

工程与应用

# 大轴比椭圆波束天线过渡函数的研究

刘兴隆, 杜彪, 秦顺友, 周建寨

(中国电子科技集团公司第54研究所, 石家庄 050081)

**摘要:**研究了不同的过渡函数对椭圆波束天线增益、旁瓣、效率和主反射面轮廓等性能的影响。根据工程应用对低旁瓣和高效率的要求,选取合适的过渡函数,给出了轴比为2:1的椭圆波束天线实例。由仿真结果表明,可以达到高效率、低旁瓣、低剖面的性能。

**关键词:**过渡函数; 大轴比; 高效率; 低旁瓣

中图分类号:TN82 文献标识码:A 文章编号:1673-5692(2012)01-072-04

## Study of Transition Function for Elliptical Beam Antenna with Large Axial Ratio

LIU Xing-long, DU Biao, QIN Shun-you, ZHOU Jian-zhai

(The 54 th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** The effect of different transition function on the gain, side-lobe level, efficiency and contour of the main reflector for large axial ratio elliptical beam antenna is studied. A 2:1 axial ratio elliptical beam antenna is given by choosing a proper transition function to satisfy the requirement of low side-lobe level and high efficiency in practical engineering. The simulation results show that the designed reflector antenna has high efficiency, low side-lobe level and low profile.

**Key words:** transition function; large axial ratio; high efficiency; low side-lobe level

## 0 引言

随着动中通卫星通信技术的发展,动中通天线向着小型化、高性能的方向发展,对天线的性能和低剖面提出更高的要求。这就需要对影响椭圆波束天线性能的各个参量详细研究,其中过渡函数是影响天线性能的关键因素之一。由文献[1]设计的椭圆波束天线独特的结构决定了过渡函数不仅影响着椭圆口面场分布而且影响到天线主反射面的轮廓。

椭圆波束天线的形成机理是根据所要的口面场分布函数对天线 $\varphi=0^\circ$ 面和 $\varphi=90^\circ$ 面的主副反射面曲线进行赋形,再选一个合适的过渡函数计算出 $\varphi=0^\circ \sim \varphi=90^\circ$ 之间的副反射面坐标,得到整个副反射面曲面;由反射定律、等光程条件得到主反射面

曲面,从而完成整个天线主副反射面的赋型设计<sup>[1]</sup>。其中,选取的口面场分布只决定 $\theta$ 方向,而 $\varphi$ 方向主要由过渡函数决定,因此该过渡函数选取的不同会影响天线的增益、旁瓣和效率等电气性能。除此之外,不同过渡函数确定了不同的副反射面的曲面形状,与之相应的主反射面曲面形状也不同,同时主反射面的轮廓也不同。若主反射面的轮廓太大就不符合所要追求的低剖面要求,相反主反射面在辐射方向的投影面积太小必将会影响天线的增益等性能下降。因此,对过渡函数进行深入研究,选取合适的过渡函数具有重要的工程应用价值。

从椭圆波束天线副反射面的计算公式入手,给出了过渡函数需要满足的边界条件,分析了三类典型的过渡函数对天线主反射面增益、旁瓣、效率和主反射面轮廓等性能的影响。针对轴比为2:1的椭

圆波束天线,根据工程应用对旁瓣和效率的要求,优选出过渡函数,给出天线设计实例。由 Grasp 仿真结果表明该天线满足低旁瓣、高效率和低剖面的性能。

## 1 过渡函数的研究

椭圆波束天线系统的俯视图,如图 1 所示。过  $z$  轴的平面与  $xoz$  平面的夹角为  $\varphi$ 。短轴平面为  $xoz$  平面(即  $\varphi=0^\circ$  面),长轴平面为  $yoz$  平面(即  $\varphi=90^\circ$  面)。根据馈源方向图函数和天线口面场分布函数应用反射定律、能量守恒和等光程条件可得到主副反射面在  $\varphi=0^\circ$  面和  $\varphi=90^\circ$  面的副反射面赋型曲线  $r_{0^\circ}(\theta)$  和  $r_{90^\circ}(\theta)$ <sup>[1,2]</sup>;再选取过渡函数  $F(\varphi)$ ,就可计算出  $\varphi=0^\circ \sim \varphi=90^\circ$  之间的副反射面坐标为

$$r(\theta, \varphi) = r_{0^\circ}(\theta) + [r_{90^\circ}(\theta) - r_{0^\circ}(\theta)]F(\varphi) \quad (1)$$

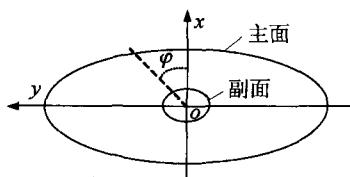


图 1 椭圆波束天线系统的俯视图

为了使副反射面平滑过渡且在  $\varphi=0^\circ$  面和  $\varphi=90^\circ$  面内入射线和反射线在各自的同一平面内,过渡函数  $F(\varphi)$  需要满足如下边界条件<sup>[1,3]</sup>

$$\text{在 } \varphi=0^\circ \text{ 时 } F(\varphi)|_{\varphi=0^\circ}=0 \quad (2)$$

$$\frac{dF(\varphi)}{d\varphi}|_{\varphi=0^\circ}=0 \quad (3)$$

$$\text{在 } \varphi=90^\circ \text{ 时 } F(\varphi)|_{\varphi=90^\circ}=1 \quad (4)$$

$$\frac{dF(\varphi)}{d\varphi}|_{\varphi=90^\circ}=0 \quad (5)$$

过渡函数可用多项式计算得到,也可以选择满足以上条件的特殊函数或其组合函数。用过渡函数可计算出所有  $\varphi$  面的副反射面坐标,进而得到整个副反射面的曲面。

### 1.1 超椭圆过渡函数

在直角坐标系中超椭圆方程的表达式为<sup>[4]</sup>

$$\left[ \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^v + \left[ \left( \frac{y}{b} \right)^2 \right]^v = 1 \quad (6)$$

式中,  $a$ 、 $b$  为椭圆长半轴或短半轴的长度;  $v$  为系数,  $v=1$  时曲线为标准的椭圆, 随  $v$  值增大曲线由椭圆向矩形逼近, 如图 2 所示。

在极坐标系中,超椭圆方程的表达式为

$$R = \sqrt{(a \cdot \cos\varphi \cdot r)^2 + (b \cdot \sin\varphi \cdot r)^2} \quad (7)$$

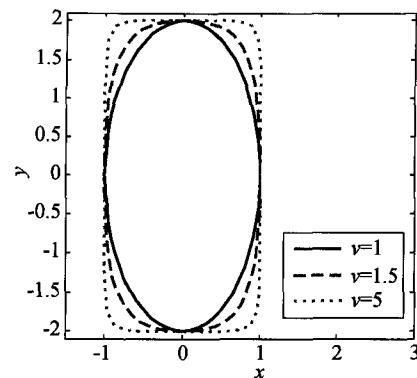


图 2 超椭圆曲线

$$\text{其中, } r = [\cos^2\varphi + \sin^2\varphi]^{-\frac{1}{2v}} \quad (8)$$

对该曲线进行处理,来满足式(2)~式(5)边界条件的要求,则超椭圆过渡函数的表达式为

$$F(\varphi) = \frac{R-a}{b-a} \quad (9)$$

针对天线主反射面轴比为 2:1 的模型,选取  $a=1$ 、 $b=2$  时,  $v=1, 0.9, 0.85, 0.82, 0.8$  所对应过渡函数曲线从上到下依次排列,如图 3 所示。

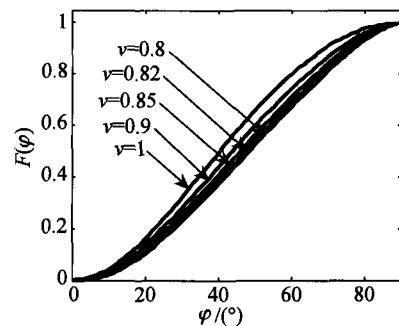


图 3 不同  $v$  值对应的过渡函数曲线

以文献[1]给出的实例为例,在频率为 14 GHz,馈源照射角度为 36°,照射电平为 -10 dB 时,天线增益,  $\varphi=0^\circ, 90^\circ, 45^\circ$  面第一旁瓣,主反射面等效直径和效率随着  $v$  的变化值,见表 1。天线主反射面轮廓线随  $v$  值变化情况,如图 4 所示。

表 1 不同  $v$  值对应的天线性能影响

$v$	增益/ dB	0°面 第一旁瓣/ dB			90°面 第一旁瓣/ dB			45°面 第一旁瓣/ dB			等效 直径/ mm	效率
		0°面 第一旁瓣/ dB	90°面 第一旁瓣/ dB	45°面 第一旁瓣/ dB	0°面 第一旁瓣/ dB	90°面 第一旁瓣/ dB	45°面 第一旁瓣/ dB	0°面 第一旁瓣/ dB	90°面 第一旁瓣/ dB	45°面 第一旁瓣/ dB		
1.00	39.989	-13.024	-14.758	-19.900	844.46	65.08%						
0.90	39.875	-13.856	-15.388	-18.970	829.15	65.75%						
0.85	39.670	-14.039	-15.437	-17.860	819.16	64.26%						
0.82	39.667	-14.579	-16.222	-17.987	812.18	65.33%						
0.80	39.603	-14.783	-16.469	-17.735	807.04	65.19%						

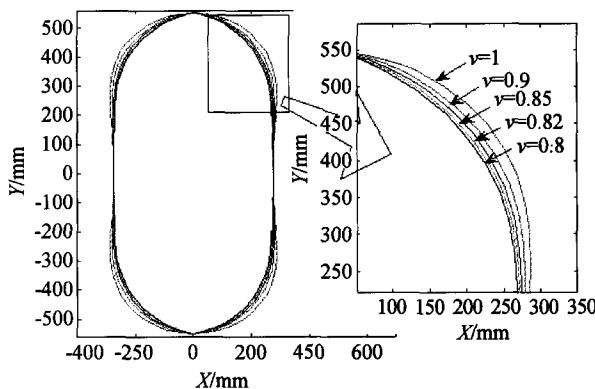


图4 不同v值对应的主反射面轮廓线

由图3、图4和表1仿真数据可以看出 $v$ 值变大,过渡曲线在 $0^\circ \sim 50^\circ$ 区间斜率变大,所对应的主反射面轮廓会变大,增益也升高。当 $v \geq 0.85$ 时主反射面的轮廓在短轴方向超出 $\pm 275$  mm的区域。反之,随着小天线主反射面轮廓变小,对应的主反射面等效直径变小,增益下降, $\varphi = 0^\circ, 90^\circ$ 面第一旁瓣变低, $45^\circ$ 面第一旁瓣升高。但总体上随 $v$ 值的变化对天线效率的影响较小。

还可看出,在选取不同过渡函数时天线增益与 $\varphi = 0^\circ, 90^\circ$ 面第一旁瓣是一对矛盾; $\varphi = 0^\circ, 90^\circ$ 面第一旁瓣与 $45^\circ$ 面第一旁瓣也是一对矛盾。只有处理好这两对矛盾,才能选择出合适的过渡函数。

## 1.2 指数过渡函数和正弦平方过渡函数

指数过渡函数表达式为<sup>[5]</sup>

$$F(\varphi) = 1 - e^{-\frac{a}{8} \cdot 100 \varphi^2} - \frac{a}{8 \cdot 100} e^{-a} \cdot \varphi^2 \quad (10)$$

正弦平方过渡函数表达式为

$$F(\varphi) = \sin^2(\varphi) \quad (11)$$

随 $a$ 取3、2、1、0.1时过渡函数曲线的变化情况和正弦平方过渡函数曲线,如图5所示,对应的天线主反射面轮廓曲线,如图6所示。

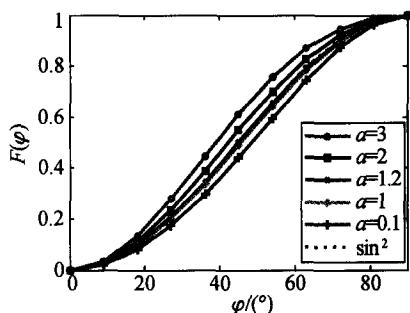


图5 指数过渡函数曲线和正弦平方过渡曲线

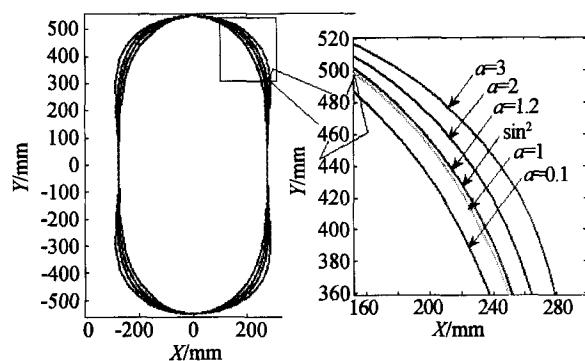


图6 不同a值对应的主反射面轮廓线

以文献[1]给出的实例为例,在频率分别为12.5 GHz、14 GHz 和 14.25 GHz,对应的馈源照射电平为-8.5 dB、-10 dB、-10.5 dB,照射角度为 $36^\circ$ 时,天线增益, $\varphi = 0^\circ, 90^\circ, 45^\circ$ 面第一旁瓣、主反射面等效直径和效率随着 $a$ 不同的变化情况,见表2。

由图5、图6和表2仿真数据可以看出指数过渡函数对天线各项性能的影响与超椭圆过渡函数有相同的规律性,但相比等效直径相同的模型发现指数过渡函数比超椭圆过渡函数的效率略高,旁瓣略好。 $a = 1.2$  的指数过渡曲线与正弦平方曲线基本重合,主反射面轮廓线和各项性能也基本一致。

表2a 频率 12.5 GHz 天线性能参数随 $a$ 值变化

	增益/ dB	$0^\circ$ 面 第一旁 瓣/dB	$90^\circ$ 面 第一旁 瓣/dB	$45^\circ$ 面 第一旁 瓣/dB	等效 直径/ mm	效率
$a = 3.0$	38.945	-12.512	-14.129	-20.017	849.39	63.45%
$a = 2.0$	38.782	-13.072	-14.921	-18.674	835.05	63.23%
$a = 1.2$	38.643	-13.644	-15.565	-17.836	823.26	63.00%
$a = 1.0$	38.614	-13.819	-15.762	-17.631	820.34	63.03%
$a = 0.1$	38.465	-14.588	-16.573	-16.887	807.64	62.83%
$\text{Sin}^2$	38.642	-13.636	-15.580	-17.819	823.16	63.00%

表2b 频率 14 GHz 天线性能参数随 $a$ 值变化

	增益/ dB	$0^\circ$ 面 第一旁 瓣/dB	$90^\circ$ 面 第一旁 瓣/dB	$45^\circ$ 面 第一旁 瓣/dB	等效 直径/ mm	效率
$a = 3.0$	40.115	-12.745	-14.458	-20.780	849.39	66.22%
$a = 2.0$	39.954	-13.309	-15.290	-19.314	835.05	66.02%
$a = 1.2$	39.813	-13.885	-15.971	-18.412	823.26	65.75%
$a = 1.0$	39.782	-14.064	-16.164	-18.199	820.34	65.75%
$a = 0.1$	39.630	-14.847	-17.012	-17.409	807.64	65.50%
$\text{Sin}^2$	39.812	-13.880	-15.990	-18.389	823.16	65.75%

表2c 频率14.25 GHz天线性能参数随 $a$ 值变化

	增益/ dB	0°面 第一旁 瓣/dB	90°面 第一旁 瓣/dB	45°面 第一旁 瓣/dB	等效 直径/ mm	效率
$a=3.0$	40.304	-12.839	-14.593	-20.954	849.39	66.76%
$a=2.0$	40.143	-13.406	-15.431	-19.465	835.05	66.56%
$a=1.2$	40.002	-13.985	-16.114	-18.551	823.26	66.29%
$a=1.0$	39.971	-14.165	-16.311	-18.339	820.34	66.29%
$a=0.1$	39.819	-14.957	-17.169	-17.532	807.64	66.04%
$\text{Sin}^2$	40.001	-13.979	-16.133	-18.527	823.16	66.29%

### 1.3 多项式过渡函数

多项式函数的表达式为

$$F(\varphi) = C_0 + C_1 \varphi + C_2 \varphi^2 + \cdots + C_n \varphi^n \quad (12)$$

式中,  $C_0, C_1 \dots C_n$  为系数, 不同的系数对应不同的曲线。为满足过渡函数的边界条件, 需要联立式(2)~式(5), 求出所有的系数, 得到多项式过渡函数。

多项式过渡函数比以上三种特殊函数组合的过渡函数的优点是可调性高, 可以为控制整体曲线走势及局部曲线变化, 可以有效控制天线主反射面轮廓和  $\varphi$  方向的口面场, 从而得到更优的天线性能。上述研究的过渡函数只针对轴比为 2:1 的椭圆波束天线, 对于任意轴比的椭圆波束天线多项式过渡函数的优势会更为显现。

### 2 仿真实例

应用上节对过渡函数的分析结果, 针对工程应用的要求(俯仰、方位的旁瓣分别为 -12 dB、-14 dB 和高效率), 选取正弦平方过渡函数或者指数过渡函数( $a=1.2$ )给出轴比为 2:1 的椭圆波束天线设计实例, 天线主反射面尺寸为 550 mm × 1 100 mm, 纵向高度为 320 mm, 满足低剖面的要求, 主副反射面立体结构图, 如图 7 所示。由表 2 可以看出在俯仰、方位平面中第一旁瓣比工程需求都有 1.5 dB 以上的工程余量; 在天线发射和接收的中心频率天线效率可分别达到 63% 和 66.29%。

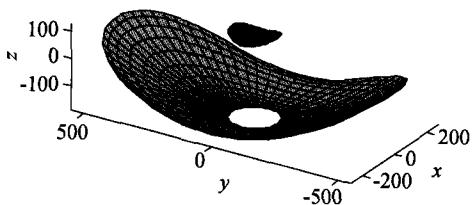


图7 主副反射面立体结构图

### 3 结语

过渡函数是椭圆波束天线赋型设计中关键因素之一, 文章研究了过渡函数对增益、第一旁瓣、效率和天线主反射面的轮廓等性能的影响。针对轴比为 2:1 的椭圆波束天线, 根据工程应用对旁瓣和效率的要求及文中对过渡函数的研究结果, 优选出过渡函数, 给出天线设计实例。为提出更高性能、低剖面的椭圆波束天线设计提供指导。

### 参考文献:

- [1] 刘兴隆, 杜彪, 秦顺友. 一种低剖面高效率大轴比椭圆波束天线 [J]. 电波科学学报, 2011, 26(增刊): 505-508.
- [2] 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.
- [3] 杨可忠. 特殊波束面天线技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [4] DUAN DAH-WEIH, et al. A Generalized Diffraction Synthesis Technique for High Performance Reflector Antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995, 43(1), 27-40.
- [5] AOKI K, MAKINO S, KATAGI T. Design Method for An Offset Dual-reflector Antenna with High Efficiency and An Elliptical Beam [J]. IEE Proc-H, 1993, 140, 121-128.
- [6] 路志勇, 杨可忠, 杜彪. 椭圆波束变焦距环焦天线的设计方法 [J]. 电波科学学报, 2003, 18(1): 7-11.

### 作者简介



刘兴隆(1986—),男,山西平遥人,硕士研究生,研究方向为电磁场与微波技术;

E-mail: xinglongxidian@163.com

杜彪(1962—),男,河北石家庄人,研究员,博士,博士研究生导师,中国电子学会高级会员,研究方向为反射面天线、馈源和阵列天线的研究与设计工作;

秦顺友(1964—),男,河南光山人,研究员,硕士研究生导师,中国电子学会高级会员,研究方向为微波与天线测量技术、微弱信号检测、EMC/EMI 测量等;

周建寨(1975—),男,河北石家庄人,高级工程师,主要研究方向为微波天线。

## 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](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>