

W 波段波束波导天线系统的设计

谷胜明¹, 刘 昊², 张凤林², 刘少斌¹

(1 南京航空航天大学 南京 210016

2 北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘 要:介绍 W 波段波束波导天线系统,包括双模圆锥喇叭馈源、双抛物面波束波导和偏置卡塞格仑天线。设计的 24dB 增益且易于加工的双模圆锥喇叭具有圆周对称的辐射方向图。在此喇叭馈源的基础上,设计出双抛物面波束波导和偏置卡塞格仑天线。仿真结果表明,设计的双抛物面波束波导可以很好地将喇叭馈源映射到偏置卡塞格仑天线副镜的焦点。采用物理光学法对整个天线系统的幅度方向图进行仿真分析,结果显示该波束波导天线具有高增益、低旁瓣和较高的极化纯度。

关键词:W 波段; 双模圆锥喇叭; 波束波导; 偏置卡塞格仑天线

中图分类号:TN823+.28

文献标识码:A

文章编号:CN11-1780(2009)05-0049-05

引 言

在深空探测和气象测量领域,要求天线具有高增益、低旁瓣和较高的极化纯度,采用波束波导馈电的反射面天线是最优的选择之一^[1,2]。偏置卡塞格仑天线采用偏置结构避免副镜和支撑杆对主镜的遮挡,从而可以提高天线的口径效率,降低近轴旁瓣电平和电压驻波比^[3]。波束波导馈电具有低损耗、易维护等许多优点,已经广泛应用于各种反射面型天线馈电系统当中。本文采用双模圆锥喇叭作为馈源,这是因为相比波纹喇叭,双模圆锥喇叭加工简单,且相位中心稳定,主瓣方向图旋转对称,高斯主模辐射效率极高(可达 96.3%)^[4,5]。

1 双模圆锥喇叭的设计

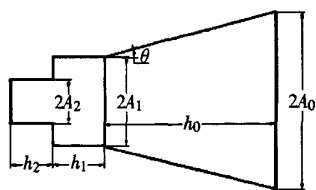


图1 双模圆锥喇叭

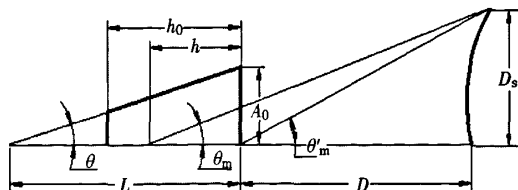


图2 喇叭照射偏置卡塞格仑天线副镜

图1为双模喇叭的设计参数图,本文中的双模圆锥喇叭采用结合偏置卡塞格仑天线副镜和主模圆锥喇叭参数的设计方法,具体步骤如下:

第一步 图2为喇叭照射偏置卡塞格仑天线副镜图,根据喇叭 24dB 增益和 -19dB 照射锥削要求,确定偏置卡塞格仑天线副镜边缘到双模喇叭相位中心的半张角 θ_m ,由于喇叭的相位中心距口面距离 h 远小于 D ,故 $\theta'_m \approx \theta_m$ 。空间因子 $\mu = kA_0 \sin \theta'_m$,故 $A_0 = \mu \lambda / (2\pi \sin \theta'_m)$,其中 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为中心频率对应的波长, D_s 为偏置卡塞格仑天线副镜对称面边缘到馈源喇叭轴线的距离。

第二步 为满足照射锥削的要求,喇叭归一化增益方向图主瓣在 -19dB 内要有良好的旋转对称性。

当双模圆锥喇叭口面模比 $M_{11} = 0.36$ 时,归一化增益方向图主瓣在 -16dB 内可以做到理想的旋转对称。仿真结果证明,当 $M_{11} = 0.36$ 时,归一化增益方向图主瓣在 -19dB 内仍有很好的旋转对称性。由 M_{11} 可以得到 τ 值($\tau = A_1/A_2$),根据 $\tau - \theta$ 曲线,从而得到 θ 值。由 $\tan\theta = A_0/L$,得 $L = A_0/\tan\theta$ 。

第三步 双模圆锥喇叭的 E_{11} 模对 H 面没有贡献,故可以根据主模喇叭归一化 H 面方向图在 -19dB 时的锥削电平和口面边缘到口面中心的相差 ϕ_m 来确定 μ 值,其中 $\phi_m \approx \pi A_0^2/\lambda L = \pi A_0 \tan\theta/\lambda = \mu \tan\theta/2\sin\theta'_m$ 。由于 ϕ_m 与 μ 值相关,设计时可由主模喇叭的 H 面方向图估算 μ 的取值范围,算出 ϕ_m ,反过来修正 μ 值,如此反复,最终确定合理的 μ 值。

第四步 由 μ 值求出 A_0 。为减小驻波并抑制高次模的传播, A_2 和 h_2 分别取 0.6λ 和 $1.1\lambda_g$,其中 λ_g 为直径 A_2 的圆波导中的波长。最后由 H_{11} 、 E_{11} 模在喇叭口面相差为零确定 h_1 段长度。具体参数值如表 1 所示。

表 1 双模圆锥喇叭的参数值

λ	λ_g	θ_m	θ'_m	τ	θ	μ
3.19mm	3.67mm	14.5°	15°	1.25	6°	5
A_0	A_1	A_2	h_0	h_1	h_2	h
9.56mm	2.39mm	1.91mm	68.23mm	3.08mm	4.00mm	9.88mm

2 波束波导的设计

高斯波束法设计波束波导快速简洁,分析精度优于几何光学但较物理光学法差。故本文采用高斯波束法设计波束波导,物理光学法精确分析。为实现馈源的理想映射,文中采用满足 Mizusawa 和 Kituregawa 准则的双抛物面波束波导^[6]。双抛物面波束波导示于图 3,两偏置抛物面镜尺寸完全相同,偏置角 Φ 由结构需求选择,文中 Φ 取 60° ,两平面镜仅起到改变波束方向的作用,设计时可先不予考虑。由于具有结构对称、宽频带以及低交叉极化特性^[7],该波束波导已广泛应用于反射面天线馈电系统中。波束波导的具体设计步骤如下:

第一步 确定偏置抛物面镜的 F 值。为减小抛物面镜的边缘衍射效应,抛物面镜一般取 $D \geq 40\lambda$ 。假设 D 取 40λ 且抛物面镜处于馈源的远场,采用 -20dB 的边缘照射,故 $\alpha \approx 15^\circ$, $F \approx D/2\tan(\alpha) \approx 238\text{mm}$,而馈源喇叭的远场距离为 $8A_0^2/\lambda < 238\text{mm}$,满足抛物面处于远场的假设。设计中取 $F = 240\text{mm}$ 。

第二步 确定抛物面镜的口径 D_0 值。由于双模圆锥喇叭辐射高斯主模的效率非常高,

故可以将辐射的电磁波近似成高斯波束,且 $\omega_0^2 = \frac{2}{k} \frac{20\lg((1 + \cos\theta'_m)/2) + 19}{20k(1 - \cos\theta'_m)\lg e}$,其中 ω_0 为馈源相位中心

处等效束腰半径。根据高斯波束理论可以求得距离相位中心 F 处的波束半径 $\omega_F = \omega_0 \sqrt{1 + (\frac{2F}{k\omega_0^2})^2}$,且距离相位中心 F 处直径为 D 的高斯波束携带能量与总的波束能量之比 $\eta = 1 - \exp(-\frac{2D^2}{\omega_F^2})$ 。当边缘照射锥

削取 -20dB 时,即 $10\lg(1 - \eta) = -20\text{dB}$,得到截获效率 $\eta = 0.99$,故 $D = \omega_F \sqrt{-\ln(1 - \eta)/2}$ 。对抛物面镜,由高斯波束理论知 $D_0 = D = 65.10\text{mm}$ 。

第三步 当平面镜尺寸取 30λ 时,边缘的绕射效应可以忽略。考虑到结构需求和遮挡效应,馈源距平面镜的距离 L 取 80mm 。使用高斯波束分析得到平面镜的截获效率为 0.999 。另一面平面镜的大小完全相同,截获效率也几乎为 1 。因此双抛物面波束波导总的截获效率为 $\eta' \approx \eta^2 = 0.98$ 。

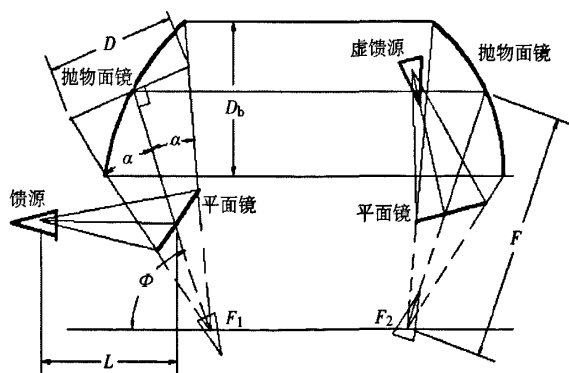


图 3 双抛物面波束波导

第四步 两抛物面之间的距离可以根据结构需求选择。考虑到波束波导系统结构的紧凑性,本次设计时取 150λ 。

3 偏置卡塞格仑天线的设计

根据天线的增益、口径效率以及结构要求合理地选择偏置卡塞格仑天线(如图 4 所示)主镜的口径 D_m 值。由主、副镜口径比估算副镜口径值,以确保副镜不对主镜造成遮挡为原则来选择偏置高度 H 值。为达到结构紧凑的目的,合理地选择焦径比 $F_m/2(D_m + H)$,从而确定 F_m 。由 D_m 、 H 和 F_m 可求出主面的半张角 θ 和偏置角 θ_0 ,馈源的半张角 Φ 取 14.5° 。根据双曲副镜的几何性质和中心对称转换原则,可以得到 M 、 e 、 Φ_0 和 β 值。其中 e 为双曲副镜的离心率, $M = (e + 1)/(e - 1)$,为放大倍数。具体参数值如表 2 所示。

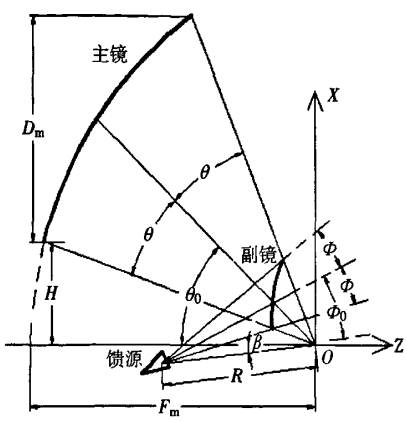


图 4 偏置卡塞格仑天线

表 2 偏置卡塞格仑天线的参数值

D_m	F_m	H	θ	θ_0	Φ	M	e	β	Φ_0	R
2m	1m	0.3m	40.5°	57.5°	14.5°	4.05	1.655	5°	20°	0.32m

4 仿真结果

4.1 双模圆锥喇叭仿真结果

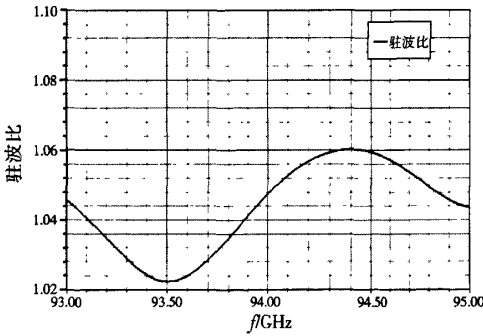


图 5 电压驻波比曲线图

双模圆锥喇叭的电压驻波比曲线如图 5 所示,其归一化增益方向图示于图 6,主极化电场的相位方向图示于图 7。

从图中可以看出,设计的双模圆锥喇叭具有极低的电压驻波比和交叉极化电平。主瓣方向图在 -19dB 锥削时 E、H 面重合得非常好且具有固定的相位中心。以上仿真结果证实了上述设计方法的正确性。

4.2 双抛物面波束波导仿真结果

双抛物面波束波导第一面平面镜反射馈源后增益方向图如图 8 所示,虚馈源增益方向图示于图 9,其主要极化电场相位方向图示于图 10。

从图中可以看出,双模圆锥喇叭馈源经平面镜反射后增益方向图基本保持不变,且双抛物面波束波

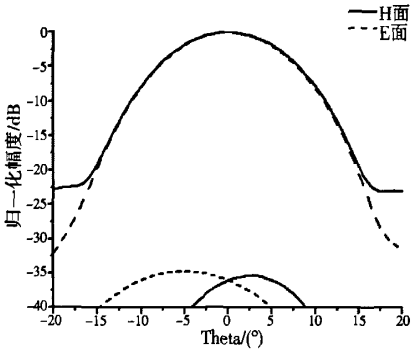


图 6 归一化的增益方向图

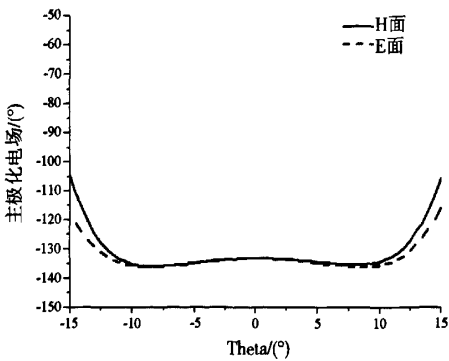


图 7 主极化电场的相位方向图

导可以很好地映射喇叭馈源。

波束波导馈电时,将虚馈源放置在偏置卡塞格仑天线的副镜焦点,即用虚馈源照射副镜。由于波束波导抛物面镜边缘照射电平为 -20dB ,截获效率只有 0.98,仍有一部分能量漏射,所以虚馈源方向图会有所恶化。

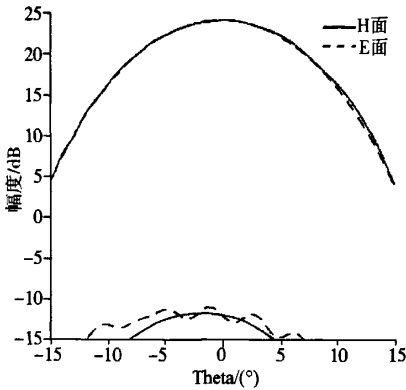


图 8 第一面平面镜反射馈源后增益方向图

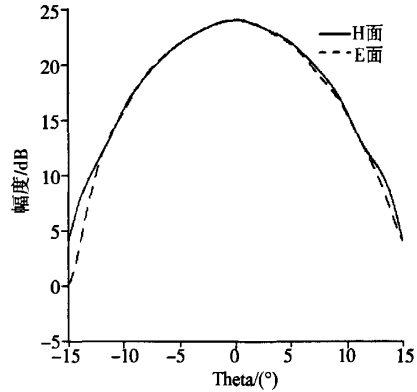


图 9 虚馈源增益方向图

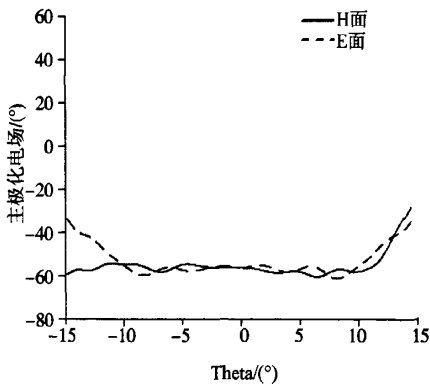


图 10 虚馈源主极化电场相位方向图

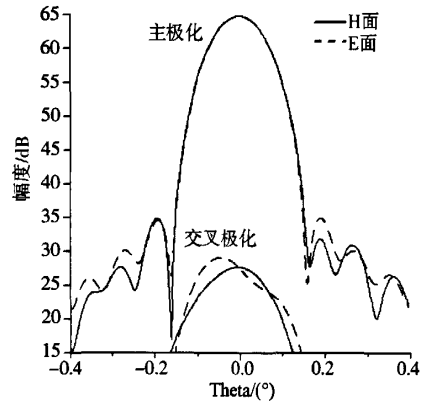


图 11 波束波导天线的近轴增益方向图

4.3 波束波导天线仿真结果

图 11 为物理光学法计算得到的波束波导天线近轴增益方向图,该结果忽略了各反射面的阻抗损耗和表面精度误差。从图 11 可以得到,波束波导天线的理论最大增益值为 64.65dB ,即物理光学效率达 75%。本次设计主副镜并没有赋形,预计赋形后天线的物理光学效率将会进一步提高。天线的 3dB 波束宽度为 0.116° 。由于虚馈源交叉极化电平较低,且采用 -19dB 锥削照射副镜,从而得到了低至 -29.7dB 的近轴旁瓣电平和 -35.5dB 的交叉极化电平。

5 结束语

本文设计了满足照射要求且各项电性能指标优越的双模圆锥喇叭馈源,给出了详细的设计过程和设计参数。并在此馈源喇叭基础上,设计了双抛物面波束波导和偏置卡塞格仑天线,从而得到了高增益、低旁瓣和较高极化纯度的波束波导天线。文中给出的仿真曲线证实了各部分采用的设计方法的正确性。该天线采用波束波导馈电不仅具有极低的馈电损耗,还可以在波束波导内方便地加入极化设备以实现频率复用。

参考文献

- [1] Im E, Durden S L, Wu C and Livermore T R. The 94 GHz Cloud Profiling Radar For the CloudSat Mission[C]. 2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings, March, 10 ~ 17, 2001.
- [2] Morabito D. Characterization of the 34-Meter Beam-Waveguide Antenna at Ka-band and X-band[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1999, 41(4): 23 ~ 24.
- [3] 叶云裳. 航天器天线(上)[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007, 166 ~ 169.
- [4] Johansson J F. A Gauss-Laguerre Analysis the Dual-mode Horn[C]. Proc. th Int. Symp. Space Thz Tech. , UCLA, 1993, 134 ~ 138.
- [5] Chen Yao, Chen Aixin, Su Donglin. The Optimization Design of the Pickett Potter Horn Antenna for Ka Band[C]. 2008 Asia-Pacific Symposium on EMC & 19th International Zurich Symposium on EMC, May, 19 ~ 22, 2008.
- [6] Mizusawa M, Kitsuregawa T. A Beam-waveguide Feed Having a Symmetric Beam for Cassegrain Antennas[J]. IEEE Trans. AP, 1973, 21(6): 844 ~ 846.
- [7] 杨可忠. 特殊波束面天线技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009, 111 ~ 114.

Design of W-band Beam Waveguide Antenna System

Gu Shengming, Liu Hao, Zhang Fenglin, Liu Shaobin

Abstract: This paper presents a W-band beam waveguide antenna system including dual-mode conical horn, dual parabolic beam waveguide and offset Cassegrain antenna. A 24dB gain and easy to fabricate dual-mode conical horn with circular symmetry radiation patterns is designed as the feed. On the basis of the feed, a dual parabolic beam waveguide and offset Cassegrain antenna are designed. A perfect image of the feed can be generated at the Cassegrain focus by the beam waveguide. Then the physical optics method is used to analyze the whole antenna system. The simulation results indicate that the antenna has high gain, low side lobe and high polarization purity.

Key words: W-band; Dual-mode conical horn; Beam waveguide; Offset Cassegrain antenna

[作者简介]

谷胜明 1984 年生, 南京航空航天大学电磁场与微波技术专业硕士研究生, 北京遥测技术研究所客座研究生。主要研究波束波导及反射面天线。

刘 昊 1976 年生, 博士, 高级工程师。主要从事遥测遥控天线的研制工作。

张凤林 1964 年生, 研究员。长期从事卫星导航与测控天线的研究与研制工作。

刘少斌 1965 年生, 教授。主要从事计算电磁学方面的研究。

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>