

应用高斯波束理论设计波束波导天线

苏丽¹, 安进朝², 路宏敏¹, 牟蔚¹

(1. 西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 河北远东哈里斯通信有限公司, 河北 石家庄 050200)

摘要: 以高斯波束理论为基础, 根据天线基本参数要求, 分析确定出波束波导系统中各反射面尺寸、反射面彼此间距及各部件相对位置。以此系统为实例, 给出各个反射面处高斯波束特征参数值, 并分析比较了反射面之间距离、反射面辐射口径等参数对截获效率的影响。波束经过两反射面反射后均会产生交叉极化模, 给出计算反射效率公式, 得出结论为: 两反射面姿态对称条件下彼此产生的交叉极化模可以互相抵消。

关键词: 高斯波束; 波束波导; 效率; 反射镜

中图分类号: TN0451

文献标识码: A

文章编号: 1003-3114(2008)01-35-2

Design of Beam Waveguide Antennas Using Gaussian Beam Theory

SU Li¹, AN Jin-chao², LU Hong-min¹, MOU Wei¹

(1. School of electronic engineering, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China;

2. Hebei Far East Harris Communications Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei 050200, China;)

Abstract: Based on Gaussian beam theory and the antenna parameters, the size of the reflectors of the beam waveguide, the distance between them and their relative locations can be determined. Some Gaussian beam parameters describing the reflectors are given as example. In addition, a series of analysis about the influence on intercept efficiency caused by the distance between the reflectors or their diameters are discussed. Cross-polarization mode will be produced when the beam is reflected by the reflectors. However, if the reflectors are symmetrical, the cross-polarization mode can be cancelled out.

Key words: Gaussian beam; beam waveguide; efficiency; reflector

0 引言

随着人类太空探测的深入, 深空探测天线技术也不断改进, 波束波导天线(Beam Waveguide—BWG)以其自身的特点越来越多地应用于深空网(Deep Space Network—DSN)。波束波导是由周期性排列的透镜或反射镜组成的波导结构, 其职能就是把BWG天线焦点的能量, 有效地传输到固定的装有接收机和发射机的地面建筑内的一点, 因此就不需要高费用的旋转箱, 解决了与此有关的空间限制的困难。不同类型的波束波导有不同的传输损耗和不同的频率适用范围。透镜型适用于光波, 双反射镜型适用于微波, 单反射镜型适用于毫米波和亚毫米波。下面着重讨论双反射镜型波束波导^[1]。一般一个双反射镜型BWG系统由4块反射镜组成: 2块平板(C、D), 2块曲板(A、B), 由一屏蔽管包围。

收稿日期: 2007-06-28

作者简介: 苏丽(1978-), 女, 硕士研究生。主要研究方向: 波束波导天线系统。

1 设计过程

(1) 天线参数要求

主反射面直径: $D_m = 34$ m;

副反射面直径: $D_s = 34$ m;

主反射面焦距: $f = 10.88$ m;

主反射面边缘对其焦点F的半张角: $\theta_v = 76^\circ$;

频率: $f = 8$ GHz。

(2) 波束波导几何参数的确定

为减少副反射面在主面开口孔径处的漏失, 天线的主反射面开口孔径应尽可能地小, 为了达到这个目的, 需要将副反射面的第2个焦点置于主反射面顶点, 且必须使波束经过BWG系统第4块反射镜后的腰部位位于主反射面顶点处。由此可以求得:

·副面距主面顶点距离: $L_1 = 10.506$ m;

·副面边缘对其第2个焦点的半张角: $\theta_m = 8.126^\circ$;

·假定初级馈源喇叭对副反射面边缘照射电平为-20 dB, 则喇叭辐射内径 $a_h = 295.6$ mm; 喇叭半

张角 $\theta_0 = 3.86^\circ$;

·偏置抛物面的偏置角为 90° ;

·偏置抛物面辐射口径选择 45λ , 即 $D_f = 1687.5 \text{ mm}$;

·偏置抛物面焦距 $f = \frac{D_f}{4\tan\theta_0} = 2781 \text{ mm}$;

·2 偏置抛物面之间间隔选择 $0.0948 \frac{D_f^2}{\lambda}$, 即

$L_H = 7200 \text{ mm}$ 。

2 计算结果与分析

通过上一节的分析, 已经得到此 BWG 系统基本参数, 本节将给出波束经过上述 BWG 系统反射镜的特征值、波束由喇叭射出至第 1 块曲板反射镜 A 的截获效率 η_{sA} 、由曲面板射出的波束被曲面板 B 截获的效率 η_{sB} 以及曲面板 A 和 B 处的反射效率等等。鉴于目前波束波导多用于深空探测或卫星通信, 而这些系统中的初级馈源多用波纹喇叭, 因此在下面的研究中以波纹喇叭为代表。为了简化计算, 典型讨论处于平衡状态的波纹喇叭馈源。

2.1 高斯波束对辐射场的描述

假设在电场极化为 \hat{y} 方向时, 波纹喇叭口面处特征参数为^[2]:

$$\frac{\zeta_0}{a_b} = 0.4550, \quad (1)$$

有 $\zeta_0 = 0.4550 a_b = 134.498 \text{ mm}$, (2)

$$R_0 = R_{\text{sep}} = 2727.6780. \quad (3)$$

则其腰部特征值为:

$$W_0 = \frac{\zeta_0}{\sqrt{1 + \left[\frac{k\zeta_0^2}{R_0} \right]^2}} = 89.9740, \quad (4)$$

$$z_0 = \frac{R_0}{1 + \left[\frac{R_0}{k\zeta_0^2} \right]^2} = 1507.0917. \quad (5)$$

根据(0,0)模基本表达式, 喇叭辐射场高斯主模描述为:

$$E_i(0,0) = \frac{1}{W_0 \zeta_i(z)} e^{-jkr} e^{j\arctan \frac{z}{kW_0}} \times e^{-\frac{k^2}{2R_i} e^{-\frac{r^2}{2\zeta_i^2(z)}}}, \quad (6)$$

式中, $\zeta_i(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{kW_0} \right)^2}$, (7)

$$R_i = z \left[1 + \left(\frac{kW_0^2}{z} \right)^2 \right], \quad (8)$$

$$\zeta_i = \zeta_r, \quad (9)$$

$$\frac{1}{R_r} = \frac{1}{R_i} - \frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_r}. \quad (9)$$

d_r 为反射波束所经过的焦点与主波束轴入射点间距离, 在本系统中 $d_r = \infty$; d_i 为人射波束所经过的焦点与主波束轴入射点间的距离, 本系统中 $d_i = 2f_{\text{抛物面}}$; z 为波束距腰部距离, 单位 mm。

反复应用式(4)、(5)、(7)、(8)和(9), 得到不同地方的高斯波束特征值如表 1 所示。

表 1 波束在各位置处特征参数值

位置	喇叭口面 (O 点)	第 1 块曲面镜 (A 处)	第 2 块曲面镜 (B 处)
ζ_i	134.498 0	370.040 3	402.882 2
ζ_r	134.498 0	370.040 3	402.882 2
R_i	2727.678 0	5751.000 4	59750.640 9
R_r	0	-169243.367 9	-6132.891 5
W	89.815 6	366.686 4	88.628 1
z	1507.091 7	-3053.971 3	-5836.099 7

2.2 反射面截获效率

① A 处截获效率可用下面公式求得:

$$\eta_{sA} = \frac{\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\frac{D_f}{2}} E_i \cdot E_i^* \rho d\rho}{\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\infty} E_i \cdot E_i^* \rho d\rho}. \quad (10)$$

高斯波束方法适合计算喇叭张角较小情况, 本系统中喇叭半张角为 8.626° , 此时 $\eta_{sA} = -0.02 \text{ dB}$ 。波束几乎被 100% 截获了。

② 反射面 B 处的截获效率

此处截获效率是指从反射镜 A 射出的波束被反射镜 B 截获的效率。经过计算 η_{sB} 随 A 与 B 之间距离的 η_{sB} 变化曲线如图 1 所示。

可以看出,

随着 A 与 B 之

间距离的增加,

截获效率下降,

当这个距离大

于 $0.1 \frac{D_f^2}{\lambda}$ (D 为

反射面直径)

后, 截获效率低

于 98%。

η_{sB} 不仅受两曲面反射镜间距离的影响, 曲面板本身辐射口径的大小也对其有很大影响。为了便于

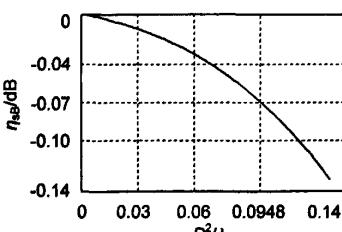


图 1 η_{sB} 与反射面间距的关系

(下转第 61 页)

路任一单路输出,1 和 2~n 其中任一路合路输出。

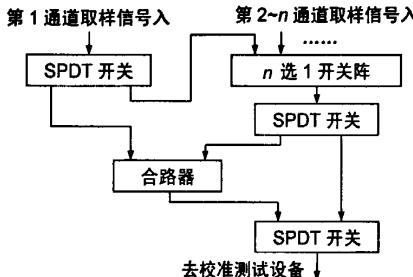


图 3 校准开关阵原理框图

3 结束语

该校准方案中系统幅度/相位误差的主要来源为,各通道移相单元幅度/移相误差、各通道耦合(取样)幅度/相位误差、校准开关阵各通道幅度/相位不一致性、耦合通道各环节射频电缆幅度/相位不一致性及校准测试设备测量误差等。经过校准算法分析,并得到某相控阵发射系统的工程验证,在 L,S 频

(上接第 36 页)

分析,也归纳了 η_{AB} 与反射面口径波长比之间的关系,如图 2 所示。

可以看出, η_{AB} 随 D 的增大而增大,当 D 取 60λ 以上时,截

获效率就几乎为 100% 了。然而为了获取 100% 的截获效率而无限增大曲面反射镜尺寸也是不现实的,在实际工程中适当选择反射镜的辐射口径,使其在满足所需截获效率的前提下尽可能得小是相当重要的。经验值一般取 $D = 40\lambda$ 就可以了。

2.3 曲面板和的反射效率

波束经过曲面板 A 反射后,一部分主模——(0,0)模会产生交叉极化模——(0,1)模,其反射效率^[1]

$$\eta_{RA} = 1 - \gamma^2, \quad (11)$$

式中,

$$\gamma = 2K_{\perp}^{(A)} \frac{a}{\sqrt{a}} \sin \theta_i^A,$$

对于抛物面 $K_{\perp}^{(A)} = \frac{\cos \theta_i^A}{2f}$, $\tilde{a} = \left(\frac{a}{\zeta(z_A)} \right)^2$ 。

同理,波束经过反射镜 B 后,(0,1)模又转换成(0,0)模,如果曲面板 A 与 B 是姿态对称的,则 2 次曲面板反射产生的交叉极化模是互相抵消的。因此,为了减小交叉极化,在 BWG 系统中应使 2 块曲

板幅度校准误差可控制到 1 dB 之内,相位校准误差可控制到 8°之内。在实际工程中可通过平时测量,建立对应频率点的幅度/相位数据表,然后从检测出来的数据中将它们去除,在 L,S 频段幅度校准误差可控制到 0.5 dB 之内;相位校准误差可控制到 2°之内。

通过理论分析和实际系统的测试验证,证实了本校准方法的有效性和工程实用性,为通信电子战领域相控阵发射系统提供了一种简单易行的在线校准方法。

参 考 文 献

- [1] 张光义.相控阵雷达系统[M].北京:国防工业出版社,2001.
- [2] Poisel R A 著.通信电子战系统导论[M].吴汉平译.北京:电子工业出版社,2003.
- [3] 程强.空间功率合成有源相控阵通道校准算法研究[D].上海大学硕士学位论文,2001.
- [4] 程春悦,吕英华.基于子空间的阵列天线幅相误差校正算法[J].无线电工程,2005,35(6):40~41.

面镜姿态保持对称。

2.4 平板反射器

平板反射镜作用是将波束旋转 90°,且第 4 块平板反射镜还需要与俯仰轴一起转动,所以需要将 2 块平板反射器安装在主方位轴上,但因为尺寸的限制,在平板边缘会产生绕射效应,经验表明,平板反射器直径 $D_p \geq 30\lambda$,其绕射影响极其微小。对平板反射镜的分析与对曲板反射器分析类似,这里就不再赘述了。

3 结束语

波束波导天线系统设备安装在半地下室,使大部分电子设备可以处在准实验室条件下,减少了外部环境如温度、湿度、风等对馈源系统的影响,方便维护和检修。应用波束波导天线,深空网系统可以比较容易地将能力扩展到高频段,而不需要增加天线重量。在文章中,根据天线参数计算波束波导系统几何尺寸及相关参数,研究了高斯波束经过这类波束波导系统时的特征参数,并对各反射面效率及其相关因素进行了分析和归纳。通过对计算结果的分析可知,适当选择反射面尺寸和间距,经过 BWG 系统的波束损耗会很小。

参 考 文 献

- [1] 章日荣.卫星地面站天线新技术研究[M].北京:国防工业出版社,1982.
- [2] 苏丽.初级馈源的高斯波束描述[J].无线电工程,2008,38(1):38~40.

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>