

星载成形反射面天线全域基设计的研究

侯沁芳 阎鲁滨

(北京空间飞行器总体设计部,北京 100094)

摘要 介绍了对星载成形反射面天线全域基设计法的研究。采用单馈源单反射面天线,通过优化反射面得到赋形波束。文章研究的全域基设计法运用物理光学法,将反射面用 Jacobi-Fourier 表达式展开,展开式各项的系数作为优化对象,代入反射面天线远场辐射积分的计算,在优化远场辐射特性的同时确定了反射面展开式各项的系数,也即确定了反射面。

关键词 赋形波束 全域基 Jacobi-Fourier 展开式

中图分类号: V443.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-8748(2007)02-022-08

A Study on the Global Design of the Onboard Shaped Reflector Antennas

HOU Qinfang YAN Lubin

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: This paper introduces the study of global design of the onboard shaped reflector antennas. Single feed and single reflector are used. The reflector is optimized to produce contoured beam. The global designs in this paper used PO method, deploying the reflector by Jacobi-Fourier expansion and calculate the far field characteristics with this expansion. The coefficients became the optimization objects. When the far field characteristics are optimized, the coefficients are gotten and the reflector is confirmed.

Key words: contoured beam; global method; Jacobi-Fourier expansion

1 引言

新一代的通信卫星中,要求天线产生赋形波束,与所覆盖服务区的形状相匹配,这样可保证尽可能多的辐射能量集中于服务区内,避免服务区以外能量的浪费,大大提高传输效率。为形成赋形波束,天线设计可供选择的方案有很多,如采用阵馈抛物反射面天线、直接辐射阵列天线等。近年来的另一趋势是采用单个馈源,对反射面作成形设计,此种成形反射面天线具有结构简单、体积小、重量轻、成本低、损耗小等优点,因此,在对一个固定区域进行赋形

时,成形反射面天线无疑是极具吸引力且最有效的选择。

纵观成形反射面天线设计技术的发展,可以看出这些技术基本基于两类思路:局域基法和全域基法。

局域基法依靠几何光学法实现,根据赋形波前、馈源和反射面的关系,当赋形波前、馈源和反射面上的一点给定时,由光路定律可确定成形反射面,其典型算法是先综合天线口径场,并由此推出远场方向图,有时也将这种方法称为间接方法。

基于几何光学法技术的一个主要缺点是设计出的成形反射面是由一系列离散的点典型表征的,这

收稿日期:2006-05-25; 修回日期:2006-08-08

作者简介:侯沁芳(1979—),女,硕士,助理工程师,现从事星载成形反射面天线等方面的研究工作。

使得出的反射面不连续,边界不规则,在制造之前必须进行修改,这样可能会引入进一步的误差,使方向图质量下降,给工程可行性提出了疑问。

全域基法通过物理光学法来实现。物理光学法的原理可简单表述为:若某一理想导体面S上存在有表面电荷和表面电流,且S所围的区域内没有其它辐射源,则该域内各点的场都可由S面上的面电荷和面电流表示。将这一原理应用于反射面天线的分析时,在一定的近似条件下,就可通过对反射面上的表面电流作积分求出天线的远场辐射方向图。

将“反射面展开和系数优化”与物理光学法结合形成了全域基的思路。我们可以将其归纳为:将反射面展开式嵌入天线的辐射特性计算(用物理光学法)中,再将辐射特性计算嵌入优化程序中,这样,反射面的展开式系数成为优化参数,在完成优化的同时确定了反射面的系数,完成了反射面的成形设计。

用物理光学法进行成形反射面天线设计,其优点是直接、精确,而且无需再做反射面的插值拟合,提高了工程可实现性。它的缺陷在于较依赖反射面展开式的形式,因此需恰当地选取反射面的展开式。

近十几年来在国外,成形反射面已经成为星载天线一项极为重要的技术,已有许多星载成形反射面天线被成功设计、制造并投入使用。国内关于成形反射面天线的研究较少,迄今为止文献中有所记载的只有两家机构:一是西安空间无线电技术研究所,他们设计并加工了在Ku频段覆盖中国版图的通信卫星成形反射面天线^[1]。该所在理论上采用了几何光学法进行分析,在实践上他们使用了进口程序POS进行设计和加工;另一家是北京邮电大学^[2],他们比较计算了覆盖中国版图的单馈成形反射面天线和阵馈抛物反射面天线。以上两例成形反射面天线的理论研究都是基于局域基法,用几何光学法实现;而完全采用全域基法设计星载成形反射面天线的理论研究和设计实现在国内还没有先例。成形反射面天线在卫星通信方面有着无可替代的优势,而国内对这项技术的研究较薄弱且存在空白点,因此发展这项技术是十分必要和迫切的。为此,本文提出的全域基设计着眼于用一个单馈源单反射面的成形反射面天线产生赋形波束,覆盖并尽可能匹配中国版图;内容重点是采用全域基的思路,将反射面直接展开,根据辐射特性要求优化展开式系数来进行成形反射面天线的设计,整个思路依靠物理光学法实现。

2 研究方案

本文研究的是单馈源单偏置成形反射面天线,其几何构形和坐标关系如图1所示,先假设有一基准偏置抛物面,馈源坐标系 zs 轴指向反射面中心, ys 轴与天线坐标 y 轴平行;其中反射面形状是待优化的,反射面在 $x-y$ 平面上的投影是直径为 D 的圆形,馈源相对反射面的偏置高度为 h 。

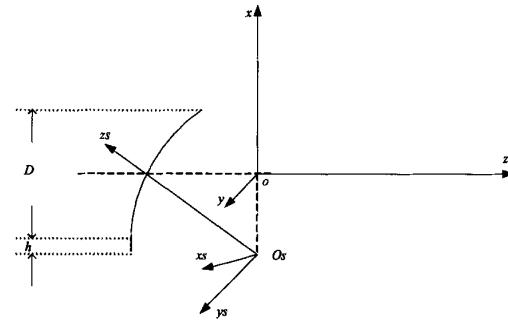


图1 单馈源单偏置成形反射面天线几何构形

Fig. 1 Structure of single feed and single offset reflector antenna

基于全域基的物理光学设计法主要的设计流程框图见图2。

设计流程的主体是图2中A、B、C、D所围的优化过程,优化变量为反射面展开式的系数,整个优化嵌入了模块B所示的用物理光学法计算天线辐射特性的过程。设计时,首先输入优化变量初值,代入模块A所示的反射面展开式,将此反射面展开式与馈源一起代入模块B计算天线的辐射特性。优化目标是将模块B输出的计算结果和输入的设计目标相比较得出的目标函数,目标函数应能反映出当下设计与预期天线辐射特性的偏离,当然侧重于不同的辐射特性时目标函数有不同的形式。当目标函数最小化(达到某一满意值)时,循环结束,认为找到了反射面展开式系数的最优解;否则用信赖域方法确定一组新的优化变量进行新一轮的循环,直到找到最优解为止。

图2中优化变量即反射面展开式系数的初始值可根据经验或按照简便的原则设定,例如,可先用几何光学法设计,或根据反射面为二次曲面形状的情况设定一组初始值。

全域基设计法有三个关键环节,分别如图2中模块B、A、D所示,即远场辐射积分的计算、反射面展开式的选取以及优化算法的选取。下文将详细介绍。

绍这三个部分的推导计算及部分结果。

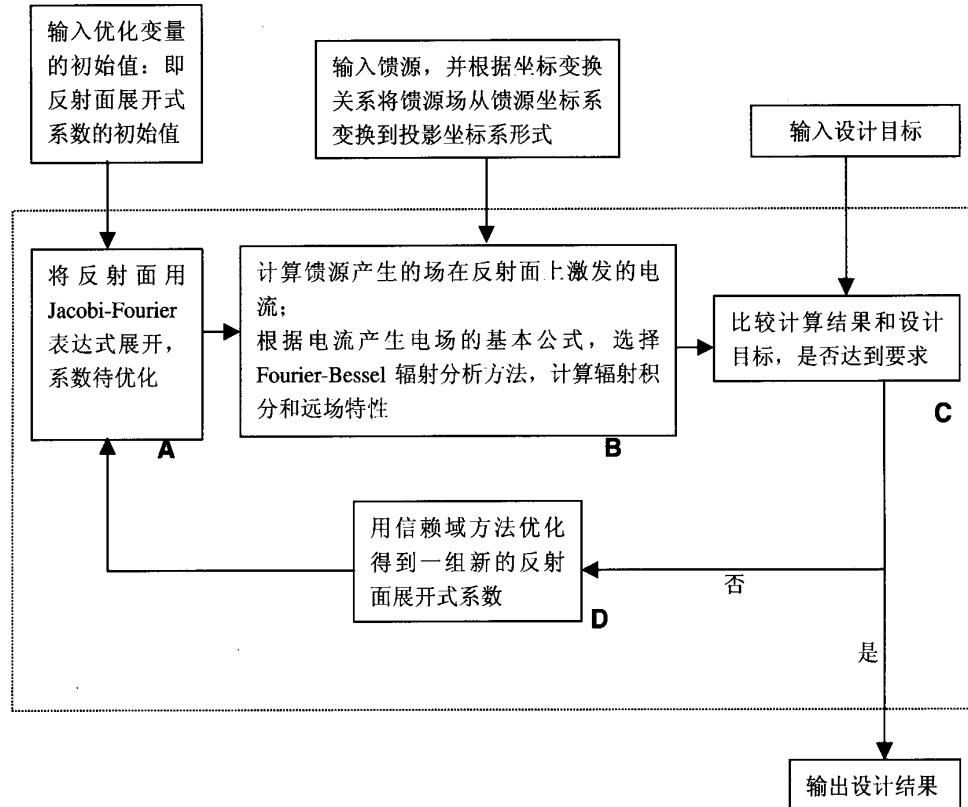


图 2 设计流程框图

Fig. 2 Modules of design procedure

3 关键环节

3.1 辐射积分的推导及编程结果

模块 B 是嵌入在整个优化设计流程中的天线辐射特性的计算，在用物理光学法计算天线的辐射特性时，需计算反射面表面电流的辐射积分，如何精确、高效地计算，这是物理光学法的一个难点。

为了计算辐射积分，研究者们寻求了各种解决方法。其中具有代表性的有 Jacobi-Bessel 方法和 Fourier-Bessel 方法。Jacobi-Bessel 方法原理简单易理解，但在数学处理上较复杂^[3]；Fourier-Bessel 方法在计算过程中应用了快速傅里叶变换(FFT)，数学形式上比较简练，也更容易理解和应用，并且效率比前一种方法高的多^[4]。本文采取 Fourier-Bessel 方法。Fourier-Bessel 方法的主要步骤可归纳为：将远场表示为反射面表面电流的辐射积分；将辐射曲面积分变换为投影圆口径面上的积分；将圆口径上的等效表面电流写成一个分段函数和一个定义

在圆口径的外切矩形上的周期函数之积；将周期函数展开为 Fourier 级数，用 FFT 计算其系数；根据分段函数 Fourier 变换的性质得到特定的 Bessel 序列，加权 FFT 计算得到的系数，叠加得到远场。

远场积分部分的程序用 MATLAB 编写，并分别用旋转对称抛物面和偏置抛物面代替成形反射面的展开式对远场积分作验证。

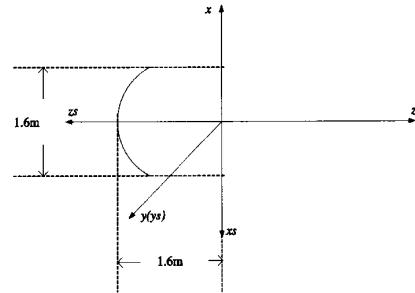


图 3 旋转对称抛物面几何构形

Fig. 3 Symmetric paraboloid reflector

图 3 为用作验证的旋转对称抛物面天线的几何

构形。天线口径 1.6m, 焦距 1.6m, 频率 6GHz。图 4 为程序计算得出的旋转对称抛物面天线增益的远场方向图, 由程序计算得天线增益最大值为 39.123dB。

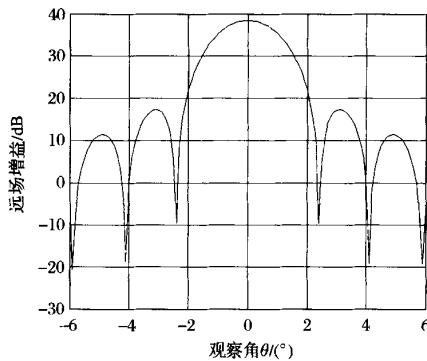


图 4 旋转对称抛物面远场增益方向图

Fig. 4 Pattern of the symmetric paraboloid reflector

图 5 为用作验证的偏置抛物面天线的几何构形图。天线口径 1.6m, 焦距 1.6m, 偏置高度 0.2m, 频率 6GHz。图 6 为上述偏置抛物面天线增益的远场方向图, 天线增益最大值 39.095 4dB, 3dB 波瓣宽度为 2.1°。与已有计算结果较吻合, 可较好地验证积分部分程序的正确性。

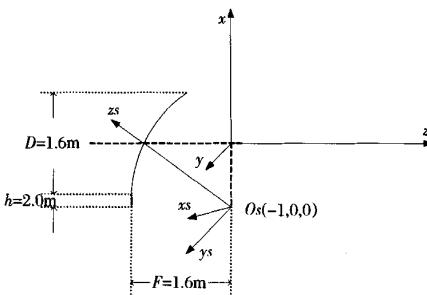


图 5 偏置抛物面天线几何构形

Fig. 5 Offset paraboloid reflector

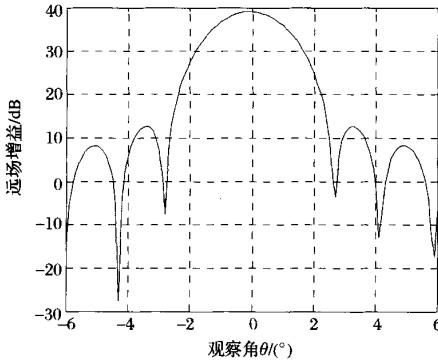


图 6 偏置抛物面远场增益方向图

Fig. 6 Pattern of the offset paraboloid reflector

3.2 反射面的展开及验证

模块 A 是在计算辐射积分时需嵌入的反射面展开式, 反射面展开式的选取也是一个关键。本课题中我们选用的是 Jacobi—Fourier 展开式, 具体形式如下

$$z' = f(x', y') = \tilde{f}(as', \phi') \sum_{n=0}^{N \rightarrow \infty} \sum_{m=0}^{M \rightarrow \infty} (C_{nm} \cos n\phi' + D_{nm} \sin n\phi') F_m^n(s')$$

$$(1)$$

(1) 式是在如图 1 所示的天线坐标系 $\langle \hat{x}, \hat{y}, \hat{z} \rangle$ 中得出的表达式, 反射面是用一个二维函数来表示的, $\tilde{f}(x', y')$ 表示直角坐标下的函数形式, $\tilde{f}(as', \phi')$ 表示圆柱坐标下的函数形式。 z' 表示反射面各点的 z 轴坐标值; ϕ', as' 为反射面上各点在 Oxy 平面上投影的极坐标, as' 为投影点的矢径, a 为投影圆口径的半径, 因此 s' 是归一化矢径, 无量纲, 变化范围为 0 到 1; ϕ' 为极角, 变化范围 0 到 2π 。对(1)式的直角坐标函数形式和柱坐标函数形式, 有如下关系 $x' = as' \cos \phi', y' = as' \sin \phi'$ 。

C_{nm} 和 D_{nm} 是展开式的系数, $F_m^n(s')$ 是修正 Jacobi 多项式。修正 Jacobi 多项式与谐振函数 $\cos n\phi', \sin n\phi'$ 一起构成了一组投影面上完整的正交基函数。(1) 式保证了反射面表面及其各阶导数都是连续的, 由于反射面的设计就是通过调整展开式的系数来完成的, 则设计出的反射面一定具有表面光滑、边界定义良好等特性。(1) 式是一个全域展开式, 即它的每一个基函数都是作用在整个投影区域上的, 这与局域函数是不同的。

(1) 式可有效表达反射面, 很多常用的反射面用最低阶的几项即可确切表达。已有很多研究者用这个展开式计算, 得出的结果是较精确的^[5,6]。

本文中我们也用偏置抛物面对 Jacobi—Fourier 展开式进行了验证, 偏置抛物面天线的结构及几何参数如图 5 所示。投影口径为圆形的偏置抛物面天线用 Jacobi—Fourier 表达式展开只需 C_{00}, C_{01}, C_{10} 三项系数即可精确表达, 其中

$$C_{00} = -\frac{F}{\sqrt{2}} + \frac{1}{8\sqrt{2}} \frac{2H^2 + a^2}{F} \quad (2)$$

$$C_{01} = -\frac{a^2}{8\sqrt{6F}} \quad (3)$$

$$C_{10} = \frac{aH}{4F} \quad (4)$$

式中 a 为投影圆口径的半径, F 为基准偏置抛物面的焦距, H 为馈源坐标系原点与天线坐标系原

点的距离,即馈源偏置高度 h 与天线投影口径半径 a 之和。将 C_{00} 、 C_{01} 、 C_{10} 系数代入(1)式,反射面展开式变为

$$z' = C_{00}F_0^0(s') + C_{01}F_1^0(s') + C_{10}\cos\phi' \cdot F_0^1(s') \\ = \sqrt{2}C_{00} + \sqrt{6}C_{01} + 2C_{10}\cos\phi' \cdot s' - 2\sqrt{6}C_{01}s'^2 \quad (5)$$

用这个展开式代替偏置抛物面原来的表达式,代入已经验证的积分程序,计算结果如图 7。

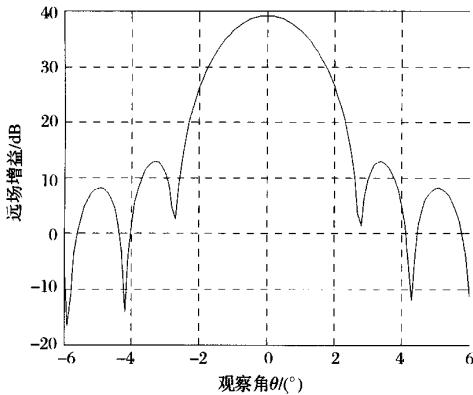


图 7 远场增益方向图

Fig. 7 Far field pattern

天线远场增益的最大值为 39.095 4dB,与上一部分反射面用常规表达式计算出来的结果完全吻合,可以验证用 Jacobi-Fourier 展开式表达反射面的正确性。

3.3 优化算法及其验证

本文的优化目标是要让采样点远场增益的计算值最好的逼近目标值。这是一个非线性最小二乘问题,其数学模型为

$$\min_{x \in R^n} f(x) = \frac{1}{2} r(x)^T r(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m [r_i(x)]^2, m \geq n \quad (6)$$

其中 $r(x) = (r_1(x), r_2(x), \dots, r_m(x))^T$ 为 $x \in R^n$ 的非线性函数,称为残量函数,本文中的残量函数即为远场增益计算值与目标值之差。

非线性最小二乘问题的优化算法最常用的有 Gauss-Newton 法和 Levenberg-Marquardt 法^{[7][8]}。Gauss-Newton 法用线性化模型代替 $r(x)$,得到线性最小二乘问题,但这种线性化并不对 $x - x_k$ 所有都成立。Levenberg 和 Marquardt 对 Gauss-Newton 法进行了修正,即考虑信赖域模型

$$\begin{cases} \min & q_k(\delta) = \frac{1}{2} \| A_k \delta + r_k \|^2 \\ \text{s. t.} & \|\delta\| \leq \rho \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$A(x) = [\nabla r_1(x), \nabla r_2(x), \dots, \nabla r_m(x)]^T$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial x_1}(x) & \frac{\partial r_1}{\partial x_2}(x) & \dots & \frac{\partial r_1}{\partial x_n}(x) \\ \frac{\partial r_2}{\partial x_1}(x) & \frac{\partial r_2}{\partial x_2}(x) & \dots & \frac{\partial r_2}{\partial x_n}(x) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial r_m}{\partial x_1}(x) & \frac{\partial r_m}{\partial x_2}(x) & \dots & \frac{\partial r_m}{\partial x_n}(x) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \delta^{(k)} \quad (9)$$

通过选取 ρ 的适当值求信赖域问题(7)的解 $\delta^{(k)}$ 确定对 $x^{(k)}$ 的修正量。由此形成的就是信赖域方法。信赖域方法不仅克服了 Gauss-Newton 法步长过长或由于 A_k 不满秩等问题引起的不收敛问题,而且增大了收敛区域,还保留了 Gauss-Newton 法的二次收敛性。因此本文中采用信赖域优化算法。

MATLAB 的优化工具箱用 lsqnonlin 函数求解非线性最小二乘问题,此函数的默认算法就是基于信赖域法^[9]。我们根据图 2 的设计流程编写了程序。最初的试探是优化出标准抛物面,天线的结构参数仍如图 5,其中偏置高度改为 0.4m,频率 6GHz。我们对已有的标准偏置抛物面天线计算出的方向图进行采样,再反过来将反射面展开成 Jacobi-Fourier 表达式来优化系数,由于非线性最小二乘模型(6)式中 $m \geq n$ 的约束,待优化的系数必须小于等于采样点的个数。

经过多次试探发现,采样点的选取,系数的初值选取均对优化结果有影响,而适当选取这两者是能够得到较好的优化结果的。图 8 是采样 40 点,反射面展开式取 8 项即优化 8 个系数得出的结果,横、纵轴分别为天线坐标系 y 、 x 轴的投影角,单位(°)。可以看出方向图较接近理想状况,最高增益位于星下点处,38.925 5dB,

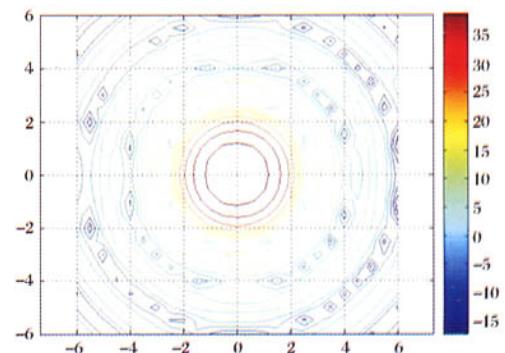


图 8 优化得到的远场增益等高线图

Fig. 8 Optimized far field gain

比计算值 39.080 4 小 0.154 9dB。

4 设计覆盖中国版图的单馈单偏置成形反射面天线

我们利用上述介绍的方法具体设计了覆盖中国版图的单馈单偏置成形反射面天线。例一,假定卫星位于地球静止轨道,定点东经 98° 上空。天线的结构参数如图 9,投影口径及焦距均为 1.6m,偏置高度 0.4m;频率 4GHz;优化过程中 C、D 系数待优化项共选择了 27 项,如(10)式所示,C、D 初值选取的是标准抛物面系数,即只有三个系数有初值,分别是 $C_{00} = -\frac{F}{\sqrt{2}} + \frac{1}{8\sqrt{2}} \frac{2H^2 + a^2}{F}$, $C_{01} = -\frac{a^2}{8\sqrt{6}F}$ 和 $C_{10} = \frac{aH}{4F}$;在中国版图上采样 47 点;目标增益 30dB 左右,可在优化过程中根据情况修正。

$$C_m = \begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} & C_{02} & C_{03} \\ C_{10} & C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{20} & C_{21} & C_{22} & 0 \\ C_{30} & C_{31} & 0 & 0 \\ C_{40} & C_{41} & 0 & 0 \\ C_{50} & 0 & 0 & 0 \\ C_{60} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, D_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{10} & D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{20} & D_{21} & D_{22} & 0 \\ D_{30} & D_{31} & 0 & 0 \\ D_{40} & D_{41} & 0 & 0 \\ D_{50} & 0 & 0 & 0 \\ D_{60} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

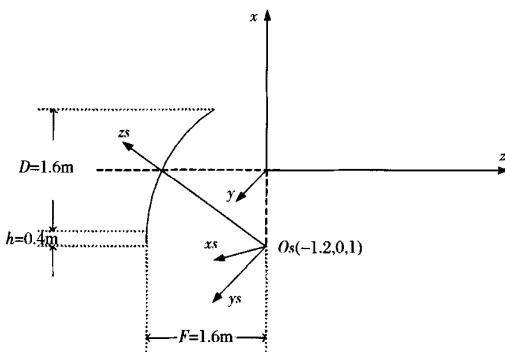


图 9 天线几何构形

Fig. 9 Structure of the reflector antenna

经过大量尝试我们总结出以下一些规律:反射面展开式系数的边界是优化过程中一个很重要的条件,取小了可能导致优化初期系数值过于分散,使优

化进程变慢,最后的优化结果也并不好,取大了则起不到约束作用,不能得到理想结果,因此边界值需谨慎选取,其大小与频率、抛物面结构尺寸均有一定关系;采样点不能过少但也无需过多,在边界转折点可适当多取一些;目标增益值可在优化过程中视情况改变以期得到更好的结果。

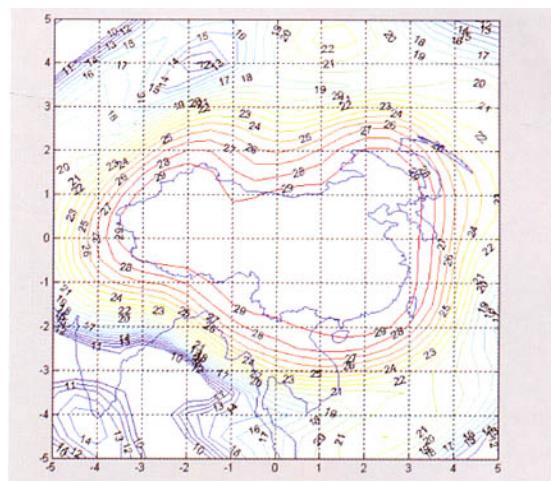


图 10 优化得到的赋形方向图

Fig. 10 Optimized contoured pattern

优化结果如图 10,横纵坐标分别是天线坐标系 y、x 轴的投影角,单位(°),可以看出,28dB 线可以覆盖全国 100% 的地区。

例二,希望能在上下行频带兼顾覆盖中国版图,卫星仍然位于地球静止轨道,定点东经 98° 上空。天线的结构参数如图 11,下行中心频率 20.55GHz,上行中心频率 30.45GHz。反射面展开式及 C、D 的

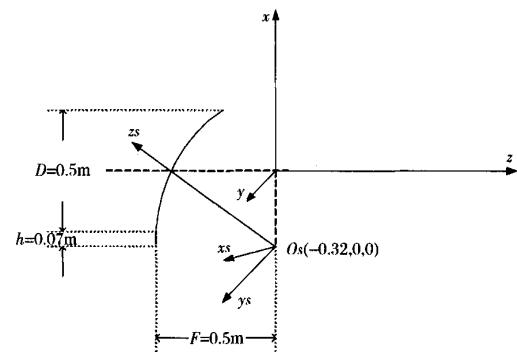
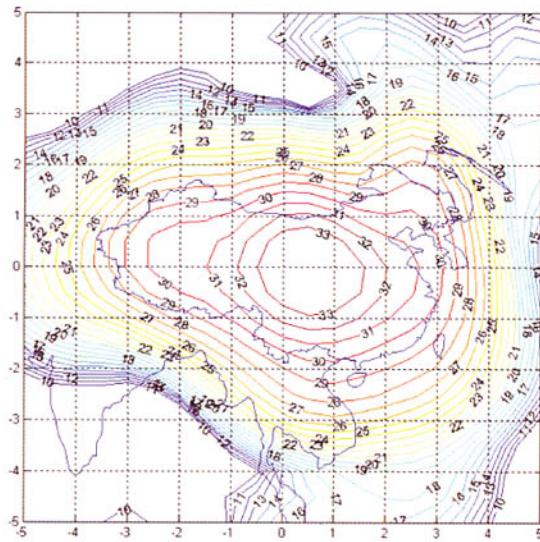


图 11 天线几何构形

Fig. 11 Structure of the reflector antenna

设置同例一。

方法一是优化时取中间频率为对象,本例中我们取 26GHz 进行优化,优化结果如图 12、13。



31dB 之间。从以上两种方案的对比我们可以看出,方案一取中间频率优化与方案二同时优化高低频率基本都能达到赋形和增益要求。就全国平均增益来说,两者相近;但从边界匹配度及细节方面来说,方案二的赋形效果比方案一的更好,方案二高频中国版图中间部分增益略低,但在后面大量的优化尝试中发现,这个缺陷是可以通过修改采样点等方法有效弥补的,因此在后面的具体设计中,我们更倾向于使用方案二来优化。我们根据优化结果可以确定(1)式中反射面的展开式系数,得到反射面的展开式如(11)式所示。

$$\begin{aligned}
 z' = & \sqrt{2}C_{00} + \sqrt{6}C_{01} \cdot (1 - 2s'^2) + \sqrt{10}C_{02} \cdot (1 \\
 & - 6s'^2 + 6s'^4) + \sqrt{14}C_{03} \cdot (1 - 12s'^2 + 30s'^4 - 20s'^6) \\
 & + 2(C_{10}\cos\phi' + D_{10}\sin\phi') \cdot s' + \\
 & \sqrt{2}(C_{11}\cos\phi' + D_{11}\sin\phi') \cdot (4s' - 6s'^3) + \\
 & \sqrt{12}(C_{12}\cos\phi' + D_{12}\sin\phi') \cdot (3s' - 12s'^3 + 10s'^5) + \\
 & \sqrt{6}[C_{20}\cos(2\phi') + D_{20}\sin(2\phi')] \cdot s'^2 + \\
 & \sqrt{10}[C_{21}\cos(2\phi') + D_{21}\sin(2\phi')] \cdot (3s'^2 - 4s'^4) + \\
 & \sqrt{14}[C_{22}\cos(2\phi') + D_{22}\sin(2\phi')] \cdot (6s'^2 - 20s'^4 + \\
 & 15s'^6) + \sqrt{8}[C_{30}\cos(3\phi') + D_{30}\sin(3\phi')] \cdot s'^3 + \\
 & \sqrt{3}[C_{31}\cos(3\phi') + D_{31}\sin(3\phi')] \cdot (8s'^3 - 10s'^5) + \\
 & \sqrt{10}[C_{40}\cos(4\phi') + D_{40}\sin(4\phi')] \cdot s'^4 + \\
 & \sqrt{14}[C_{41}\cos(4\phi') + D_{41}\sin(4\phi')] \cdot (5s'^4 - 6s'^6) + \\
 & \sqrt{12}[C_{50}\cos(5\phi') + D_{50}\sin(5\phi')] \cdot s'^5 + \\
 & \sqrt{14}C_{60}\cos(6\phi') + D_{60}\sin(6\phi')] \cdot s'^6 \quad (11)
 \end{aligned}$$

其中 z' 、 ϕ' 及 s' 的含义同(1)式。我们由(11)式再对反射面进行型面、结构等工程设计,最后反射面可由数控机床加工得到。

5 小结

本文对星载成形反射面天线的全域基设计进行了研究,深入讨论了三个关键部分并给出解决方案。其中辐射积分的计算采用了 Fourier—Bessel 方法;反射面展开式选取了 Jacobi—Fourier 展开式;而优化算法是基于信赖域方法。我们设计了覆盖中国版图的单馈源单偏置成形反射面天线,得出的赋形效

果是很好的,证明了全域基设计法的可行性和有效性。当然,还存在很多可深入探讨的问题,如:上下行频带如何更好地兼顾并在上行频带绕开台湾问题、交叉极化问题,其他参数如反射面尺寸、馈源对优化结果的影响等等。我们将继续研究这些问题,并继续总结设计规律,归纳出一套系统的成形反射面天线全域基设计方法。

参考文献 (References)

- [1] 孙雷洪, 郭文嘉, 李正军. 单馈源赋形反射面天线研究 [J]. 空间电子技术, 1995, 2: 27-37
SUN Leihong, GUO Wenjia, LI Zhengjun. Study of the single feed shaped reflector antenna [J]. Space Electronic Technology, 1995, 2: 27-37
- [2] 夏文, 王华芝, 马文华. 卫星成形反射面天线波束赋形的研究 [J]. 中国空间科学技术, 1999, 2: 21-26
XIA Wen, WANG Huazhi, MA Wenhua. Study of the onboard shaped reflector antenna producing contoured beam [J]. Chinese Space Science and Technology, 1999, 2: 21-26
- [3] Rahmat-Samll Y. Shaped reflector antenna analysis using the Jacobi-Bessel Series [J]. IEEE trans, Antenna Propagation, 1980, 28(4)
- [4] CHARLES C. HUNG. Secondary pattern and focal region distribution of reflector antennas under wide-angle scanning [J]. IEEE trans, Antenna Propagation, 1983, 31(5)
- [5] DuanDahweih, Rahmat-Samii Yahya. A generalized diffraction synthesis technique for high performance reflector antennas [J]. IEEE trans, Antenna Propagat, 1995, 43(1)
- [6] Rahmat-Samll Y, Mumford J. Reflector diffraction synthesis using global coefficients optimization techniques [C]. IEEE AP-S Intl. Symp, 1989: 1166-1169
- [7] 孙文瑜, 徐成贤, 朱德通. 最优化方法 [M]. 高等教育出版社, 2004
SUN Wenyu, XU Chengxian, ZHU Detong. Optimization method [M]. Advanced Education Press, 2004
- [8] 袁亚湘, 孙文瑜, 最优化理论与方法 [M]. 科学出版社, 1997
YUAN Yaxiang, SUN Wenyu. Optimization theory and method [M]. Science Press, 1997
- [9] 苏金明, 阮沈勇, 王永利. MATLAB 工程数学 [M]. 电子工业出版社, 2005
SU Jiming, RUAN Shenyong, WANG Yongli. MATLAB engineering mathematics [M]. Electronic Industry Press, 2005

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>