

文章编号:1001-9014(2012)01-0042-05

## 毫米波赋形偏馈双反射面天线技术

陈鑫, 屈劲, 潘文武, 余川, 陈世韬, 施美友

(中国工程物理研究院应用电子学研究所高功率微波技术实验室, 四川绵阳 621900)

**摘要:**为了实现一种具有高口面辐射效率、斜波束出射能力的口径天线,采用几何光学方法设计了一种偏馈双反射面天线.天线主反射面采用赋形设计,副反射面的设计过程中采用 Snell 定理作为约束条件.通过理论公式、数值模拟仿真和实验测试研究,实现了一种出射波束口径为 110 cm、天线口面场分布为抛物形分布、波束出射方向与垂直方向成 20° 夹角的赋形偏馈双反射面天线.在中心频率 95 GHz 下,实测天线增益为 59.7 dB,第一副瓣电平为 -19 dB,天线口径效率达到 78%.

**关键词:**赋形;偏馈;几何光学;口径效率

**中图分类号:**TN820 **文献标识码:**A

## The shaped millimeter-wave antenna with offset feed and dual-reflector

CHEN Xin, QU Jin, PAN Wen-Wu, YU Chuan, CHEN Shi-Tao, SHI Mei-You

(Institute of Applied Electronics, CAEP, Laboratory of high power microwave Technology, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** A shaped scheme based on geometric optics for offset fed dual reflector antenna is presented. A ray tube emerging from a symmetric feed horn is transformed, after reflections, into a circular beam with a uniform phased and a prescribed radial power distribution on the aperture. Snell's law was imposed on the subreflector. Based on this design solution, theoretical analysis, numerical simulation and experimental test were carried out for a 110 cm dish baseline system with a angle of 20 degrees between X axis and the beam. The experiment shows that at 95 GHz, the antenna has a 78% aperture efficiency and the minor lobe meets a -19 dB criterion and the gain is 59.7dB.

**Key words:** shaped; offset fed; geometric optics; aperture efficiency

**PACS:** 84.40. Ba

### 引言

近年来,国内外对毫米波领域进行了广泛、深入的研究,赋形偏馈双反射面天线就是毫米波天馈系统的研究热点问题之一.赋形偏馈双反射面天线主要应用于卫星通信、毫米波发射等系统中,其优点是利用赋形的特点可以获得良好的口面分布从而使天线具有很低的副瓣和很高的辐射效率<sup>[1-4]</sup>,这一优点相比于传统类型的天线具有很大的优势.但传统赋形偏馈双反射面天线的波束出射方向均为平行于坐标轴,在实际应用当中多有不便<sup>[5-7]</sup>.研究了一种任意波束出射角度、任意口面分布的高效率赋形偏馈双反射面天线设计方法.通过数值模拟与实验结

论的比较,验证了该设计方法的可行性.

### 1 理论依据及相关公式

#### 1.1 理论依据

由于毫米波波长很短,在很大程度上接近于光的性质,因此在天线设计过程中,采用了几何光学相关设计理论.图 1 为赋形偏馈双反射面天线系统在 XOZ 面上的投影.天线系统包括圆锥喇叭馈源、副反射面、主反射面.天线系统可以设计为 Cassegrain 型或者 Gregorian 形,在设计过程中将使用以下几个光学定理作为约束条件:

1) 光线传播的能量守恒定律

使用该定律可以将圆锥喇叭的口面分布函数转

收稿日期:2010-12-21,修回日期:2011-06-18

基金项目:国家高技术发展计划项目(2009AA8030106)

Foundation item: National Programs for High Technology Research and Development of China(2009AA8030106)

作者简介:陈鑫(1981-),男,甘肃兰州人,助理研究员,硕士,主要研究领域为毫米波传输与发射技术. E-mail: chenx\_frank@sohu.com.

Received date: 2010-12-21, revised date: 2011-06-18

化成为在与喇叭同轴的圆形口面上的能量分布函数.

## 2) Snell 定律

在本系统设计中,为了简化建模过程的公式计算及编程实现,Snell 定律只用于副反射面的设计中.

## 3) 光径长度相等

要求从馈源发出的光线经过两个反射面反射后到达检测面的传输距离相等、出射的光线相互平行.

## 1.2 公式分析

如图 1 所示,副反射面用三维坐标  $(x_{small}(\theta, \phi), y_{small}(\theta, \phi), z_{small}(\theta, \phi))$  表示,而主反射面可以用三维坐标  $(x(\theta, \phi), y(\theta, \phi), z(\theta, \phi))$  表示. 坐标轴的原点位置位于馈源的相心位置  $(0, 0, 0)$ . 由馈源中心出发的光线确定了两个反射面的几何中心位置:副反射面的中心位置位于  $(0, 0, \rho_0)$  处,而主反射面的中心位置位于  $(x_0, 0, z_0)$  处. 出射波束的波束宽度为  $D$ ,喇叭馈源的出射波束宽度为  $2\theta_c$ ,馈源出射的任意波束与  $Z$  轴的夹角为  $\theta$ ,主抛物面波束出射方向与  $X$  轴的夹角为  $\theta_0$ . 馈源方向图函数为  $F(\theta)$ ,口面功率分布为  $P(R)$ . 其中  $x_0, z_0, \rho_0, D, \theta_c, F(\theta), P(R), \theta_0$  在设计初期作为初始值已经给出具体数值或者表达式.

由于一般赋形偏馈双反射面天线文献<sup>[1-5]</sup>只介绍出射波束与  $Z$  轴平行的设计方法,为解决工程实现中天线配重的问题,并减小实际主天线尺寸,希望实现天线波束的倾斜出射,即出射波束与  $X$  轴夹角. 以下将完成对出射波束与  $X$  轴有任意夹角的赋形偏馈双反射面天线设计公式的推导.

对于圆对称口面场分布,能量守恒定律可以表示为

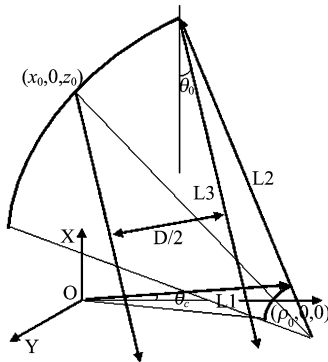


图 1 赋形偏馈双反射面天线几何结构示意图  
Fig. 1 The geometry configuration of the antenna

$$\frac{\int_0^{\theta_c} F(\theta') \sin\theta' d\theta'}{\theta_c} = \frac{\int_0^R P(R') R' dR'}{D/2} \quad (1)$$

设功率分布为  $P(R') = \left(1 - \frac{\rho'^2}{\rho_{mm}^2}\right)^{0.5}$  其中  $\rho_{mm} \geq \rho, F(\theta') = \cos^{m+1}(\theta), m = 4794$  则式(1)简化为

$$\int_0^R P(R') R' dR' = \frac{[1 - \cos^{m+1}(\theta)]}{[1 - \cos^{m+1}(\theta_c)]} \cdot \int_0^{D/2} P(R') R' dR' \quad (2)$$

上式中积分上限  $R$  可由式(1)或式(2)得到,设从馈源出射的光线用单位辐射矢量表示为

$$l_1 = \hat{a}_\rho = \rho_0 \quad (3)$$

经过副反射面反射的几何光线表示为

$$l_2 = \begin{cases} \frac{1}{l} [(x - \rho \sin\theta \cos\phi) \hat{i} + (y - \rho \sin\theta \sin\phi) \\ + (z - \rho \cos\theta) \hat{k}] \\ \frac{1}{l} (a \hat{i} + b \hat{j} + c \hat{k}) \end{cases}, \quad (4)$$

其中  $l_2$  为副反射面  $(\rho, \theta, \phi)$  到主反射面  $(x, y, z)$  之间的光线矢量

$$l = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}, \quad (5)$$

$$OL = l_1 + l_2 + l_3 = \rho_0 + \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} + l_3 \quad (6)$$

用式(9)~(11)求解偏微分方程(7)、(8)可以得到  $\rho(\theta, \phi)$ , 从而利用式(6)、(11)、(12)求解得出  $l_3$ , 如式(13)所示

$$\rho = \rho_0 + d\rho \quad (7)$$

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial \rho}{\partial \phi} d\phi, \quad (8)$$

其中:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} = \frac{QV}{Q^2 + U^2} \\ \frac{\partial \rho}{\partial \phi} = \frac{U \cdot V \sin\theta}{Q^2 + U^2} \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} Q = \frac{(a \cos\theta \cos\phi + b \cos\theta \sin\phi - c \sin\theta)}{\rho} \\ U = \frac{(b \cos\phi - a \sin\phi)}{\rho} \\ V = l + a \sin\theta \cos\phi + b \sin\theta \sin\phi + c \cos\theta \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} a = x - \rho \sin\theta \cos\phi \\ b = y - \rho \sin\theta \sin\phi \\ c = z - \rho \cos\theta \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} A = R\cos\phi\sin\theta_0 - \rho\sin\theta\cos\phi + x_0 \\ B = R\cos\phi\cos\theta_0 - \rho\cos\theta + z_0 \\ D = OL - \rho \end{cases}, \quad (12)$$

$$l_3 = \frac{D^2 - A^2 - B^2 - b^2}{2(A\cos\theta_0 - B\sin\theta_0 + D)}, \quad (13)$$

$$\begin{cases} x = x_0 + R\sin\theta_0\cos\phi + l_3\cos\theta_0 \\ y = R\sin\phi \\ z = z_0 + R\cos\theta_0\cos\phi - l_3\cos\theta_0 \end{cases}. \quad (14)$$

利用计算得到的得到的  $l_3, R$  及初始值  $x_0, z_0$  经式(14)计算得到天线主面坐标数据  $(x(\theta, \phi), y(\theta, \phi), z(\theta, \phi))$  后, 就可以由 ProE 导入数据并生成主抛物面的几何结构. 副反射面的几何结构数据的计算可以根据 Snell 定理得到

$$l_1 \times n = -l_2 \times n. \quad (15)$$

将式(3)、(4)、(5)带入式(15)后得到

$$l + (\hat{a}i + \hat{b}j + \hat{c}k) \cdot \left( \hat{a}_\rho - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \hat{a}_\theta - \frac{\hat{1}}{\rho \sin\theta} \frac{\partial \rho}{\partial \phi} \hat{a}_\phi \right) = 0, \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} \hat{i} \\ \hat{j} \\ \hat{k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\theta\cos\phi & \cos\theta\cos\phi & -\sin\theta \\ \sin\theta\sin\phi & \cos\theta\sin\phi & \cos\phi \\ \cos\theta & -\sin\theta & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{a}_\rho \\ \hat{a}_\theta \\ \hat{a}_\phi \end{pmatrix}. \quad (17)$$

通过坐标系转换公式(17)及天线主反射面坐标数据  $(x(\theta, \phi), y(\theta, \phi), z(\theta, \phi))$  可以得到副反射面的坐标数据  $(x_{small}(\theta, \phi), y_{small}(\theta, \phi), z_{small}(\theta, \phi))$ , 如式(18)所示

$$\begin{cases} x_{small} = \rho\sin\theta\cos\phi \\ y_{small} = \rho\sin\theta\sin\phi \\ z_{small} = \rho\cos\theta \end{cases}. \quad (18)$$

## 2 赋形偏馈双反射面天线建模

本文设计了一种 Cassegrain 非聚焦形式的赋形偏馈双反射面天线, 设计的初始条件为: 波束宽度  $D = 110 \text{ cm}$ , 波束出射方向与  $X$  轴负方向夹角为  $20^\circ$ . 喇叭馈源方向图  $F(\theta) = \cos^{4794}\theta$ , 口面功率分布为抛物型分布, 分布函数为  $P(R') = (1 - \rho^2/\rho_{mm}^2)^{0.5}$ , 喇叭馈源的出射波束宽度为  $\theta_c = 2.52^\circ$ , 主反射面中心位于  $(x, y, z) = (0.6, 0, 1.38)$ , 副反射面的中心位置位于  $(x_{small}, y_{small}, z_{small}) = (0, 0, 2.498)$  即  $\rho_0 = 2.498$ .

依据以上的设计初始条件, 根据公式(1)~(18)编写程序, 计算得出主反射面及副反射面的坐标矩阵为  $(x(\theta, \phi), y(\theta, \phi), z(\theta, \phi)) (x_{small}(\theta, \phi), y_{small}(\theta, \phi), z_{small}(\theta, \phi))$ , 详细的天线设计数据如图

2 所示, 按照仿真频率为  $f = 95 \text{ GHz}$  时所对应的波长  $\lambda/10$  对几何模型进行网格划分. 由于电磁场仿真软件在建模方面的局限性, 几何模型的建立是通过软件 ProE 对 Matlab 生成的数据进行导入后编程处理, 最终生成几何模型, 如图 3 所示. 并在 ProE 中用边长为  $0.1\lambda$  的三角形网格对几何模型进行网格划分, 以便下一步进行仿真计算.

## 3 软件仿真分析

用波束宽度为  $\theta_c = 2.52^\circ$ , 方向图函数为  $F(\theta) = \cos^{4794}\theta$  的方向图数据作为赋形偏馈双反射面天线的馈源, 在  $95 \text{ GHz}$  的频率下, 用物理光学法仿真得到天线远场方向图, 天线增益仿真值为  $59.82 \text{ dB}$ , 天线方向图如图 4 所示. 图 5 为天线波束在  $200 \text{ m}$  远处的场分布仿真图, 观察得知  $3 \text{ dB}$  波束直径为  $80 \text{ cm}$ .

## 4 天线测试结果

以  $95 \text{ GHz}$  作为中心频率, 利用高精度天线近场扫描系统得到了天线近场幅度、相位分布, 如图 6、

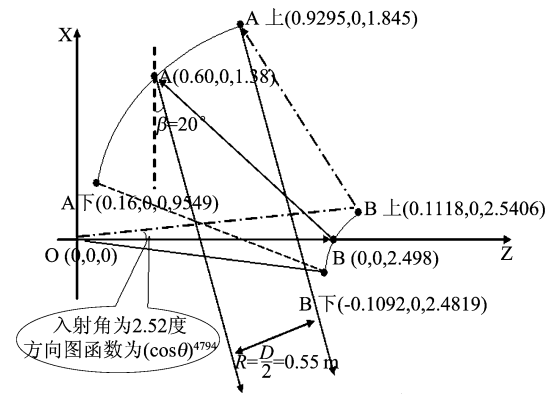


图 2 Cassegrain 形式赋形偏馈双反射面天线设计数据  
Fig. 2 The geometry data of the antenna

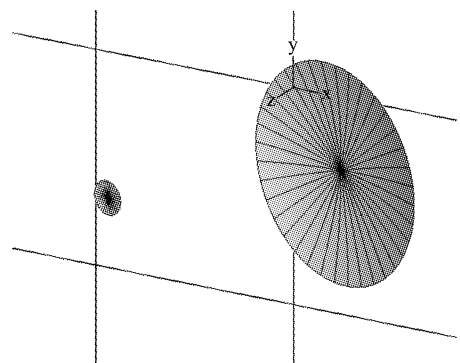


图 3 赋形偏馈双反射面天线三维视图  
Fig. 3 The 3D view of the antenna

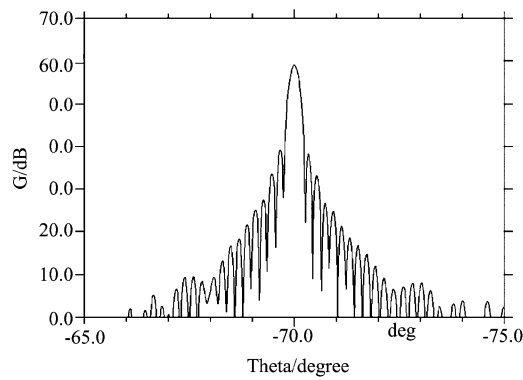


图 4 天线远场方向图  
Fig. 4 Simulation of the far-field pattern

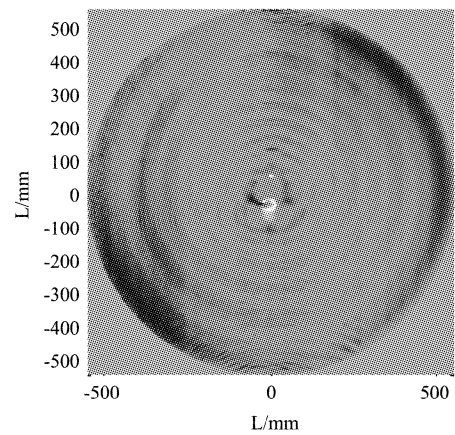


图 7 天线近场相位分布  
Fig. 7 Near-field phase distribution

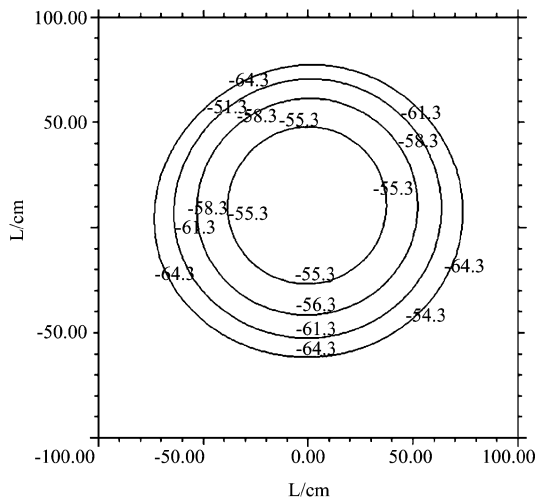


图 5 距口面 200 m 处的场分布  
Fig. 5 Simulated field distribution at 200 meters

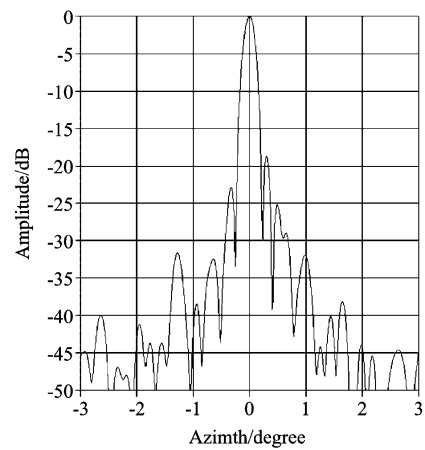


图 8 方位面实测方向图  
Fig. 8 Azimuth-field radiation pattern

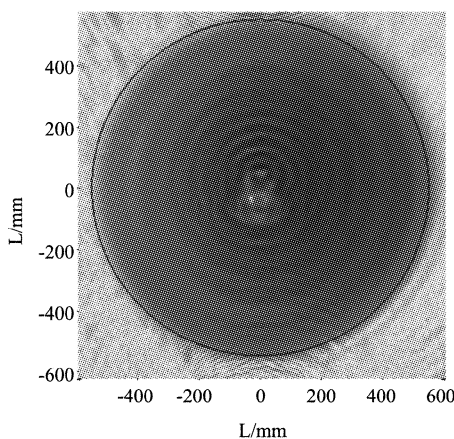


图 6 天线近场幅度分布  
Fig. 6 Near-field amplitude distribution

图 7 所示. 根据近场-远场反演程序计算得到了天线远场方向图, 如图 8、图 9 所示. 暗室扫描架采用美国 NSI 高精度近场扫描系统, 机械扫描精度可达

0.02 mm, 满足该频段系统测试精度要求. 探头采用 BJ900 波导探头并配备 3 mm 吸波材料, 吸波材料最小反射率高达 -20 dB, 最大限度地降低了探头对被测场的扰动; 在数据后处理方面, 引入探头方向图补偿技术, 消除了由于探头方向图的影响带来的测量误差, 远场方向图 ( $\pm 45^\circ$  以内) 及天线增益的测试精度可达  $\pm 0.1$  dB.

天线 E 面及 H 面 3dB 波束宽度均为  $0.19^\circ$ , 天线增益为 59.7 dB, 天线口径效率为 78%. 图 10 为天线波束在 200 m 远处的场分布图, 3 dB 波束直径为 85 cm, 与仿真结果基本一致.

### 5 结论

本文采用几何光学法的设计思想, 通过对理论公式的推导得出了一种赋形偏馈双反射面天线的设计方法. 编程计算得到了天线的几何结构尺寸, 并由三维建模软件实现了天线建模及表面网格剖分, 最

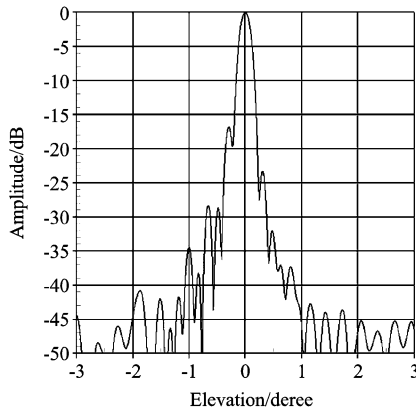


图9 俯仰面实测方向图  
Fig. 9 Elevation-field radiation pattern

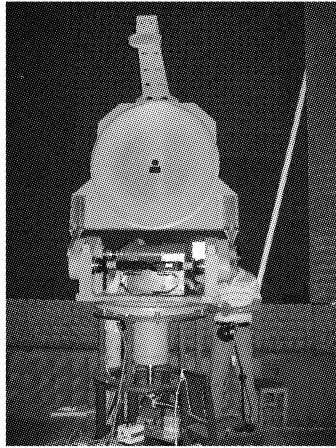


图10 天线实物测试图  
Fig. 10 Photo of antenna testing state

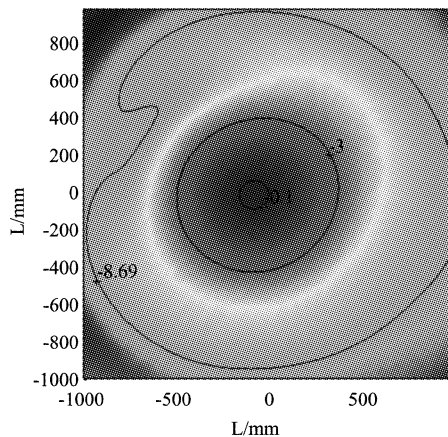


图11 距口面 200 m 处的场分布图  
Fig. 11 Test field distribution at 200 meters

后采用物理光学方法仿真得到 95 GHz 频率下天线的远场方向图. 该天线增益达到 59.82 dB, 副瓣电平为 -20 dB, 天线仿真口径效率达到 80%. 在距离天线口面 200 m 天线辐射近场区域设立观测面, 仿

真得到 200 m 处近场观测面上的场分布图, 其 3 dB 波束直径为 80 cm.

以 95 GHz 作为中心频率, 通过实验测试得到近场幅度、相位的数据, 经过近场-远场反演计算得到天线远场方向图, 其中天线 E 面及 H 面 3 dB 波束宽度均为  $0.19^\circ$ , 天线远场增益为 59.7 dB, 实测口径效率为 78%. 天线波束在 200 m 远处的场分布的 3 dB 波束直径为 85 cm, 天线增益与距离口面 200 m 处 3 dB 波束宽度与仿真结果基本一致, 天线波束实测出射角度与仿真结果一致.

根据仿真结果和实验数据对比来看, 利用公式 (1) ~ (18) 编写的程序可以用来设计任意波束出射角度的高效率赋形偏馈双反射面天线. 通过进一步的理论公式推导, 可以编程实现聚焦形式的偏馈赋形双反射面天线, 该类型天线近场焦点处增益可达到天线远场增益, 可以大大提高焦点及焦点附近区域的辐射功率密度.

## REFERENCES

- [1] Lee J, Parad L, Chu R. A shaped offset-fed dual-reflector antenna[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat.* 1979, **27**(2): 165 - 171.
- [2] Bergmann J R. Shaped subreflector for offset gregorian reflector antenna with a paraboloidal main reflector[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat.* June 1998, **7**(2): 828 - 831.
- [3] Floreani M G, Zich R E, Aulisio G. Design and experimental validations of a new shaped subreflector geometry for Cassegrain system [C]. *IEEE Antennas and propagations Society International Symposium.* July 2000; 842 - 845.
- [4] Floreani M G, Aulisio G, Freccesetti M G. Design and experimental validation of a 70 GHz Cassegrain antenna with a shaped subreflector geometry [C]. *IEEE Antennas and propagations Society International Symposium.* July 2002; 842 - 845.
- [5] Cha A G. The JPL 1.5-Meter Clear Aperture Antenna With 84.5 Percent Efficiency [C]. *TDA Progress Report.* January-March 1983; 42 - 73.
- [6] Cha A G. Design of a 1.5 m, 32 GHz, Clear aperture Antenna [C]. *TDA Progress Report.* September-October 1981; 42 - 66.
- [7] Lier E, Skyttemyr S A. A shaped single reflector offset antenna with low cross-polarization fed by a lens horn [J]. *IEEE Trans Antennas Propagat.* 1994, **42**(4): 478 - 483.
- [8] Bergmann J R, Palma Pereira L C. Shaped subreflector for offset gregorian reflector antenna with a paraboloidal main reflector [J]. *IEEE Trans Antennas Propagat.* 1998, **7**(2): 828 - 831.
- [9] LING Chang-Lu. *Antenna Engineering Handbook* [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry (林昌禄. 天线工程手册. 北京: 电子工业出版社), 2002.
- [10] ZHANG Ke-Qian. *Electromagnetic Theory for Microwaves and Optoelectronics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry (张克潜. 微波与光电子学中的电磁理论 [M]. 北京: 电子工业出版社), 2001.