

卫星反射面天线波束赋形的研究¹

夏文 王华芝 马文华

(北京邮电大学电信工程学院 北京 100876)

摘要 卫星波束赋形天线普遍采用阵馈抛物反射面天线和单馈成形反射面天线。针对前者阵馈和后者反射面表面形状复杂的特点,本文分别采用了遗传算法和共轭梯度法对这两种天线进行了优化,并获得了中国版图的波束赋形,说明上述算法在卫星反射面天线波束赋形优化中是有效的。

关键词 赋形波束, 阵馈抛物反射面, 单馈成形反射面, 遗传算法, 共轭梯度法

中图分类号 TN927.2, TN823

1 引言

卫星通信中,天线在特定地区或版图内产生的增益电平需达到地面站要求,其外的增益电平要尽可能低,以免造成干扰。赋形波束天线因符合此要求而得到了广泛的应用。产生赋形波束的首选天线为反射面天线,包括阵馈抛物反射面天线和单馈成形反射面天线。前者通过优化馈源阵的激励系数分布,后者通过优化反射面的表面形状来达到赋形的目的。

阵馈抛物反射面天线系统由馈源阵,波束成形网络和反射面组成。针对不同形状的覆盖区,波束成形网络通过可变功率分配器和可变移相器来调整馈源阵的幅度和相位分布,以产生不同的赋形波束,因此,其波束是可再赋形的,可达到卫星重复利用的目的。此外,由于采用多个馈源,可实现频率复用,提高通信容量。单馈成形反射面天线由单个馈源和反射面组成。在高频的情况下,波束成形网络构造与调谐极为复杂,而且费用较高,射频损耗较大,简化波束成形网络的单馈成形反射面天线便具备造价较低、重量较轻和损耗较小的优点,其反射面的表面形状是不规则的,加工制造有赖于机械工艺。

阵馈抛物反射面天线与单馈成形反射面天线各具其特点,而且在卫星通信中都得到了不同程度的应用,本文以这两种天线作为研究对象,采用遗传算法优化馈源阵的激励系数,选取口面栅格场的相位的共轭梯度法优化反射面的表面形状,分别对中国版图进行了波束赋形。

2 阵馈抛物反射面天线馈源阵激励系数的优化

为使赋形波束满足覆盖区内外的电平要求,需对这两个区域进行采样。假设总共有 M 个采样点,天线有 N 个馈源,首先根据天线的几何参数用分析的方法求出一个 $M \times N$ 阶的复矩阵 A ,用于计算该天线系统的远场增益电平^[1]。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1N} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{M1} & \cdots & a_{MN} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

(1) 式中 $a_{ij} = a_{ijR} + ja_{ijI}$ 表示当第 j 个馈源馈以单位电平,而其他的馈源馈以零电平时,在第 i 个采样点得到的场强值。忽略各馈源之间的相互耦合,如果各个馈源的激励系数

¹ 1998-03-23 收到, 1998-10-17 定稿
国家自然科学基金资助课题

为 (z_1, z_2, \dots, z_N) , 则采样点的场强和激励系数呈线性关系, 第 i 个采样点的场强 E_i 和功率 Q_i 分别为

$$E_i = a_{i1}z_1 + \dots + a_{ij}z_j + \dots + a_{iN}z_N = \sum_{j=1}^N a_{ij}z_j, \quad (2)$$

$$Q_i = |E_i|^2 = [\text{Re}(E_i)]^2 + [\text{Im}(E_i)]^2. \quad (3)$$

采用遗传算法对激励系数进行优化。首先设定控制参数, 即群体规模、交叉概率和变异概率的大小; 再将优化变量进行编码, 设优化变量为 $(x_1, \dots, x_q, \dots, x_n)$, $x_q \in [-1.0, 1.0]$, $q = 1 \dots n$, 可将每个变量 x_q 编码为 $L = 8$ 位长的二进制无符号整数 k , x_q 的左边界实数值为 $x_l = -1.0$, 右边界实数值为 $x_r = 1.0$, x_q 可解码为 $x_q = (x_r - x_l) \cdot k / 2^L + x_l$ 。基因串的总长度为 $L * n$; 接着设计适应度函数, 用于评价解的优劣, 其值越大, 说明解越逼近最优点, 本文以整体偏差逼近建立如下式的适应度函数:

$$\left. \begin{aligned} \max f(\vec{x}) &= C - g(\vec{x}), \quad g(\vec{x}) \leq C, \\ g(\vec{x}) &= \left[\sum_{i=1}^M \omega_i \left(\frac{Q_i - Q_i^0}{Q_i^0} \right)^P \right]^{1/P}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(4) 式中, P 为偶数, ω_i 是权值系数, Q_i^0 是各采样点的目标功率值, C 是保证适应度函数为非负的常数。最后, 经过反复多次选择、交叉和变异的操作, 直至取得满意的波束赋形效果。

选择操作从当前群体中选出优良的个体置于配对库中, 使之有机会作为父代进行交叉操作。个体适应度函数值越大, 其被选中的机会就越大。交叉操作把两个父代个体的部分结构加以替换重组而生成新的个体, 其目的是使解向最优点处逼近。交叉可分两步进行: 首先对配对库中的个体进行随机配对; 其次, 在配对个体中随机设定交叉处, 配对个体彼此交换部分信息, 现给出一个交叉的例子

$$\begin{array}{l} \text{配对个体} \quad \text{个体A} \quad 1010|0100 \rightarrow 10101010 \quad \text{新个体A}' \\ \quad \quad \quad \text{个体B} \quad 0101|1010 \rightarrow 01010100 \quad \text{新个体B}' \end{array}$$

变异是 0 与 1 的互换, 首先在群体中所有个体的码串范围内随机地确定基因座; 然后以事先设定的变异概率来对这些基因座的基因值进行变异。操作如下

$$\begin{array}{l} \text{个体A} \quad 10101101 \xrightarrow{\text{变异}} 11100101 \quad \text{新个体A}' \\ \quad \quad \quad \bullet \quad \bullet \quad \quad \quad \bullet \quad \bullet \end{array}$$

3 单馈成形反射面天线反射面的表面形状的优化

将反射面天线的口面分成足够多的栅格, 如图 1 所示。由于采用反射面的口面直径较大, 口面栅格的场的幅度分布在优化过程中可以视为不变^[2]。选定抛物反射面天线为起始

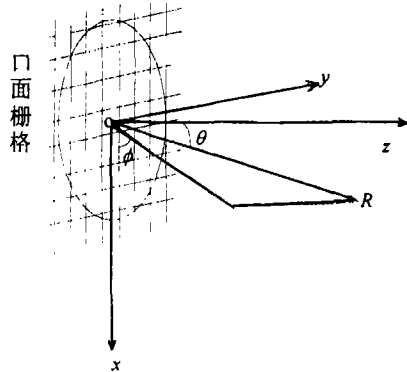


图 1 口面栅格

天线系统, 根据远场采样点的增益要求, 采用共轭梯度法优化算法, 对栅格上场的相位进行优化迭代, 直至满足迭代停止判决条件。

采用口面场法计算该天线的远场。设栅格总数为 N , 口面上每个栅格内的场的幅度和相位均等于每个栅格中心的场的幅度和相位, 将天线等效为具有相同矩形面阵元的平面天线阵。根据叠加原理, 在空间一点处的远场为 N 个矩形面阵元产生的场叠加而成, 表示为

$$E(\theta, \phi) = \sum_{j=1}^N A_j E_j(\theta, \phi) e^{j\varphi_j(\theta, \phi)} e^{j\beta_j}, \quad (5)$$

$$\varphi(\theta, \phi) = ku(\theta, \phi)x_{aj} + kv(\theta, \phi)y_{aj} = k(x_{aj}u(\theta, \phi) + y_{aj}v(\theta, \phi)), \quad (6)$$

$$E_j(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{4\pi S_j}{\lambda^2}} \left[\frac{\sin((\pi a_j/\lambda)u(\theta, \phi))}{(\pi a_j/\lambda)u(\theta, \phi)} \right] \left[\frac{\sin((\pi b_j/\lambda)v(\theta, \phi))}{(\pi b_j/\lambda)v(\theta, \phi)} \right], \quad (7)$$

$$u(\theta, \phi) = \sin \theta \cos \phi, \quad (8)$$

$$v(\theta, \phi) = \sin \theta \sin \phi, \quad (9)$$

(5) 式中 A_j 是第 j 个阵元相对于中心阵元的幅度相对值, 由该天线的口面场的分布确定, β_j 是第 j 个阵元的相位, 也是优化的对象, $E_j(\theta, \phi)$ 为第 j 个阵元在 (θ, ϕ) 方向上的点产生的归一化远场分量的大小。(6) 式中, x_{aj} 表示第 j 个阵元的 x 坐标, y_{aj} 表示第 j 个阵元的 y 坐标。 k 为波矢量的大小。(7) 式中 S_j 为第 j 个阵元的面积, a_j, b_j 为第 j 个阵元的长和宽。在这里, 记第 i 个 (θ, ϕ) 方向的远场大小为

$$E_i(\theta, \phi) = \sum_{j=1}^N A_j E_{ji}(\theta, \phi) e^{j\beta_j}. \quad (10)$$

(10) 式中 $E_{ji}(\theta, \phi) = E_j(\theta, \phi) e^{j\varphi_j(\theta, \phi)}$, 则第 i 个 (θ, ϕ) 方向的增益表达式为

$$Q_i(\theta, \phi) = \frac{|E_i(\theta, \phi)|^2}{\sum_{j=1}^N A_j^2} = \frac{\left| \sum_{j=1}^N A_j E_{ji}(\theta, \phi) e^{j\beta_j} \right|^2}{\sum_{j=1}^N A_j^2}. \quad (11)$$

以整体偏差逼近建立目标函数为

$$\left. \begin{aligned} & \min_{\vec{\beta}} f(\vec{\beta}), \\ & f(\vec{\beta}) = \left[\sum_{i=1}^M \omega_i (Q_i - Q_i^0)^P \right]^{1/P}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

(12) 式中, P 为偶数, ω_i 是权值系数。目标函数对优化变量的求导如下:

$$\frac{\partial f}{\partial \beta_j} = \left[\sum_{i=1}^M \omega_i (Q_i - Q_i^0)^P \right]^{1/P-1} \sum_{i=1}^M \omega_i (Q_i - Q_i^0)^{P-1} \left[-2A_j / \sum_{j=1}^N A_j^2 \text{Im}(E_i^* E_{ji} e^{j\beta_j}) \right]. \quad (13)$$

(13) 式中, Im 表示求复数的虚部, $*$ 表示求共轭复数。

此问题的优化变量多达数千, 有些算法难以适用。为节省存储量和保证收敛速度起见, 选取共轭梯度法求解此无约束的非线性规划问题, 得到优化后的口面栅格的场的相位分布, 根据几何光学原理, 反射面的形状可由栅格上场的相位分布求出^[3,4]。

4 赋形实例

根据以上思想, 分别采用了阵馈抛物反射面天线和单馈成形反射面天线对中国版图进行赋形。卫星均处于静止轨道, 位置为 105°E , 天线均指向 112.5°E 、 33.7°N 的位置。抛物反射面天线有 10 个馈源, 初始为等幅同相激励, 成形反射面天线为单个馈源, 初始时反射面为抛物反射面。

表 1 经优化后馈源阵的激励系数分布

馈源	优化后的激励系数
1	(0.310558, -0.234453)
2	(-0.045418, -0.236908)
3	(0.313013, -0.023323)
4	(0.116613, 0.079788)
5	(0.313013, -0.286008)
6	(0.241818, -0.001228)
7	(0.313013, 0.313013)
8	(-0.096973, 0.155893)
9	(0.313013, 0.313013)
10	(0.003683, 0.089608)

表 1 为以遗传算法对阵馈抛物反射面天线进行优化后得到的馈源阵激励系数分布情况。图 2 为以共轭梯度法对单馈抛物反射面天线进行优化后得到的成形反射面天线的反射面表面形状分布情况, 图 2(a) 表示初始时的抛物反射面的表面形状, 图 2(b) 表示优化后的成形反射面表面与初始时对应点的差值。

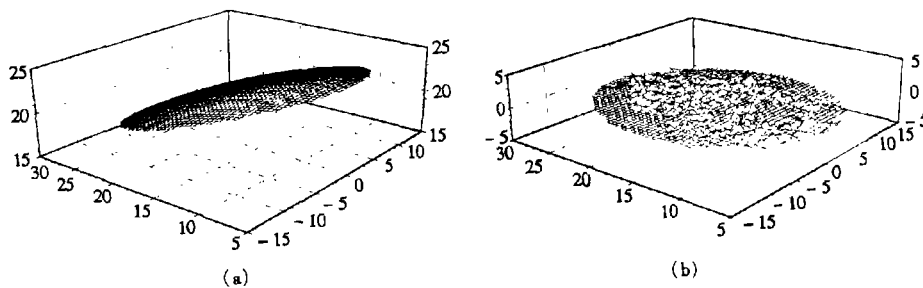


图 2 经优化后的成形反射面的表面形状分布
(a) 抛物反射面的表面示意图 (b) 形成反射面与抛物反射面的表面差值示意图

图 3 是优化阵馈抛物反射面天线馈源阵激励系数后得到的远场增益等值线图, 图 4 是优化单馈成形反射面天线的反射面表面形状后得到的远场增益等值线图。从图 3 和图 4 可以看出, 阵馈抛物反射面天线和单馈成形反射面天线均能获得良好的赋形效果 (因比例关系, 南沙群岛等海域以虚线画出)。

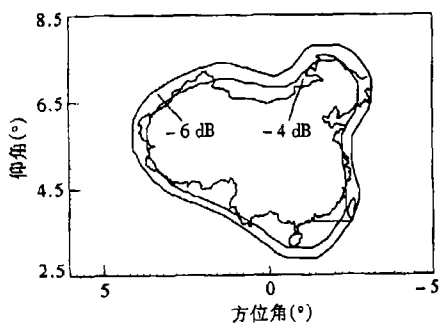


图 3 阵馈抛物反射面天线增益等值线图

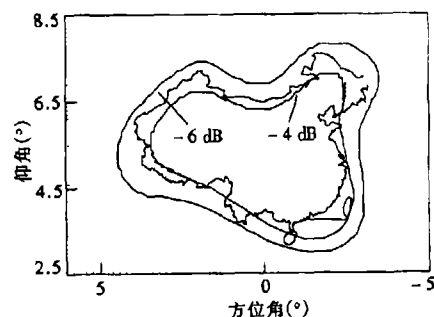


图 4 单馈成形反射面天线增益等值线图

5 结 论

阵馈抛物反射面天线具备波束可再赋形和频率复用的优点, 单馈成形反射面天线则造价较低、重量较轻和损耗较小, 采用遗传算法和共轭梯度法分别对其优化, 均可获得良好的赋形效果。

参 考 文 献

- [1] 谢崇进. 卫星多波束天线赋形方法的研究: [硕士论文]. 北京: 北京邮电大学, 1996, 3.
- [2] Kazuyoshi Shogen, Hayato Nishida, Noboru Toyama. Single shaped reflector antennas for broadcasting satellites. *IEEE Trans. on AP*, 1992, AP-40(2): 178-187.
- [3] Alan R. Cherrette, Shung-wu Lee, Roberto J. Acosta. A method for producing a shaped contour radiation pattern using a single shaped reflector and a single feed. *IEEE Trans. on AP*, 1989, AP-37(6): 698-706.
- [4] 夏文. 卫星反射面天线波束赋形优化的研究: [硕士论文]. 北京: 北京邮电大学, 1998, 3.

THE STUDY OF CONTOURED BEAM OF SATELLITE REFLECTOR ANTENNA

Xia Wen Wang Huazhi Ma Wenhua

(*Institute of Telecomm. Eng., Beijing University of Posts and Telecomm., Beijing 100876*)

Abstract Array-fed parabolic reflector and shaped reflector with a single feed are usually used to be contoured beam satellite antenna. In the paper, in accordance with the feature of array feeds of the former and the complex reflector surface shape of the latter, genetic algorithms and conjugate gradient method are chosen to optimize these two kinds of antennas to contour China map respectively, which proves that the algorithms are effective in the optimization of contoured beam of satellite reflector antenna.

Key words Contoured beam, Array-fed reflector, Shaped reflector with a single feed, Genetic algorithms, Conjugate gradient method

夏文: 男, 1973年生, 工程师, 现工作于邮电工业总公司中讯技术服务中心。

王华芝: 女, 1938年生, 教授, 现从事天线与电波传播教学和科研工作。

马文华: 男, 1975年生, 硕士生, 专业为电磁场与微波技术。