

# 双反射面天线主面模具共享技术 及其优化方法\*

徐国华 漆一宏

(西北电讯工程学院, 西安)

**摘要** 本文提出了通过优化副反射面使同一焦距不同口径的主反射面共用一套加工模具的双反射面天线主面板模具共享技术。提出了一种快速收敛优化方法, 并将其应用于主面共享设计, 取得了较为满意的结果。

**关键词** 天线; 双反射面天线; 主面模具共享技术; 迭代法

## 一、引言

随着卫星通讯的发展和普及, 作为卫星地面接收站主要设备的双反射面天线的需求越来越大。如何能够降低天线的制造成本, 提高天线的生产速度是一个很重要的实际问题。由于反射面天线加工时所用的工装费用很高, 特别是主面面板蒙皮及其筋模, 由于要求精度高, 数量多, 因而所需的费用十分可观。为了解决上述工程实际问题, 本文提出了双反射面天线主面板模具共享设计技术, 即在保证一定天线效率的情况下, 使同一焦距不同口径的主反射面共用一套加工模具或利用部分公共模具, 从而达到降低生产成本, 提高天线生产速度的目的。

要实现主面模具共享, 就必须对每一口径的主反射面给出一个与其匹配的优化副面, 优化计算的工作量很大, 为了使优化得以进行, 本文提出了一种快速收敛的优化方法——混合基优化方法, 即通过构造与物体边界条件较为吻合的相应数学形式, 缩短寻求最优解所花的时间。本文用混合基方法和分级优化策略<sup>[1]</sup>对一双反射面天线进行了主面模具共享设计。算例表明, 本文中的方法是一种快速、准确、实用的工程天线设计方法。

## 二、天线效率计算公式<sup>[1,2]</sup>

运用场相关定理, 把馈源和天线的主反射面视为两个辐射源, 由物理光学近似得天线的效率计算公式:

$$\eta = (J, J^*) = |J|^2 \quad (1)$$

式中

\* 1987年1月2日收到, 1987年7月2日修改定稿。

$$J = \iint_S (\mathbf{E}_r \times \mathbf{H}_i) \cdot d\mathbf{S} \quad (2)$$

$J^*$  为  $J$  的共轭,  $\mathbf{E}_r$  为主反射面接收单位功率轴向入射平面波时, 由主反射面感应电流在副反射面处产生的电场,  $\mathbf{H}_i$  为馈源辐射单位功率时, 由馈源在副反射面处产生的磁场,  $S$  代表副面被照射面。

$$d\mathbf{S} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \theta} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \phi} d\theta d\phi \quad (3)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r} &= r\hat{r} \\ \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \theta} &= \frac{\partial r}{\partial \theta} \hat{r} + r\hat{\theta} \\ \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \phi} &= \frac{\partial r}{\partial \phi} \hat{r} + r \sin \theta \hat{\phi} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

对于旋转对称的副反射面有  $\frac{\partial r}{\partial \phi} = 0$ ,  $\frac{\partial r}{\partial \theta} = \frac{dr}{d\theta}$ 。

设主面是一口径为  $D$ , 焦距为  $f$  的旋转对称抛物面, 副反射面为母线方程为  $r(\theta)$  的旋转对称面, 其半张角为  $\theta_s$ , 则有

$$\mathbf{E}_r(r, \theta, \phi) = f_1(r, \theta) \cos \phi \hat{\theta} - f_2(r, \theta) \sin \phi \hat{\phi} + f_3(r, \theta) \cos \phi \hat{r} \quad (5)$$

其中  $(r, \theta, \phi)$  为副面上点的坐标, 坐标原点取在主面焦点上。  $f_1(r, \theta)$ ,  $f_2(r, \theta)$ ,  $f_3(r, \theta)$  可由球面波展开法求得<sup>[1]</sup>。

$$\mathbf{H}_i(r', \theta', \phi') = g_1(r', \theta') \sin \phi' \hat{\theta}' + g_2(r', \theta') \cos \phi' \hat{\phi}' \quad (6)$$

式中  $(r', \theta', \phi')$  是以馈源相位中心为坐标原点时, 副面上点的坐标。  $g_1(r', \theta')$ ,  $g_2(r', \theta')$  由具体的馈源形式确定。

将(3), (5), (6)式代入(2)式, 并利用关系式

$$\left. \begin{aligned} \hat{\theta}' &= \sin(\theta + \theta') \hat{r} + \cos(\theta + \theta') \hat{\theta} \\ \hat{\phi}' &= -\hat{\phi} \\ \hat{\phi}' &= -\hat{\phi} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

经化简得

$$\begin{aligned} J = & -\pi \int_0^{\theta_s} \left( \left\{ f_2(r, \theta) g_1(r', \theta') \left[ \cos(\theta + \theta') + \sin(\theta + \theta') \frac{1}{r} \frac{dr}{d\theta} \right] \right. \right. \\ & \left. \left. + g_2(r', \theta') \left[ f_1(r, \theta) + f_3(r, \theta) \frac{1}{r} \frac{dr}{d\theta} \right] \right\} r^2 \sin \theta \right)_{r=r(\theta)} d\theta \end{aligned} \quad (8)$$

若令

$$\frac{dr}{r d\theta} = \tan \frac{\theta + \theta'}{2} \quad (9)$$

则有

$$J = -\pi \int_0^{\theta_s} \left( \left\{ f_2(r, \theta) g_1(r', \theta') + g_2(r', \theta') \left[ f_1(r, \theta) \right. \right. \right.$$

$$+ f_3(r, \theta) \tan \frac{\theta + \theta'}{2} \Big\} r^2 \sin \theta \Big|_{r=r(\theta)} d\theta \quad (10)$$

### 三、共享设计的数学模型和方法

为了方便起见,将(10)式记为

$$J = \int_0^{\theta_s} F[\theta, D(\theta), r(\theta), r'(\theta)] d\theta \quad (11)$$

式中  $F$  称为耦合函数。设主面为旋转对称抛物面,我们通过对副反射面进行优化设计,实现主面板模具的共享设计,其优化问题可以表示如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max B(D) | \eta = (J, J^*), J(\theta_s, r, D) = \int_0^{\theta_s} F[\theta, D(\theta), r(\theta), r'(\theta)] d\theta, \\ D(\theta) > 0, \eta \geq \eta_0 \end{array} \right\} \quad (12)$$

其中  $B(D)$  为一定焦距下主面板共享模口径的共享区间;  $D = D(\theta)$  为主面口径方程;  $\eta_0$  为给定的天线效率约束。

解(12)式即可求得主面板模口径的最大共享区间:

$$B^* = [D, \bar{D}] \quad (13)$$

其中  $D$  为主面板共享模口径的下限;  $\bar{D}$  为主面板共享模口径的上限。

为了加快优化的收敛速度,本文采用了以下措施。

(1) 混合基方法 由不同性态的基函数组成的基称为混合基。根据不同的物理问题,选用适当的混合基,然后在混合基张成的子空间中寻求修正量就能较快地逼近实际物理模型。本文选取控制反射面局部形状特性的幂函数和控制反射面总体形状特性的三角函数作为混合基函数,这样就能用较少的项数去逼近反射面的形状,从而达到缩短优化时间的目的。

设副反射面的初始形状为  $r_0(\theta)$ , 副反射面的形状修正因子为  $dr(\theta)$ , 则以混合基表示的形状修正因子为

$$dr(\theta) = \sum_{i=0}^n C_i \theta^i + \sum_{l=1}^m d_l \sin(l\theta) \quad (14)$$

其中  $C_i (i = 0, 1, 2, \dots, n)$ ,  $d_l (l = 1, 2, \dots, m)$  为待定系数

(2) 两级优化策略<sup>[1]</sup> 根据副反射面半张角和副面母线方程修正量物理含义差别较大,相互耦合弱这一特点。采用对副面半张角和形状实际交替优化,迭代逼近的方法寻求最优解,其中第一级优化策略为副面半张角优化,即求解问题

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \eta(\theta_s) | \eta = (J, J^*) = |J|^2, J = \int_0^{\theta_s} F(\theta, D(\theta), \\ r(\theta), r'(\theta)) d\theta, \theta_s \leq \theta \leq \bar{\theta}_s \end{array} \right\} \quad (15)$$

式中  $\theta_s$  和  $\bar{\theta}_s$  分别为副面半张角的下限和上限,  $r = r(\theta)$  为副面为双曲面时的母线方程。

第二级优化为副面形状优化,即求解优化问题

$$\left\{ \begin{aligned} \max \eta[r(\theta)] | \eta = (J, J^*) = |J|^2, J = \int_0^{\theta_s^*} F(\theta, D(\theta), \\ r(\theta), r'(\theta)) d\theta, \eta \geq \eta_0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中  $\theta_s^*$  为第一级优化后所得的半张角值。

#### 四、基本计算步骤

(1) 根据工程实际,给定初始主面口径  $D_1$ 。

(2) 优化副面半张角,即解问题

$$\left\{ \begin{aligned} \max \eta(\theta_s) | \eta = (J, J^*) = |J|^2, J = \int_0^{\theta_s} F(\theta, D(\theta), \\ r(\theta), r'(\theta)) d\theta, \theta_s \leq \theta_s \leq \bar{\theta}_s \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

用一维搜索法解上式得最优副面半张角  $\theta_s^*$ ,若此时效率  $\eta \geq \eta_0$ ,则转步骤(4),否则转下步。

(3) 优化副面形状,即求解问题

$$\left\{ \begin{aligned} \max \eta(r(\theta)) | \eta = (J, J^*) = |J|^2, J = \int_0^{\theta_s^*} F(\theta, D(\theta), \\ r(\theta), r'(\theta)) d\theta, \eta \geq \eta_0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

其中

$$r(\theta) = r_0(\theta) + dr(\theta) \quad (17)$$

$$dr(\theta) = \sum_{i=0}^n C_i \theta^i + \sum_{l=1}^m d_l \sin(l\theta) \quad (14)$$

式中  $C_i (i = 0, 1, 2, \dots, n)$   $d_l (l = 1, 2, \dots, m)$  为待定系数,利用随机复形法求得  $C_i, d_l$ ,从而可得副面的最优形状  $r^*(\theta)$ 。

(4) 根据一定的投点规则,给定另一主面口径  $D_k$  并重复步骤(2)和(3)

这样可以求得主面口径的某一集合

$$\{D_k | k = 1, 2, 3, \dots, m\} \quad (18)$$

并且有

$$\bar{D} = \max \{D_k | k = 1, 2, 3, \dots, m\} \quad (19)$$

$$D = \min \{D_k | k = 1, 2, 3, \dots, m\} \quad (20)$$

从而可以求得主面面板共享模口径的最大共享区间

$$B^*(D) = [D, \bar{D}] \quad (21)$$

#### 五、方法举例

根据上述思想和方法,我们对主面焦距  $f = 35\lambda$ , 初始副面的偏心率  $e = 1.7$ , 焦距

为 13.6λ 的卡塞格仑天线进行了理论计算。其中取馈源发射单位功率时的  $g_1(r', \theta')$  和  $g_2(r', \theta')$  为

$$g_1(r', \theta') = g_2(r', \theta') = \sqrt{\frac{2S+1}{2\pi}} \cos^5 \theta e^{-ikr'/r'} \quad (22)$$

其中  $S = 20$ , 给定天线的效率约束为  $\eta_0 = 80\%$ 。

计算结果如表 1 和图 1 所示。

表 1

旋转对称主 反射面口径	副 反 射 面		效 率
	半张角 $\theta_s$ (rad)	形 状	
80 入 (抛物面)	优化前 $\theta_s$ 1.03829223	双 曲 面	64.71%
	优化后 $\theta_s^*$ 1.2449329	双 曲 面	78.82%
	优化后 $\theta_s^*$ 1.2449329	最优副面形状 $r_1^*(\theta)$	81.40%
90 入 (抛物面)	优化前 $\theta_s$ 1.14267496	双 曲 面	70.31%
	优化后 $\theta_s^*$ 1.3430656	双 曲 面	78.94%
	优化后 $\theta_s^*$ 1.3430656	最优副面形状 $r_2^*(\theta)$	82.57%
100 入 (抛物面)	优化前 $\theta_s$ 1.2404989	双 曲 面	72.02%
	优化后 $\theta_s^*$ 1.4408895	双 曲 面	77.75%
	优化后 $\theta_s^*$ 1.4408895	最优副面形状 $r_3^*(\theta)$	83.09%

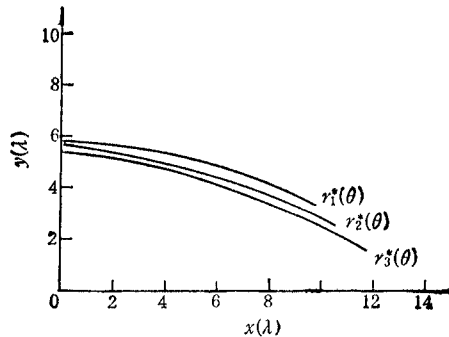


图 1

最优副面形状  $r_1^*(\theta)$ ,  $r_2^*(\theta)$ ,  $r_3^*(\theta)$  由图 1 给出。

从而我们得到了主面板共享模口径的最大共享区间

$$B^*(D) = [80\lambda, 100\lambda]$$

在此区间上,采用优化后的副反射面,就可以使各双反射面天线的效率  $\eta$  都大于 80%。

## 六、结 论

副反射面尺寸小,易于加工,且容易更换,因此通过优化副反射面使不同口径的主面共享一套加工模具,其经济价值是明显的,这对降低卫星地面站造价,提高天线的生产速度有重要的意义。另外,本文的副面优化方法还能使那些性能不太好的天线通过更换一优化的副面,提高其电气性能。本文的混合基优化方法对其它类型的工程优化也有一定的参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] 施济立,电子学报,1985年,第5期,第59-64页  
[2] P. J. Wood, *Marconi, Rev.*, 34(1972), 149-172.

# MAIN REFLECTOR MODULE SHARING TECHNIQUE FOR DUAL REFLECTOR ANTENNA AND ITS OPTIMIZATION METHOD

Xu Guohua Qi Yihong

(Northwest Telecommunication Engineering Institute, Xi'an)

**ABSTRACT** Main reflector module sharing technique for dual reflector antennas is presented in this paper, which makes main reflectors with same focus but different aperture share one set of module by means of optimizing subreflectors. To optimize the subreflector, a fast convergent optimization method is given and satisfactory results are obtained.

**KEY WORDS** Antenna; Dual reflector antenna; Main reflector module sharing technique; Iterative approach