

# 侧馈偏置卡塞格伦天线的面赋形研究

刘少东, 刘淑芳, 焦永昌, 张福顺

(西安电子科技大学 天线与电磁散射研究所, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 为改善星载天线的宽角扫描特性, 采用射线追踪的方法, 通过优化的思想对侧馈偏置卡塞格伦(SFOC)天线的主反射面进行了面赋形设计。为增加反射面表达式的灵活性, 设计时首先根据反射面的初始数据, 以双三次 B 样条函数逼近其形状, 然后以各馈源相位中心到与其对应的扫描口径面的路径等长为优化目标, 通过 Powell 方法对样条函数的插值数据点进行调节, 最终确定了反射面的形状。分析结果表明, 面赋形工作有效降低了 SFOC 天线一维扫描和二维扫描过程中由相位误差带来的增益损失, 改善了该天线系统的宽角扫描特性。

**关键词:** 星载天线; 射线追踪; 面赋形; B 样条

中图分类号: TN823<sup>+</sup>.27 文献标识码: A 文章编号: 1001-2400(2005)04-0541-04

## Study of the shaping reflector for side-fed offset cassegrain antennas

LIU Shao-dong, LIU Shu-fang, JIAO Yong-chang, ZHANG Fu-shun

(Research Inst. of Antennas and EM Scattering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** To improve the wide-angle scanning properties of the satellite antenna, we concentrate on the shaping of the main reflector of the Side-Fed Offset Cassegrain (SFOC) antenna by the method of the ray tracing and the idea of the optimization. In the process of reflector shaping, in order to enhance the flexibility of the expression for the reflector, a two-dimensional cubic B-spline is used to approach the reflector surface according to the initial data. Then, taking the rays' paths which are equal from every feed to corresponding apertures as the optimization objective, the interpolation data points for the spline function are adjusted with Powell's direct method, and in this way, the shaped reflector surface is obtained. The analytical results indicate that the 1-D and 2-D gain degradations of the SFOC antenna due to the aberration are reduced remarkably, and thus the wide-angle scanning properties of the SFOC is improved.

**Key Words:** satellite antenna; ray tracing; reflector shaping; B-spline

反射面天线是目前通信、雷达和射电天文应用很广的一类天线<sup>[1,2]</sup>, 尤其在卫星通信中, 应用更为广泛。如何减小星载天线扫描过程中的增益损失, 一直是天线工作者们关心的一个研究课题。为实现全球扫描, 理论上只需同步卫星天线具有约  $17^\circ$  ( $\pm 8.5^\circ$ ) 视域的扫描能力, 但在实际应用和设计中, 考虑到不同子卫星间的相互干扰以及波束的指向误差, 星载天线的扫描范围需增加至  $20^\circ$  ( $\pm 10^\circ$ )<sup>[3]</sup>。这样, 随着扫描角度的增加, 反射面天线由口径相差带来的增益损失会显著增加, 因而有必要对反射面的形状进行赋形, 以减小该增益损失给天线性能带来的影响。笔者以侧馈偏置卡塞格伦(SFOC)天线<sup>[3~5]</sup>为研究对象, 运用射线追踪的方法, 通过优化的思想对该天线的主反射面进行了赋形设计。

## 1 标准 SFOC 天线结构形式简介

图 1 是 SFOC 天线在其对称面内的结构。天线主面为旋转抛物面(焦距为  $F$ ), 副面为旋转双曲面(焦距

收稿日期: 2004-08-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60171045); 天线与微波技术重点实验室基金资助项目; 教育部优秀青年教师资助项目

作者简介: 刘少东(1976-), 男, 西安电子科技大学博士研究生。

为 $2C$ ), 双曲面的远焦点与抛物面的焦点相重合, 二者对称轴的夹角为 $\pi - \beta$ . 为方便起见, 分别建立了主副面的坐标系. 其中, 主面坐标系原点选择在抛物面的焦点,  $z_m$  轴为抛物面的对称轴,  $y_m$  轴垂直纸面向外; 副面坐标系原点选择在双曲面两焦点的中心,  $z_s$  轴为双曲面的对称轴,  $y_s$  轴垂直纸面向外. 主面在  $z_m = 0$  的平面上的投影圆直径为  $D$ , 主面偏置角为  $\theta_0$ . 天线波束非扫描时, 馈源置于双曲面的近焦点上(如图 1 所示); 天线波束扫描时, 对应于每一扫描角度, 其馈源位置和指向需做相应的调整. 设计时, 利用馈源能量漏射最小和辐射场的交叉极化最低的原则来确定天线的主副面方程<sup>[6,7]</sup>.

## 2 SFOC 双反射面天线主面的赋形设计

忽略热损耗等其他效率,天线在特定扫描方向的增益可表示为

$$G = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 G_0 \quad , \quad (1)$$

式中  $G_0$  为反射面天线的理想增益值,  $G_0 = 4\pi A/\lambda^2$ ,  $A$  为扫描角度为  $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 0^\circ)$  时, 主反射面在口径面上的投影面积;  $\varepsilon_1$  为馈源的漏射效率,  $\varepsilon_1 = P'_t/P_t$ ,  $P'_t$  和  $P_t$  分别为馈源投射到反射面上的功率和馈源辐射的总功率;  $\varepsilon_2$  为天线的投影面效率,  $\varepsilon_2 = S/A$ ,  $S$  为特定扫描角度下, 主反射面在扫描口径面上的投影面积;  $\varepsilon_3$  为天线的口径效率, 影响  $\varepsilon_3$  的因素主要有天线扫描口径面上的相位误差、扫描方向的像散因子、馈源能量在主面上的渐消程度, 以及天线的交叉极化等等。当馈源能量在主面上的分布趋于均匀时,  $\varepsilon_3$  的大小主要由射线在扫描口径面上的相位误差和像散因子决定, 因而增大  $\varepsilon_3$  的值是反射面赋形工作的主要目标。赋形过程中, 为增加反射面表达式的灵活性, 可用 B 样条函数<sup>[8,9]</sup>来表示反射面的形状, 为此, 需首先给出主面矩形网格上的一组初始点数据  $P_m^{i,j}$  ( $i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N$ ), 然后用双三次 B 样条函数对这些数据点进行插值运算, 获得主面样条函数的初始表达式。另外, 为完成天线的赋形设计, 还需确定与各扫描角度对应的馈源位置。确定馈源位置时, 可将天线看作一接收系统, 利用最优扫描波束的思想<sup>[10]</sup>确定与各扫描方向对应的馈源位置。

设从第  $k$  个馈源(对应第  $k$  个扫描方向)发出的射线,经副面反射到达主面网格点  $P_m^{i,j}$ ,再经主面反射到达对应扫描口径面上的路径长为  $L_k^{i,j}$ . 于是,对于第  $k$  个扫描角度,为使从馈源发出的射线经主副面反射后到达扫描口径面上的路径误差最小,其优化的任务是使得

$$S_k^2 = (L_k^{ij} - \bar{L}_k)^2 \quad , \quad (i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

$$\text{达到最小,式中} \quad \bar{L}_k = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N L_k^{i,j} \quad , \quad k = 1, 2, \dots, K \quad . \quad (3)$$

最后,为完成天线的扫描任务,对  $K$  个扫描角度下的  $S_k^2 (k = 1, 2, \dots, K)$  进行加权求和,

$$T = \sum_{k=1}^K W_k S_k^2 = \sum_{k=1}^K [W_k \cdot (L_k^{i,j} - \bar{L}_k)^2] \quad , \quad (i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

式中  $W_k (k = 1, 2, \dots, K)$  为与不同扫描角度对应的加权系数。

于是,为确定主反射面的方程,最终的优化任务是调整主面矩形网格点  $P_m^{i,j}$  ( $i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N$ ) 的纵坐标,使得目标函数式(4) 中的  $T$  达到最小. 对  $T$  的优化可通过 Powell 直接法来完成. 另外,主面的初始数据可由标准抛物面产生.

### 3 数值模拟结果

模拟 SFOC 天线的参数(参照图 1)为: 主面口径  $D = 400\lambda$ , 主面赋形前(抛物面)的焦距  $F =$

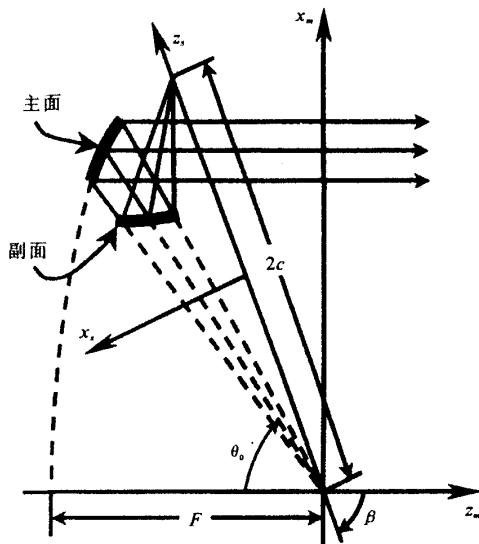


图 1 标准 SFOC 双反射面天线结构

$1722.55\lambda$ ,副面半焦距  $C = 1204.96\lambda$ ,副面离心率  $e = 2.23$ ,  $\theta_0 = 58.5^\circ$ ,  $\beta = 70.0^\circ$ . 在实现一维扫描的赋形中,“K”个扫描方向角( $\theta, \varphi$ )取为( $-10^\circ, 0^\circ$ ),( $-3^\circ, 0^\circ$ ),( $3^\circ, 0^\circ$ )和( $10^\circ, 0^\circ$ ),二维扫描的赋形中,“K”个扫描方向角( $\theta, \varphi$ )取为以下8个方向,( $\theta, \varphi$ ) = ( $10^\circ, i \times 45^\circ$ ), $i = 1, 2, \dots, 8$ . 下面通过比较主面赋形前后的口径损失参数  $\varepsilon_3$  来说明文中赋形思想的可行性和有效性.

设馈源为  $\hat{x}$  向线极化,并以下式近似其方向图:

$$f(\theta, \varphi) = \hat{\theta} \cos \varphi \cos^2 \theta - \hat{\varphi} \sin \varphi \cos^2 \theta. \quad (5)$$

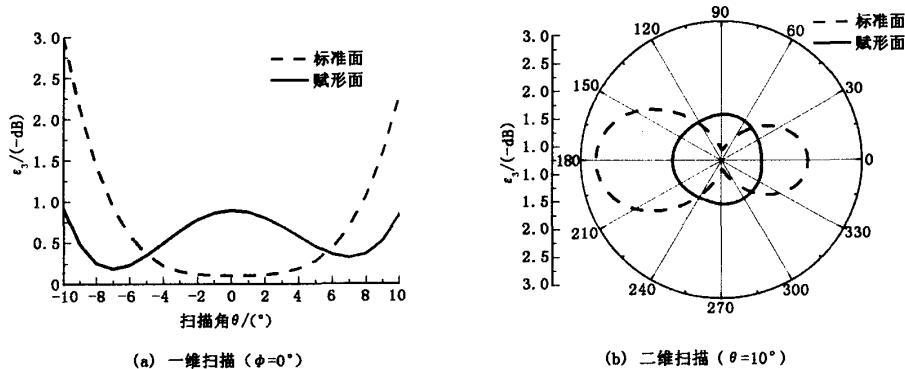


图2 SFOC 天线扫描过程中的口径损失( $\varepsilon_3$ )

图2给出了SFOC天线扫描过程中的口径损失 $\varepsilon_3$ ,其中图2(a)中的扫描角为 $\varphi = 0^\circ, \theta \in [-10^\circ, 10^\circ]$ ,图2(b)中的扫描角为 $\theta = 10^\circ, \varphi \in [0^\circ, 360^\circ]$ ,表1列出了二维扫描情形下口径损失( $\varepsilon_3$ )的一系列具体值.

表1 SFOC 天线( $D = 400\lambda$ )在主面赋形(二维扫描)前后的口径损失( $\varepsilon_3$ )

扫描角( $\theta, \varphi$ )	( $10^\circ, 0^\circ$ )	( $10^\circ, 45^\circ$ )	( $10^\circ, 90^\circ$ )	( $10^\circ, 135^\circ$ )	( $10^\circ, 180^\circ$ )
标准面/(-dB)	2.29	1.59	0.95	2.00	2.98
赋形面/(-dB)	1.46	1.54	1.58	1.56	1.62

分析计算SFOC天线系统的远场方向图时,首先通过几何光学(GO)对天线的副面进行分析,获得了天线主面上的面电流分布<sup>[11]</sup>,继而利用物理光学(PO)对求得的面电流进行积分<sup>[12]</sup>,得到了天线系统的远场方向图.馈源方向图以式(5)近似,图3以二维扫描的赋形工作为例,给出了主面赋形前后,天线远场在E面内的扫描方向图.

以上模拟结果表明,通过文中的面赋形工作,SFOC天线扫描过程中,由相位误差带来的口径损失得到了有效均衡,解决了随着扫描角度增加,天线增益急速下降的问题,从而为全球扫描星载天线的设计提供了有效的方案.

最后需提到的是,由于笔者的优化设计过程是从单馈源的情况出发的,因而使得天线的漏射损失 $\varepsilon_1$ 很高,在下一步的工作中,为减小馈源的能量漏射,将以馈源阵代替单馈源的情况,对SFOC双反射面天线的反射面和馈源阵进行一体化研究和设计.

## 4 结 论

反射面天线扫描过程中,其口径上的路径(相位)误差是造成天线增益损失的直接原因,为减小该增益损失,以SFOC天线为对象,运用射线追踪和双B样条函数的知识,通过优化的思想对该天线的主反射面进行了赋形设计.模拟结果表明,通过主面的赋形,SFOC双反射面天线一维和二维扫描过程中由相位误差带来的增益损失得到了有效降低,从而改善了该天线系统的扫描特性.另外,以此思想对SFOC天线的副面进行赋形可得到类似的扫描效果.

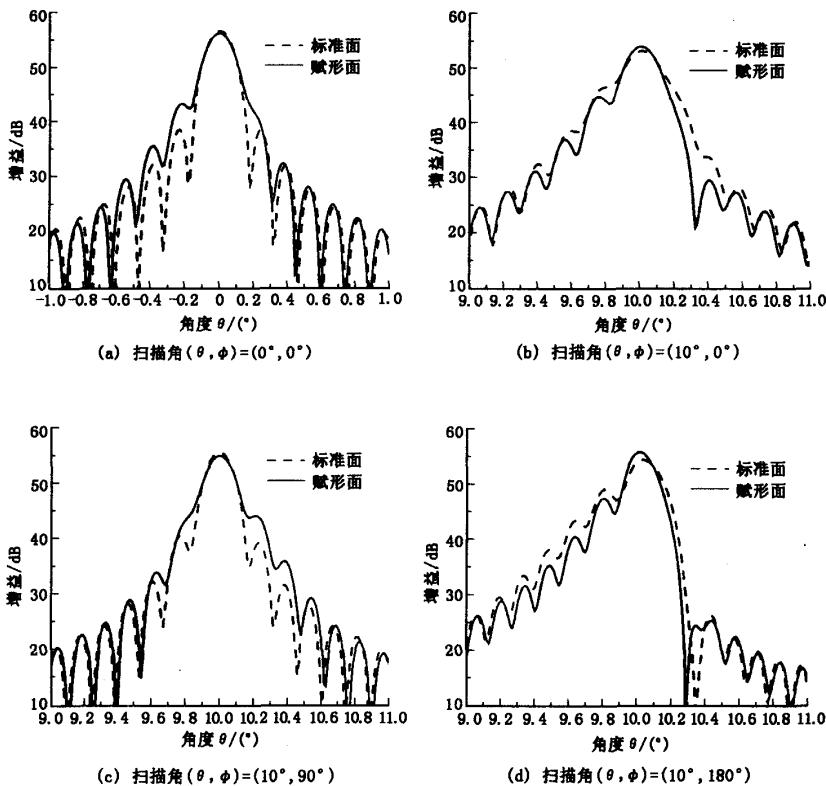


图3 SFOC天线在主面赋形(二维扫描)前后的方向图比较

## 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, 1992.
- [2] Lei Juan, Wan Jixiang, Fu Demin, et al. Design and Analysis of a Multibeam Parabolic Reflector Antenna[J]. Journal of Xidian University, 2003, 30(3): 399-402.
- [3] Jorgensen R, Balling P. Dual Offset Reflector Multibeam Antenna for International Communications Satellite Applications[J]. IEEE Trans on Antenna and Propagat, 1985, 33(12): 1304-1312.
- [4] Jr Prata A, Thompson MD, Pascalar H G. A Compact High-performance Dual-reflector Millimeter-wave Imaging Antenna with a 20/spl Times/20 Degrees Square Field of View[A]. Antennas and Propagation Society International Symposium[C]. Seattle: IEEE, 1994. 2050-2053.
- [5] Chandler C, Hoey L, Chan R. Advanced Satellite Antenna Technology for the Emerging Ka-band Market[A]. 52nd International Astronautical Federation Congress[C]. Toulouse, France: the International Astronautical Federation, 2001. 1-9.
- [6] Rush V T. Derivation and Application of the Equivalent Paraboloid for Offset Cassegrain and Gregorian Antennas[J]. IEEE Trans on Antenna and Propagat, 1990, 38(8): 1141-1149.
- [7] 刘少东二维扫描侧馈偏置卡塞格伦天线设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2003.
- [8] Boor C D. A Practical Guide to Spline[M]. New York: Springer-Verlag, 1978.
- [9] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [10] Krichevsky V, Diffonzo D F. Optimum Beam Scanning in Offset Single and Dual Reflector Antennas[J]. IEEE Trans on Antenna and Propagat, 1985, 33(2): 179-188.
- [11] Lam P T. Analysis and Optimization of Reflector Antenna Systems[D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1986.
- [12] Hung C C, Mittra R. Secondary Pattern and Focal Region Distribution of Reflector Antennas Under Wide-angle Scanning[J]. IEEE Trans on Antenna and Propagat, 1983, 31(5): 756-763.

(编辑: 李维东)

## 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](http://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](http://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](http://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>