

文章编号: 2095-4980(2015)01-0076-04

## 超宽频带通信传输中的天线优化设计

周 添<sup>1</sup>, 岳艳涛<sup>1</sup>, 徐冠雄<sup>1,2</sup>, 张洋洋<sup>1,2</sup>, 季春霖<sup>1,2</sup>

(1.深圳光启高等理工研究院, 广东 深圳 518057; 2.超材料电磁调制技术国家重点实验室, 广东 深圳 518057)

**摘 要:** 超宽频带传输在短距离内(通常 10 m 范围内)利用自身的带宽优势, 可以通过较低的能量(功率谱密度小于 $-41.3$  dBm/MHz)和较大带宽(超过 500 MHz)进行高速通信(100 Mb/s 以上, 理论上可以达到 1 Gb/s)。超宽频带通信技术与多入多出技术的结合还可以进一步增加通信容量。作为超宽带通信应用中重要的一环, 超宽频带天线的优化设计显得尤为重要。超宽频带天线为带宽超过 500 MHz 或相对带宽大于 20%的宽频天线。本通信选取最具代表性的 Vivaldi 天线为例, 通过统计优化算法对多目标任务进行优化, 得到 130 mm × 100 mm 尺寸天线的 $-10$  dB 带宽达 2.4 GHz。该设计方法对宽频带、多参数天线设计有较好的借鉴。

**关键词:** 超宽频通信; 小型化天线设计; 超宽频天线; 多目标优化

**中图分类号:** TN822.8

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201501.0076

## Antenna optimization in the application of ultra-wideband communication

ZHOU Tian<sup>1</sup>, YUE Yantao<sup>1</sup>, XU Guanxiong<sup>1,2</sup>, ZHANG Yangyang<sup>1,2</sup>, JI Chunlin<sup>1,2</sup>

(1.Shenzhen Kuang-Chi Institute of Advanced Technology, Shenzhen Guangdong 518057, China; 2.State Key Laboratory of Metamaterial Electromagnetic Modulation Technology, Shenzhen Guangdong 518057, China)

**Abstract:** Ultra-wideband(UWB) communication shows its advantages of fast data transfer(100 Mb/s or above) in a relatively short distance(typically below 10 m) with relatively weak power consumption (energy spectrum below  $-41.3$  dBm/MHz). Integrated with Multiple Input Multiple Output(MIMO) technology, channel capacity could be further enhanced. As a critical link in the ultrawideband communication, UWB antenna needs extra efforts in design optimization to boost the performance of the whole system. UWB antenna is defined as the antenna whose bandwidth exceeds 500 MHz or relative bandwidth greater than 20%. This paper takes the most representative Vivaldi antenna as a show case for multi-objective optimization design with statistical methods. The optimized miniaturized antenna(sized 130 mm × 100 mm) shows a  $-10$  dB bandwidth of 2.4 GHz. The design method provides guidance in common wideband, multi-parameter antenna design.

**Key words:** ultra-wideband communication; miniaturized antenna design; ultra-wideband antenna; multi-objective optimization

应用于无线通信领域的超宽带通信技术(UWB)是一种低功率的无线电技术。按照 2002 年美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)在向民用领域开放 UWB 时的定义, 超宽带技术指的是信号相对带宽不小于 20%或绝对带宽不小于 500 MHz, 并使用指定的 3.1 GHz~10.6 GHz 频段的通信方式。与其他传统的无线通信技术相比较, UWB 的技术特点主要有:

1) 传输速率高; 2) 通信距离短; 3) 平均发射功率低; 4) 多径分辨率极高; 5) 适合于便携型应用等特点<sup>[1]</sup>。超宽带通信雷达在军事上也有很广泛的应用。

超宽带通信技术在 2004 年~2006 年取得了高速发展, 但后期因为与其他通信系统的兼容性和缺少行业标准等原因没有得到广泛的推广。但伴随着目前物联网和信息需求的增长, 超宽带通信技术将显得越发重要。本文将介绍如何利用优化算法对于超宽频带、多参数的小型化 Vivaldi 天线进行设计, 使其在短距离低功耗大信息量传

收稿日期: 2014-03-20; 修回日期: 2014-04-19

基金项目: 广东省引进创新科研团队计划基金资助项目(2009010005); 广东省超材料微波射频重点实验室基金资助项目(2011A060901010); 深圳市变换光学与空间调制技术重点实验室基金资助项目(CXB201109210100A); 深圳市科技计划基金资助项目(JC201005280649A)

输中发挥作用。

### 1 Vivaldi 天线设计

1974 年美国雷声公司(Raytheon Company)的 Lewis L R 发表了题为“A broadband stripline array element”的文章,提出了一种微带线馈电波导开槽天线,被视为缝隙宽带天线的起源<sup>[2]</sup>。1979 年英国 Philips 研究实验室的 P J Gibson 发表了名为“The Vivaldi Aerial”的论文,提出了一种指数渐变缝隙天线,这一种行波天线可以提供倍频带宽<sup>[3]</sup>。

自从 Vivaldi 天线出现以后,学者们对其进行了大量研究和改进。按照槽线类型又产生出线性渐变缝隙天线和固定宽度缝隙天线<sup>[4]</sup>。天线形态方面又出现双层对跖和带状线馈电 3 层天线结构等<sup>[5]</sup>。同时对于馈电方式和巴伦进行了大量的研究改进<sup>[6]</sup>。微带馈电的 Vivaldi 天线设计关键在于微带—槽线之间的耦合馈电设计,以及渐变开槽缝隙和谐振腔的设计。一种 Vivaldi 天线的形态如图 1 所示,并显示了天线工作时表面电流情况。

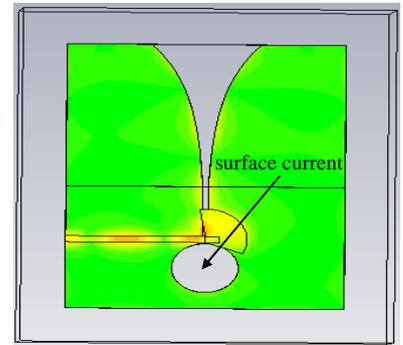


Fig.1 Illustration of the Vivaldi antenna (surface current shown in grayscale)  
图 1 Vivaldi 天线示意图(灰度显示表面电流)

对于超宽频 Vivaldi 天线的长期研究积累了丰富的天线设计和参数设计<sup>[7-8]</sup>经验方法。传统的方法为先设计天线槽线和微带耦合馈电结构,再根据需要设计微带阻抗匹配网络、谐振腔、扇形短截线和渐变缝隙<sup>[9]</sup>。即使具备一定的天线设计经验,每个阶段仍然需要多次的迭代尝试,而且由于后一阶段天线结构的变化,前期尝试的最优结果有可能产生变化而需要重新迭代尝试,增加了天线设计的周期。本文提出一种利用统计优化进行设计的方法。

### 2 优化设计

天线设计目标为在  $L/S$  频段获得 2 GHz 以上的-10 dB 带宽,最小增益应大于 4 dBi,且物理尺寸小于 150 mm × 100 mm。工艺实现采用微带馈电形式。

Vivaldi 天线包含诸多的设计参数,如谐振腔半径  $R_c$ 、槽线宽度  $W_s$ 、槽线缝隙渐变曲率  $R$ 、扇形馈电短截线半径  $R_s$ 、扇形短截线张角  $\theta$  和  $\theta_2$  等(图 2~图 3)。Vivaldi 天线槽线曲线方程可以描述为  $x = W_s / 2e^{R(y-L_1)}$ , 其中  $W_s$  为过渡槽线初始宽度,  $R$  为渐变曲线曲率,  $L_1$  为曲线起点坐标。天线设计需要有丰富设计经验的人员初步确定天线参数范围和后期不可避免的迭代优化。在迭代优化的过程中,可以先对目标进行参数敏感度分析,利用统计优化的方法进行多参数多目标优化迭代,科学、快速地达到仿真目标。槽线缝隙渐变曲率  $R$  变化时对频段内最大驻波比和最小增益的影响如图 4 所示,圆圈半径表示最小增益的大小,在  $R$  为 0.044 时取得频段内最大驻波比的最小值,  $R$  为 0.05 时取得频段内最小增益的最大值。槽线缝隙最窄段决定了 Vivaldi 天线的高频特性,最宽段决定了天线的低频特性,渐变曲率的变化影响整个频段的阻抗匹配。扇形馈电短截线半径  $R_s$  变化时对驻波比和增益的影响如图 5 所示,随着驻波比的恶化,频段内的最小增益(圆圈半径)也在减小。

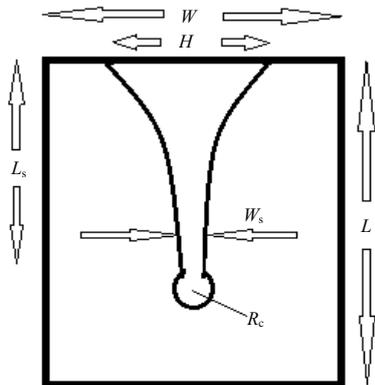


Fig.2 Illustration of parameters of the antenna, front view  
图 2 天线正面参数示意图

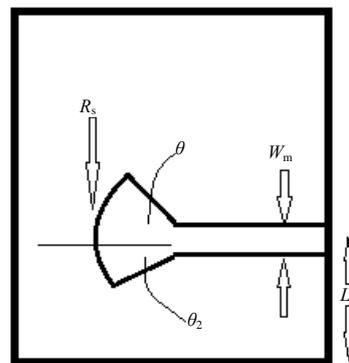


Fig.3 Illustration of parameters of the antenna, back view  
图 3 天线背面参数示意图

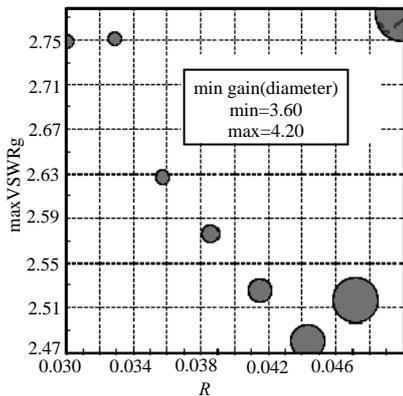


Fig.4 Bubble figure of multi-object optimization with variant  $R$

图4 单参数  $R$  多目标优化 Bubble 图

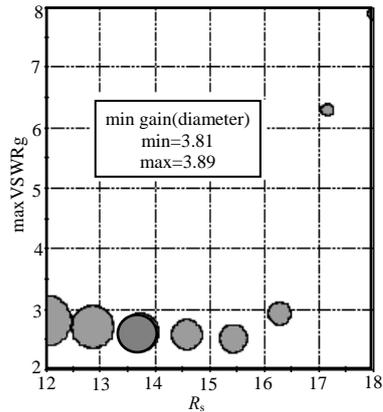


Fig.5 Bubble figure of multi-object optimization with variant  $R_s$

图5 单参数  $R_s$  多目标优化 Bubble 图

因为每组天线参数都将对应一次电磁仿真，而电磁仿真根据模型的大小有可能比较费时，在实验设计时可采用均匀拉丁超立方对求解空间进行采样。为了更快达到优化目标，在对所有均匀拉丁超立方的结果进行遍历后可采用多目标模拟退火(Multi Objective Simulated Annealing, MOSA)或多目标赛局理论(Multi Objective Game Theory, MOGT)等优化算法，也可以在优化求解的不同阶段采用不同的优化算法或者混合算法。采用 MOSA 优化算法产生的多目标优化散点图(部分)如图 6 所示。每一个散点对应一组天线参数试验设计。最终优化结果列于第 3 部分仿真结果中。

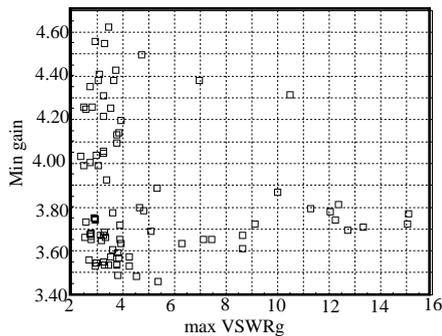


Fig.6 Scatter plot of multi-object optimization  
图6 多目标优化散点图

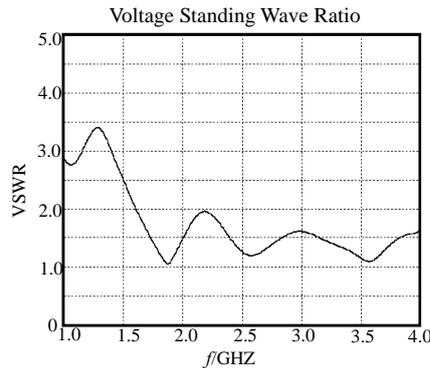


Fig.7 VSWR of the antenna(1 GHz-4 GHz)  
图7 天线驻波比曲线(1 GHz~4 GHz)

### 3 仿真结果

多目标优化后得到的参数见表 1，天线采用微带贴片形式，基材采用 Rogers Ultralam 2000(介电常数 2.5，损耗角正切 0.001 9)，厚度 1.5 mm，覆铜厚度 0.018 mm。天线中除优化参数外的其他参数见表 2。

表 1 多目标优化所得参数

Table1 Parameter table from multi-object optimization					
$R_1$ /mm	$R_2$ /mm	$W_1$ /mm	$\theta_1$ /mm	$\theta_2$ /mm	$R$ /mm
12	15	2	120	21.6	0.042 5

表 2 天线其他参数列表

Table2 Other parameters of the antenna					
$L$ /mm	$W$ /mm	$L_1$ /mm	$W_m$ /mm	$t_{\text{Sub}}$ /mm	$t_{\text{Cu}}$ /mm
130	100	60	3	1.5	0.018

采用多目标优化后得到 Vivaldi 天线的 -10 dB 带宽为 2.4 GHz(1.6 GHz~4 GHz)， $L/S$  频段内天线的驻波比如图 7 所示。天线 1.5 GHz~4 GHz 频率范围内增益大于 4 dBi。多目标优化后天线增益曲线如图 8 所示，该天线在 2 GHz 时的天线 3D 远场方向如图 9 所示。天线整体尺寸为 130 mm × 100 mm × 1.5 mm，满足设计要求。

### 4 结论

虽然因受标准制定和与 WiFi、蓝牙通信系统的干扰问题影响，超宽带通信在生活中还没有大面积推广，但

伴随着大数据和物联网时代的到来,并且借助于柔性天线、3D 打印等技术手段,超宽带通信将在智能家居、移动商务、汽车电子和消费类电子设备终端上有广泛应用。本文介绍了对于此类通信中多参数天线的优化设计方法。借助于成熟商业多目标优化设计软件如 ModeFrontier 和成熟电磁仿真软件如 CST, HFSS 和 COMSOL 等的相互配合,可以有效地提高天线设计效率,得到优化目标。

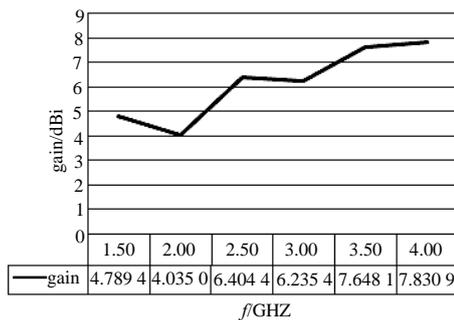


Fig.8 Gain of antenna after multi-object optimization  
图 8 多目标优化后天线增益曲线

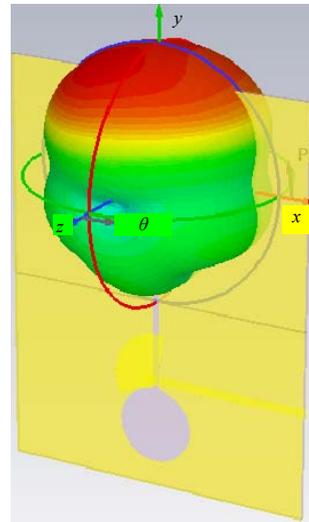


Fig.9 Far-field pattern of the antenna(2 GHz)  
图 9 天线远场方向图(2 GHz)

#### 参考文献:

- [1] 刘丹谱. 超宽带无线通信技术[J]. 中兴通讯技术, 2004(3):42-47. (LIU Danpu. Ultrawideband wireless telecommunication[J]. ZTE Communications, 2004(3):42-47.)
- [2] Lewis L R. A broadband stripline array element[C]// IEEE Antennas and Propagation Symposium. [S.l.]:IEEE, 1974:335-337.
- [3] Gibson P J. The Vivaldi array[C]// 9<sup>th</sup> European microwave conference. Brighton, UK:Proceedings, 1979:101-105.
- [4] Yngvesson K, Schaubert D H, Korzeniowski T L, et al. Endfire tapered slot on dielectric substrates [J]. IEEE Trans. on Antenna and Propagat., 1985, 33(12):1392-1400.
- [5] Gazit E. Improved design of the Vivaldi antenna[J]. IEEE Proceeding on Microwave Antennas and Propagation, 1988, 135(2): 89-92.
- [6] Zinlerls M, Sloan R. A broadband microstrip to slotline transition[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1998, 18(5):339-342.
- [7] 姚远. 宽带天线与天线阵列[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2012. (YAO Yuan. Wideband Antenna and Array[M]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2012.)
- [8] 宋跃, 焦永昌, 张福顺, 等. 一种新型超宽带渐变槽线天线设计[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2009, 36(6):1034-1038. (SONG Yue, JIAO Yongchang, ZHANG Fushun, et al. Design of a novel ultra-wideband tapered slot antenna[J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(6):1034-1038.)
- [9] 边莉. Vivaldi 超宽带天线设计及 FDTD 研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006. (BIAN Li. Design and FDTD research on Vivaldi UWB antenna[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2006.)

#### 作者简介:



周 添(1984-), 男, 吉林省吉林市人, 博士, 高级工程师, 博士后, 中国电子学会高级会员, 广东省通信学会会员, 省自然科学基金评审专家。主要从事微波工程和电磁场数值计算方法等研究。发表国际期刊会议论文15余篇, 国内外专利30余项, email: benzhou.tian@126.com.

徐冠雄(1978-), 男, 江苏省南通市人, 深圳光启高等理工研究院总工程师, 高级工程师, 主要从事通信、光电子器件、电路和系统等研究。已发表论文10余篇, 专利300余件。

季春霖(1981-), 男, 河北省沧州市人, 美国杜克大学统计系博士, 美国哈佛大学博士后。深圳光启高等理工研究院副院长, 超材料电磁调制技术国家重点实验室副主任。主要从事统计建模和计算方法等研究, 发表学术论文50余篇, 专利申请200余项。