

引用:徐娟,王伟,王俊龙,等. 加载引向器的 SSPPs 超宽带 Vivaldi 天线设计[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2026,39(3): 382-390.

Citation: XU Juan, WANG Wei, WANG Junlong, WANG Jianchao. Design of ultra-wideband Vivaldi antennas for SSPPs loaded with directors[J]. Journal of Liaocheng University (National Science Edition), 2026, 39(3): 382-390.

文章编号 1672-6634(2026)03-0382-09

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025040011

加载引向器的 SSPPs 超宽带 Vivaldi 天线设计

徐娟,王伟,王俊龙,王建超

(曲阜师范大学 网络空间安全学院,山东 曲阜 273165)

摘要 提出一种加载引向器的人工表面等离激元(Spoof Surface Plasmon Polaritons, SSPPs)超宽带 Vivaldi 天线。针对传统 Vivaldi 天线增益较低的问题,通过集成 SSPPs 波导和加载引向器结构实现性能突破。首先,在传统 Vivaldi 天线中引入周期性凹槽的 SSPPs 波导结构,通过优化其椭圆渐变匹配设计,激发表面 SSPPs 模式,显著提升天线增益,同时保持超宽带特性。进一步在 SSPPs 超宽带 Vivaldi 天线基础上加载“凹”形引向器阵列,通过优化单元尺寸与周期性排布,有效调控表面电流分布并抑制表面波,使峰值增益提升至 12.28 dBi,辐射效率最高达 98%,工作带宽为 14.63~36.54 GHz。结构上采用低损耗 Rogers RT5880 介质基板,实现了低剖面、高阻抗匹配及稳定的端射辐射特性。仿真结果表明,该设计在毫米波段兼具超宽带、高增益与高效率优势,为未来毫米波通信系统的高性能天线设计提供了新思路。

关键词 人工表面等离激元;Vivaldi 天线;引向器;超宽带

中图分类号 TN92

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Design of ultra-wideband Vivaldi antennas for SSPPs loaded with directors

XU Juan, WANG Wei, WANG Junlong, WANG Jianchao

(School of Cyber Science and Engineering, Qufu Normal University, Qu Fu, 273165, China)

Abstract A spoof surface plasmon polaritons(SSPPs) based ultra-wideband Vivaldi antenna integrated with a director was proposed in this paper. To address the low gain limitation of conventional Vivaldi antennas, a performance breakthrough was achieved through the synergistic integration of SSPPs waveguides and director loading structures. Initially, an SSPPs waveguide structure featuring periodic grooves was incorporated into the traditional Vivaldi antenna. By optimizing the elliptical gradient matching design, the surface SSPPs mode was effectively excited, yielding significant gain enhancement while preserving ultra-wideband characteristics. Furthermore, a concave-shaped directional array was implemented on the SSPPs-enhanced ultra-wideband Vivaldi antenna. Through meticulous optimization of unit dimensions and periodic arrangement, surface current distribution was precisely controlled and surface wave suppression was achieved, resulting in a peak gain of 12.28 dBi, radiation efficiency up to 98%, and

收稿日期:2025-04-15

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2023MF038 资助)

通信作者:徐娟,女,汉族,博士,副教授,研究方向:电磁场与微波技术,E-mail:xujuan125@163.com。

an operational bandwidth spanning 14.63~36.54 GHz. The proposed configuration employs a low-loss Rogers RT5880 dielectric substrate, realizing low-profile geometry, high impedance matching, and stable end-fire radiation characteristics. Simulation results demonstrate that this design simultaneously achieves ultra-wideband operation, high gain, and superior efficiency in millimeter-wave frequencies, providing a novel paradigm for high-performance antenna development in next-generation millimeter-wave.

Keywords spoof surface plasmon polaritons; vivaldi antenna; director; ultra-wideband

0 引言

随着第五代(5G)及未来第六代(6G)移动通信系统向毫米波频段的快速演进,超宽带天线技术因其大带宽、高容量和低延迟特性^[1-2],成为支撑高速率通信的核心组件。然而,毫米波频段的高路径损耗与复杂多径效应,对天线系统的辐射效率、方向性和宽角扫描能力提出了严苛挑战。研究表明,低剖面、高增益且兼具宽频带特性的辐射单元设计是突破毫米波通信系统容量瓶颈的关键路径。传统端射天线(如喇叭天线、贴片天线)虽在低频段表现稳定,但在毫米波频段面临辐射效率下降、波束畸变及剖面过高等问题^[3-4]。在此背景下,Vivaldi 天线凭借其一体化指数渐变结构脱颖而出,可在超宽带范围内实现稳定的端射辐射,且具备 E 面与 H 面波束对称特性^[5-6]。尽管如此,其增益性能受限于高频段电磁场能量扩散导致的边缘衍射效应,难以满足毫米波系统对高增益的需求。现有改进方案(如加载介质透镜)虽能部分提升增益,却以牺牲带宽或增加剖面高度为代价^[7],凸显了传统设计方法的内在局限性。

近年来,SSPPs 作为一种新型电磁表面波调控技术,为天线性能优化提供了颠覆性思路。其通过亚波长周期性结构激发局域表面等离子体共振,在毫米波频段实现强场束缚效应,有效抑制能量泄漏并降低辐射损耗。理论分析与实验研究表明,SSPPs 的慢波特性能延长电磁波传播路径,使辐射单元间的近场耦合效率有效提升,同时通过表面波与空间波的相位匹配优化阻抗带宽。此外,SSPPs 的低剖面特性与柔性基板兼容性,为天线小型化与共形设计奠定了物理基础^[8-10]。值得关注的是,SSPPs 与 Vivaldi 天线的结构兼容性为两者协同设计提供了可能,SSPPs 的亚波长凹槽结构可嵌入 Vivaldi 天线的渐变槽线边缘,在不改变整体剖面高度的前提下,通过表面波调控抑制边缘衍射^[11-13]。进一步地,SSPPs 的强场束缚效应可将电磁能量集中于辐射缝隙近场区域,结合引向器对辐射波前的定向调控^[14],可通过优化引向器单元间距与尺寸参数,压缩主波束能量分布,引向器的波前校正作用使辐射能量更集中于指定方向,多级引向器的级联结构形成电磁波导引通道,抑制旁瓣辐射造成的能量损耗。通过 SSPPs 慢波结构与 Vivaldi 渐变槽线的阻抗渐变特性协同设计,还可实现多频段阻抗匹配,为超宽带高增益天线设计开辟了新维度。

在上述研究基础上,本文进一步提出了一种加载引向器的 SSPPs 超宽带 Vivaldi 天线。通过引入 SSPPs 波导结构,利用其强场束缚性,结合引向器的增益增强特性,设计了一款具有显著性能提升的 Vivaldi 天线。该天线不仅具备超宽带特性,还实现了高增益和高辐射效率,有望为毫米波通信系统提供一种高性能的天线解决方案。

1 SSPPs 超宽带 Vivaldi 天线设计

1.1 SSPPs 理论

SSPPs 是一种通过周期性亚波长结构(如凹槽或孔阵)激发的表面电磁波模式,其核心特性为强场束缚与低损耗传播。SSPPs 的传播特性可通过色散关系近似描述

$$k_{sp} \propto k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}} \cdot \left(1 + \frac{\lambda}{4h}\right), \quad (1)$$

式中 k_{sp} 为 SSPPs 的传播常数, h 为凹槽深度, ϵ_d 和 ϵ_m 分别为介质基板与金属的介电常数。在毫米波频段,金属的等效负介电常数($|\epsilon_m| \gg 1$)使得电场能量高度局域于结构表面附近,衰减长度显著小于自由空间波长,从而抑制边缘绕射损耗,提升辐射效率。

SSPPs 的辐射机制源于表面波与空间波的耦合。通过设计渐变终端结构(如椭圆形开口),束缚的电磁

能量逐步转换为空间辐射波,其慢波效应($v_p \ll c$)延长电磁波与辐射单元的相互作用时间,增强能量耦合效率。此外,引向器与 SSPPs 的协同作用进一步优化辐射性能:引向器对辐射波前的定向调控,使辐射能量更集中于指定方向,而 SSPPs 的场束缚特性抑制能量泄漏,实现高效率辐射。SSPPs 的引入有效解决了传统 Vivaldi 天线增益不足的瓶颈问题,为毫米波超宽带天线的高性能设计提供了理论依据与实现路径。

1.2 SSPPs 超宽带 Vivaldi 天线设计

采用上述辐射原理,设计了一款传统 Vivaldi 天线。该天线采用阶梯状递进的形式对馈电结构进行了设计,该设计通过逐步改变微带线的宽度或其他几何参数,实现从馈电端到谐振腔的渐变阻抗匹配。这种结构避免了阻抗突变,减少了反射波,使得能量能够更高效地传输到天线的辐射部分,从而提高了辐射性能。该天线的介质基板的选材为 Rogers RT5880,其相对介电常数 ϵ_r 为 2.2,损耗正切角 $\tan\delta$ 为 0.0009,基板厚度为 0.508 mm,天线整体尺寸为 $27\text{ mm} \times 13.5\text{ mm} \times 0.508\text{ mm}$,如图 1 所示。天线具体参数值如表 1 所示。

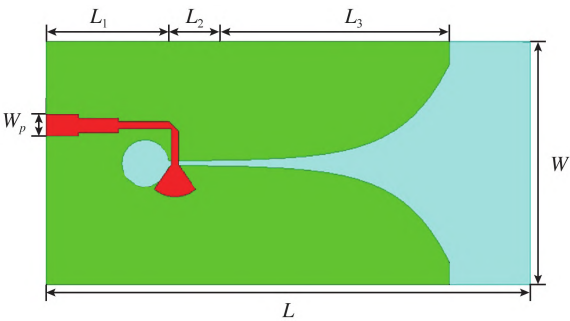


图 1 初始 Vivaldi 结构图
Fig. 1 Initial Vivaldi structure diagram

表 1 天线的详细尺寸

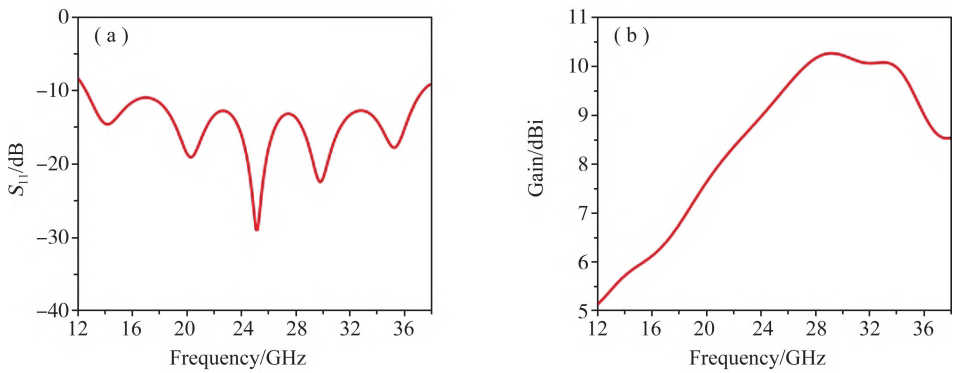
Tab. 1 Detailed dimensions of the antenna

Parameter	Length/mm	Parameter	Length/mm	Parameter	Length/mm
L	27	W_p	1.2	L_{p4}	1.97
L_1	6.8	W_a	1.2	R_1	1.8
L_2	2	L_{p1}	1.8	R_2	1.3
L_3	13.6	L_{p2}	2.2		
W	13.5	L_{p3}	2.85		

在本结构中,Vivaldi 天线的槽线最宽处开口宽度 W 为 13.5 mm。为了验证该结构是否满足槽线最宽处开口大于低频截止波长的二分之一这一条件,需要计算低频截止波长。根据天线的工作频率范围,低频截止频率为 12.57 GHz。低频截止波长 λ_{low} 可通过公式计算

$$\lambda_{\text{low}} = \frac{c}{f_{\text{low}}}, \tag{2}$$

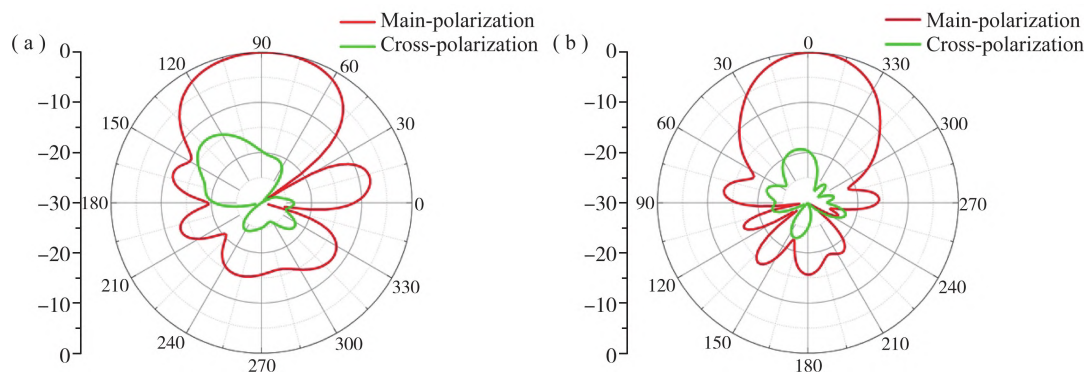
式中 c 是光速, f_{low} 是低频截止频率,代入数值计算得 $\lambda_{\text{low}} \approx 23.86\text{ mm}$,其二分之一约为 11.93 mm。由于槽线最宽处开口宽度 $W = 13.5\text{ mm}$,因此本结构的 Vivaldi 天线结构满足槽线最宽处开口大于低频截止波长得二分之一这一条件。



注:(a) Vivaldi 天线的 S_{11} ;(b) Vivaldi 天线的增益。

图 2 天线仿真结果图
Fig. 2 Antenna simulation results

通过使用电磁仿真软件对天线建模与仿真,获得了天线性能参数。通常将相对带宽大于 25% 的天线称为超宽带天线,由图 2(a)可知,天线的相对带宽达到 99.36%(12.57~37.39 GHz),因此所设计的该天线是一款超宽带天线。天线的峰值增益为 10.27 dBi,且增益在 5.3~10.27 dBi 的范围内波动,图 2(b)所示。图 3 为天线在 25 GHz 的远场辐射图,表明该天线可实现将辐射能量集中到端射方向。

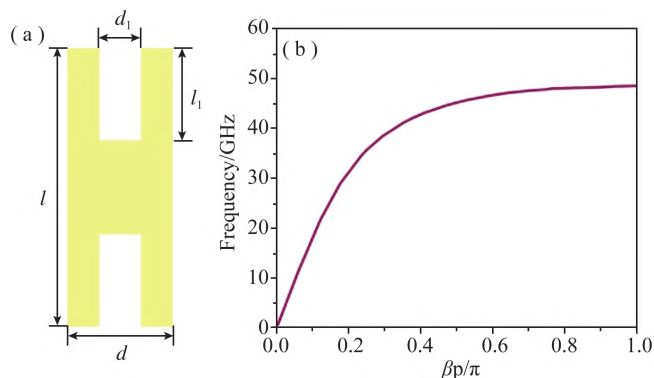


注:(a) 25 GHz 时 E 面辐射方向图;(b) 25 GHz 时 H 面辐射方向图。

图 3 天线归一化辐射方向图

Fig. 3 Antenna normalized radiation pattern

SSPPs 波导是将相同的金属凹槽单元按照周期性排列方式组合而成。单元结构如图 4(a)所示,其中 $d=0.6$ mm, $l=3$ mm, $d_1=0.2$ mm, $l_1=1.1$ mm。图 4(b)为该单元结构的色散曲线图,截止频率显示为 48.5 GHz,而最终天线的最大工作频率不超过 38 GHz,因此远低于截止频率,这表明在该天线在其工作带宽内可以实现 SSPPs 波导的激发。



注:(a) SSPPs 单元结构图;(b) SSPPs 单元结构色散。

图 4 SSPPs 单元

Fig. 4 SSPPs unit

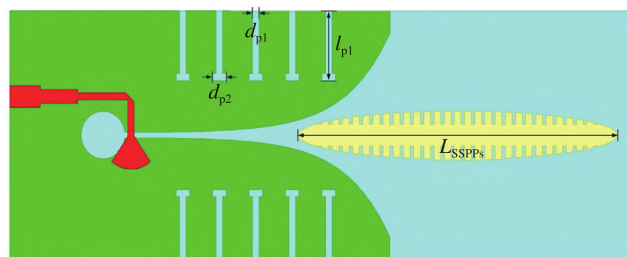
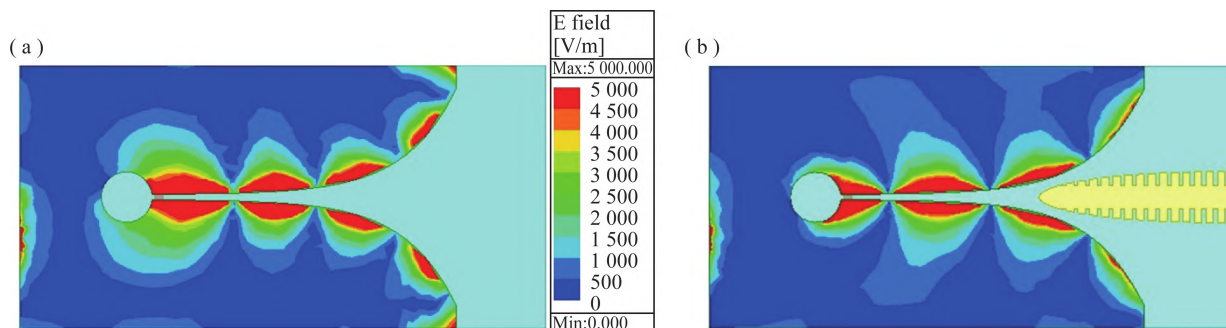


图 5 基于 SSPPs 的超宽带 Vivaldi 天线结构图

Fig. 5 Structural diagram of ultra-wideband

Vivaldi antenna based on SSPPs



注:(a) 未加载 SSPPs 波导的电场分布图;(b) 加载 SSPPs 波导后的电场分布图。

图 6 天线在 25 GHz 时辐射电场分布图

Fig. 6 Radiation electric field distribution map of the antenna at 25 GHz

为实现天线辐射性能的提升,基于上述理论对传统 Vivaldi 天线进行改进,在其原有结构上增加了 SSPPs 波导结构和 T 形槽,如图 5 所示。天线整体结构设计在尺寸为 $37.9 \text{ mm} \times 13.5 \text{ mm} \times 0.508 \text{ mm}$ 的 Rogers RT5880 基板上,其中 $L_{\text{SSPPs}} = 18.8 \text{ mm}$, $d_{\text{pl}} = 0.3 \text{ mm}$, $l_{\text{pl}} = 3.8 \text{ mm}$, $l_{\text{p2}} = 0.8 \text{ mm}$ 。

如图 6 所示,在无 SSPPs 波导的传统 Vivaldi 天线中,电场能量因边缘衍射效应在金属表面以表面波形式传播,导致能量泄漏和增益受限。而加入 SSPPs 波导后,其亚波长周期性结构激发局域表面等离子体共振,将电场能量高度束缚在波导表面,形成局域化电场分布,有效抑制了表面波传播,减少了能量泄漏。同时,SSPPs 的慢波特性延长了电磁波与辐射单元的相互作用时间,优化了辐射方向,使能量更集中于端射方向,从而显著提升了天线的峰值增益,天线峰值增益由 10.27 dBi 提升至 11.6 dBi ,如图 7 所示。在设计 Vivaldi 结构中,无 T 型槽时,电流分布相对分散,局部电流密度较低,电流走向的协同性较差,电流难以形成高效的谐振分布,如图 8(a) 所示。因此,在两个辐射臂表面各自刻蚀一列 T 形槽,使电流分布更集中且具有明确的规律性,在特定区域电流方向的一致性更强,如图 8(b) 所示,显示出 T 型槽对电流路径的引导作用,使其更符合谐振模式,提升天线的性能。

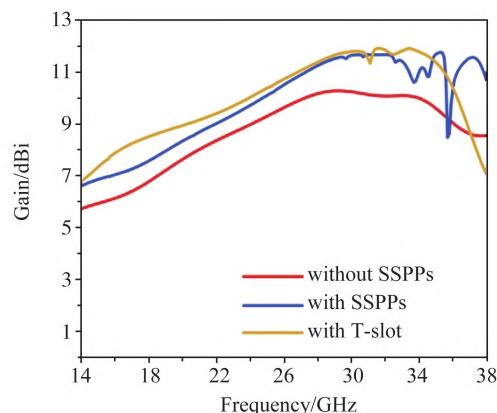
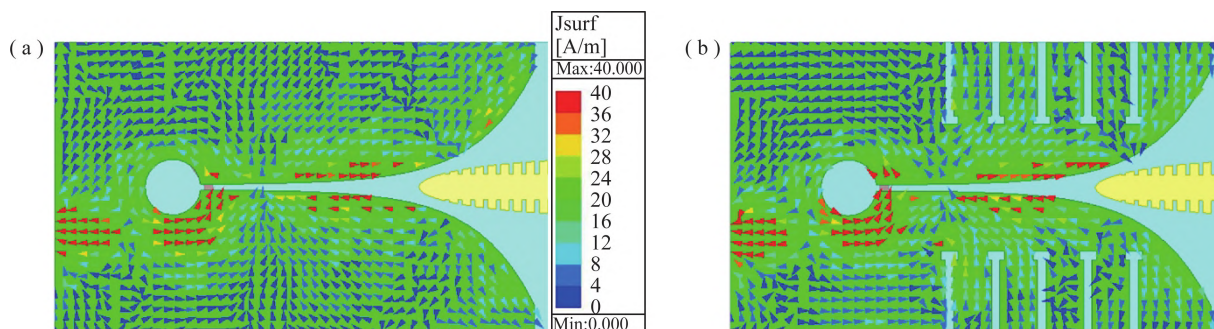


图 7 改进前后天线增益对比曲线图

Fig. 7 Comparison of antenna gain curves before and after improvement



注:(a) 无 T 型槽时的电流分布图;(b) 有 T 型槽时的电流分布图。

图 8 天线在 15.4 GHz 时电流分布图

Fig. 8 Current distribution diagram of the antenna at 15.4 GHz

通过使用电磁仿真软件对天线建模与仿真,获得了天线性能参数。由图 9 可知,天线反射系数在 $14 \sim 35.7 \text{ GHz}$ 内小于 -10 dB ,且天线的相对带宽为 87.4% 。由于增加 SSPPs 波导结构后天线的长度造成同样的增加,因而造成了天线的相对带宽有所减小,但仍远远大于常规的超宽带天线。

2 加载引向器的 SSPPs 超宽带 Vivaldi 天线设计

为了将 SSPPs 超宽带 Vivaldi 天线的辐射性能进一步提升,通过加载引向器阵列结构对整个天线进行改进。单元结构是阵列结构的基础,因此针对图 10 提出的“凹”形的引向器单元结构进行设计研究。单元介质基板选用 Rogers

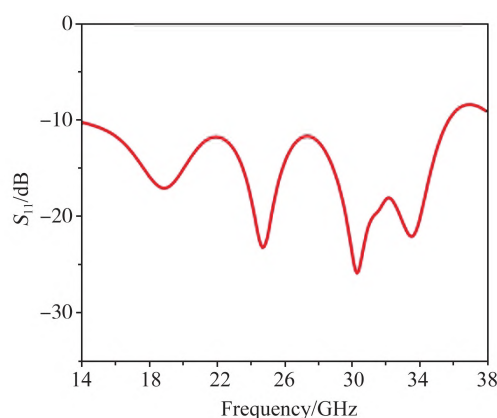


图 9 基于 SSPPs 的超宽带 Vivaldi 天线 S_{11} 曲线图

Fig. 9 S_{11} curve of ultra-wideband Vivaldi antenna based on SSPPs

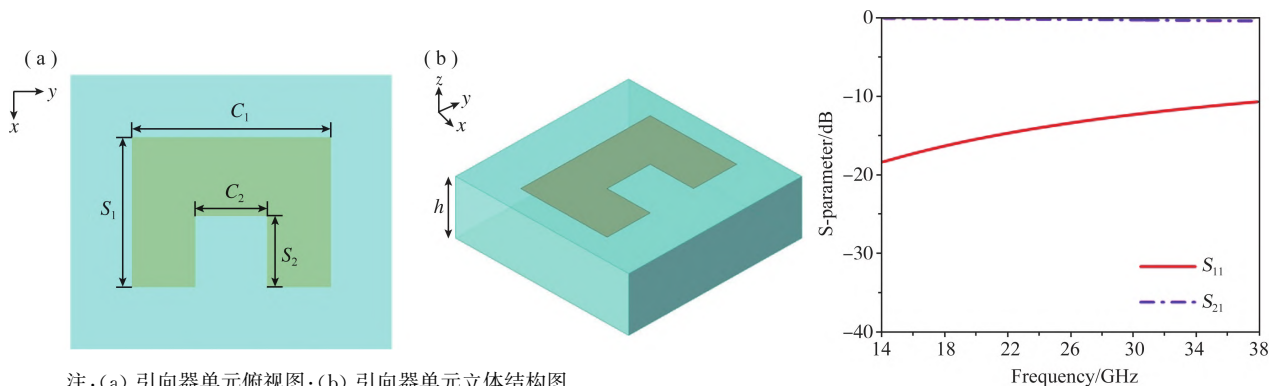
RT5880,确保与天线主体结构阻抗匹配。对引向器单元的 S 参数进行了模拟,如图 11 所示。引向器单元的尺寸参数如表 2 所示。

表 2 引向器单元的详细尺寸

Tab. 2 Detailed dimensions of the director unit

Parameter	Length/mm	Parameter	Length/mm	Parameter	Length/mm
C_1	0.9	S_1	0.6	h	0.508
C_2	0.3	S_2	0.3		

以改进的 Vivaldi 天线为基础,设计了一款带有引向器阵列结构的端射天线,其结构如图 12 所示。该天线在原改进结构的基础上,将介质基板向前延伸并在延伸部分添加 6×9 引向器阵列。通过添加引向器阵列,可进一步提升端射天线的辐射性能。天线具体参数值如表 3 所示。



注:(a) 引向器单元俯视图;(b) 引向器单元立体结构图。

图 10 引向器单元

Fig. 10 director element

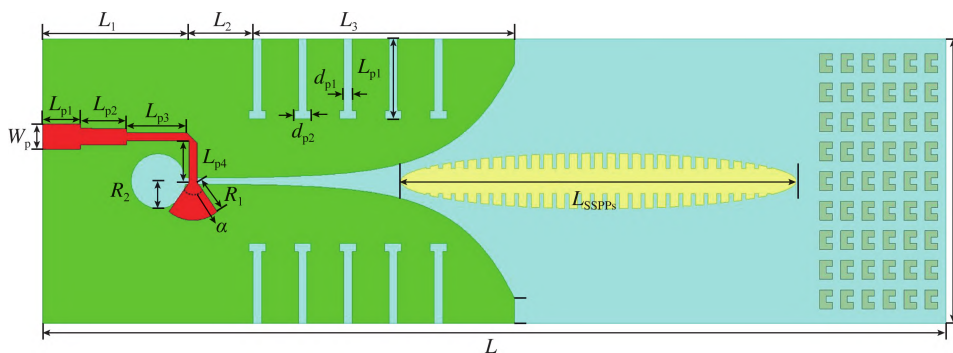
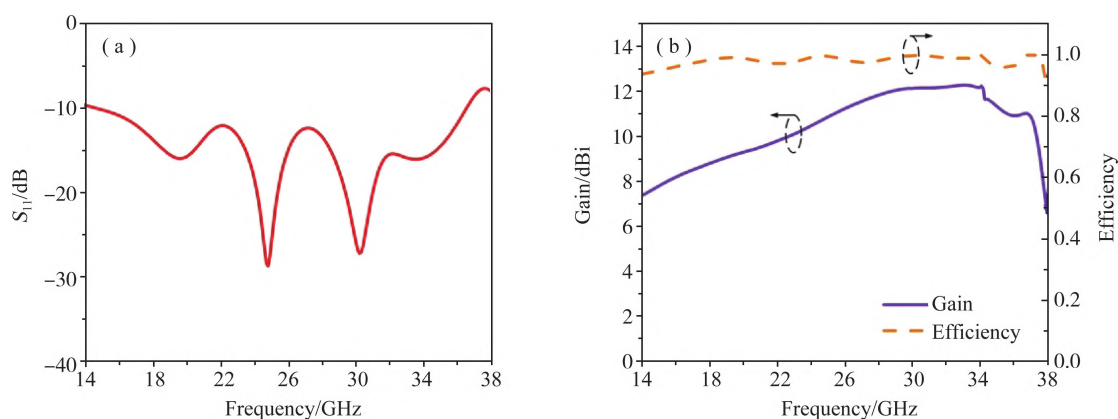
图 11 引向器单元 S 参数Fig. 11 director element S parameters

图 12 加载引向器的 SSPPs 超宽带 Vivaldi 天线结构

Fig. 12 Ultra-wideband metasurface Vivaldi antenna structure based on SSPPs

在本结构中,槽线最宽处开口宽度 W 保持为 13.5 mm。上一节已经计算出低频截止波长的二分之一为 11.93 mm。因此,最终结构的槽线最宽处开口宽度仍然大于低频截止波长的二分之一,满足 Vivaldi 天线的设计要求。

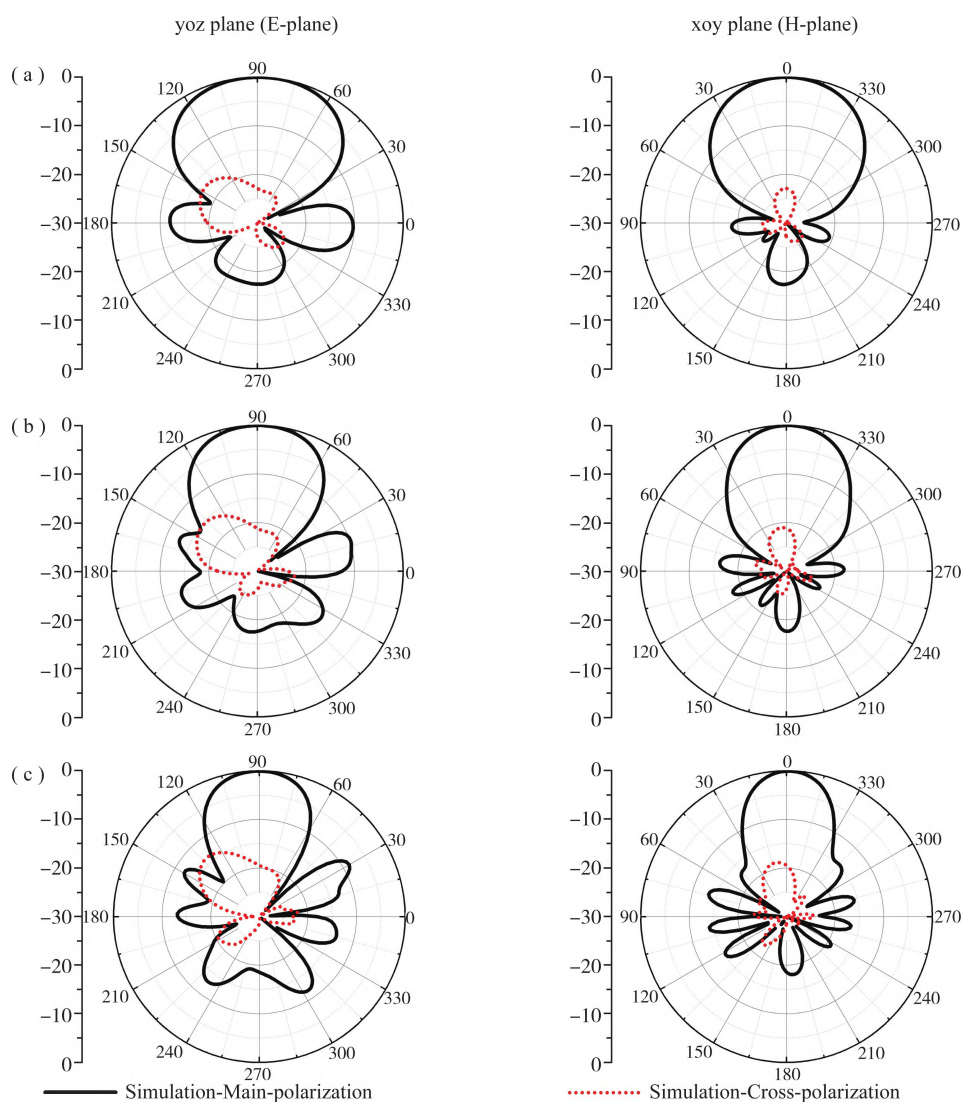
通过使用仿真软件对该天线进行分析,得到的仿真结果显示在 14.63~36.54 GHz 的工作带宽上天线的 S_{11} 均在 -10 dB 以下,如图 13(a)所示。该数据结果既表明了此工作频段内该天线结构既实现了良好的阻抗匹配,又保持了超宽带特性。加载引向器的 SSPPs 超宽带 Vivaldi 天线的增益和辐射效率如图 13(b)所示。由该天线的增益仿真曲线可知,在工作频段内具有良好的预期增益效果,平均增益在 10 dBi 以上,且峰值增益为 12.28 dBi,相较于未添加引向器阵列的天线增益增加了 0.68 dB。同时该天线在工作频段内的最高辐射效率达到 98%,若考虑在实际测试情况下会受到多种外部因素的干扰,其实际辐射效率则低于理想环境下的仿真结果。



注: (a) 天线的 S_{11} ; (b) 天线的增益及辐射效率。

图 13 天线参数仿真图

Fig. 13 Antenna parameter simulation diagram



注: (a) 20 GHz; (b) 30 GHz; (c) 30 GHz。

图 14 加载引向器的 SSPPs 超宽带 Vivaldi 天线在 yoz 平面(E 面)和 xoy 平面(H 面)上模拟的具有主极化和交叉极化的归一化辐射方向图

Fig. 14 Normalized radiation pattern with main and cross polarization simulated by an ultra-wideband Vivaldi antenna loaded with a director in the yoz plane (E-plane) and xoy plane (H-plane)

表3 天线的详细尺寸

Tab. 3 Detailed dimensions of the antenna

Parameter	Length/mm	Parameter	Length/mm	Parameter	Length/mm
W	13.5	W_p	1.2	R_1	1.8
L	37.9	W_a	1.2	R_2	1.3
L_{SSPPs}	18.8	L_{p1}	1.8	d_{p1}	0.3
L_1	6.8	L_{p2}	2.2	d_{p2}	0.8
L_2	2	L_{p3}	2.85	l_{p1}	3.8
L_3	13.6	L_{p4}	1.97		

图14给出天线在20、25和30 GHz时E面和H面辐射方向仿真图。可以看出,天线具有良好的辐射特性,且辐射方向指向端射方向。

最后,对比本节提出的 SSPPs 端射天线与其他 SSPPs 端射天线可知,所提出的 SSPPs 端射天线的增益优势较为明显,并且保留了超宽带的特点,如表4所示。

表4 本文的 SSPPs 端射天线与其他文献 SSPPs 端射天线的比较

Tab. 4 Comparison of SSPPs end-firing antennas in this paper with SSPPs end-firing antennas in other literatures

Reference	Size/ λ_0^3	Center frequency/GHz	Impedance bandwidth/%	Peak gain/dBi
本文	$3.57 \times 1.12 \times 0.04$	25	85.6	12.28
[15]	$20.75 \times 4.64 \times 0.04$	23.5	89	11.27
[16]	$1.2 \times 1.2 \times 0.01$	6.0	34.1	9.16
[17]	$4.16 \times 2 \times 0.017$	10	100	9.13
[18]	$16.1 \times 16.1 \times 0.1$	60.5	27.1	12.0

3 结论

提出了一款加载引向器的 SSPPs 超宽带 Vivaldi 天线。首先设计了一款传统的 Vivaldi 天线,其工作带宽为 12.57~37.39 GHz,增益在工作带宽内的变化范围为 5.3~10.27 dBi。然后将 SSPPs 波导结构与传统的 Vivaldi 天线进行结合设计出了 SSPPs 的超宽带 Vivaldi 天线,其峰值增益达到 11.6 dBi。利用加载引向器结构设计出加载引向器的 SSPPs 超宽带 Vivaldi 天线,其峰值增益提升至 12.28 dBi。结果表明,可以将引向器和端射天线集成在一起,不仅保持原有的低剖面、低成本的特性,还可以实现端射性能的提升。

参 考 文 献

- [1] LI A, LUK K M. Ultra-wideband endfire long-slot-excited phased array for millimeter-wave applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(6): 3284-3293.
- [2] NOVAK M H, MIRANDA F A, VOLAKIS J L. Ultra-wideband phased array for millimeter-wave ISM and 5G bands, realized in PCB [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(12): 6930-6938.
- [3] WANG J X, WU F, JIANG Z H, et al. A millimeter-wave substrate integrated waveguide H-plane horn antenna with enhanced gain and efficiency[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(4): 769-773.
- [4] HAO Q H, ZHENG S Y, LU K. An SIW horn antenna with flat-top beam for millimeter-wave applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(2): 608-612.
- [5] LIU H, LIU Y, ZHANG W B, et al. An ultra-wideband horizontally polarized omnidirectional circular conformal connected Vivaldi antenna array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(8): 4351-4356.
- [6] SUN X Y, WU B, ZHANG H H, et al. Ultrawideband circularly polarized halved-type Vivaldi antenna with symmetrical radiation pattern[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(2): 633-637.
- [7] CICCHETTI R, CICCHETTI V, FARAONE A, et al. A compact high-gain wideband lens Vivaldi antenna for wireless communications

- and through-the-wall imaging[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(6): 3177-3192.
- [8] FU Q F, LIU L L, LUO G Q. A flexible millimeter-wave endfire antenna based on spoof surface plasmon polaritons[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(1): 29-33.
- [9] XIAO M R, RASHID A K, LIU B Y, et al. Design of high-gain single-layer endfire antenna using phase-reversed asymmetric spoof surface plasmon polaritons[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(3): 641-644.
- [10] PAN Y S, DONG Y D. Dual-polarized printed endfire antenna based on spoof surface plasmon polariton[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(5): 1129-1133.
- [11] LIAO Z, CHE Y Z, LUO G Q, et al. Enhanced radiation characteristics for Vivaldi antenna using spoof surface plasmon polaritons[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(9): 2730-2736.
- [12] WANG H Z, ZHOU Y G, YANG H M, et al. High gain ultra-wideband Vivaldi antenna using spoofing surface plasmons polaritons [C]//Proceedings of International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium IEEE, 2022:1-3.
- [13] QI H H, LIU H W. Wideband high-gain filtering Vivaldi antenna design based on MS and herringbone SSPP structure[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(8): 1798-1802.
- [14] ZHOU W L, LIU J H, LONG Y L. A broadband and high gain planar complementary yagi array antenna with circular polarization[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(3): 1446-1451.
- [15] ZU H R, WU B, ZHAO Y T, et al. Dual-band antenna with large beam steering angle incorporating endfire and frequency scanning modes using double-layer SSPPs structure[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(1): 46-55.
- [16] YANG L, XU F, JIANG T, et al. A wideband high-gain endfire antenna based on spoof surface plasmon polaritons[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(12): 2522-2525.
- [17] AN G T, ZHU C H, ZHANG Y, et al. A wideband endfire antenna incorporating modified antipodal Vivaldi resonator and spoof surface plasmon polaritons[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(6): 1874-1878.
- [18] PHAM D A, LEE M, SARKAR A, et al. High-gain elevational-scanning multibeam planar SSPP antenna array with large ground-clearance for millimeter-wave UAM applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(4): 5139-5149.

(责任编辑:赵海军)

(上接第 381 页)

- [22] WANG R X, LI L, LIU J L, et al. Triple-band tunable perfect terahertz metamaterial absorber with liquid crystal[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 32280-32289.
- [23] 王若星, 薛喻宸, 龚瑞, 等. 基于环形电磁超材料的可调谐太赫兹吸收器[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2019, 32(6): 14-20.
- [24] YAO H Y, YANG M S, YAN X, et al. Patterned graphene and terahertz metasurface-enabled multidimensional ultra-sensitive flexible biosensors and bio-assisted optical modulation amplification[J]. Results in Physics, 2022, 40: 105884.
- [25] CHO C R, CHO S I, VADIM S, et al. Current-induced metal-insulator transition in VOx thin film prepared by rapid-thermal-annealing [J]. Thin Solid Films, 2006, 495(1/2): 375-379.
- [26] 王昌雷, 武帅, 栗岩峰, 等. 二氧化钒薄膜光致绝缘体-金属相变的太赫兹时域光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(11): 3046-3049.
- [27] SONG Z Y, WEI M L, WANG Z S, et al. Terahertz absorber with reconfigurable bandwidth based on isotropic vanadium dioxide metasurfaces[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(2): 1-7.

(责任编辑:赵海军)