

# 偏置抛物面天线方向图的计算

李守友,龚书喜

(西安电子科技大学 天线与微波国家重点实验室 陕西 西安 710071)

**摘要:**采用表面电流法计算偏置抛物面天线远区的电场;并用 Ludwig 方法推导了远区电场的幅度和相位的近似表达式。通过 FORTRAN 程序计算得到远区电场归一化的方向图,并对不同参数天线的主平面方向图进行了计算。

**关键词:**偏置抛物面天线;天线方向图;Ludwig 方法

中图分类号:TN823<sup>+</sup>.27

文献标识码:B

文章编号:1004-373X(2006)增刊-322-02

## Computation on Pattern of Offset Parabolic Antenna

LI Shouyou, GONG Shuxi

(National Key Lab of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an, 710071, China)

**Abstract:** This paper computes the electric field of far field of offset parabolic antenna using superficial current method and deduces the extent of electric field and approximate expression of phase by using Ludwig method. The normalized antenna pattern of electric field is computed based on FORTRAN program, and attain the antenna patterns of different antenna which have different parameter.

**Keywords:** offset parabolic antenna; antenna pattern; Ludwig method

## 1 引言

在微波波段,抛物面天线是使用最广泛的一种天线,常用的对称抛物面天线由于反射面的反射作用而导致馈源喇叭驻波特性的恶化,馈源系统及其支撑结构的阻挡作用则会使增益和波束效率下降、旁瓣电平和交叉极化电平升高。在反射面较小的天线系统中,如用于中、低轨道移动卫星通信系统中的多波束天线,其影响更加严重;偏置抛物面天线通过改变反射面和馈源之间的相对位置来避免上述反射和阻挡,但是其不对称性却会导致旁瓣电平和交叉极化电平的提高,偏置抛物面天线的近似分析方法一般有两种<sup>[4,5]</sup>:

**口径场法** 先利用几何光学原理求出抛物口径面上的内场分布,然后用波动光学法的基尔霍夫绕射公式计算其辐射场;

**表面电流法** 根据馈源辐射到反射面上的电磁场求出反射面上的感应电流分布,再沿反射面进行积分来求辐射场。

## 2 理论基础

本文采用表面电流方法来计算偏置抛物面天线的远区特性<sup>[4,5]</sup>。当抛物面的焦距和反射面口径大于波长,且反射面位于馈源的远区场时,可以近似地把反射面的人射波和反射波看成平面波,从而可以用物理光学方法来求反

射面上的表面电流分布。

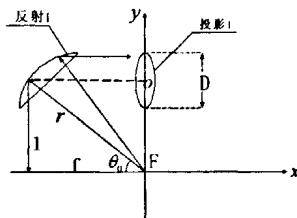


图 1 偏置抛物面天线

用物理光学法计算抛物面方向图(图 1),其公式为一个沿反射器表面 S 的曲面积分:

$$E(\theta, \phi) = \iint_S \hat{R} \times [\hat{R} \times (\hat{n} \times H_1)] e^{ik(P \cdot R)} dS \quad (1)$$

式中,  $R$  为沿  $R$  方向的单位矢量;  $\hat{n}$  为抛物面的单位法矢量;  $P$  为  $F$  点到反射点的矢量,假定抛物面处于馈源的远区,反射面上的投射磁场  $H_1$  可用投射电场  $E_1$  表示;

$$H_1 = \frac{1}{\eta} (\hat{r} \times E_1) \quad (2)$$

式中  $\eta$  为自由空间波阻抗,  $\hat{r}$  为投射方向的单位矢量。于是,式(1)中被积函数的幅度正比于:

$$\hat{\Theta}[(\hat{\theta} \cdot E_1)(\hat{n} \cdot \hat{r}) - (\hat{\theta} \cdot \hat{r})(\hat{n} \cdot E_1)] + \hat{\Phi}[(\hat{\phi} \cdot E_1)(\hat{n} \cdot \hat{r}) - (\hat{\phi} \cdot \hat{r})(\hat{n} \cdot E_1)]$$

相位部分为:

$$k(P \cdot R - P)$$

当喇叭张角很小的时候,用沿  $y'$  方向极化的  $TE_{10}$  模激励馈源,  $E_1$  可按下式计算:

$$E_1(\theta, \phi) = \frac{1}{P} f(\theta, \phi) (\hat{\theta} \sin \phi + \hat{\varphi} \cos \phi) e^{-ikP} \quad (3)$$

$$f(\theta, \varphi) = \frac{1 + \cos \theta}{2} \cdot \frac{\sin \mu}{\mu} \cdot \frac{\cos \nu}{1 - (\frac{2\nu}{\pi})^2} \quad (4)$$

式中  $d_1, d_2$  为馈源沿  $x'$  和  $y'$  方向的尺寸:

$$\mu = \frac{\pi d_2}{\lambda} \sin \theta \sin \varphi, \nu = \frac{\pi d_1}{\lambda} \sin \theta \cos \varphi,$$

$$\theta = \arctg \frac{\sqrt{x'^2 + y'^2}}{z'}, \varphi = \arctg \frac{y'}{x'}$$

对于沿  $x'$  方向极化的情况可以写出类似的公式。

### 3 分析方法

假定反射器的椭圆口径两主轴的长度分别为  $D_1$  和  $D_2$ , 偏置角为  $\theta_0$ , 反射器对馈源的张角为  $\theta^*$ , 工作波长为  $\lambda$ 。见图 2。

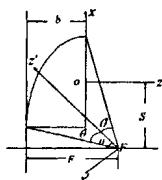


图 2 反射面坐标系

以椭圆投影口径中心  $o$  为原点, 建立反射面坐标系  $axyz$ , 以便进行数值积分; 与此坐标相联系的球坐标系  $(R, \Theta, \Phi)$  则用来表示远场方向图。在反射器坐标系中, 抛物面的方程可表示为:

$$z = [(x + S)^2 + y^2]/4F - b \quad (5)$$

式中:

$$S = D_1/2 + r_2 \sin(\theta_0 - \theta^*)$$

$$b = F - r_1 \cos(\theta_0 + \theta^*)$$

$$r_1 = 2F/[1 + \cos(\theta_0 + \theta^*)]$$

$$r_2 = 2F/[1 + \cos(\theta_0 - \theta^*)]$$

以抛物面焦点  $F$  为原点, 建立馈源坐标系  $Fx'y'z'$ , 与之相联系的球坐标系  $(r, \theta, \varphi)$  则用以表示馈源辐射场。馈源坐标系到反射面坐标系的变换为:

$$x' = -(x + S) \cos \theta_0 + (F - b - z) \sin \theta_0$$

$$y' = y \quad (6)$$

$$z' = (F - b - z) \cos \theta_0 + (x + S) \sin \theta_0 \quad (6)$$

用式(6)进行坐标变换, 可得到  $E_1$  在反射器坐标系中的表达式, 又因为:

$$dS = \sqrt{1 + (\frac{\partial z}{\partial x})^2 + (\frac{\partial z}{\partial y})^2} dxdy$$

$$dS = dxdy$$

由此可见, 在式(1)中,  $E_1$  的两个分量  $E_\theta$  和  $E_\varphi$  都可以表示为如下形式的积分:

$$E = \iint_S I(x, y) e^{jka(x, y)} dxdy$$

将被积曲面的投影口径平面划分成若干个等面积单元  $\Delta S_{mn} = \Delta x_m \Delta y_n$ 。当  $\Delta S_{mn}$  很小的时候, 用 Ludwig 法将幅

度函数  $I(x, y)$  和相位函数  $J(x, y)$  当作线形函数来处理。

$$I(x, y) = a_{mn} + b_{mn}(x - x_m) + c_{mn}(y - y_n)$$

$$J(x, y) = \alpha_{mn} + \beta_{mn}(x - x_m) + \xi_{mn}(y - y_n)$$

$$x, y \in \Delta S_{mn}$$

式中:

$$a_{mn} = \frac{1}{4} [3I(x_m, y_n) - I(x_{m+1}, y_{n+1}) + I(x_{m+1}, y_n) + I(x_m, y_{n+1})]$$

$$b_{mn} = \frac{1}{2\Delta x_m} [I(x_{m+1}, y_n) - I(x_m, y_n) + I(x_{m+1}, y_{n+1}) - I(x_m, y_{n+1})]$$

$$c_{mn} = \frac{1}{2\Delta y_n} [I(x_m, y_{n+1}) - I(x_m, y_n) + I(x_{m+1}, y_{n+1}) - I(x_{m+1}, y_n)]$$

$$x_{m+1} = x_m + \Delta x_m$$

$$y_{n+1} = y_n + \Delta y_n$$

将上式中的  $I$  换成  $J$ , 即得到  $a_{mn}, \beta_{mn}, \xi_{mn}$  的公式, 这样, 与  $\Delta S_{mn}$  所对应的曲面单元  $\Delta S$  对方向图的贡献为:

$$\Delta E_{mn} = e^{jka} (a_{mn} AB + b_{mn} A'B + c_{mn} AB')$$

式中:

$$A = \begin{cases} \frac{1}{jk\beta_{mn}} (e^{jka} - 1), & \beta_{mn} \neq 0 \\ \Delta x_m^2, & \beta_{mn} = 0 \end{cases}$$

$$A' = \begin{cases} \frac{1}{jk\beta_{mn}} (\Delta x_m e^{jka} - A), & \beta_{mn} \neq 0 \\ \frac{1}{2} \Delta x_m^2, & \beta_{mn} = 0 \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} \frac{1}{jk\xi_{mn}} (e^{jka} - 1), & \xi_{mn} \neq 0 \\ \Delta y_n, & \xi_{mn} = 0 \end{cases}$$

$$B' = \begin{cases} \frac{1}{jk\xi_{mn}} (e^{jka} - 1), & \xi_{mn} \neq 0 \\ \Delta y_n, & \xi_{mn} = 0 \end{cases}$$

将各  $\Delta E_{mn}$  叠加起来, 即可得到偏置抛物面天线的远场方向图。

### 4 计算结果与分析

用本程序分析了多种偏置抛物面天线, 图 3 和图 4 给出了两个天线的主平面方向图(点图为参考文献图形, 线图为程序计算出来的图形)。天线的工作波长为 75.95mm, 其几何尺寸见表 1。

表 1 天线的几何尺寸

参数	$d_1$	$d_2$	$D_1$	$D_2$	$F$	$\theta_0$	$\theta^*$	(长度单位为 mm)	
								偏置方向	偏置方向
天线(1)	96.2	120	1 300	620	650	45	45	$y'$	$y'$
天线(2)	120	180	1 050	675	780	38.8	33	$y'$	$y'$

(下转第 328 页)

- Kolloquium Technische Universität Ilmenau, 2003.
- [2] 宋登元. SiC器件基本制备工艺的原理与发展现状[J]. 半导体技术, 1994(2).
- [3] Palmour J W, Davis R F. Dry Etching of  $\beta$ -SiC in  $CF_4 + O_2$  Mixtures J Vac Sci. Technol. 1986, A4(3): 590.
- [4] 柴常春, 杨银堂, 朱作云, 等碳化硅(SiC)器件制造工艺中的干法刻蚀技术[J]. 西安电子科技大学学报, 1998, 25:(5).
- [5] 柴常春, 杨银堂, 李跃进, 等. 3C-SiC单晶薄膜的干法刻蚀研究[J]. 西安电子科技大学学报自然科学版, 2001, 28:(1).
- [6] American National Standard, ANSI TL 413 - 1995, for Telecommunications Network and Customer Installation Interfaces Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) Metallic Interface[S].
- [7] 柴常春, 杨银堂, 李跃进, 等.  $\beta$ -SiC薄膜在  $SF_6$  和  $SF_6 + O_2$  中的等离子体刻蚀研究[J]. 物理学报, 1999, 48:(3).
- [8] Eduardo Pereira Stevens, Phil Mawby, Mark Pritchard, et al. Reactive Ion Etching of 4H-SiC in  $C_2F_6 - O_2$  and  $C_2F_6 - Ar$  Mixtures. PROC. 23rd International Conference on Microelectronics(MIEL 2002), Vol 2, NI, Yugoslavia, 12 - 15 May, 2002.
- [9] 吴振宇, 汪家友, 杨银堂, 等. 电子回旋共振等离子体的刻蚀技术[J]. 真空电子技术, 2004(2).
- [10] Femish J R, Xie K, Zhao J H. Smooth Etching of Single Crystal 6H-SiC in an Electron Cyclotron Resonance Plasma Reactor. Appl. Phys. Lett., 1994, 64(17).
- [11] 张鉴, 黄庆安. ICP刻蚀技术与模型[J]. 微纳电子技术, 2005(6).
- [12] Liudi Jiang, Plank N O V, Blauw M A, et al. Dry Etching of SiC in Inductively Coupled  $Cl_2/Ar$  Plasma. J. Phys. D: Appl. Phys. 2004, 37.
- [13] Jiang L, Cheung R. Impact of Ar Addition to Inductively Coupled Plasma Etching of SiC in  $SF_6/O_2$ . Microelectronic Engineering, 2004.
- [14] Jiang L, Cheung R, Brown R, et al. Inductively Coupled Plasma Etching of SiC of SiC in  $SF_6/O_2$  and etch-induced Surface Chemical Bonding Modifications. J. Appl. Phys. 2003, 93(3).
- [15] Kim D W, Lee H Y, Park B J, et al. Thin Solid Films. 2004, 447 - 448: 100 - 104..
- [16] Hopkins J, Lea L, Nicholls G, et al. Plasma Sources for High-rate Etching of SiC. Solid State Technology, 2005.

**作者简介** 徐俊平 女, 1983年出生, 西安电子科技大学在读硕士, 2001~2005年在西安电子科技大学学习, 以优异成绩毕业, 获得电子科学与技术专业学士学位, 同年被保送西安电子科技大学微电子学院研究生。目前攻读的专业为超大规模集成电路设计。

(上接第323页)

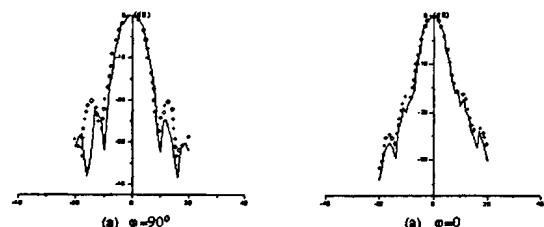


图3 天线(1)的主平面方向图

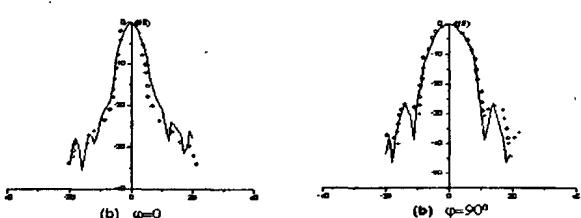


图4 天线(2)的主平面方向图

结果表明, 计算得出得图形能够与参考文献的图形良好的吻合, 适合与工程上的计算。但是本种方法有一定

的限制, 馈源仅限于线极化形式, 由于忽略了馈电喇叭口面上的相位变化, 因而只适用于计算小张角角锥喇叭馈电的情况。

#### 参 考 文 献

- A. C. Ludwig. Computation of Radiation Patterns Involving Numerical Double Integration. IEEE Trans. 1968, AP - 16: 767 - 769.
- Craig Scott. Modern Methods of Reflector Antenna Analysis and Design. Rockwell International El Segundo, California.
- A. C. Ludwig. Comments on the Accuracy fo the Ludwig Integration Algorithm. IEEE Trans. Antennas Propagat, 1998, AP - 36: 578 - 579.
- 魏文元, 宫德明, 陈必森. 天线原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- 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.

**作者简介** 李守友 男, 1980年出生, 现为西安电子科技大学微波与电磁场专业在读研究生, 主要研究方向为电磁散射, 电磁学数值方法研究。

龚书喜 男, 1957年出生, 现为西安电子科技大学教授, 博士生导师, 西安电子科技大学天线与电磁散射研究所所长, 天线与微波技术国家重点实验室主任。

## 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>