

doi:10.3969/j.issn.1009-671X.201112030

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20120521.1002.001.html>

## X 波段 Vivaldi 天线阵列互耦研究

李文兴<sup>1</sup>, 刘聪<sup>1</sup>, 赵中洋<sup>2</sup>

1. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

2. 解放军 93163 部队 司令部, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要:** 利用有源方向图法对 X 波段 Vivaldi 天线阵列互耦问题进行了分析, 提出了加载 DGS 结构的 Vivaldi 天线阵的去耦方法, 分析了互耦对阵列天线方向图增益、波束宽度、副瓣电平等特性的影响. 理论分析和仿真结果表明, 该方法可以有效地减小 Vivaldi 天线阵列的耦合, 对天线阵列设计有一定的实用价值.

**关键词:** X 波段; 天线阵列; Vivaldi 天线; DGS 结构; 互耦技术

中图分类号: TN82

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X (2012) 03-0032-04

## Research on X-band Vivaldi antenna array coupling techniques

LI Wenxing<sup>1</sup>, LIU Cong<sup>1</sup>, ZHAO Zhongyang<sup>2</sup>

1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

2. Forces Command 93163, PLA, Harbin 150001, China

**Abstract:** A decoupling method was proposed for Vivaldi antenna array integrated with rectangle defected ground structure (DGS). The influence of coupling problems on array patterns, antenna gain and side lobe level was analyzed. The simulation results show that this method can effectively solve the coupling problems between Vivaldi array elements. This method can also be used in any other antenna arrays designs.

**Keywords:** X-band; antenna array; Vivaldi antenna; DGS structure; coupling techniques

相控阵天线已广泛应用于各种雷达、遥测、通信和遥感等设备, 一直是国内外研究的热点, Vivaldi 天线是 Gibson 于 1979 年提出的一种按指数规律渐变的非谐振式开槽天线, 其辐射方式为端射, 是一种线极化、高增益行波天线, 其工作频带宽、结构简单、易于加工且适合与固体器件集成一体, 作为相控阵天线的辐射单元<sup>[1]</sup>, 文中阵列天线单元就是采用 Vivaldi 槽缝天线.

阵列天线中单元天线之间的耦合直接影响天线性能, 如辐射方向图失真、副瓣升高、增益改变等; 因此, 阵列天线的去耦是设计中必须考虑的问题. 通常有 2 种方法去耦: 一种是建立阵列天线的互耦系数矩阵<sup>[2]</sup>, 进行互耦补偿; 另一种是对天线结构本身进行改进<sup>[3-7]</sup>. 目前, 已有很多科学家利用 EBG 结构和 DGS 缺陷地结构的表面波带隙特性来减小天线阵的互耦<sup>[3-5]</sup>, 以提高天线阵性能. Abbas Ali Lofti

Neyestanak 等<sup>[3]</sup>提出了一种蘑菇状 EBG 结构来抑制表面波的传播, 大大降低了单元间的互耦. 但 EBG 结构需要较多的周期性单元, 会增加天线的面积; 而 DGS 缺陷地结构体积小、结构更简单. 这 2 种结构多用于微带贴片天线中<sup>[2-7,9-10]</sup>, 文中将 DGS 结构用于 Vivaldi 天线来改善阵列单元之间的互耦, 并利用高频结构仿真软件 CST 对天线进行了建模、仿真分析和优化. 从仿真结果来看, 该结构能提高阵列天线增益, 减小副瓣电平, 可以有效地减小阵列天线的互耦.

### 1 X 波段 Vivaldi 天线单元设计

加入 DGS 结构的 Vivaldi 天线单元结构图 1 所示. 该天线由带状线—槽线馈电部分、介质板和指数渐变开槽接地板 3 部分组成.

带状线—槽线馈电部分的设计将直接影响天线的宽带特性<sup>[8]</sup>, 结构参数主要有带状线宽  $W_{SL}$  和槽线宽度  $W_{ST}$ , 该馈电结构由带状线—槽线过渡部分、圆形谐振腔和扇形微带短接线组成. 圆形谐振腔是在槽线末端加的环形结构, 可以增加天线的阻抗带宽, 一般

收稿日期: 2011-12-30. 网络出版日期: 2012-05-21.

作者简介: 李文兴 (1960-), 男, 教授, 主要研究方向: 天线、电磁兼容, 软件无线电, E-mail: liwenxing@hrbeu.edu.cn.

其直径取中心频率波长的 0.125 左右, 扇形微带短接线使微带线在更大的频段上保持开路状态, 可以更好地使微带线上的能量耦合到槽线上, 提高天线的辐射效率, 介质基板尺寸选择为  $30 \text{ mm} \times 14 \text{ mm} \times 2.4 \text{ mm}$ , 介电常数为 2.2.

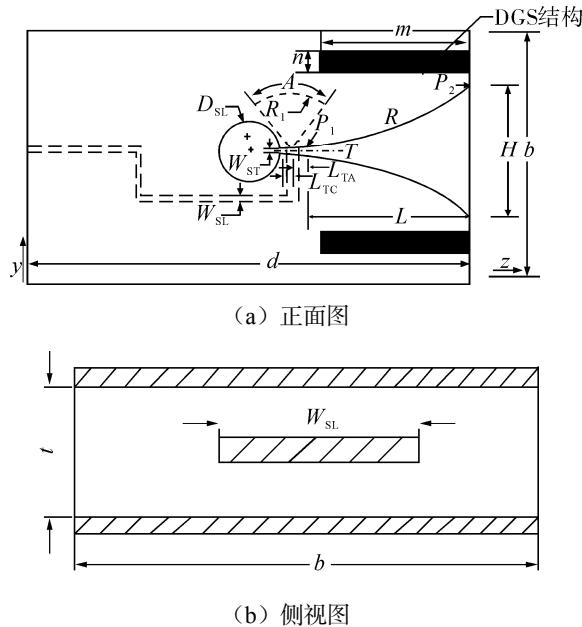


图 1 单元天线的基本结构

指数渐变开槽部分由开口率  $R$  和渐变曲线起点和终点决定. 一般天线的渐变曲线开口率  $R$  由天线的工作频率决定, 天线辐射部分槽线最窄处由最高频率所对应波长决定, 槽线最宽处由最低频率所对应波长决定, 根据 X 波段范围, 取  $R=0.3$ .

为了进一步研究天线各参数和天线性能的关系, 用软件 CST 对所设计的天线进行了仿真分析和优化. 在天线单元加载 DGS 结构——接地板上刻蚀长方形缺陷地, 抑制天线表面波, 达到减小阵列单元之间的耦合, 进行分析优化后得到单元天线尺寸如表 1 所示.

表 1 天线基本结构主要参数

主要天线参数	值
天线口径 $H/\text{mm}$	12.0
槽缝线宽 $W_{\text{ST}}/\text{mm}$	0.80
微带线宽 $W_{\text{SL}}/\text{mm}$	0.52
谐振腔半径 $D_{\text{SL}}/\text{mm}$	3.40
渐变指数 $R$	0.30
渐变曲线长度 $L/\text{mm}$	24
扇形角度 $A/(\text{°})$	92
扇形半径 $R_1/\text{mm}$	2.70
DGS 长度 $m/\text{mm}$	7.20
DGS 宽度 $n/\text{mm}$	0.50

用 CST 建模和仿真, 回波损耗结果如图 2 所示.

在 X 波段 (8~12.5 GHz) 回波损耗小于-10 dB, 加入 DGS 结构后可以明显增加天线单元的阻抗带宽, 工作频率并没有明显偏移, 说明该结构对天线的工作频率并无明显的影响; 而在工作频率范围内回波损耗降低了 5 dB 左右, 10 GHz 时回波损耗达到-27.4 dB, 完全符合设计要求. 天线的  $E$  面和  $H$  面辐射方向如图 3 所示, 增益达到 4.6 dBi, 3 dB 波束宽度达到 94.3°, 具有很好的宽角辐射特性, 可作为天线阵列辐射单元.

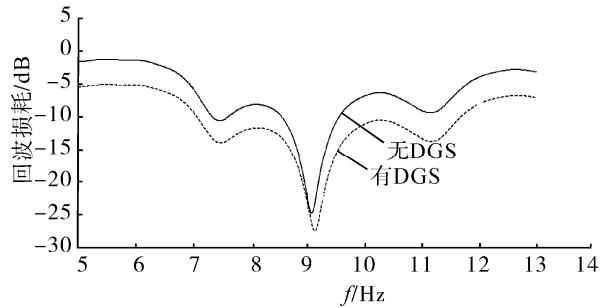


图 2 单元天线的回波损耗

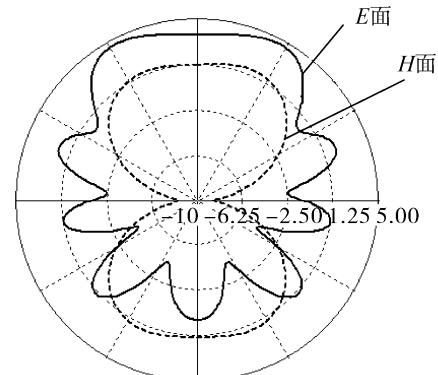


图 3 单元天线的方向

## 2 阵列天线互耦分析

在研究互耦问题时一般采用有源方向图法. 选定一个阵元接信号源作为参考单元, 而将其他阵元接匹配负载, 将所有的耦合都归入有源元, 此时设第  $m$  个阵元得到的方向图即为有源元方向图  $g_m(\theta, \phi)$ . 有源元方向图是由第  $m$  个单元的直接辐射场, 以及其他阵元通过空间耦合接收第  $m$  个阵元的功率产生的二次辐射场相结合而形成. 接匹配负载单元从自身辐射出去一定能量, 这些能量就相当于互耦效应的存在, 互耦机理如图 4 所示.

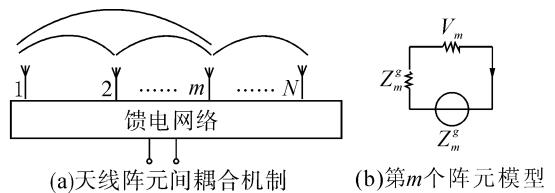


图 4 阵列天线的互耦机理

这样形成的天线阵方向图为

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^N g_m(\theta, \varphi) I_m e^{j\zeta_m}.$$

在这里, 全部耦合影响都组合在有源元方向图  $g_m(\theta, \varphi)$  中, 它依赖于每个阵元的特性及天线阵的几何结构. 将之前所述的天线单元组成线阵形式, 如图 5 所示.

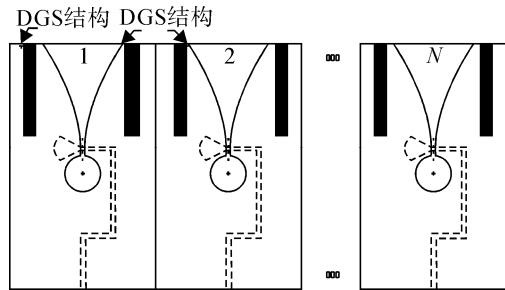


图 5 加入 DGS 结构的 Vivaldi 天线阵

单个 DGS 单元在某个频率点具有衰减特性和截止频率, 其频率特性和单极点 Butterworth 低通滤波器的响应有相似之处, 那么电磁特性可用集总参数电感和电流来描述, 单个单元的等效电路图为 LC 并联电路, 其带阻特性由谐振频率和截止频率决定, 所有 DGS 单元的等效集总电路如图 6 所示.

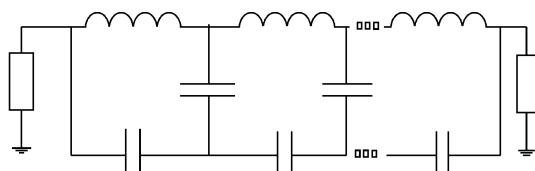


图 6 DGS 单元等效集总电路

连接 DGS 单元的金属产生等效电容, 整个电路特性为串联的 LC 谐振回路, 如滤波器般在某个频段上阻止电流在导体上面流动, 抑制表面波的传播, 即可以在一定程度上降低阵列单元之间由于二次辐射而造成的耦合影响, 达到去耦的效果.

### 3 天线阵列仿真和结果分析

将 Vivaldi 槽缝天线为阵列单元, 组成 10 元线阵, 应用有源方向图法, 首先只对中心阵元进行馈电, 分别加入 DGS 结构和不加 DGS 结构 2 种情况进行仿真, 结果如图 7 所示.

同元因子方向图比较可知: 不加 DGS 结构时, 由于互耦的影响, 中心阵元的方向图发生了较大的变化; 而引入 DGS 结构后, 中心单元的方向图更接近于元因子的方向图, 说明引入 DGS 结构可以减小天线阵的互耦.

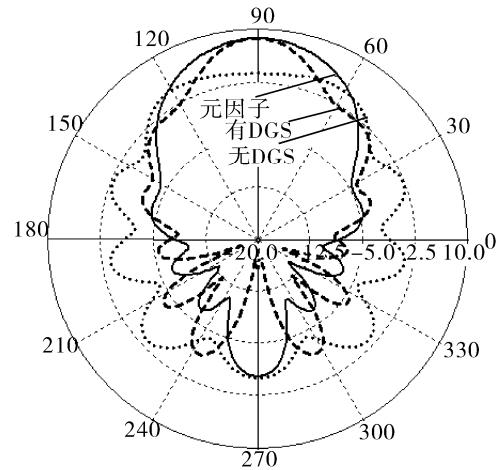
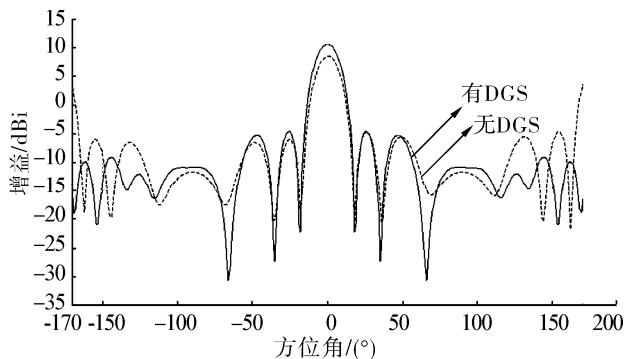
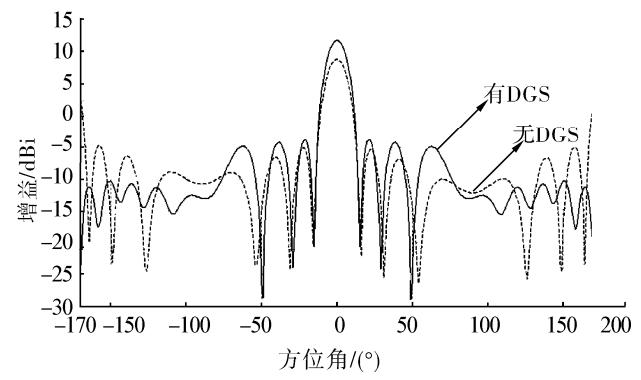


图 7 中心阵元方向

对于全激励阵列天线, 采用契比雪夫激励进行馈电没有互耦时, 各副瓣电平应该是等幅的. 图 8 (a) 和 (b) 给出了考虑耦合时, 在 10 和 12 GHz 条件下, 加入 DGS 结构和不加 DGS 结构的 2 种仿真结果; 同时, 也给出了 DGS 宽度不同情况下的仿真结果, 如图 8 (c) 所示. 表 2 对图 8 (a) 和 (b) 方向图特性进行了总结.



(a)  $f=10$  GHz 方向



(b)  $f=12$  GHz 方向

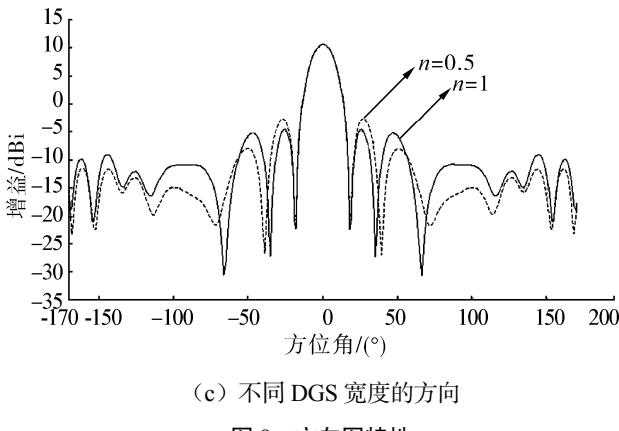


图 8 方向图特性

表 2 方向图特性表

频率/GHz	增益/dBi	3 dB 波束/(°)	副瓣电平/dB
10	有 DGS	10.6	15.9
	无 DGS	8.5	15.5
12	有 DGS	11.6	-15.4
	无 DGS	9.6	-14.0

从表 2 可以看出, 当频率为中心频率 10 GHz 时, 加入 DGS 结构后, 增益增加了 2.1 dBi, 3 dB 波束宽度增加了 0.4°, 副瓣电平降低了 0.7 dB; 同样, 12 GHz 时, 增益提高了 2 dBi, 3 dB 波束宽度增加了 0.6°, 副瓣电平降低了 1.4 dB, 并且每个波束零陷处电平值均有所降低。由图 8 知, 改变 DGS 的宽度值,  $n=1$  mm 较  $n=0.5$  mm 情况下, 主瓣宽度影响不大, 但是副瓣电平趋于平稳, 第一副瓣电平降低了 2.4 dB。由此可以看出 DGS 结构对 Vivaldi 天线阵减小互耦、改善方向性能的效果是明显的。

#### 4 结束语

互耦是影响阵列天线性能的一个重要因素, 单元间的互耦分析相对复杂, 文中从改善单元天线结构出发, 在 Vivaldi 天线单元中加载 DGS 结构, 理论分析和仿真结果表明, 对单元天线而言, 阻抗带宽有所增加, 回波损耗降低 3~5 dB; 对阵列天线来说, 可以有效降低单元之间互耦带来的影响, 阵列增益能提高 2~3 dBi, 副瓣电平也有所降低。总之, 在 Vivaldi 天线单元中加载 DGS 结构, 可以有效地改善天线和天线阵的性能。

#### 参考文献:

- [1] RAJARAMAN R. Design of a wideband Vivaldi antenna array for the snow radar[D]. Kansas city: Kansas University, 2004: 21-40.
- [2] WANG Yan, XU Shanjia. Mutual coupling calibration for transmitting array[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004, 26(6): 979-985.
- [3] NEYESTANAK A A L, JOLANI F, DADGARPOUR M. Mutual coupling reduction between two microstrip patch antennas[J]. IEEE Trans Environmental Electromagnetics, 2009, 16(20): 176-179.
- [4] FAN Y, RAHMAT-SAMII Y. Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structures: a low mutual coupling design for array applications[J]. IEEE Transaction on Antenna and Propagation, 2003, 51(10): 2936-2946.
- [5] LI L, LI B, LIU H X, et al. Locally resonant cavity cell model for electromagnetic band gap structure[J]. IEEE Transaction on Antenna and Propagation, 2006, 54(1): 90-100.
- [6] SUNG Y J, KIM M, KIM Y S. Harmonics reduction with defected ground structure for a microstrip patch antenna[J]. IEEE Antennas Wireless Propag Lett, 2003, 2: 111-113.
- [7] GUHA D, BISWAS M, ANTAR Y M M. Microstrip patch antenna with defected ground structure for cross polarization Suppression[J]. IEEE Antennas Wireless Propag Lett, 2005, 4(1): 455-458.
- [8] SHIN J, SCHAUBERT D H. A parameter study of stripline-fed Vivaldi notch-antenna array[J]. IEEE Transaction on Antenna and Propagation, 1999, 47(5): 879-886.
- [9] 沈洁. 微带相控阵天线的分析与设计[D]. 苏州: 苏州大学, 2010: 13-15.
- [10] 张友俊. 电磁带隙和缺陷地结构在微带线中的应用研究[D]. 上海: 上海大学, 2005: 52-56.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>