

文章编号: 1001-4322(2010)01-0131-04

三镜波束波导在高功率微波天线中的应用*

秋 实^{1,2}, 刘国治², 焦永昌¹, 黄文华², 侯 青²

(1. 西安电子科技大学 天线与微波技术国家重点实验室, 西安 710071; 2. 西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 通过对波束波导馈电卡塞格伦天线工作原理的分析, 论述了波束波导在高功率微波辐射天线中的应用及设计方法, 重点介绍了一套利用波束波导馈电高功率微波辐射天线。该天线利用由三面反射镜组成的波束波导对一个由两个抛物面镜组成的双反射面天线进行馈电, 实现了波束的快速扫描。该天线工作在 X 波段时, 功率容量大于 1 GW, 天线增益大于 50 dB。

关键词: 高功率微波; 波束波导; 卡塞格伦天线; 多模喇叭

中图分类号: TN011

文献标志码: A doi:10.3788/HPLPB20102201.0131

波束波导(BWG)馈电作为一种低传输损耗的馈电方式被广泛应用于微波和毫米波天线、特别是大型的射电望远镜中^[1-2]。一般来说, BWG 由一系列平板反射镜、二次曲面镜或透镜组成, 利用在电磁波传输途径中具有一定角度放置的曲面镜和平面镜来作为旋转关节, 实现天线波束的机械扫描。对于高功率微波(HPM)辐射应用来说, BWG 馈电的天线系统具有独特的优势^[3]。由于 HPM 源体积重量大、结构组成复杂, 并且峰值功率一般大于 100 MW, 目前最高已经达到了 3 GW, 为了避免空气中的微波击穿, 在 BWG 内波束不能重新聚焦。K. Tomiyasu 介绍了一种合成孔径雷达中采用的波束波导系统, 其馈电采用一个相控阵列馈源, X 波段时最大发射功率达到了 500 W^[4]; T. Bondo 利用一个辅助平面, 通过物理光学的方法分析了一个亚毫米波天线中波束波导的场^[5]; 钟哲夫等人设计了一种用于 HPM 辐射的束波导传输偏置抛物面系统, 避免了中心馈电的则挡效应, 同时也降低了系统的驻波比(小于 1.5)和旁瓣(-40 dB)。本文介绍一种采用三反射镜波束波导馈电的双反射面天线系统, 由于在波束波导内波束不再重新聚焦, 大大提高了天线的功率容量。

1 波束波导馈电的双反射面天线

三反射镜 BWG 馈电的双反射面天线的结构如图 1 所示, 其中, 波束波导由一个抛物面反射镜和两个平面镜组成。

首先利用偏馈抛物面反射镜 S₃ 将馈源辐射的球面波转换为平面波, 再利用两个平面反射镜 S₂ 和 S₁ 经过两次反射, 形成对天线副面有效的照射。由于电磁波从第一反射面到天线主面的整个传输过程中不再周期性聚焦, 从而大大提高了 BWG 的功率容量。同时由于此时 BWG 中传输的是平面波, 所以在该方案中副反射面不同于卡塞格伦天线的双曲副反射面, 也不同于格里高利天线的双曲副面, 而是一个与主反射面共焦的抛物反射面。

2 高功率容量馈源

在 HPM 辐射系统中, 馈源是整个系统功率容量的最终限制因素。由于在该辐射装置中, HPM 是由真空返波管产生, 所以 HPM 需要经过一个带有介质输出窗的喇叭馈送至 BWG 系统^[6]。选择内壁光滑过渡的变张角多模圆锥喇叭作为馈源, 其结构示意图见图 2。图中 L₁, L₂ 为变张角段, L₃ 为喇叭扩张段, 为了降低介质窗表面的微波场强, 特地增加了 L₄ 段, 其目的是在满足馈源电性能要求的前提下, 尽量使得介质窗远离喇叭的相位中心。

介质窗形状要保证微波尽可能垂直入射, 以降低介质表面的反射。介质窗厚度的选择首先要保证介质内表面反射最小, 其次还要满足真空密封的强度要求。

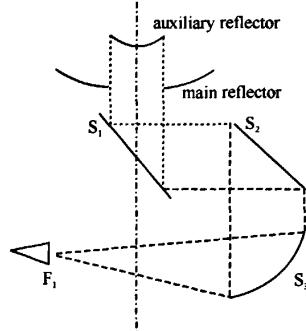


Fig. 1 Dual-reflector antenna feed by beam waveguide

图 1 波束波导馈电的双反射面天线

* 收稿日期: 2009-04-29; 修订日期: 2009-09-21

基金项目: 国家高技术发展计划项目

作者简介: 秋 实(1968—), 男, 陕西人, 博士研究生, 副研究员, 主要从事 HPM 传输及发射研究; qiuushiln@sohu.com。

设 η_1, η_2, η_3 分别为真空、介质材料和大气的波阻抗, d 为介质窗的厚度。介质表面的内表面的反射系数可表示为

$$R_1 = \frac{\eta_2(\eta_3 - \eta_1)\cos k_2 d + j(\eta_2^2 - \eta_1\eta_3)\sin k_2 d}{\eta_2(\eta_3 + \eta_1)\cos k_2 d + j(\eta_2^2 + \eta_1\eta_3)\sin k_2 d} e^{-jk_1 d_1} \quad (1)$$

近似地认为真空和大气的波阻抗相等, 则当 $\sin k_2 d = 0$, 即 $d = d_n = n\pi/k_2$ ($n=0, 1, 2, \dots$) 时, 介质表面的反射最小。介质窗厚度的强度校核按照真空碟形盖厚度公式进行, 即

$$d = \frac{1.7 p R_g M}{2\delta} \quad (2)$$

式中: p 为大气压力; R_g 为顶盖中心球面半径; 系数 $M = 0.25(3 + \sqrt{R_g}/r)$, r 为顶盖球面到喇叭的弯角半径; $\delta = \delta_b/n_b$ 为允许的最大许用应力, n_b 为材料的许用应力, n_s 为安全系数。最终确定的馈源结构参数见表 1。

表 1 多模圆锥喇叭的结构参数值

Table 1 Structure parameters of multi-mode conical horn

D_1/mm	L_1/mm	D_2/mm	L_2/mm	D_3/mm	L_3/mm	D_4/mm	L_4/mm	d/mm	R_g/mm
50	132	67.8	121	162	160	500	98	32.4	422

设计中利用高频模拟软件对该喇叭的辐射方向图进行了模拟计算, 结果见图 3。加工完成后, 在暗室利用旋转天线法对喇叭的 E 面、 H 面幅度及相位方向图进行了测试: 在正负 25° 范围内, 喇叭 E 面、 H 面辐射方向图基本等化, 等相位面相位差不超过 40°; 喇叭相位中心距离喇叭介质窗罩子外表面 438.2 mm。利用 HPM 源对该馈源进行了功率容量考核, 证明该馈源在 X 波段的功率容量大于 1.0 GW。

3 波束波导设计

在一个标准大气压下, 空气的击穿场强取 30 kV/cm(不考虑脉冲效应)。BWG 的最大承受功率可以根据圆波导传输电磁能量的计算。当传输功率大于 1 GW 时, BWG 的半径应该大于 500 mm。在 BWG 系统的电磁场计算中采用高斯波束展开法分析, 用多阶高斯模迭加可以准确地求得电磁场在任意距离上的幅相分布和传输效率。经过分析计算, 第一曲面镜采用边缘照射电平-15 dB、照射半角 23° 的高功率馈源时, 截获效率比较理想, 同时馈源喇叭与曲面镜之间仍有一定的空间距离(馈源介质输出窗距离曲面镜下沿约 3 cm)。为了实现 90° 的波束偏转和照射补偿, 曲面镜馈源偏置角为 87°, 照射偏角为 3°。

每对相邻的反射镜间距在 9.3 GHz 折算出的用高斯波束分析的菲涅耳数 N 大约为 2, 反射镜间距处于平面波区域, 当采用边缘照射电平-15 dB、口径边缘最大相位偏差 40° 的馈源照射时, 每对相邻反射镜的传输效率大约为 96.9%, 到达副反射面时传输效率为 88.5%。

4 测试结果

4.1 电性能测试

利用高功率、短脉冲 HPM 源对三镜馈电的双反射面天线进行了辐射方向图和增益测试。图 5 给出了主反射面为 5 m 天线在 9.4 GHz 时的远场方向图。可以看出, E 面半功率波束宽度 $\theta_{HPBW} = 0.42^\circ$, H 面半功率波束宽度 $\varphi_{HPBW} = 0.39^\circ$ 。利用对比法和波束宽度法测得的天线增益大于 51 dB, 第一副瓣约为-16 dB, 方向图左右不完全对称, 左侧副瓣略高于右侧, 其原因是抛物反射面下半部造成的场压缩, 造成了主反射面照射不均匀。

微波经 BWG 中三个反射面的反射并发生极化偏转, 天线输出微波的极化方向随波束的指向发射变化。馈入为垂直极化时, 输出极化偏转角度与方位扫描角度的对应关系如图 5 所示, 图中横坐标代表波束方位上的扫描角度, 纵坐标代表天线出射波极化方向和垂直方向的夹角。

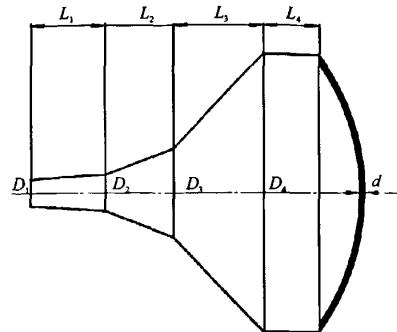


Fig. 2 Structure of smooth-walled multi-mode conical horn

图 2 变张角喇叭结构图

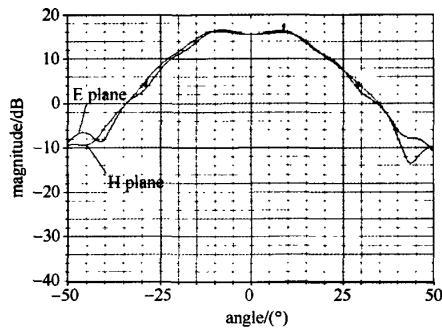


Fig. 3 Simulated radiation pattern of the conical horn

图 3 喇叭数值仿真方向图

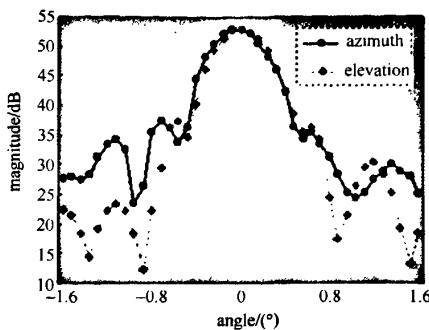


Fig. 4 Measured radiation pattern of the antenna

图4 天线实测辐射方向图

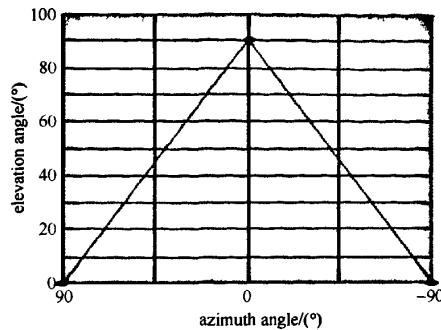


Fig. 5 Variation of polarization with beam pointing

图5 极化随波束指向的变化

4.2 天线功率容量测试

当注入到大气中的 HPM 功率足够大, 电场强度足够高, 就会引起空气击穿。击穿在空气中形成一定数密度的等离子体, 当等离子体的频率与微波频率相近时, 微波脉冲受到等离子体的反射, 造成脉冲缩短或尾蚀^[4]。对于结构尺寸一定的天线来说, 存在一个不发生击穿的最大可承受功率。该功率即为该天线的功率容量。

给天线馈入一定功率的微波, 在天线远场监测接收到的微波信号, 通过观察波形是否发生尾蚀或脉宽变窄, 即可判断天线是否存在击穿现象。图 6 给出了输入为 X 波段、功率 1.1 GW、脉宽 20 ns 的近似方波时, 在远场测到的微波波形。可以看出: 天线工作在单次时, 辐射场波形脉宽较宽, 为近似方波信号。逐渐提高脉冲重频数, 观察辐射场接收到的微波信号。当重频达到 50 Hz 时, 波形出现明显的脉宽缩短, 说明此时天线中存在着击穿现象。

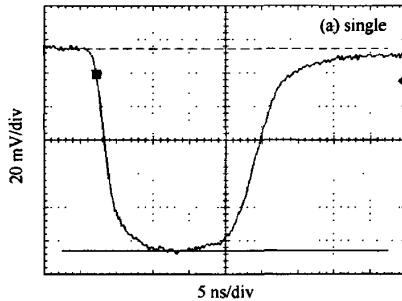


Fig. 6 Microwave signals measured in antenna's far field

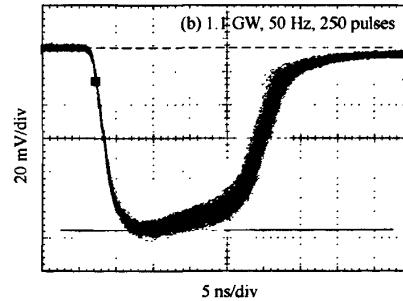


图6 天线远场测到的微波信号

5 波束波导中的击穿及抑制

5.1 击穿现象诊断

在空气发生击穿时, 会伴随着可见光的发射。利用光学摄像头对天线各部位进行探测和观察, 确定击穿发生在曲面镜附近。图 7 给出了摄像得到的击穿图像(其中图(a)为未做击穿实验时的反映馈源安装位置的照

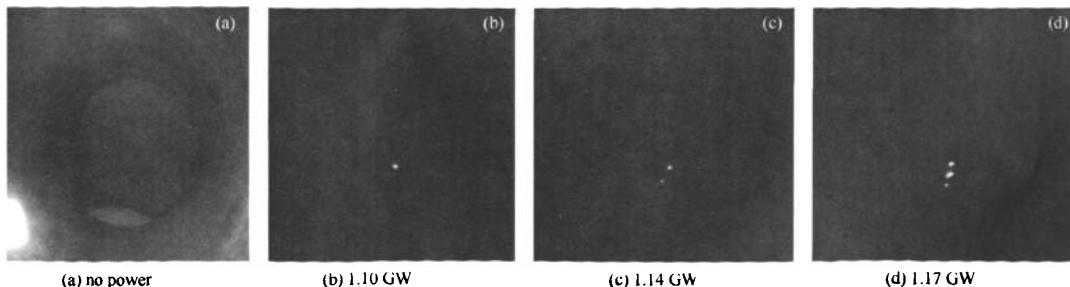


Fig. 7 Breakdown points moving to feed

图7 击穿点向馈源方向移动

片,视场正下方白色区域为馈源介质窗。图 7(b)注入功率 1.10 GW,50 Hz。图 7(c)注入功率 1.14 GW,50 Hz。图 7(d)注入功率 1.17 GW,50 Hz)。可以看出:当注入功率大于 1 GW,脉冲重复频率 50 Hz 时,击穿发生在曲面镜中心部位;随着注入微波功率的提高,击穿点(图中亮点)由 1 个变为 3 个,击穿位置向馈源方向移动。

根据以往的研究^[4]结果分析认为:击穿点移动的过程是当在某一点形成足够密度的等离子体时,使入射微波反射形成驻波,在距击穿点 $\lambda/4$ 处为波峰点,其电场幅值大于入射电场幅值,最大可达 2 倍。而 $\lambda/4$ 处电场强度的增加,将导致在该点击穿发生。上述过程再次重复,造成击穿点向馈源移动。

5.2 击穿原因分析及功率容量提高

利用 HFSS 软件对馈源和曲面镜区域进行数值模拟,结果表明:在曲面镜前一定区域反射波和入射波叠加,使得该区域的电场明显增强,导致波束波导的实际功率容量低于设计值。将该区域的空气替换为干燥的氮气后,在注入的微波功率 1.1 GW、重复频率 50 Hz 连续运行时,天线辐射远场微波波形恢复正常,说明击穿得到了有效抑制。

6 结束语

三反射镜 BWG 馈电的双反射面天线用于 HPM 辐射具有独特的优势,包括功率容量高、波束扫描范围广、可实现较高的指向精度等。随着 HPM 源产生功率的不断增加,如何进一步提高波束波导的功率容量还有待深入开展研究。

参考文献:

- [1] Gouban D, Schwering F. On the guided propagating of electromagnetic wave beams[J]. *IRE Trans on Antennas and Propagation*, 1961, 9(3): 248-256.
- [2] 黄立伟. 天线与电波传输基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. (Huang Liwei. The basis of antenna and electric wave transmitting. Xi'an: Xidian University press, 2002)
- [3] 钟哲夫, 刘盛纲. 用束波导与真空椭圆波导传输的高功率微波发射系统研究[J]. 强激光与粒子束, 1996, 8(3): 337-341. (Zhong Zhefu, Liu Shenggang. The study of two radiating systems with a beam waveguide or vacuum flexible elliptical waveguide for high power microwave applications. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, 8(3): 337-341.)
- [4] Tomiyasu K. Conceptual reconfigurable antenna for 35 GHz high-resolution spaceborne synthetic aperture radar[J]. *IEEE Trans Antennas and Propagation*, 2003, 51(3): 1069-1073.
- [5] Bondo T, Srensen S B. Physical optics analysis of beam waveguide using auxiliary planes[J]. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 2005, 53(3): 1062-1068.
- [6] Barker R J, Schamiloglu E. 高功率微波源与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (Barker R J, Schamiloglu E. High power microwave source and technology. Beijing: Tsinghua University Press, 2004)

Application of three-reflector beam waveguide to HPM radiating antenna

Qiu Shi^{1,2}, Liu Guozhi², Jiao Yongchang¹, Huang Wenhua², Hou Qing²

(1. National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-13, Xi'an 710024, China)

Abstract: Beam waveguide (BWG) feed system, composed of a series of flat reflectors, conicoid mirrors and lens can use conicoid mirror and flat mirror as rotating joint to implement mechanical scan of antenna in electromagnetic wave transmission. In this paper, the operating principle of the Cassegrain antenna fed by beam waveguide is analyzed, and the design method of the beam waveguide for the HPM radiating antenna is discussed. Emphasis is placed on a practical HPM radiating antenna fed by beam waveguide. In the antenna system, a dual-reflector antenna with two paraboloids is fed by the beam waveguide feeding system formed by three reflectors, realizing quick scanning of the beam. The antenna can operate at X-band with more than 1 GW power capacity, and its gain is greater than 50 dB.

Key words: high power microwave; beam waveguide; Cassegrain antenna; multi-mode horn

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)，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>