

VLASOV 天线的研究*

周海京¹, 丁 武¹, 刘庆想²

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 使用频域矩量法(MM)和时域有限差分方法(FDTD)对 VLASOV 天线进行了系统研究。通过数值模拟, 对 VLASOV 天线中的模式转换及辐射过程进行了清晰的物理描述; 对 VLASOV 天线进行了参数化研究; 并为实验提供了加工原型, 实测结果与模拟结果吻合良好。在此基础上, 结合 VLASOV 天线在高功率微波系统中的应用提出了一种新的设计方案。该方案实现了天线与天线罩的一体化设计, 使辐射波束实现了较好的圆对称性, 天线增益提高 6dB, 第一副瓣电平下降 13dB。

关键词: 高功率微波; 天线; 数值模拟
中图分类号: TN82 文献标识码: A

对于输出模式为 TEM 同轴线模或 TM_{01} 圆波导模的高功率微波源(如 RKO、MILO、VCO、PASOTRON 等), 由于其输出端口的口径场分布具有圆对称性, 将导致轴向为零的环状远场方向图。因此, 为了获得单向波束以及线极化的辐射特性, 就必须对辐射系统重新进行设计。根据我们对国内外大量有关文献的分析, 针对这一实际问题已有三种解决方案, 即: 模式转换器^[1]、同轴波束旋转天线(COBRA)^[2]和 VLASOV 天线^[3]。这三种方案各有特点, 而且都有实际应用。第一种方案最为常见, 其做法是: 通过模式转换器将 TEM 模或 TM_{01} 模转换到 TE_{11} 或 HE_{11} , 再通过普通喇叭进行辐射。其主要缺点是: 需要设计转换效率很高的理想模式转换器并不容易, 而且模式转换器的存在增加了系统的长度、重量和复杂度。第二种方案是近期由美国空军 Phillips 实验室提出的一种新概念天线反射面天线, 该天线的设计思路是: 把由 TEM 或 TM_{01} 模辐射得到的环状方向图作为初级馈源方向图, 而将反射面分割成多瓣, 各瓣作适当的轴向位移, 从而将圆对称的口径场分布转换为线对称。这种方案的缺点是系统较复杂、体积大, 而且目前该项技术尚不成熟, 口径效率很低。相比而言, 第三种方案——VLASOV 天线设计方案的优点就十分突出: 结构简单紧凑, 不需要模式转换装置。其主要缺点在于方向图特性不理想, 增益不高。本文通过数值模拟技术对 VLASOV 天线展开系统研究, 并提出新的设计方案使方向图特性得到了显著改善。

VLASOV 天线是由俄罗斯科学家 Vlasov 于 1975 年首先提出的^[4]。当时的应用背景是: 将回旋管输出端的圆对称高次模 TE/TM_{0n} 模($n \geq 1$)或 Whispering Gallery 模(TE/TM_{mm} 模, $m \gg 1$)转换到 TE_{11} 模, 以实现定向线极化辐射。VLASOV 天线结构简单、紧凑而且有效, 因此很快在高功率微波领域获得承认, 并不断发展成为一种新的天线类别, 引起众多研究兴趣^[5~11]。目前, VLASOV 型天线在应用中已有多种变形, 如以其切口形状的不同就可分为 Step-Cut 型、Helix-Cut 型和 Bevel-Cut 型。其中最后一种又被称为 VLASOV-NAKAJIMA 辐射器^[7], 应用最为广泛。

1 VLASOV 天线的研究方法

VLASOV 天线的传统研究方法是普遍用于毫米波准光器件设计的各种高频近似方法: 如将波导中的传输模式作平面波(射线)展开再进行射线追踪; 或用物理光学方法计算波导开口壁上的等效电流, 利用口径场积分结合物理光学计算辐射场等^[5~9]。显然, 这些方法只有在波导高度过模的条件下才比较准确, 而且无法描述波导中场的真实物理特性和准确计算在转换段由于不连续性造成的反射。近年来, 文献中出现了关于 VLASOV 天线全波数值模拟的报道。但是, 这些模拟结果或是基于二维模型^[10], 或是采用了过于简化的馈源形式^[11], 不能满足实际的设计要求。

正是在这种背景下, 我们使用频域矩量法(MM)和时域有限差分方法(FDTD)对 VLASOV 型天线进行了

* 第六届全国激光科学技术青年学术交流会优秀论文。
收稿日期: 2001-12-18; 修订日期: 2002-02-22
基金项目: 国家自然科学基金(863-410-7)
作者简介: 周海京(1970-), 男, 博士, 北京 8009 信箱; E-mail: haijing-z@yahoo.com。

时域和频域上的三维全波数值模拟。通过数值模拟,对 VLASOV 天线模式转换及其辐射过程的物理图像进行了清晰的描述,澄清了以往对于该天线的若干错误认识。通过数值模拟,对 VLASOV 天线进行了参数化研究,给出了天线结构尺寸与其电特性的关系,并为实验提供了设计模型。近期进行的实测与模拟结果吻合良好。

2 数值模拟结果与分析

本文给出一些有代表性的模拟图并从数值模拟结果分析得到的基本结论。图 1 是传统 VLASOV 天线在工作频带内的典型辐射近场图。从图中可以清楚地看出电磁场从同轴波导中的 TEM 模转换到圆波导段的 TM_{01} 模,然后从斜切端口辐射出去的物理过程。

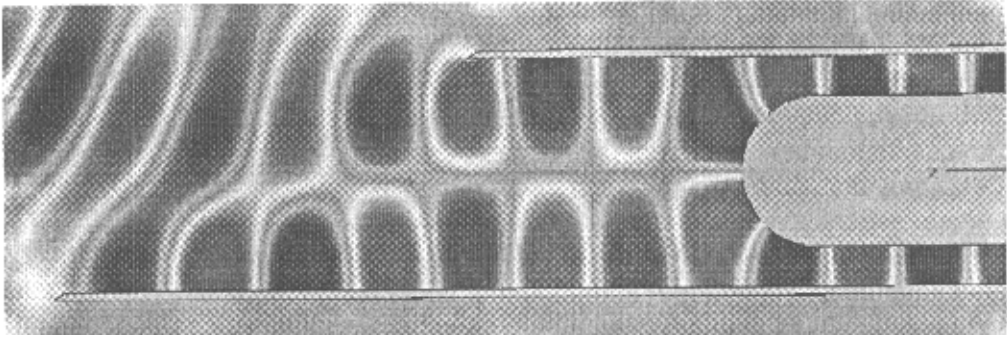
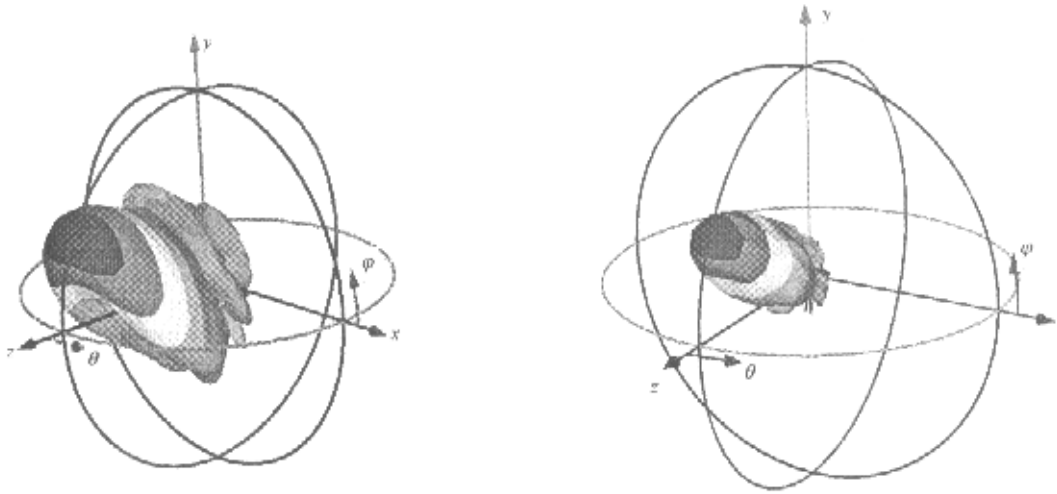


Fig. 1 Transient magnetic field pattern for Vlasov antenna in working band
图 1 VLASOV 天线工作频带内的典型瞬态磁场分布

从宽频带的 VSWR 数值模拟结果可以发现,VLASOV 天线的工作频带以保证圆波导段 TM_{01} 模的有效传输为条件,即:低频点应高于 TM_{01} 模的截止频率,高频点应低于 TM_{02} 模的截止频率。当工作频率升到有 TM_{02} 模出现时,该模式高度色散,不能有效辐射,将导致该频率点附近出现强反射。当工作频率继续升高, TM_{02} 和 TM_{01} 模并存,将会导致方向图出现多瓣。在其工作频带内圆波导段中可能激励的其它高次模式还包括 TE_{21} , TE_{41} 和 TM_{21} 模等,但只要保证加工精度,这些模式在总场中所占的份额就可以忽略。

数值模拟结果还指出:VLASOV 天线的切口倾角 α 对辐射方向图影响很大。当 α 较大时,因有效辐射口径较小和存在很强的边缘绕射效应,导致较高的旁瓣电平;当 α 取 30° 时方向图较理想;而当 α 继续减小到 30° 以下后,方向图特性并没有明显改善。从数值模拟结果还可以看出:VLASOV 天线中同轴内导体到辐射口径的距离对天线特性影响很小,并不需要足够长的圆波导段以维持 TM_{01} 模的传输。这也正是 VLASOV 天线与普通模式转换装置的最大区别。图 2(a)是传统 VLASOV 天线的典型方向图,该图与测试结果吻合很好。



(a) $G=14.5\text{dB}$, $\text{SLL1}=-12\text{dB}$ (b) $G=20.8\text{dB}$, $\text{SLL1}=-25\text{dB}$, $\eta=98\%$

Fig. 2 Typical directional diagrams for traditional (a) and novel (b) Vlasov antenna

图 2 传统 VLASOV 天线与新型 VLASOV 的典型方向图

3 新型 VLASOV 型天线设计方案

VLASOV 天线在工程应用中存在的主要问题包括:方向图特性不理想;增益不高;主波瓣圆对称性差;切口严重的边缘绕射造成较差的旁瓣和后瓣特性,同时也容易在 HPM 应用中造成击穿^[2]。针对这些问题,并结合具体的应用背景,我们结合数值模拟技术对 VLASOV 天线进行了优化设计。

提高 VLASOV 天线增益的传统方法是在适当位置添加一个或多个抛物柱面反射器^[7],但这种方案严重损害了整个辐射系统设计的结构紧凑性。为了减小切口处的绕射场,可采用的方法或者是减小边缘入射场,或者是减小边缘绕射系数。此外,还必须考虑到在高功率微波应用中需要安装天线罩以保证天线工作在真空状态。根据以上三点,并结合我们从数值模拟中获得的对传统 VLASOV 天线辐射特性的物理认识,我们提出一种新型 VLASOV 型天线设计方案,即在传统 VLASOV 天线切口处连接一个变张角圆锥喇叭。这一改进使得辐射口径上的电磁场分布比较对称,而且场强从中心向边缘处递减,使边缘场强大大减小。该方案既在工程上实现了天线和天线罩的一体化设计,又在电性能上弥补了传统设计的固有缺陷,使辐射波束实现了较好的圆对称性,天线增益从 14dB 提高到 20dB,第一副瓣电平从-12dB 降至-25dB。图 2(b)是新型天线方向图的模拟结果。

参考文献:

[1] Koslover R A,Koslover R A. Cremer C D. Green W P. et al.Compact, Broadband High Power Circular TM₀₁ to TE₁₁ Mode Converter[P]. U. S. Patent. 4999591.

[2] Courtney C C,Baum C E. The Coaxial Beam-Rotating Antenna(COBRA): Theory of Operation and Measured Performance, *IEEE Trans AP*, 2000,**48**(2):299—309.

[3] Haworth M, Haworth M. Allen K, Baca G, et al. Recent Progress in the Hard-Tube MILO Experiment[A]. *SPIE V*. 1997,**3158**:28—39.

[4] Vlasov S N, Orlova I M, Quasi-Optical Transformer Which Transforms the Waves in a Waveguide Having Circular Cross-Section into a Highly Directional Wave Beam[J]. *Radiophys. Quantum Electron.*,1975,**17**:115—119.

[5] Thumm M. Modes and Mode Conversion in Microwave Devices[A]. Generation and Applications of High Power Microwave[M]. 1998.

[6] Sealy P J, Vernon R J. Equivalence-Principle Model for Radiation from TE_{0n} and TM_{0n} Mode Step-Cut and Slant-Cut Vlasov Feeds[J]. *IEEE APS’1991 Digest*, 1991.1836—1839.

[7] Nakajima W M. Quasi optical reflector antennas for high power millimeter waves[A]. Proc of the EC6 Joint Workshop on ECE and ECRH [C]. UK Oxford, 1987,

[8] Dahlstrom R K, Dahlstron R K, Hadwin L J, Ruth B G, et al. Reflector Design for an X-Band Vlasov Antenna[J]. *IEEE APS’1990*, 1990, 968—971.

[9] 钟哲夫. 圆波导劈形端口辐射器的数值分析[J]. *强激光与粒子束*,1999,**11**(6):733—736. (Zhong Z F.Numerical analysis of a circular waveguide bevel cut radiator. *High power laser and particle beams*. 1999,**11**(6):733—736)

[10] Beggs J M,Beggs J H, Luebbers R J, Ruth B C, et al. Analysis of electromagnetic radiation from shaped-end radiators using the finite difference time domain method[J]. *IEEE Trans AP*, 1993,**41**(9):1324—1327)

[11] Braunstein J, Braunstein J, Connor K, Salon S, et al, Analysis of Flared End for Vlasov-Type Antenna: Comparison of Finite Element Analysis with Experiment[J]. *IEEE Trans MAG*, 1994,**30**(5):3120—3123).

Research on Vlasov-type antenna

ZHOU Hai-jing¹, DING Wu¹, LIU Qing-xiang²

(1. *Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P.O. Box 8009-11, Beijing 100088,China*;
2. *Institute of Applied Electronics, CAEP, P.O. Box 919-1015, Mianyang 621900,China*)

Abstract: In this paper, Vlasov antenna is studied systematically by the moment method (MM) and finite difference time domain (FDTD). Based on the simulation results, the process of mode conversion in the waveguide and radiation through the aperture is described in detail by clear physical pictures. The measurement results agree well with the numerical results. Furthermore, a new design of Vlasov-type antenna is presented together with a radome, which will be used in a high power microwave system, is proposed. Compared with the traditional designs, the antenna gain increased by 6dB, and the first side lobe level decreased by 13dB.

Key words: high power microwave; antenna; numerical simulation

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)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)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、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),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>