

宽角度扫描反射面天线辐射特性

陈丰, 郭陈江

(西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710072)

摘要:研究了宽角度扫描时侧馈偏置卡塞格伦反射面天线(SFOC)系统的远场特性。应用几何光学原理,对侧馈偏置卡塞格伦反射面天线的各项参数进行了设计。利用最小二乘法对反射面的最佳馈点位置进行了拟合,得到了最佳馈点位置的曲面图,并给出了馈源对副面的最佳指向。采用几何光学与基于傅立叶-贝塞尔方法的物理光学相结合的方法对扫描状态下给定尺寸的双反射面天线系统进行分析。方法具有分析速度快,精度高的优点。计算出了该天线的宽角扫描辐射特性和增益。计算结果表明,该天线在宽角扫描范围内,辐射方向图无太大畸变,增益损失小,效果好。

关键词:宽角扫描;侧馈偏置卡塞格伦反射面天线;最佳馈点位置;辐射方向图;几何光学理论;物理光学理论

中图分类号:V417⁺.6 文献标识码:B

Radiation Characteristics of Wide-angle Scanning Reflector Antennas

CHEN Feng, GUO Chen-jiang

(School of Electronics and Information, NWPU, Xi'an Shanxi 710072, China)

ABSTRACT: An analytic method of beam-scanning side-fed offset Cassegrain (SFOC) antennas is presented. The geometry optics theory is used to design the parameters of the offset Cassegrain dual-reflector antennas. The least-square method is utilized to fit the optimal feed positions (OFP), and an optimal position feed curve (OPFC) is calculated. The optimal feed direction and the contour of the sub-surface are found. Then a method combining the geometrical optics (GO) with physical optics (PO) based on Fourier-Bessel technique is proposed. The hybrid dual-reflector analysis method presented in the dissertation is shown to have higher accuracy and efficiency. Computational results indicate that the radiation patterns of the SFOC antenna have little distortion and its gain loss is small within the wide-angle scanning region.

KEYWORDS: Wide-angle scanning; SFOC; OFP; Radiation pattern; Theory of geometrical optics; Theory of physical optics

1 引言

随着现代空间和电子技术的发展,通讯和雷达设备对星载扫描天线提出了越来越严格的电性能要求。要求在较大的扫描范围里,辐射方向图无太大畸变,增益损失很小,副瓣电平满足要求。目前关于反射面分析的研究不少,但有关宽角扫描双反射面天线的分析方法的研究却不多。因此,研究此类天线的宽角扫描远场辐射特性快速、精确分析方法是十分迫切和必要的。近年来,在双反射面和多反射面天线的远场特性分析时,一般用高阶近似分析法。通常有几何光学法、物理光学法、几何绕射理论和物理绕射理论等。几何光学法(GO)在反射面天线方向图的主瓣和近轴副瓣区域可以

得到比较精确的结果,但在远轴副瓣和后向辐射范围内误差很大。物理光学法(PO)比几何光学计算更为精确,在单反射面和双反射面的分析中经常采用,但如果分析双反射面天线时,对主副面均采用PO方法进行分析,则会大大增加计算量。几何绕射理论(GTD)克服了几何光学近似法在阴影区失效的缺点,同时也改善了照明区中的几何光学解。其缺点是公式冗长复杂。物理绕射理论(PTD)在几何光学阴影边界过渡区和射线的焦散区都有效。PTD的主要困难是它的最终积分不容易计算,所以未能像GTD那样得到广泛应用。因此,为了克服以上方法的缺点,需要给出一种兼顾准确性与效率的方法,以实现对双反射面天线宽角扫描特性的快速分析。本文便采用了一种双反射面天线混合方法,即对副面采用GO进行分析,而对主面采用基于傅立叶-贝塞尔方法的PO方法进行分析,这种方法能够实现宽角扫描状态下双反射面天线远场特性的准确、快速分析。另外在高增益波束

扫描天线系统的形式上,侧馈偏置卡塞格伦(SFOC)天线^{[1],[2]}优于其它形式的反射面天线,不仅扫描性能优异,而且结构紧凑,便于在卫星平台上安装。本文便以SFOC天线为研究对象,利用射线追踪^[3]法对该天线系统的最佳馈源位置(OFP)和最佳馈源指向(OFD)进行了优化求解。消除了天线辐射场的交叉极化分量,同时也使馈源的漏射能量最小,有利于提高天线的宽角扫描特性。文中还对求得的OFP离散点进行了曲面拟合,从而提高了天线系统的工程可实现性。最后对设计好的SFOC天线,利用混合方法^[4],计算出该天线的宽角扫描特性。

2 偏置卡塞格伦天线的优化设计

图1为SFOC天线,在天线的设计中,为了消除天线辐射场的交叉极化分量,同时也使馈源的漏射能量最小。引入了等效抛物面。根据几何光学理论,对于不偏置单抛物反射面天线,当馈源置于抛物面对称轴上并沿对称轴向反射面入射时,就能够满足要求。因此,天线不扫描时,馈源对副面的中心连线应恰好位于等效抛物面的对称轴上。由此来确定SFOC的主副面参数^[5]。求出SFOC的参数值如下:

$$\begin{aligned} a &= 132.1777\lambda \quad c = 295.9856\lambda \quad \theta_c = 12.5^\circ \quad \theta_o = \\ &121.7^\circ \quad \theta_p = 100^\circ \quad \beta = 109.9956^\circ \quad F = 429.0824\lambda \quad b = \\ &264.8330\lambda \quad D = 100\lambda \quad \alpha = 29.9956^\circ \quad e = 2.2393 \quad L \\ &= 117.68\lambda \end{aligned}$$

其中:

D :主面口径在 x_moy_m 面上的投影圆直径;

a, b, c :副面的长、短轴、半焦距;

F :主面焦距;

θ_c :副面对馈源的半张角;

L :主、副面中心之间的距离;

α :馈源指向与 z_s 轴负方向的夹角;

θ_p :主面坐标系 z_m 与馈源指向的夹角;

β : z_s 与 z_m 的夹角;

θ_o :主面的偏置仰角;

e :副面的离心率。

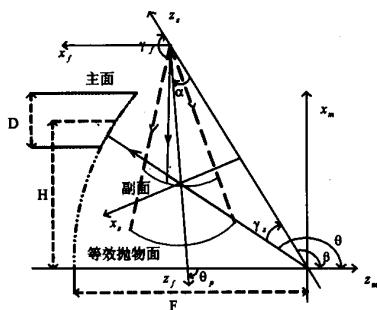


图1 SFOC反射面天线在 $y=0$ 平面内的结构

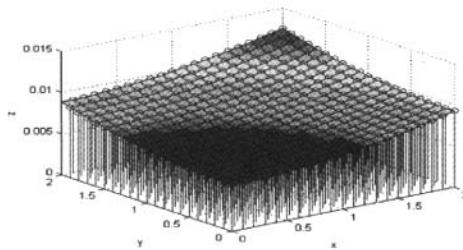


图2 OFP的曲面图

2.1 最佳馈源曲面位置的确定

当一组平行射线入射到主面上并经主副面两次反射后,天线焦区射线密度最大的位置,为能量最高的位置,即为放置馈源的位置。这种方法确定的馈源相位中心叫做最佳馈源位置(OFP)。

对于不同的扫描方向,OFP的轨迹可以拟合成一个馈源位置曲面。为适应工程需要,对OFP的轨迹作最小二乘的二次曲面拟合。在馈源坐标系下曲面三维图如图2所示。

2.2 馈源对副面的最佳指向

特定扫描角度下馈源的位置确定后,需要确定与扫描角度对应的馈源指向,以使馈源对副面上相应照射区域内有尽可能高的照射电平,实现特定扫描角度下馈源对相应照射区域的最高照射效率。把该馈源对副面的指向称之为最佳馈源指向(OFD)。

求解最佳馈源指向,首先求出 n 条入射线入射到副面上的交点坐标,然后取副面上照射区的边缘点坐标和已求得的最佳馈源位置,再求副面上一点与 n 条入射线的距离的样本方差的最小值,则所求点与馈源相位中心的连线就是馈源对副面的最佳指向。

以设计的SFOC为例,当天线扫描方位角 $\varphi=0^\circ$,俯仰角 θ 分别取 $\pm 8.5^\circ$ 和 0° 时,馈源位置OFP以及OFD的结果见表1。表中OFP为馈源在副面坐标系中的坐标,给出的是它们的坐标值(x, z);OFD为馈源中心线在副面坐标系中的方向角。

表1 $\varphi=0^\circ$ 时,OFP与OFD的比较

θ	-8.5°	0°	8.5°
OFP(λ, λ)	($-28.7094, 278.3905$)	($0, 295.9848$)	($30.7634, 312.6122$)
OFD(φ, φ)	($145.3498, 0$)	($150.0044, 0$)	($155.3057, 0$)

表2和表3是天线扫描俯仰角 θ 取正负最大扫描角度,扫描方位角 φ 为一系列值时对应的OFP和OFD。其中,OFP是馈源中心在副面坐标系中的三维坐标(x, y, z)。

表 2 不同扫描角度下馈源中心在副面坐标系中的三维坐标

θ	-8.5°	8.5°
-45°	(-19.9619, -24.3152, 283.3997)	(22.0861, 24.2554, 307.5975)
45°	(-19.9619, 24.3152, 283.3997)	(22.0861, -24.2554, 307.5975)
90°	(1.0969, 34.3410, 295.4958)	(1.0969, -34.3410, 295.4958)

表 3 不同扫描角度下馈源中心在副面坐标系中的三维坐标

θ	0°
-8.5°	(69.284867, 0, 136.626198)
0°	(90.249126, 0, 139.641802)
8.5°	(108.802828, 0, 142.897843)

3 SFOC 天线的辐射特性的分析

对于已经优化的 SFOC 天线, 采用混和方法进行了分析, 即首先通过几何光学法(GO)对副面进行分析, 得到副面上的场分布, 继而利用物理光学法(PO)对主面上的面电流进行积分, 得到天线系统的远区辐射场。

3.1 反射场求解

在由主面等效电流计算远场方向图时, 采用了快速傅立叶变换(FFT)的算法。由前面求得的最佳馈源及最佳指向, 可求出副面反射点。然后再根据馈源辐射场、副面方程和副面反射点, 由几何光学原理, 可以得到主面上网格处的磁场^[6]:

$$\vec{H}(P_m) = (DF)e^{-jkd_2}[\vec{H}(P_i) - 2[\vec{H}(P_i) \cdot \hat{n}]\hat{n}] \quad (1)$$

式中 $\vec{H}(P_i)$ 为副反射面上反射点 P_i 处的入射磁场, DF 为散射因子, \hat{n} 为 P_i 处的单位法向矢量。

3.2 次级方向图计算

馈源辐射场经副反射面反射后在主面上产生的磁场 \vec{H}^{inc} (r') 利用几何光学法计算, 则天线远区辐射场(即次级方向图)可以表示为:

$$\vec{E}(\theta, \varphi) = -jk\eta \frac{1}{4\pi} (\vec{I} - \hat{R}\hat{R}) \cdot \iint 2\hat{n} \times \vec{H}^{inc}(r') e^{jk\vec{r}' \cdot \vec{R}} ds' \quad (2)$$

其中 $\vec{H}^{inc}(r')$ 为主面上 r' 处的入射磁场, \vec{r}' 为坐标原点到积分点的矢量, \vec{R} 为坐标原点到远场观察点的单位矢量。

3.3 方向性系数

求出次级方向图电场表达式以后, 则次级辐射场的方向性系数可通过下式计算:

$$D = \frac{|\vec{E}(\theta, \varphi)|^2}{\frac{1}{4\pi} \iint |\vec{E}(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi} \quad (3)$$

3.4 SFOC 计算结果

由这些天线的辐射方向图可以看出: ①辐射方向图增益损失小, 副瓣电平优于 -17dB ; ②当馈源横向偏离焦点时, 方向图两边的副瓣不再对称, 一边副瓣的电平下降, 而另一边

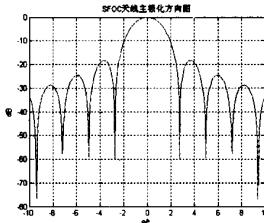


图 3 扫描角 $\theta = 0^\circ$ 时方向图

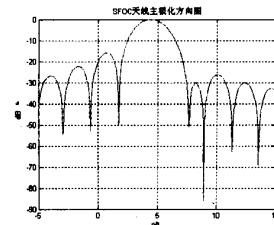


图 4 扫描角 $\theta = 4^\circ$ 时方向图

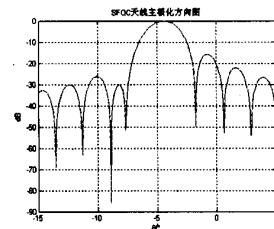


图 5 扫描角 $\theta = -4^\circ$ 时方向图

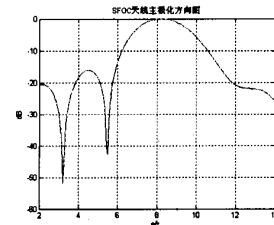


图 6 扫描角 $\theta = 8.5^\circ$ 时方向图

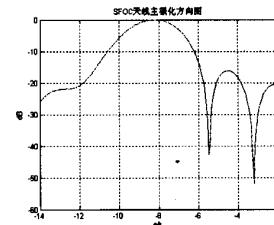


图 7 扫描角 $\theta = -8.5^\circ$ 时方向图
(下转第 111 页)

GPS 和磁航向传感器三种传感器进行组合,以此来实现无人机的导航定位功能。通过对仿真实验的结果进行分析,验证了该方案具有较高的可靠性。

参考文献:

- [1] 张树侠,孙静. 捷联式惯性导航系统[M]. 北京:国防工业出版社,1992.
- [2] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [3] D H Titterton, J L Weston. Strapdown Inertial Navigation Technology[M]. Peter Peregrinus Ltd. On behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1997.
- [4] 秦永元,张洪锐,汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,2007.

(上接第 52 页)

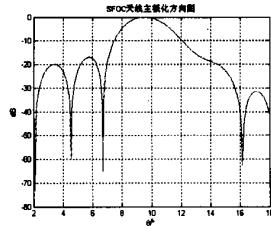


图 8 扫描角 $\theta = 10^\circ$ 时方向图

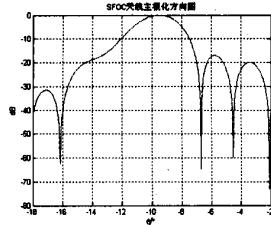


图 9 扫描角 $\theta = -10^\circ$ 时方向图

副瓣的电平升高;③随着扫描角的增加,天线方向图最大辐射特性变差。因为馈源的偏焦引起口径场的线性相位律偏移和立方相位律偏移;④天线方向图主瓣宽度随着扫描角的增加而变宽,且天线的增益下降,方向图的不对称性加剧。

4 结论

本文采用 GO/PO 混合方法对侧馈偏置卡塞格伦天线远场辐射特性进行了分析,其中,对正面分析时采用了物理光学方法,而对背面分析时则采用了几何光学方法,仿真结果与文献中结果^[7]比较,结果表明可行且精确,但其分析速度大大加强。由于天线的优化设计,消除天线辐射场的交叉极

- [5] 杨艳娟,金志华. MIMU/GPS 组合导航系统研究[J]. 中国惯性技术学报,2003,(10).
- [6] 陈哲. 捷联惯导系统原理[M]. 北京:宇航出版社,1986.

【作者简介】

- 张治生(1980-),男(汉族),陕西咸阳人,博士研究生,研究方向为组合导航、信息融合。
陈怀民(1963-),男(汉族),安徽涡阳人,副教授,研究方向为导航、制导与控制。
吴成富(1962-),男(汉族),浙江金华人,教授,研究方向为飞行控制与仿真。
吴佳楠(1977-),男(汉族),辽宁锦州人,讲师,研究方向为飞行控制与仿真。

化。计算结果表明了该天线在宽角扫描范围内,辐射方向图无太大畸变,增益损失小,效果好,副瓣电平优于 -17dB ,达到了星载天线的要求。

参考文献:

- [1] R Jorgensen, P Bailing. Dual offset reflector multibeam antenna for international communications satellite applications[J]. IEEE Trans. On AP, 1985, 33(12): 1304-1312.
- [2] C Chandler, L Hoey, R Chan. Advanced satellite antenna technology for the emerging Ka-Band [M]. TRW Space & Electronics. One Space Park, Redondo Beach, California 90274, USA, 2004-9.
- [3] A Marcos, et al. A Novel Fast Algorithm for Physical Optics Analysis of Single and Dual Reflector Antennas [J]. IEEE Trans on Magnetics, 1996, 32(3): 910-913.
- [4] 刘旭峰. 宽角扫描反射面天线的方向图分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2005-2.
- [5] Aluizio Prata. Derivation and Application of the Equivalent Paraboloid for Offset Cassegrain and Gregorian Antennas [J]. IEEE Trans. On AP, 1990, 38(8): 1141-1149.
- [6] 田琳. 偏馈抛物面天线前轴向区的辐射特性[J]. 兰州大学学报, 2005-8.
- [7] R Jorgensen, P Bailing. Dual Offset Reflector Multi-beam Antenna for International Communications Satellite Applications [J]. IEEE Trans on Antennas Propagation, 1985, 33(12): 1304-1312.

【作者简介】

- 陈丰(1983-),男(汉族),湖北人,西北工业大学电磁场与微波技术研究生,研究方向:反射面天线。
郭陈江(1967-),男(汉族),陕西人,硕士,西北工业大学电子工程系主任,教授,研究方向:天线。

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>