

一种双偏置格里高利天线的赋形方法

孙滢翔 杜彪 吴建明

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

摘要 针对平方公里阵天线(SKA)的需求, 给出了一种双偏置格里高利天线的赋形方法。通过选取馈源方向图和口面场分布函数首先对天线的主副反射面中截面曲线进行赋形设计, 再利用几何关系将副反射面中截面曲线拓展为整个副反射面曲面, 进而根据反射定律、等光程条件求取天线主反射面的坐标。最后给出了一个设计实例, 仿真结果表明, 可以实现高增益、低旁瓣等优良的辐射性能。

关键词 赋形设计; 双偏置反射面天线; 高效率; 低旁瓣

中图分类号 TN820

1. 引言

赋形双偏置天线通过合理配置主副反射面的位置和赋形主副反射面的形状, 避免了馈源及其支杆对副反射面、副反射面对主反射面的遮挡, 改善了口面场分布, 进而实现了天线高效率和低旁瓣的辐射方向图。通过利用对称转换原则^[1], 双偏置天线可以消除线极化使用时的交叉极化和圆极化使用时的波束倾斜。由于其优良的辐射性能, 引起了人们广泛的研究^[2-4]。但采用了偏置结构, 天线失去了对称性, 导致主反射面加工成本较高, 副反射面和馈源的支撑定位较为困难, 限制了该天线的广泛使用。

在国际无线电科学联盟(URSI)1993 年的京都大会上, 包括中国在内的 10 国天文学家提出了建造接收面积为一平方公里的巨型射电望远镜平方公里阵天线(SKA)的设想^[5]。SKA 将由约 3300 面 15 米口径的天线组成, 要求天线的性价比最优, 即天线具有高效率、低旁瓣、低噪声温度、最低的成本、最快的安装速度和最长的使用寿命。经反复研究比较, 双偏置天线是一种较为理想的天线形式。

双偏置天线主要有卡塞格伦型双偏置天线和格里高利型双偏置天线。由于 SKA 天线的工作频率从 300 MHz 到 10 GHz, 需要多个馈源来覆盖此频带, 同时还要使用相位阵馈源(PAF 馈源)来实现多波束观测, 因此这些馈源需放置在两个焦点处。显然卡塞格伦型双偏置天线无法放置这些馈源, 而格里高利型双偏置天线完全可实现此要求。此外, 格

里高利型双偏置天线容易实现紧凑的结构, 且由于其馈源和副反射面之间有较大空间, 易于实现馈源的远场照射。美国的 GBT 望远镜天线就使用了未经赋形的格里高利双偏置形式^[6]。

针对 SKA 天线的实际需求, 论述了一种双偏置格里高利天线的赋形方法, 并给出了一个设计实例。

2. 主副反射面赋形公式

为了在主反射面口径上获得一个关于中心截面(对称面)镜像对称的口面分布, 选用旋转对称的辐射方向图馈源, 主副反射面赋形设计步骤如下:

- 1) 利用能量守恒定律、反射定律、等光程条件赋形计算出中心截面内主副反射面曲线。
- 2) 主反射面在辐射方向的投影可划分为若干同心圆环, 这些同心圆环可对应于副反射面上的若干闭合曲线。求取这些闭合曲线即可得到整个副反射面的形状。
- 3) 利用反射定律和等光程条件, 由副反射面的形状确定出主反射面的形状。

2.1 中心截面曲线

图 1 为天线的坐标系统, O 为原点, 主副反射面所在直角坐标系分别为 XYZ 和 $X'Y'Z'$ 坐标系, 副反射面所在极坐标系 (r, θ, φ) 的极轴沿 Z' 轴方向, 主反射面上任意一点 M 的坐标为 (X_m, Y_m, Z_m) ,

对于点 M 的副反射面上任意一点 S 的坐标为 (X_s, Y_s, Z_s) 。图 2 为天线中心截面上主副面曲线。

令 $W_p(\theta)$ 为馈源的功率辐射方向图, $W_a(\rho)$ 为主反射面口径上的能量分布函数, 则由能量守恒定律得到

$$\frac{\int_0^\theta W_p(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^\theta W_p(\theta) \sin \theta d\theta} = \frac{\int_0^\rho W_a(\rho) \rho d\rho}{\int_0^\rho W_a(\rho) \rho d\rho} \quad (1)$$

式中: θ 为 S 与 O 点连线与 Z' 轴的夹角; θ_m 为馈源的照射半锥角; ρ 为 M 所对应的辐射方向投影的同心圆环半径; ρ_m 为同心圆环的最大半径。

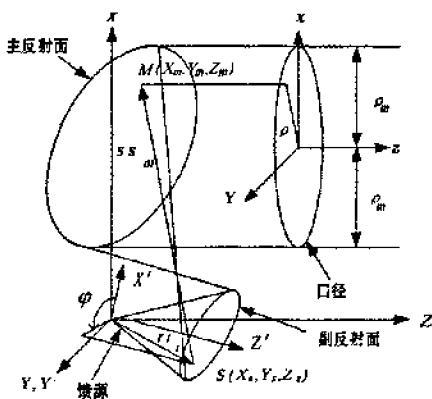


图 1 天线的坐标系统

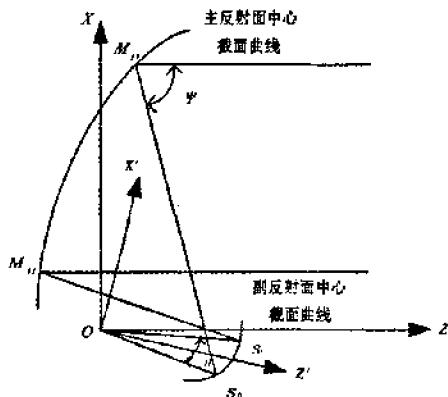


图 2 天线系统的中心截面曲线

根据等光程条件, 从馈源相心 O 点发出的射线经主副面反射到口径面上一点 Q 的距离是一常数。

$$r + \frac{r \cos \theta' - Z_m}{\cos \Psi} + (Z_0 - Z_m) = C \quad (2)$$

式中: $\theta' = \theta_m \mp \theta$; r 为 O 到 S 的矢量 OS 的长度; Ψ 为 M 点入射光线与反射光线的夹角; Z_0 为主反射

面中心点的 Z 坐标; θ_m 为 Z' 轴与 Z 轴的夹角; C 为光程。

在副反射面和主反射面的 S 点和 M 点上, 有反射定律成立:

$$\frac{1}{r} \frac{dr}{d\theta} = \pm \tan \frac{\Psi - \theta'}{2}$$

$$\frac{dZ_m}{dX_m} = \tan \frac{\Psi}{2} \quad (3)$$

主反射面中心截面曲线的 X 坐标与 ρ 的关系:

$$X_m = X_0 \mp \rho \quad (4)$$

式中 X_0 为主反射面中心点的 X 坐标。

重新整理式(1)~(4), 得到联立的微分方程:

$$\frac{dr}{d\theta} = \pm r \tan \frac{\Psi - \theta'}{2} = \pm r \tan \frac{\Psi - (\theta_m \mp \theta)}{2}$$

$$\frac{dZ_m}{d\theta} = \mp \frac{d\rho}{d\theta} \tan \frac{\Psi}{2} \quad (5)$$

式中

$$\Psi = \cos^{-1} \left(\frac{r \cos \theta' - Z_m}{C - r - Z_0 + Z_m} \right)$$

$$\frac{d\rho}{d\theta} = \frac{W_p(\theta) \sin \theta}{W_a(\rho) \rho} \frac{\int_0^\rho W_a(\rho) \rho d\rho}{\int_0^\rho W_p(\theta) \sin \theta d\theta} \quad (6)$$

消去交叉极化分量^[1], 给出 r 、 θ_m 、 X_0 和 Z_0 的初始值, Ψ 的初始值和光程 C 即可求出。通过用数值计算的方法解式(4)、(5)、(6), 可以求出以 θ 为变量的 ρ 、 r 、 X_m 和 Z_m 。于是就可以得到主副反射面的中心截面曲线。

2.2 副反射面坐标

副反射面上对应于主反射面在辐射方向投影的同心圆环的闭合曲线可认为是由馈源发射出的圆锥形射线与副反射面相交得到。这些曲线为椭圆环, 其长轴所在的对称平面与中心截面重合, 中心截面与任意一个椭圆环交于 S_0 和 S_D 两点, 即长轴的两个端点。于是, 副反射面上的 S 点的坐标 (X_s, Y_s, Z_s) 就可由下式表示:

$$r_s = r (\sin \theta \cos \varphi_s + \sin \theta \sin \varphi_s + \cos \theta_s) \quad (7)$$

式中^[4]

$$r = \frac{1}{p + q \cos \varphi}$$

$$p = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_D} \right)$$

$$q = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_D} \right) \quad (8)$$

2.3 主反射面坐标

主反射面的形状可以利用反射定律和等光程条件由副反射面的形状求得。

沿着反射线方向的单位矢量 s_m 为

$$s_m = i_r - 2(i_r \cdot n_r)n_r \quad (9)$$

副反射面上任意一点的单位法线矢量为

$$n_r = \frac{\partial i_r / \partial \theta \times \partial i_r / \partial \varphi}{|\partial i_r / \partial \theta \times \partial i_r / \partial \varphi|} \quad (10)$$

等光程条件要求

$$r + s + Z_0 - Z_m = C \quad (11)$$

式中 s 为光线由副反射面上点 S 反射到主反射面上点 M 的距离。

由几何关系容易得到

$$s s_m \cdot i_z = i_r \cdot i_z - Z_m \quad (12)$$

由式(11)、(12)可以导出

$$s = \frac{C - r - Z_0 + i_r \cdot i_z}{1 - s_m \cdot i_z} \quad (13)$$

点 O 到主反射面上点 M 的矢量 OM 表示为

$$OM = i_r + s s_m \quad (14)$$

将式(7)和(13)代入式(14), 可求得主反射面上 M 点的坐标。

3. 设计实例与仿真结果

3.1 口面场分布函数的研究

标准双偏置天线的几何参数就是赋形双偏置天线的初始赋形参数, 主反射面直径 $D_m = 15$ m; 副反射面直径 $D_s = 2.9$ m; 主反射面焦距比 $F/D = 0.36$; 馈源照射半锥角 $\theta_m = 55^\circ$ 。

口面场分布函数 $F(R)$ 决定天线的效率、旁瓣和噪声温度。初步选取三种口面场分布函数: 均匀分布 $F(R) = 1$ 、高斯分布 $F(R) = e^{-p(R/R_m)^2}$ 和准平方率分布 $F(R) = [1 - (V_m R/R_m)^2]^p$ (取 $V_m = 0.85$, $p = 0.75$) 对天线进行赋形, 利用 GRASP 9 软件对 0.3 GHz、3 GHz、10 GHz 三个频率的辐射性能进行了计算, 结果分别如表 1、表 2 和表 3 所示。

表 1 口面场为均匀分布的仿真结果

频率 /GHz	增益 /dB	口面利用率 /%	第一旁瓣 /dB	交叉极化/dB
0.3	31.90	69.75	-17.60	-23.44
3	52.98	89.44	-17.48	-29.05
10	63.55	91.78	-17.45	-29.32

表 2 口面场为高斯分布的仿真结果

频率 /GHz	增益 /dB	口面利用率 /%	第一旁瓣 /dB	交叉极化/dB
0.3	31.87	69.27	-23.87	-22.57
3	52.40	78.26	-26.90	-40.38
10	62.87	78.48	-26.97	-45.37

表 3 口面场为准平方率分布的仿真结果

频率 /GHz	增益 /dB	口面利用率 /%	第一旁瓣 /dB	交叉极化/dB
0.3	32.05	72.20	-20.50	-23.04
3	52.77	85.22	-21.17	-34.56
10	63.31	86.85	-21.01	-35.32

由表 1、2、3 可以看到: 在频率为 0.3 GHz 时, 天线的增益都相对偏低, 这是由于此时副面的电尺寸只有 3~4 个波长, 绕射现象较为严重缘故。SKA 项目要求天线在满足第一旁瓣低于 -20 dB 的情况下获得尽可能高的增益。口面场为均匀分布时, 虽然增益较高, 但是第一旁瓣仅达到 -17 dB; 口面场为高斯分布时, 第一旁瓣较低, 但是增益也偏低; 口面场为准平方率分布时第一旁瓣满足低于 -20 dB 的要求, 同时增益也较高。因此, 选用口面场分布为准平方率分布。

3.2 设计实例

以表 3 中的准平方率分布函数赋形出的主副反射面曲线如图 3 所示。其副反射面尺寸为 4.034 m \times 3.684 m, 主反射面尺寸为 18.672 m \times 14.929 m, 0.3 GHz、3 GHz 和 10 GHz 频率所对应的天线辐射方向图分别如图 4(a)、(b)、(c) 所示。

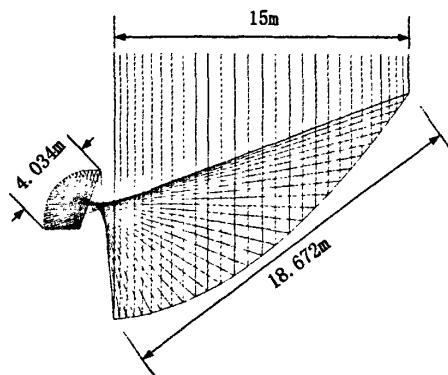


图 3 对天线赋形得到的主副面曲线

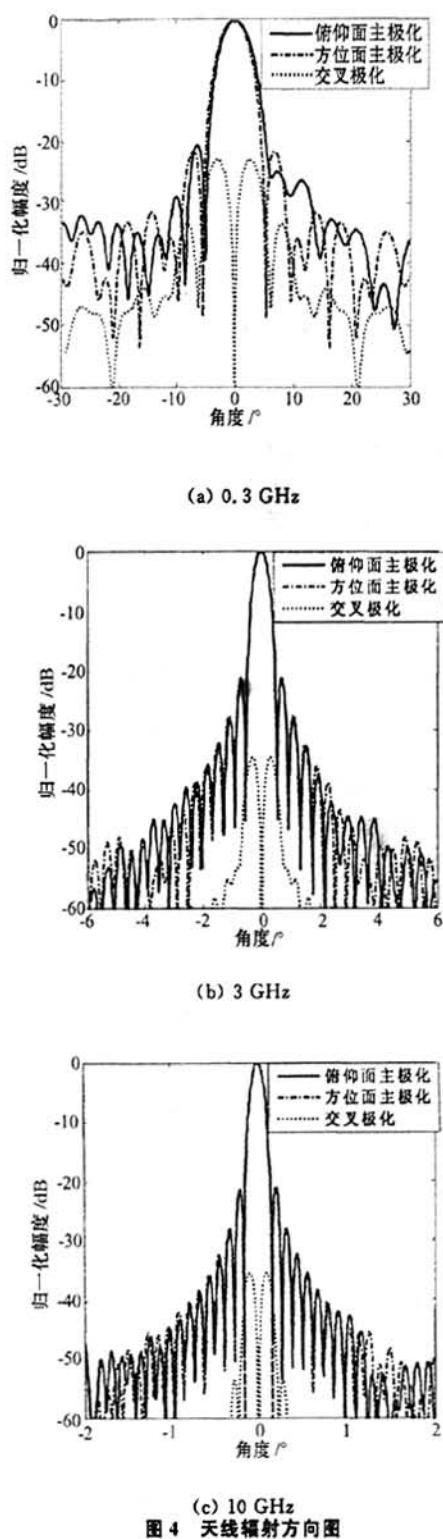


图4 天线辐射方向图

由辐射方向图可以看到,天线在0.3 GHz频率时的口面利用率、第一旁瓣电平、交叉极化电平分别

达到72.20%、-20.50 dB、-23.04 dB;在3 GHz频率时分别达到85.22%、-21.17 dB、-34.56 dB;在10 GHz频率时分别达到86.85%、-21.01 dB、-35.32 dB。

4. 结论

通过选取馈源方向图和口面场分布函数,对天线的主副面中截面曲线进行赋形,利用几何关系将副面中截面曲线拓展为整个副面,进而根据反射定律、等光程条件求得天线主反射面坐标。对天线的辐射性能进行了分析计算,选出了一种口面场分布函数,利用此分布函数对天线进行了赋形设计,得到了较高的增益和优于-20 dB的第一旁瓣。本文给出的设计方法可用于指导实际工程设计。

参考文献

- [1] 杨可忠,杨智友,章日荣.现代面天线新技术[M].北京:人民邮电出版社,1993.
- [2] LEE J, LEONARD J, CHU R S. A shaped offset-fed dual-reflector antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1979, AP-27, 2165-171.
- [3] BROWN K W, PRATA A. A design procedure for classical offset dual reflector antennas with circular apertures[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(8), 1145-1153.
- [4] 章日荣,王汉礼,杨可忠.圆孔径低交叉极化改进型偏置双馈天线[J].中国科学A辑,1986(1),91-99.
- [5] DEWENY P E, HALL P J, SCHILIZZI R T, et al. The square kilometer array[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(8), 1482-1496.
- [6] S. Srikanth, R. Norrod, L. King, D. Parker. An Overview of the Green Bank Telescope[J]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 1999, vol. 3, 1548-1551

作者简介

孙莲翔 (1988—),男,山东人,在读硕士研究生,专业为电磁场与微波技术。

杜彪 (1962—),男,河北人,研究员,博士,博士研究生导师,中国电子学会高级会员。现从事反射面天线、馈源和阵列天线的研究与设计工作。

吴建明 (1965—),男,高级工程师,1996年获得北京理工大学硕士学位。现从事电磁散射、微波天线、天线阵、宽频带和多频共用馈源的研制和设计工作。

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>