

宽角扫描双反射面天线的方向图分析

刘旭峰, 刘少东, 张福顺, 焦永昌

(西安电子科技大学 天线与微波技术国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要: 为了计算双反射面天线的宽角扫描辐射特性, 该文给出了一种双反射面天线的方向图混合分析方法。先将几何光学和基于傅里叶-贝塞尔方法的物理光学相结合, 提出了一种有效的双反射面天线次级方向图分析方法。与文献中已有结果的比较表明, 文中的混合方法是可行和精确的, 并采用该混合方法对一个侧馈偏置卡塞格伦天线进行了分析, 给出了该天线的宽角扫描辐射特性和增益。计算结果表明, 该天线在宽角扫描过程中, 辐射方向图无太大畸变, 增益损失很小, 副瓣电平优于 -20 dB 。

关键词: 宽角扫描; 双反射面天线; 辐射方向图; 侧馈偏置卡塞格伦天线

中图分类号: TN828.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-2400(2005)01-0080-04

Pattern analysis of dual-reflector antennas under wide-angle scanning

LIU Xu-feng, LIU Shao-dong, ZHANG Fu-shun, JIAO Yong-chang

(State Key Lab. of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: In order to calculate the wide-angle scanning characteristics of the dual reflector antenna, a hybrid pattern analysis method for the antenna is presented. We combine the geometrical optics (GO) with the physical optics (PO) based on the Fourier-Bessel technique, and propose an effective hybrid secondary pattern analysis method. The simulated analysis results of the hybrid method are in good agreement with the results presented in the literature, which shows that the method is feasible and accurate. Finally, the hybrid method is used to analyze a side-fed offset Cassegrain (SFOC) antenna, and its radiation characteristics as well as its gain under wide-angle scanning are given. The calculated results show that the radiation patterns of the SFOC antenna have less distortion, its gain losses are small, and its sidelobe levels are better than -20 dB in the wide-angle scanning region.

Key Words: wide-angle scanning; dual-reflector antenna; radiation pattern; side-fed offset Cassegrain antenna

近年来, 卫星通信等技术对双反射面天线提出了很高的宽角扫描性能要求, 即要求该天线在较大的宽角扫描范围内, 辐射方向图无太大畸变, 增益损失很小, 副瓣电平满足要求。目前有关宽角扫描双反射面天线分析方法的研究不多^[1], 因此研究此类天线的宽角扫描远场辐射特性快速、精确分析方法是必要的。

在双反射面天线的远场特性分析中, 几何光学(GO)和物理光学(PO)是广泛采用的分析方法^[2-5], 利用它们可方便地计算反射面天线的远场特性。GO方法在计算反射面天线的扫描方向图时, 由于散射造成的影响, 其副瓣电平以及零深的计算存在较大的偏差^[6]。相对于GO方法, PO方法是一种较准确的方法, 但其存在计算量大的缺点, 特别是分析双反射面天线的次级方向图时, 其计算量尤为庞大。因此, 为分析双反射面天线的扫描特性, 笔者对几何光学(副面)和物理光学(正面)相结合的混合方法进行了研究。在对双反射面天线系统的副面反射场进行计算时, 由于只需考虑反射到正面的场, 副面辐射方向图的副瓣和零深对最终天线系统二次方向图影响很小, 因此可以采用几何光学方法快速准确的计算副面反射场; 而采用物理光学方法对正面进行分析, 在计算量增加不大的基础上, 能够准确地得到天线系统的远场方向图。文中把混合法的计算

收稿日期: 2004-02-18

基金项目: “十五”预研资助项目(41321070102); 天线与微波技术国家重点实验室基金资助项目(51437040101ZS0702)

作者简介: 刘旭峰(1978-), 男, 西安电子科技大学博士研究生。

结果与和文献中已有结果作了比较,结果表明,文中的混合方法是可行和精确的.文中最后采用该混合方法对一个宽角扫描侧馈偏置卡塞格伦天线进行了分析,给出了该天线的宽角扫描辐射特性.计算结果表明,该天线在宽角扫描过程中,辐射方向图无太大畸变,增益损失很小,副瓣电平优于-20 dB.

1 理论介绍

1.1 副面反射场的确定

由馈源发出的辐射场,经副面反射后到达主面特定点,根据几何光学原理,主面上的磁场可表示为^[7]

$$\mathbf{H}'(P_s) = D_F \exp(-jkd_1) \{ \mathbf{H}^i(P_s) - 2[\mathbf{H}(P_s) \cdot \mathbf{N}] \mathbf{N} \} , \quad (1)$$

式中 $\mathbf{H}^i(P_s)$ 为副反射面上反射点 P_s 处的入射磁场, D_F 为散射因子; \mathbf{N} 为 P_s 处的单位法向矢量. 散射因子 D_F 可由下式求得:

$$D_F = \{1/[1 + (d_1/R_1')]^{1/2}\} \cdot \{1/[1 + (d_1 + R_2')]^{1/2}\} , \quad (2)$$

式中 R_1' 和 R_2' 为 P_s 处的曲率半径, d_1 为副面反射点到主面对应点的距离.

1.2 基于傅里叶-贝塞尔方法的次级方向图计算

由几何光学方法得到了主面上的磁场,根据磁场可得主面上的电流^[2]:

$$J(r') = 2\mathbf{n} \times \mathbf{H}^{\text{inc}}(r') , \quad (3)$$

式中 \mathbf{n} 为主面法向矢量, $\mathbf{H}^{\text{inc}}(r')$ 为主面上 r' 处的入射磁场. 忽略球面波传播因子 $\exp(-jkR)/R$. 天线远区辐射场可以表示为

$$\mathbf{E}(\theta, \varphi) = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi} (\bar{I} - \mathbf{u}_R \mathbf{u}_R) \cdot \iint_A \mathbf{J}_s \exp(jk\mathbf{p} \cdot \mathbf{u}_R) dS , \quad (4)$$

其中 \mathbf{J}_s 为入射面电流密度; \mathbf{p} 为坐标原点到积分点的矢量; \mathbf{u}_R 为坐标原点到远场观察点的单位矢量,其表达式为 $\mathbf{u}_R = \sin\theta \cos\varphi \mathbf{u}_x + \sin\theta \sin\varphi \mathbf{u}_y + \cos\theta \mathbf{u}_z = u_x \mathbf{u}_x + v_y \mathbf{u}_y + \cos\theta \mathbf{u}_z$. 将式(4)进行变量代换可得^[8]

$$\mathbf{E}(\theta, \varphi) = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi} (\bar{I} - \mathbf{u}_R \mathbf{u}_R) \cdot \iint_A \mathbf{J}_{eq} \cdot \exp[jk(u - u_0)x + jk(v - v_0)y] dx dy , \quad (5)$$

式中 $\mathbf{J}_{eq} = \mathbf{J}_s [(1 + (\partial z/\partial x)^2 + (\partial z/\partial y)^2)]^{1/2} \exp[jk(u_0 x + v_0 y)] \exp(jkz \cos\theta)$, (6)

其中 $u_0 = \sin\theta_0 \cos\varphi_0$, $v_0 = \sin\theta_0 \sin\varphi_0$, $[1 + (\partial z/\partial x)^2 + (\partial z/\partial y)^2]^{1/2}$ $dx dy = dS$, θ_0 和 φ_0 是波束的扫描方向,积分域 A 为正面投影在口径面上的圆形区域. 为采用快速傅里叶变换,需要将正面圆形积分区域 A 扩展为方形区域 B , 如图1所示.

为使扩展后的积分结果与实际值相吻合,需引入一截断函数 T , 其定义如下:

$$T = \begin{cases} 1 & \text{口径区域 } A \text{ 内部,} \\ 0 & \text{口径区域 } A \text{ 外部.} \end{cases} \quad (7)$$

将电流 \mathbf{J}_{eq} 做傅里叶级数展开,带入截断函数 T , 可得到

$$J_{eq} = T \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \mathbf{E}_{mn} \exp\left[-j\left(\frac{2m\pi x}{D} + \frac{2n\pi y}{D}\right)\right] . \quad (8)$$

对电流积分后可得到双反射面天线的远区电场表达式为

$$\mathbf{E}(\theta, \varphi) = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \left(\frac{D}{2}\right)^2 (\bar{I} - \mathbf{u}_R \mathbf{u}_R) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \mathbf{E}_{mn} \frac{J_1(\eta_{mn})}{\eta_{mn}} , \quad (9)$$

式中 $\eta_{mn} = k\left(\frac{D}{2}\right) \left[\left(u - u_0 - \frac{2m\pi}{kD}\right)^2 + \left(v - v_0 - \frac{2n\pi}{kD}\right)^2 \right]^{1/2}$, J_1 为一阶贝塞尔函数. 为了保证计算精度的同时提高计算速度,需要对式(9)中的 m, n 设定合适的值. 在以下分析中, 经过计算验证, 当 $m = 32, n = 32$ 时, 计算结果即能满足需要的精度, 同时还保证了计算的效率.

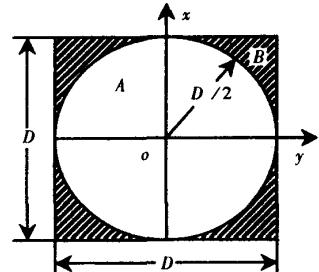


图1 积分区域扩展示意图

2 方法验证与计算

2.1 方法准确性验证

为了验证所提出的混合方法的可行和准确性,采用该混合方法,对文献[1]中的宽角扫描天线进行了分析,给出了该天线扫描角(θ, φ)分别为($0^\circ, 0^\circ$)和($10^\circ, 0^\circ$)时的方向图,如图2所示,并与文献结果进行了比较.

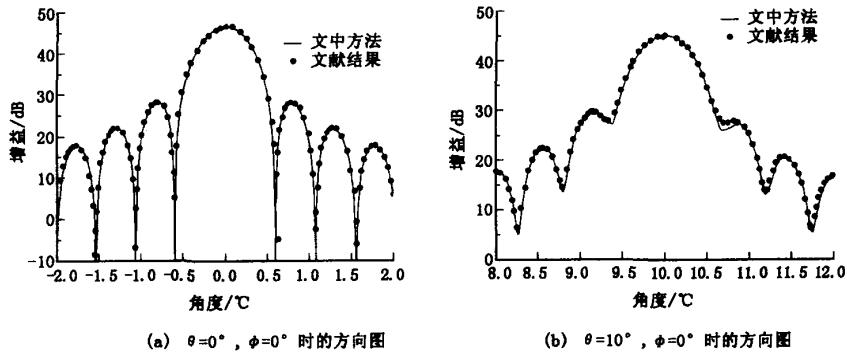


图2 宽角扫描天线非扫描及 10° 扫描方向图

由图2可以看出,计算结果与文献结果吻合良好,说明文中的混合方法是可行和精确的.

2.2 双反射面天线实例分析

在实际工作中,采用文中的混合方法对一宽角扫描侧馈偏置卡塞格伦(SFOC)双反射面天线实例进行了分析.

该SFOC双反射面天线的结构如图3所示,其主面口径 $D = 100\lambda$,主面焦距 $F = 429.0824\lambda$,主面偏置 $H = 478.6297\lambda$,副面长轴 $a = 132.1778\lambda$,副面短轴 $b = 264.8362\lambda$,主面坐标系 z_m 与副面坐标系 z_s 轴夹角为 $\beta = 70.0044^\circ$.

分析结果表明,该天线在宽角扫描过程中,辐射方向图无太大畸变,如图4所示.

根据分析结果,在表1中给出了该SFOC天线的扫描特性,由其扫描特性可以看出,该天线在宽角扫描时,增益损失很小,副瓣电平优于 -20 dB .

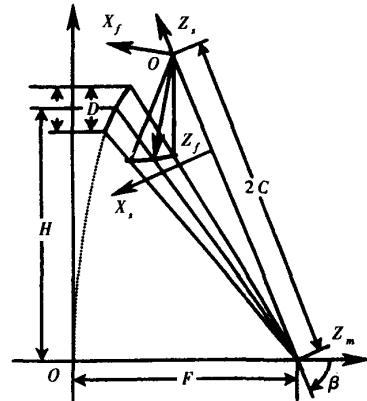


图3 SFOC 双反射面天线结构示意图

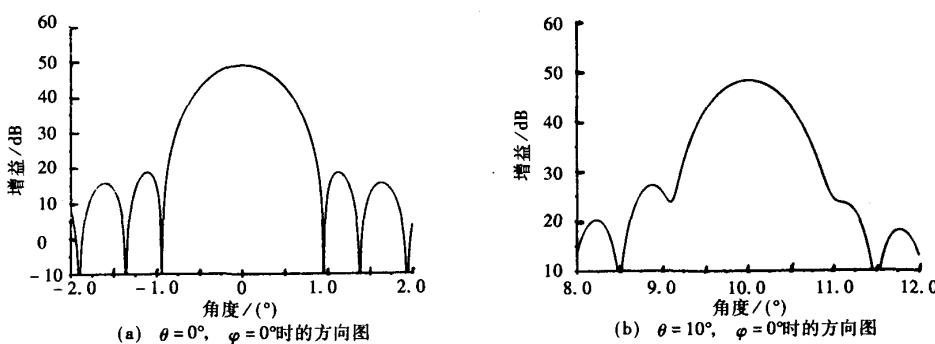


图4 SFOC 天线宽角扫描平面方向图

最后,采用文中方法对该天线扫描时的立体方向图进行了计算,下面给出了其扫描角(θ, φ)为($0^\circ, 0^\circ$)

和 $(10^\circ, 0^\circ)$ 时的计算结果,如图5所示。

表1 SFOC天线扫描特性

θ 方向扫描角/($^\circ$)	0.0	4.1	8.5	10.0	-4.1	-8.5	-10.0
增益/dB	48.87	48.71	48.39	48.22	48.93	48.84	48.75
3 dB 带宽	0.696	0.709	0.730	0.750	0.690	0.695	0.697
旁瓣电平	-30.140	-25.520	-22.097	-20.970	-29.511	-26.864	-25.630

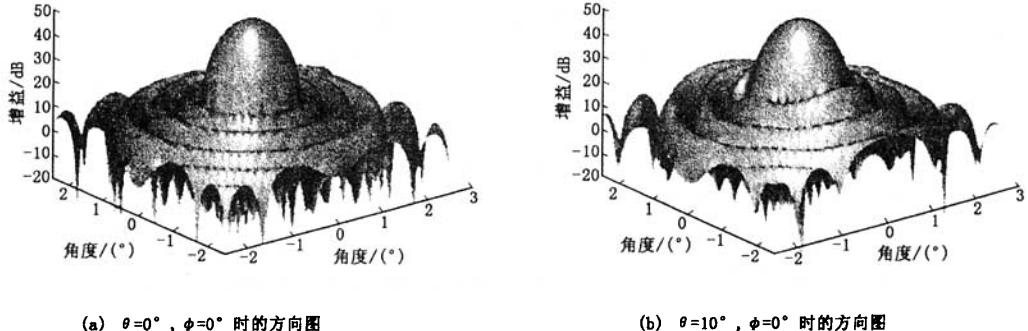


图5 SFOC天线宽角扫描立体方向图

3 结 论

对双反射面天线宽角扫描特性的分析方法进行了研究,给出了一种将 GO 和 PO 相结合的分析方法。由于时间、设备以及天线测试场地的影响,目前无法对此类天线进行测试,通过将该方法计算结果与相关文献结果进行比较,验证了该方法的正确性。与单一几何光学或物理光学分析方法相比,该混合方法能够在满足计算精度的情况下极大地提高计算效率。并采用该方法对一个双反射面设计实例(SFOC 天线)的辐射特性进行了分析,得到了理想的结果。由于 SFOC 天线的副面电尺寸很大,其边缘绕射场对最终天线次级方向图的贡献很小,因此,文中没有计入副面绕射场对远场的影响。

参考文献:

- [1] Jorgensen R, Baling P, English W J. Dual Offset Reflector Multibeam Antenna for International Communications Satellite Applications [J]. IEEE Trans on Antennas Propagation, 1985, 33(12): 1304-1312.
- [2] Scott C. Modern Methods of Reflector Antenna Analysis and Design[M]. London: Artech House, 1990.
- [3] Mittra R, Rushdi A. An Efficient Approach for Computing the Geometrical Optics Field Reflected from a Numerically Specified Surface [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1979, 27(6): 871-877.
- [4] Marcos A, Ariza A, Edita M, 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.
- [5] Kildal P S. Analysis of Numerically Specified Multireflector Antennas by Kinematic and Dynamic Ray Tracing[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1990, 38(10): 1600-1606.
- [6] Samii Y R. A Comparison Between Go/Aperture-field and Physical-optics Methods for Offset Reflectors[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1984, 32(3): 301-306.
- [7] Lee S W, Cramer P, Woo Jr K, et al. Diffraction by a Arbitrary Subreflector: GTD Solution[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1979, 27(3): 305-316.
- [8] Hung C C, Mittra R. Secondary Pattern and Focal Region Distribution of Reflector Antennas Under Wide-angle Scanning[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1983, 31(5): 756-763.

(编辑:齐淑娟)

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>