

陈军^{1,2} 万发雨²

一种超宽带高增益对踵 Vivaldi 天线

摘要

本文设计了一种带宽 3.3~40 GHz 的新型超宽带高增益对踵 Vivaldi 天线,该天线介质板两侧采用相同的辐射结构,由一个微带线和两条指数型槽线构成.在天线辐射方向添加一块梯形结构介质板,将天线正反两面的表面电流限制在天线辐射方向,既可以矫正 E 面方向图的增益峰值偏移角度,也可以提升天线辐射强度.实测结果显示,3.3~40 GHz 带宽内的驻波比均小于 2,倍频带宽大于 12,增益为 1.0~12.6 dB.该天线的 E 面方向图对称性好,天线的交叉极化比小,且易于设计、成本低廉,在超宽带、高增益的天线领域具有较高应用价值.

关键词

Vivaldi 天线;超宽带;高增益

中图分类号 TN820

文献标志码 A

收稿日期 2021-05-12

资助项目 国家自然科学基金(61971230);江苏省双创团队人才计划(SRCB201526)

作者简介

陈军,男,硕士,研究方向为电磁测试、天线设计.chenjuntz1@js.chinamobile.com

1 中国移动通信集团江苏有限公司 泰州分公司,泰州,225300

2 南京信息工程大学 电子与信息工程学院,南京,210044

0 引言

随着国内外无线通信的传输速度不断地提升,微波天线的带宽和辐射特性都面临较高的需求.在众多天线中,Vivaldi 天线备受国内外专家的青睐,它最早是由 Gibson^[1]提出的,实际为一种指数渐变槽线的平面印刷天线^[2].Hood 等^[3]基于传统对踵 Vivaldi 天线设计了两种天线,但是这两种天线的增益均较低,阻抗带宽只有 7.5 GHz. Anu 等^[4]采用增加树状指数槽线的技术来提升 Vivaldi 天线的频宽和频段内增益,但由于设计比较复杂,制作难度大.Reddy 等^[5]通过切割 Ω 型槽线设计了一种陷波型 Vivaldi 天线,带宽为 8 GHz. Dastranj^[6]将天线左右两端的 4 个边缘直角切圆,进而提升天线辐射特性,其带宽为 12 GHz,最高增益为 8.4 dB. Teni 等^[7]在对踵 Vivaldi 天线的两端和前方均增加矩形槽线,从而优化低频带宽,提高天线的整体带宽,并在天线辐射方向增加了一个半圆形介质基板以便提升天线增益,最终打造了一种增益高达 8.5 dB 的对踵 Vivaldi 天线.徐国建等^[8]在传统 Vivaldi 天线的两端切割树杈形槽线,提高 5.4 GHz 频点处的增益,但是驻波比小于 2 的频段仅 3.4~7.6 GHz.岳新东^[9]通过在传统对踵 Vivaldi 天线背面加载矩形地板,并延伸介质板的宽度,从而提升天线增益,最高增益高达 8 dB,带宽为 9 GHz.柏艳英^[10]以对踵 Vivaldi 天线为天线单元,通过镜像法布阵设计了一款超宽带相控阵天线.蔺炜^[11]在直径为 4 mm 的圆形介质板上设计了一款高增益天线.王轶珏等^[12]采用分段线的负 μ 传输线加工了两个宽带天线.由上述文献可以看出,近年来大部分 Vivaldi 天线的带宽和增益均不高,并且未关注到 E 面方向图的对称性和峰值角度偏移问题.

本文对传统对踵 Vivaldi 天线进行改进,设计了一种带宽 3.3~40 GHz 的新型超宽带高增益对踵 Vivaldi 天线,该天线介质板两侧采用相同的辐射结构,在天线辐射方向添加一块梯形结构介质板,将天线正反两面的表面电流限制在天线辐射方向,既可以矫正 E 面方向图的增益峰值偏移角度,也可以提升天线辐射强度.该新型对踵 Vivaldi 天线的尺寸为 57.5 mm×60.7 mm,在厚度为 0.508 mm 的 Rogers RO4003C 介质板上制作.实测结果显示,3.3~40 GHz 带宽内的驻波比(VSWR)均小于 2,倍频带宽大于 12,增益为 1.0~12.6 dB.该天线的 E 面方向图对称性好,并具有交叉极化比小、易于设计、成本低廉等特点,在超宽带、高增益的天线领域具有较高的应用价值.

1 理论分析

为满足天线超带宽、低驻波、高增益的设计要求,本文在传统对踵 Vivaldi 天线的基础做了一些改变,介质板两侧的辐射贴片采用相同结构,均由一个微带线和两条指数型槽线构成,从而修正天线 E 面方向图不对称性,并提高天线增益特性.其结构示意图如图 1 所示.介质板为介电常数 3.38 的 Rogers RO4003C 板材.该天线易于设计、成本低廉,采用 50 Ω 同轴接头馈电.

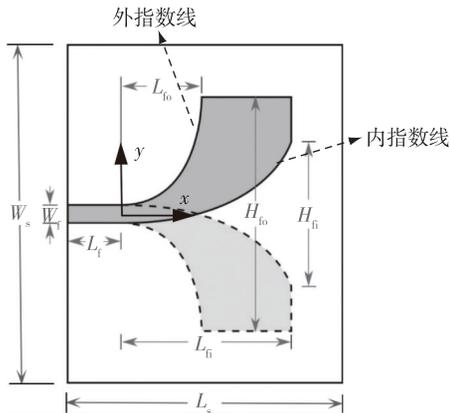


图 1 对踵型 Vivaldi 天线
Fig. 1 The antipodal Vivaldi antenna (antenna 1)

由于对踵型 Vivaldi 天线没有准确的经验公式可供参考,本文通过数学公式来确定天线的初步尺寸,其内外指数渐变槽线的尺寸通过式(1)和(2)表示为

$$y_i = C_{1i} e^{(F_i x_i^{S_i})} + C_{2i}, \quad (1)$$

$$y_o = C_{1o} e^{(F_o x_o^{S_o})} + C_{2o}, \quad (2)$$

式中, x_i 和 y_i 分别表示内指数渐变线的 x 坐标和 y 坐标, x_o 和 y_o 分别表示为外指数渐变线的 x 坐标和 y 坐标,单位均为 mm. C_{1i}, C_{2i}, F_i, S_i 为内指数渐变槽线表达式(1)的系数, C_{1o}, C_{2o}, F_o, S_o 为外指数渐变槽线表达式(2)的系数, e 是自然对数底.

2 新型对踵 Vivaldi 天线的设计

为了进一步提高天线辐射特性,本文在天线辐射方向上增加了一块梯形结构介质板,增加梯形结构介质板可以将表面电流限制在天线的辐射方向,既可以矫正天线 E 面方向图的峰值偏移角度,也可以提高天线增益特性.其结构如图 2 所示.

采用 HFSS 软件对天线的指数槽线、梯形结构介质板和微带线的进行优化,确定了整个天线各参数的尺寸,如表 1 所示.

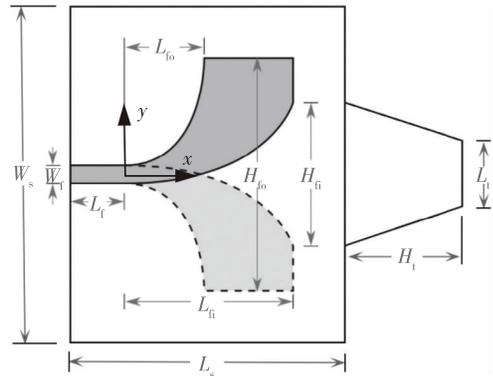


图 2 新型对踵 Vivaldi 天线
Fig. 2 The novel antipodal Vivaldi antenna (antenna 2)

表 1 天线结构尺寸

Table 1 Structure size of the antenna mm								
参数	L_f	W_f	H_{fi}	H_{fo}	L_{fi}	L_{fo}	W_g	H_t
值	1.7	1	18.7	43	31.9	17.8	1	19.9
参数	L_t	T_s	H_s	L_s	W_s	F_i	F_o	
值	10.8	0.036	1	40.8	57.5	0.161	1	0.017
参数	S_i	S_o	C_{1i}	C_{1o}	C_{2i}	C_{2o}		
值	1	2	0.058	1	0.080	9	-0.578	7
							0.439	7

采用 HFSS 软件分别对图 1 和图 2 所示两种天线的表面电流进行仿真研究,得到如图 3 所示的天线表面电流分布.由图 3a 可知:两个天线在 10 GHz 的电流强度基本相似.由图 3b—3d 可知:增加梯形结构介质板后,天线在梯形结构介质板上(区域 O 处)的电流强度较大,并且表面电流主要集中在天线辐射方向上,特别是 20、30 和 40 GHz 三个频点,天线辐射方向上的电流非常集中;而未增加梯形结构介质板时,区域 O 处的表面电流大致是向两边扩散的.基于图 3 所示的天线表面电流分布情况,可以得出:增加梯形结构介质板可以将表面电流限制在天线的辐射方向,既可以矫正天线 E 面方向图的峰值偏移角度,也可以提高天线的增益特性.

分别对图 1 和图 2 所示两个天线进行驻波比 (VSWR) 和增益 (Gain) 仿真研究,得到的 VSWR 仿真结果如图 4 所示.由图 4 可以发现,两种天线的驻波仿真结果在 2~40 GHz 频段内基本一致.图 5 为这两个天线的 Gain 仿真结果.由图 5 可以发现,增加梯形结构介质板后,该天线在 20~40 GHz 频段内的辐射增益有所提升,尤其是在 40 GHz 时增益值提升了约 6 dB,这是增加梯形结构介质板,将天线表面电流限制在辐射方向所致.

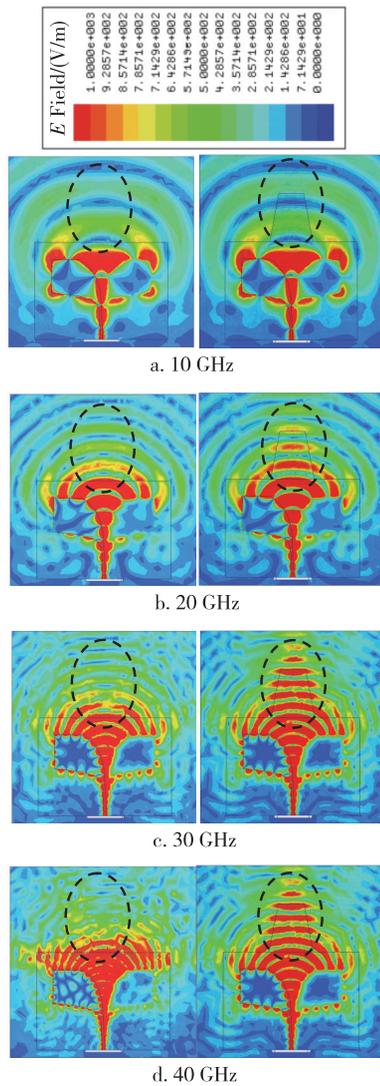


图3 天线表面电流分布

Fig. 3 Current distribution on antenna 1 (left) and antenna 2 (right) surface

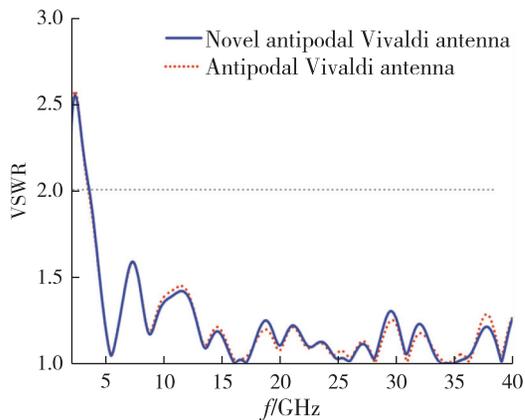


图4 驻波比仿真结果对比

Fig. 4 Comparison of the simulated VSWR results

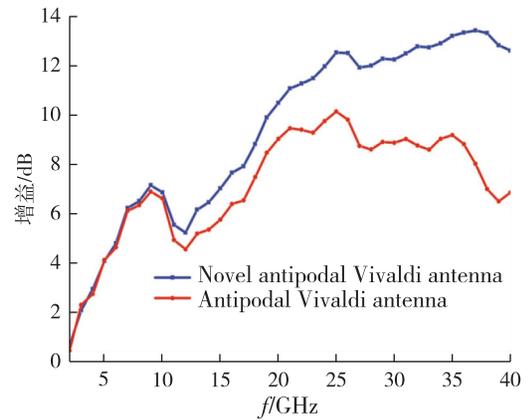


图5 增益仿真结果对比

Fig. 5 Comparison of the simulated gain results

3 新型对踵 Vivaldi 天线的实验研究

对踵 Vivaldi 天线在厚度为 0.508 mm 的 Rogers RO4003C 板材上进行实物加工,天线的实物照片如图 6 所示,通过 50 Ω 的 SMA 同轴接头馈电.



图6 天线实物图

Fig. 6 Picture of the antenna

采用网络分析仪完成该对踵 Vivaldi 天线的 VSWR 测量,得到 2~40 GHz 频率范围内的 VSWR 实测值和仿真值对比如图 7 所示.由图 7 可以发现,天线在 3.3~40 GHz 频段内的 VSWR 小于 2, VSWR 实测值和仿真值大致相符,但是 10 GHz 以上的 VSWR 实测值略高于仿真值,这是因为高频段对天线加工偏差比较敏感导致的.同时基于图 7 可以发现:该天线带宽可以扩展到 40 GHz 以上的频段.

在微波暗室中完成天线增益和方向图的测试,天线增益的实测值和仿真值如图 8 所示.从图 8 可以发现:2~40 GHz 频率范围内的增益实测值为 1~12.6 dB,在频点 25 GHz 处的增益达到最大,为 12.6 dB.由于介质板以及 SMA 同轴接头在高频段的损耗较大,因此高频段增益的实测值略逊于仿真值,但是

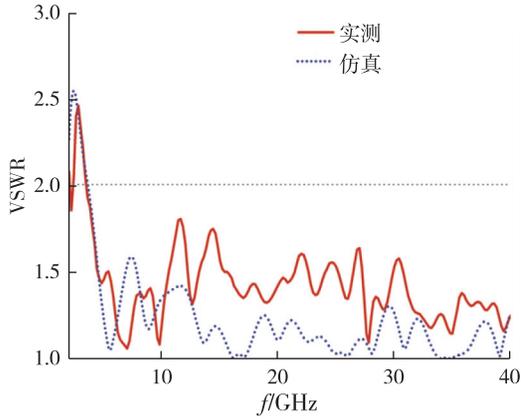


图 7 VSWR 仿真与实测对比

Fig. 7 Comparison between measured and simulated VSWR

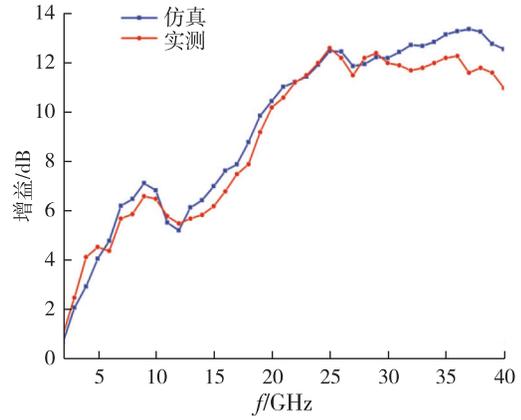


图 8 增益仿真与实测对比

Fig. 8 Comparison between measured and simulated gains

整体的变化趋势是大致相似的。

该天线在 10、20、30 和 40 GHz 四个频点的 *E* 面方向图如图 9 所示,两种天线的 *E* 面方向图电磁参数比较结果如表 2 所示,表中天线 1 为新型对踵 Vivaldi 天线,天线 2 为未加载梯形结构介质板的对踵 Vivaldi 天线.明显可以看出,天线 1 的 *E* 面方向图比较对称,而且辐射特性较好,四个频点的交叉极化

比均小于 -10 dB.并且天线 1 的 *E* 面方向图的峰值偏移角度较小,尤其是 30~40 GHz 高频段的偏移角度得到较好的矫正,几乎是零度.由图 9 可以看出,方向图仿真结果和实测结果存在差异,主要是加工误差、介质板的高频插损所致.由表 2 明显可以看出,新型对踵 Vivaldi 天线具有更好的方向性和更高的增益。

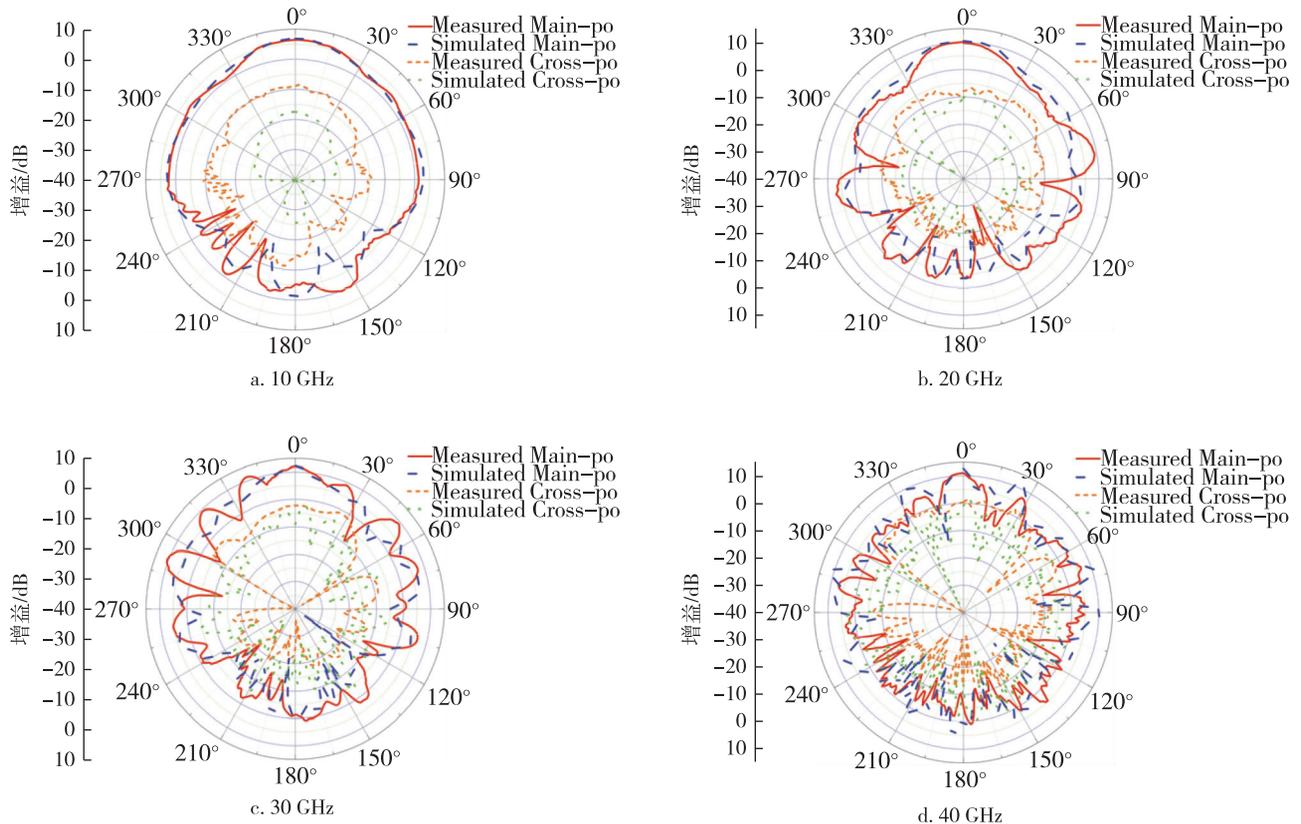


图 9 天线的 *E* 面方向图

Fig. 9 Radiation patterns of the antenna at *E*-plane

表 2 两种天线的电磁参数特性

Table 2 Electromagnetic characteristics of the two antennas

频率/GHz	E 面增益/dB		峰值偏移角度/(°)		E 面波瓣宽度/(°)		前后比/dB		交叉极化比/dB	
	天线 1	天线 2	天线 1	天线 2	天线 1	天线 2	天线 1	天线 2	天线 1	天线 2
4	4.1	2.9	3.8	7.2	63.3	83.7	10.1	7.3	-20.3	-19.0
10	6.5	6.1	2.4	4.3	48.5	53.9	10.9	8.2	-16.1	-13.3
20	10.2	8.3	1.6	3.2	39.5	48.2	13.6	9.9	-18.0	-17.4
30	12.0	8.0	0.2	5.8	19.2	23.0	12.6	8.8	-21.3	-20.4
40	11.1	6.8	0.5	5.2	13.1	17.8	15.9	8.3	-10.6	-7.3

4 总结

本文设计了一种带宽 3.3~40 GHz 新型超宽带高增益 Vivaldi 天线,采用对踵型结构,该天线介质板两侧采用相同的辐射结构,在天线辐射方向添加一块梯形结构介质板,将天线正反两面的表面电流限制在天线辐射方向,既可以矫正 E 面方向图的增益峰值偏移角度,也可以提升天线辐射强度.该新型对踵 Vivaldi 天线的尺寸为 57.5 mm×60.7 mm,在厚度为 0.508 mm 的 Rogers RO4003C 介质板上制作.实测结果显示,3.3~40 GHz 带宽内的 VSWR 均比小于 2,倍频带宽大于 12,增益为 1.0~12.6 dB.该天线的 E 面方向图对称性好,具有交叉极化比小、易于设计、成本低廉等特点,在超宽带、高增益的天线领域有较高应用价值.

参考文献

References

- [1] Gibson P J.The Vivaldi aerial[C]//1979 9th European Microwave Conference. September 17 - 20, 1979, Brighton, UK.IEEE,1979:101-105
- [2] Gazit E.Improved design of the Vivaldi antenna[J].IEE Proceedings H Microwaves, Antennas and Propagation, 1988,135(2):89
- [3] 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
- [4] Anu R G, Kumar S S.Design of Vivaldi like antenna using Fourier series approach[C]//2014 Eleventh International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN).September 11 - 13, 2014, Vijayawada, India.IEEE,2014:1-5
- [5] Reddy K A, Natarajamani S, Behera S K. Antipodal Vivaldi antenna UWB antenna with 5.5 GHz band-notch characteristics [C] // 2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (IC-CEET). March 21 - 22, 2012, Nagercoil, India. IEEE, 2012:821-824
- [6] Dastranj A.Wideband antipodal Vivaldi antenna with enhanced radiation parameters [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2015, 9(15):1755-1760
- [7] Teni G E, Zhang N, Qiu J H, et al. Research on a novel miniaturized antipodal Vivaldi antenna with improved radiation [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12:417-420
- [8] 徐国建, 周勇, 陈军, 等. 一种小型化树杈形缝隙 Vivaldi 天线的设计 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(26):70-74
- XU Guojian, ZHOU Yong, CHEN Jun, et al. Design of a miniaturized Vivaldi antenna with fork type slot [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(26):70-74
- [9] 岳新东. 一种对踵型 Vivaldi 超宽带天线设计 [J]. 兰州理工大学学报, 2019, 45(4):110-113
- YUE Xindong. Designing of an antipode-type Vivaldi ultra wideband antenna [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2019, 45(4):110-113
- [10] 柏艳英. 一种小规模超宽带相控阵天线设计 [J]. 电讯技术, 2018, 58(2):214-218
- BAI Yanying. Design of a small scale UWB phased array [J]. Telecommunication Engineering, 2018, 58(2):214-218
- [11] 蔺炜. 全向及定向圆极化天线的小型化研究 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2019, 11(1):1-7
- LIN Wei. Miniaturization techniques for omnidirectional and unidirectional circularly polarized antennas [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2019, 11(1):1-7
- [12] 王轶珏, 贾兴宁, 朴大志. 基于负 μ 传输线的电偶极子和环天线设计 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2019, 11(1):47-52
- WANG Yijue, JIA Xingning, PIAO Dazhi. Design of electric dipole and loop antenna based on mu-negative transmission line [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2019, 11(1):47-52

An ultra-wideband high-gain antipodal Vivaldi antenna

CHEN Jun^{1,2} WAN Fayu²

1 China Mobile Group Jiangsu Co., Ltd. Taizhou Branch, Taizhou 225300

2 School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract A novel ultra-broadband high-gain antipodal Vivaldi antenna is designed with a bandwidth of 3.3–40 GHz frequency. The same radiation structure, which consists of one microstrip line and two exponential slot lines, is printed on both sides of the dielectric plate. In order to effectively constrain the surface current in the radiation direction, a trapezoidal dielectric substrate is added in the radiation direction, which can not only correct the gain peak offset angle of *E*-plane pattern, but also improve the radiation intensity of antenna. The measured results show that the VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) is smaller than 2 at the frequency band of 3.3–40 GHz, the frequency doubling bandwidth is up to 12, and the gain is 1.0–12.6 dB. In addition, the antenna has the characteristics of good symmetry in *E*-plane pattern, small cross-polarization ratio, simple structure, easy processing and low cost, thus it has high research significance and application prospects in antenna with high bandwidth and high gain.

Key words Vivaldi antenna; ultra-wideband; high gain