

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.02.004

一种 3D 拱形高增益超宽带 Vivaldi 天线

王丽黎, 刘 庆

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 以提高 Vivaldi 天线的增益为目的, 利用 CST 仿真软件设计了一种工作在 3.7~14 GHz 的 3D 超宽带、高增益的 Vivaldi 天线。该天线在传统 Vivaldi 天线的基础上引入开槽设计, 并由两个相邻的 Vivaldi 天线组成, 旋转角度为 180°, 具有三维弯曲结构的特点。馈电结构采用微带线-槽线馈电, 以更好地完成阻抗匹配。在工作频带内增益达到 10 dBi, 平均效率为 95.2%, 可以工作在 C 波段、X 波段和部分 Ku 波段, 适用于微波成像及双边方向的基站。

关键词: Vivaldi 天线; 高增益; 超宽带; 三维结构

中图分类号: TN823+.24

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2022)02-0171-05

A high gain UWB Vivaldi antenna with 3D arch

WANG Lili, LIU Qing

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to improve the gain of Vivaldi antenna, a 3D ultra-wideband, high-gain Vivaldi antenna that works at 3.7~14 GHz is designed using the CST simulation software. The antenna introduces a slotted design on the basis of the traditional Vivaldi antenna and is composed of two adjacent Vivaldi antennas, with a rotation angle of 180°, and it has the characteristics of a three-dimensional curved structure. The feed structure adopts microstrip line-slot line fed to better complete impedance matching. The gain reaches 10 dBi in the working frequency band and the average efficiency is 95.2%. It is suitable for microwave imaging and bilateral base stations.

Key words: Vivaldi antenna; high gain; ultra-wideband; three-dimensional structure

近年来无线通信技术飞速发展,使天线在社会生活中的应用越来越广泛,各领域的种种需求也要求天线拥有更大的带宽和更高的速率。于是,在现有的窄带天线和单频带天线的基础上,提出了超宽带天线^[1-2]的设计理念,为天线的发展提出了新的研究热点。超宽带天线具有频带覆盖广、制造成本低、抗干扰能力强^[3]、传输效率高、体积小等特点和优点。在现如今无线通信迅速发展的环境下,应用于超宽带领域的天线,不仅需要拥有较高的增益,而且需要满足低成本、小尺寸、低损耗等特点。而 Vivaldi 天线作为一种高性能、小型化的超宽带天线,具有较宽的带宽和良好的辐射性能^[4],且符合现代通信设备追求的小型化、轻量化等特点。因此, Vivaldi 天线在超宽带领域具有广泛的研究价值,也是本

文研究的重点内容。

Vivaldi 天线因其结构简单、工作频带宽、效率高、增益高而成为相控阵雷达、超宽带成像等宽带应用领域的首选^[5]。1979 年, Gibson 最早提出了使用指数渐变曲线的锥削槽天线,被称为传统 Vivaldi 天线,属于渐变式、非周期、端射行波天线,通过指数渐变缝隙结构使电磁波从较窄的缝隙端向较宽的开口端辐射。为了提高天线的性能,通常采用在传统结构的基础上加载超材料^[6]、引入缝隙结构^[7]、加载介电透镜^[8]等方式。文献[7]通过引入开槽设计和三角形引向器使 2~4 GHz 的增益最高达到 6.7 dBi。文献[9]提出了混合式 Vivaldi 喇叭天线,通过在 Vivaldi 天线的外部围绕喇叭天线以提高高频段增益。文献[10]提出了一种在接地层加载圆弧形反

收稿日期: 2021-06-04; 网络出版日期: 2022-03-22

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20220321.1916.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61771389)

第一作者: 王丽黎,女,硕士,副教授,硕导,研究方向为微波与天线系统、先进导航技术。E-mail: wanglili@xaut.edu.cn

通信作者: 刘庆,女,硕士生,研究方向为超宽带高增益 Vivaldi 天线。E-mail: 18706751571@163.com

射器的对极型 Vivaldi 天线,最终得到的天线最高增益为 5.6 dBi。上述文献在一定范围内提高了天线的增益,但是随着超宽带技术的发展,要求天线具有更高的增益和更优异的性能,因此迫切需要进一步的优化。

通过以上研究,本文提出了一种 3D 拱形 Vivaldi 天线,在 3.7~14 GHz 的宽频带中表现出了良好的辐射特性,峰值增益达到了 10 dBi,平均效率也达到了 95.2%。与文献[7]和[10]相比,它具有更宽的相对带宽和更高的增益,在通信系统和集成电路中具有重要的价值,尤其是在微波成像系统有更广泛的应用^[11]。

1 天线设计

1.1 Vivaldi 天线的基本结构

Vivaldi 天线是一种具有弧线形槽线轮廓的缝隙结构天线,传统的 Vivaldi 天线结构示意图见图 1,图 1 中黄色部分为金属层,蓝色部分为介质基板。

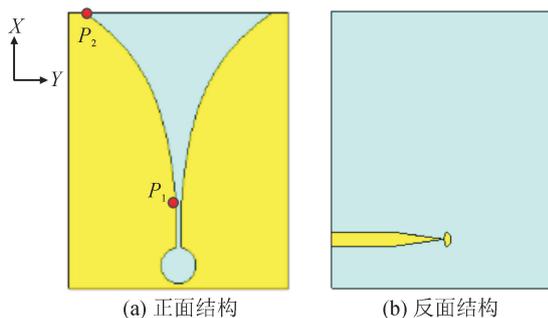


图 1 Vivaldi 天线的结构
Fig.1 Vivaldi antenna structure

该天线是将金属层覆盖在介质板的两面,其中正面作为金属接地板,见图 1(a),在金属接地板上蚀刻出由圆形槽线开路腔、矩形槽线和指数渐变槽线三部分依次组成的金属缝隙结构。其中,圆形槽线开路腔用于阻抗匹配,矩形槽线与微带线相互耦合,使电磁波由圆形槽线开路腔沿着矩形槽线传播至指数渐变槽线,并由指数渐变槽线逐渐辐射至自由空间。反面作为馈电部分,Vivaldi 天线的馈电方式一般分为同轴线-槽线馈电、共面波导-槽线馈电和微带线槽线馈电,一般采用易于加工的微带线-槽线馈电,见图 1(b),电磁波通过微带线耦合到天线正面的辐射贴片^[7]。

天线处于工作状态时,电磁波通过微带线耦合到正面金属层的矩形槽线之间,并沿着渐变指数槽线传输并耦合辐射至自由空间。在电磁波传输过程中,当指数槽线开口较小时,电磁波的能量被束缚在

天线的金属贴片之间,此时辐射较弱。当电流顺着指数曲线槽线传输至开口较大位置时,金属贴片对电场的束缚能力逐渐减小,使电场信号在开口处向自由空间辐射。所以,天线的指数渐变槽线的最小距离决定天线的最高工作频率,而槽线的最大开口距离限制天线的最低工作频率。

1.2 天线尺寸计算

Vivaldi 天线的长度 L 、宽度 W 和指数渐变线 y 的尺寸通过式(1)~(5)给出。

Vivaldi 天线的长度 L 应大于波长 λ 的一半:

$$L > \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

式中: λ 为最大工作波长。

天线的宽度 W 应大于波长 λ 的四分之一:

$$W > \frac{\lambda}{4} \quad (2)$$

Vivaldi 天线的槽线属于指数渐变线,这种指数型槽线使 Vivaldi 天线比普通的槽线天线拥有更宽的带宽,图 1 中 $P_1(x_1, y_1)$ 为槽线的起点, $P_2(x_2, y_2)$ 为槽线的终点,指数渐变槽线可以表示为:

$$y = C_1 e^{Kx} + C_2 \quad (3)$$

式中: K 为指数曲线的增长率; C_1 、 C_2 为常数,可用下式表示:

$$C_1 = \frac{y_1 - y_2}{e^{Kx_2} - e^{Kx_1}} \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{y_2 e^{Kx_1} - y_1 e^{Kx_2}}{e^{Kx_2} - e^{Kx_1}} \quad (5)$$

1.3 天线结构

本文设计的天线结构见图 2(a),图中蓝色部分为介质基板,黄色为金属部分。介质基板采用介电常数为 2.2、厚度为 0.78 mm 的 Taconic TLY-5 材料,金属部分是厚度为 0.017 5 mm 的铜箔。该天线主要包括弯曲部分、垂直部分和水平部分。图 2(b)和(c)分别示出了该结构的前视图和侧视图,从图 2(b)可以看出,天线的垂直及弯曲部分的内边缘为弧形辐射臂,它们由指数渐变槽线 $f(x)$ 组成,指数渐变槽线满足式(3)的要求。图 2(c)中的半圆弯曲部分是由两端的辐射臂向内弯曲为四分之一圆弧构成,因而形成拱形结构。图 2(d)和(e)分别示出了水平部分的顶视图和后视图。如图 2(e)所示,安装在水平部分的微带馈线采用渐变微带线以更好的实现阻抗匹配。

Vivaldi 天线的辐射方向是沿着指数槽线向外辐射,对于馈电部分,电流主要集中在微带线和圆形开路腔附近,对于指数渐变槽线部分,电流主要集中在指数渐变槽线边缘。

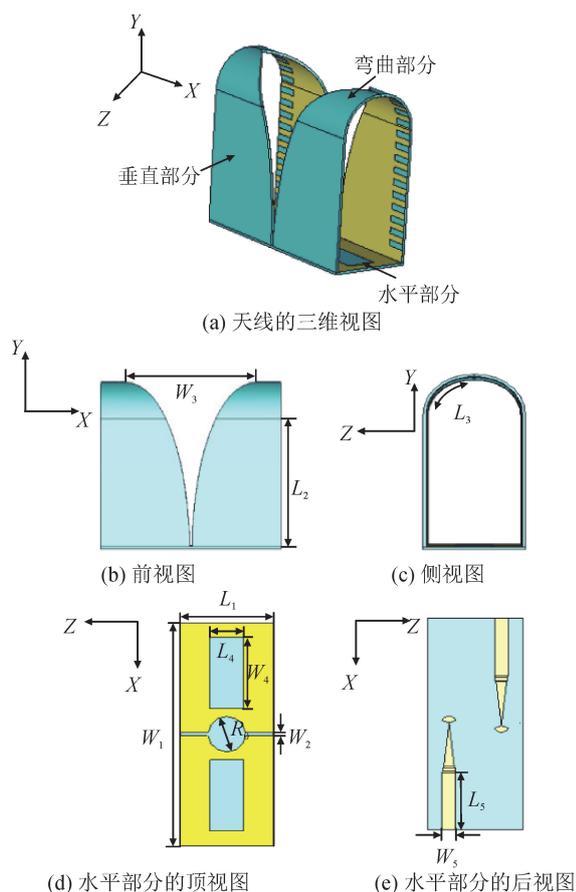


图 2 天线结构图

Fig. 2 Antenna structure diagram

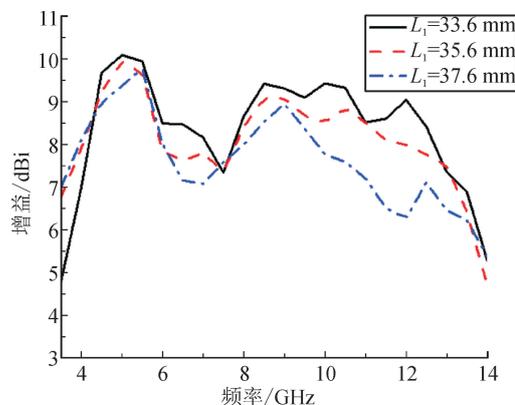
本文所设计的天线,存在左右两部分向内弯曲的辐射臂,电磁波通过左右两个微带线与圆形开路腔进行阻抗匹配,并分别向左右两端的矩形槽线耦合馈电,天线在水平部分被馈电,电磁波沿着垂直部分和向内弯曲部分的指数渐变槽线传输同时耦合辐射至自由空间。对于水平部分,电流主要集中在两个微带线及圆形开路腔附近,对于垂直及向内弯曲的辐射臂部分,电流主要集中在指数渐变槽线边缘,垂直及向内弯曲的辐射臂改变了 Vivaldi 天线原本的辐射方向,使天线从弯曲的辐射臂之间辐射出行波,进而提高了天线的增益。

1.4 参数优化

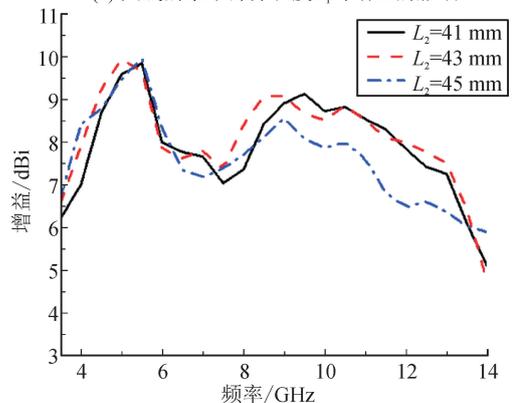
为了在上述设计中获得最佳的天线性能,分别对天线的水平部分长度 L_1 、垂直部分长度 L_2 和弯曲部分长度 L_3 进行了仿真优化。讨论这些参数的不同取值对增益的影响,在进行参数优化时,其他参数为固定值。

图 3(a)显示了当 $L_2 = 43 \text{ mm}$, $L_3 = 23.5 \text{ mm}$ 时,天线的水平部分长度 L_1 对天线增益的影响。从图 3(a)可以看出,当 $L_1 = 33.6 \text{ mm}$ 时,低频段的增

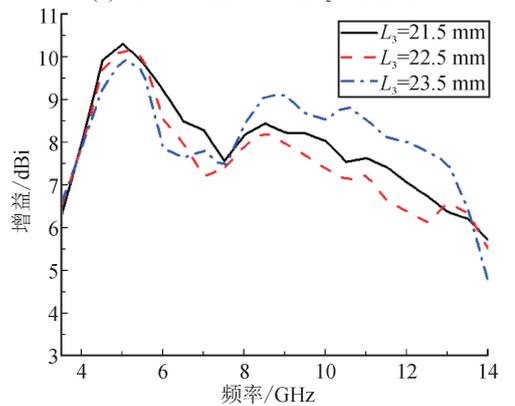
益太低;当 $L_1 = 37.6 \text{ mm}$ 时,中高频段的增益较低;当 $L_1 = 35.6 \text{ mm}$ 时,天线在整个工作频段内具有稳定的增益,因而选取天线的水平部分长度为 $L_1 = 35.6 \text{ mm}$ 。



(a) 天线的水平部分长度 L_1 对增益的影响



(b) 天线的垂直部分长度 L_2 对增益的影响



(c) 天线的弯曲部分长度 L_3 对增益的影响

图 3 部分重要参数优化图

Fig. 3 Optimization diagram of some important parameters

图 3(b)显示了当 $L_1 = 35.6 \text{ mm}$, $L_3 = 23.5 \text{ mm}$ 时,天线的垂直部分长度 L_2 对天线增益的影响。从图 3(b)可以看出,当 $L_2 = 41 \text{ mm}$ 时,低频段的增益较低;当 $L_2 = 45 \text{ mm}$ 时,中高频段的增益较低。因此,考虑到天线的尺寸及增益大小,因而选取天线的垂直部分长度为 $L_2 = 43 \text{ mm}$ 。

图 3(c)显示了当 $L_1 = 35.6 \text{ mm}$, $L_2 = 43 \text{ mm}$

时,天线的弯曲部分长度 L_3 对天线增益的影响。从图 3(c)可以看出,低频时, L_3 尺寸的改变对天线增益的影响较小;中高频段时,随着 L_3 尺寸的增大,增益也逐渐增大,因而选取天线的弯曲部分长度为 $L_3 = 23.5 \text{ mm}$ 。

根据以上的参数研究,最终得出天线优化后的关键参数值,见表 1。

表 1 设计的天线尺寸
Tab.1 Designed antenna size

参数	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	R_0
数值/mm	35.6	43.0	23.5	10	19	5.6
参数	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	
数值/mm	70	1.5	60	22.5	4.5	

2 天线的仿真结果与分析

2.1 S 参数

见图 4 所示,利用 CST 软件对天线进行仿真分析,得到天线的 S_{11} 与频率的关系图,从图中可以看出,在 3.7~14 GHz 之间,天线的 S_{11} 均在 -10 dB 以下。

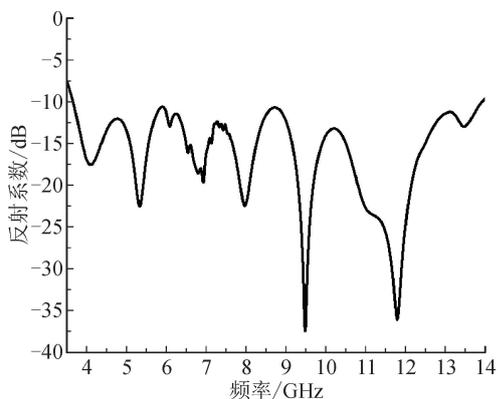


图 4 天线的 S_{11} 图

Fig.4 S_{11} diagram of the antenna

2.2 增益和辐射效率

仿真分析了天线的增益与辐射效率,见图 5,图 5 中黑色线代表增益,红色线代表辐射效率。在天线仿真设计过程中,通过调整天线的水平部分矩形槽的长度、宽度以及天线垂直部分和弯曲部分的长度,有效改善了天线的增益。从图 5 可以看出,最终所设计的天线增益的峰值可以达到 10 dBi,平均效率达到了 95.2%。为了解释图 5 中增益抖动的规律,给出了天线在 5 GHz、6 GHz、7 GHz、9 GHz 频率处的电流分布图,见图 6。从图 6 中可以看出,在 6 GHz 和 7 GHz 处谐振产生了更多 X 方向的电流,由于所设计天线的主极化方向沿 Y 方向,使得天线

辐射的电磁能量很大程度减小,所以这些频点处增益较低。相反,在 5 GHz 和 9 GHz 处谐振产生了更多 Y 方向的电流,两者相互叠加,使得这些频点处增益增大。

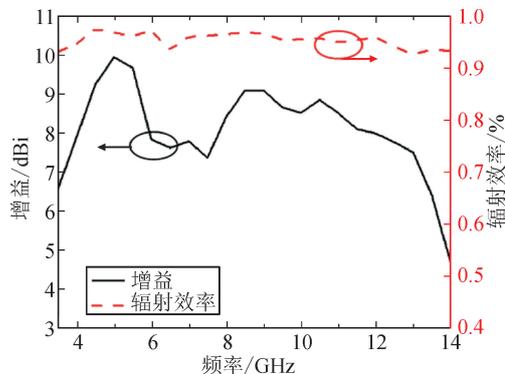


图 5 天线的增益和辐射效率图

Fig.5 Antenna gain and radiation efficiency diagram

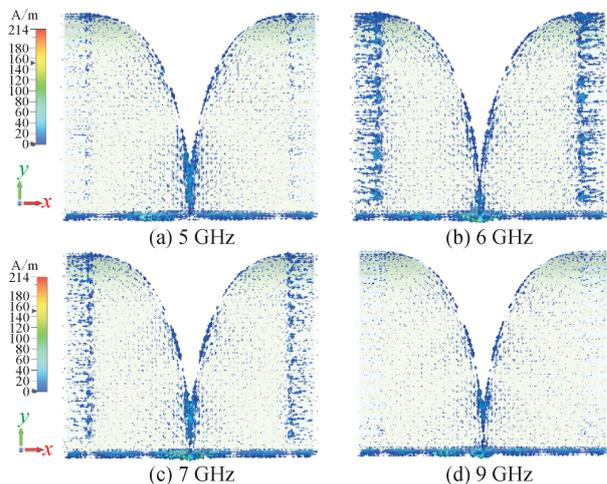
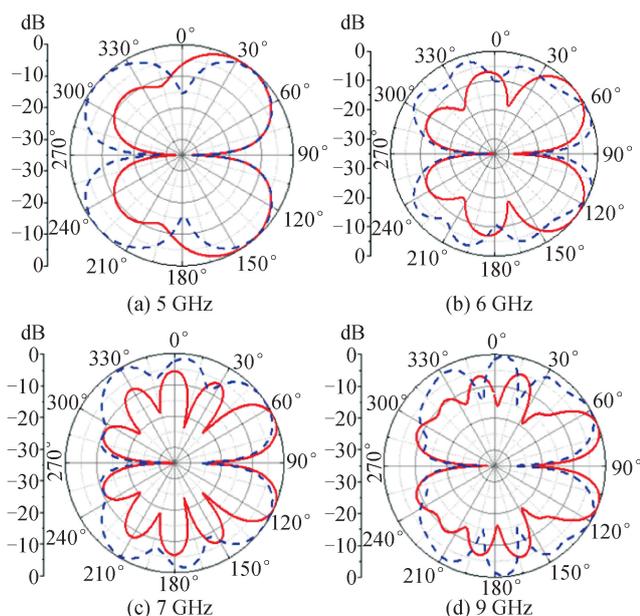


图 6 天线的电流分布图

Fig.6 Antenna current distribution diagram

2.3 辐射方向图

图 7 为天线在 5 GHz、6 GHz、7 GHz 和 9 GHz 的 E 面和 H 面归一化辐射方向图,从图 7 中可以看出,天线在整个工作频段内存在两个主辐射方向。因为本文所设计的天线是由两个 Vivaldi 天线组合而成,天线在整个工作频段内辐射方向沿着左右两侧的指数曲线辐射臂进行辐射,因而存在左右两个主辐射方向。Vivaldi 天线因其特殊的指数曲线结构,高频时,辐射位置靠近槽线起始端,低频时,辐射位置靠近槽线末端,而本文所设计的天线是向内弯曲结构,因而在不同频段时,主辐射方向角度稍有不同。为了突出本文设计的天线的新颖性,表 2 中显示了本文设计的天线与近几年文献中类似结构主要性能的比较。可以看出,本文设计的天线具有良好的增益。



—E 面方向图,--H 面方向图。

图 7 天线的 E 面和 H 面归一化辐射方向图
Fig. 7 Normalized radiation pattern of E-plane and H-plane of antenna

表 2 与其他天线的参数比较

Tab. 2 Comparison with other antenna parameters

文献	尺寸/ mm ²	带宽/ GHz	增益/ dBi	高度/ mm	辐射效 率/%
[7]	100 × 80	2~4	6.7	1.5	—
[10]	100 × 120	1~3	7.5	2.0	—
本文	70 × 35.7	3.7~14	10	56.4	95.2

3 结 论

本文提出了一种 3D 拱形超宽带 Vivaldi 天线,最高增益可达 10 dBi,平均辐射效率达到 95.2%,性能良好。所提出的天线可工作在 C 波段、X 波段和部分 Ku 波段,适用于微波成像及双边方向的基站。

参考文献:

[1] KIM C B, LIM J S, JANG J S, et al. Design of the wideband notched compact UWB antenna[C]//2007 Asia-Pacific Microwave Conference. IEEE, 2008.
[2] 华军,刘江凡,席晓莉,等. 平面对角螺旋天线的理论分析与数值仿真[J]. 西安理工大学学报,2007,23(4):385-

389.

HUA Jun, LIU Jiangfan, XI Xiaoli, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of the equiangular spiral antennas[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2007, 23(4): 385-389.

[3] 柯熙政,卢瑜. 基于功率倒置算法的 GPS 抗干扰天线研究[J]. 西安理工大学学报,2008,24(2):149-152.
KE Xizheng, LU Yu. Research of GPS anti-jamming antenna based on power inversion algorithm[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008, 24(2): 149-152.
[4] GIBSON P J. The Vivaldi aerial[C]// 1979 9th European Microwave Conference. IEEE, 2007.
[5] DIXIT A S, KUMAR S. A Survey of performance enhancement techniques of antipodal Vivaldi antenna[J]. IEEE Access, 2020, 8: 45774-45796.
[6] ISLAM T, ISLAM M T, SAMSUZZAMAN M, et al. Metamaterial loaded nine high gain Vivaldi antennas array for microwave breast imaging application [J]. IEEE Access, 2020, 8: 227678-227689.
[7] 王蒙蒙,王学田,高洪民,等. S 波段高增益 Vivaldi 天线设计[J]. 微波学报,2020,36(增刊 1):105-108.
WANG Mengmeng, WANG Xuétian, GAO Hongmin, et al. Design of S-band high gain Vivaldi antenna[J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(S1): 105-108.
[8] ASOK A O, DEY S. High gain elliptically tapered antipodal Vivaldi antenna with tooth shaped dielectric lens [C]//2020 International Symposium on Antennas & Propagation. IEEE, 2020.
[9] LIM T H, PARK J E, CHOO H. Design of a Vivaldi-fed hybrid horn antenna for low-frequency gain enhancement[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 66(1): 438-443.
[10] 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 Mujin, JIANG Xing, SUN Fengyuan, et al. Design of an antipode-type Vivaldi high gain antenna[J]. Journal of Microwaves, 2021, 37(1): 28-31, 36.
[11] SHAIKHF A, KHAN S, ZAHARUDIN Z, et al. Ultra-wideband antipodal Vivaldi antenna for radar and microwave imaging application[C]//2017 IEEE 3rd International Conference on Engineering Technologies and Social Sciences. IEEE, 2017.

(责任编辑 王绪迪)