

# 卫星多波束天线不规则馈元阵形赋形的研究

张亦希, 傅君眉, 汪文秉

(西安交通大学微波工程与光通信研究所, 陕西西安 710049)

**摘要:** 本文着重研究了卫星多波束天线馈元阵的形状对赋形的影响. 首先证明了常用的通用阵形中存在着对赋形没有贡献的冗余馈元, 进而提出采用没有冗余馈元的不规则阵形来赋形以减小馈元数量的思路, 并进一步证明了不规则阵和相应的规则阵在同样条件下, 用同一种赋形算法, 有着同样的赋形效果, 最后给出了由通用规则阵得到相应不规则阵的简单而有效的方法.

**关键词:** 卫星通信; 多波束天线; 赋形; 馈元阵形

**中图分类号:** TN822 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2002)06-0777-03

## Research on Pattern Synthesis for Irregular Feed Array Configuration in Satellite Multiple-Beam Antennas

ZHANG Yixi, FU Jurmei, WANG Wenbing

(Electromagnetic and Communication Laboratory, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

**Abstract:** In this paper the effect of feed array configuration in satellite multiple beam antennas on pattern synthesis has been investigated. First it is proved that some redundant feeds which have no contribution to pattern synthesis exist in regular configuration feed array, such as hexagonal grid array. Then a type of irregular configuration feed array with no redundant feed is proposed to reduce the number of array feeds and proved to have the same performance in pattern synthesis as the regular one. In the end a very simple and effective method is presented to derive the configuration of irregular feed array from its regular counterpart.

**Key words:** satellite communication; multiple beam antenna; pattern synthesis; feed array configuration

### 1 引言

卫星多波束天线技术已开始广泛地应用于卫星通信领域当中. 卫星多波束天线技术是应用数字处理技术先形成许多相互独立的点波束, 然后再对这些点波束进行组合叠加, 从而形成天线的赋形波束, 以覆盖服务区域<sup>[1]</sup>. 因此卫星多波束天线与传统天线不同, 它可以只在指定的任意形状的区域具有较高的增益, 而在此区域之外天线的增益则很低, 故它能有效提高天线的增益、频谱的利用率, 并能使地面站终端设备得到简化和降低成本. 卫星多波束天线主要有馈元阵多波束天线、有源相控阵天线、赋形反射面多波束天线以及相控阵双反射面多波束天线等四种形式<sup>[2]</sup>. 由于馈元阵多波束天线具有增益高、重量轻等优点, 因此使用的最多, 故本文所提到的卫星多波束天线都是指馈元阵多波束天线. 目前对卫星多波束天线技术的研究主要集中在赋形算法上(即研究如何通过某种算法使卫星多波束天线的方向图成为人们所希望的任意形状), 并已提出了一些较为成熟有效的赋形算法, 如: 最小 $p$ 乘法<sup>[3,4]</sup>、最小最大法<sup>[5,6]</sup>和遗传算法<sup>[7]</sup>等. 本文着重研究了馈元阵的形状对赋形的影响, 发现并证明了当前常用的通用馈元阵形中往往存在着较大的冗余性, 即阵中存在着许多对赋形没有贡献的冗余馈元, 并据此提出了一种没有冗余性的不规则布阵方法, 它可以在保证赋形精度不变的条件下, 减小馈元的数量, 从而达到降低卫星重量和复杂性的目的.

### 2 卫星多波束天线的工作原理及赋形方法

卫星多波束天线一般由一个微波光学器件(反射面或微波透镜)、一个馈元阵和控制产生多个波束的波束成形网络组成, 如图1所示<sup>[8]</sup>.

由于卫星距离地球较远, 由这个距离所造成的自由空间损耗很大, 因此必须使用微波光学器件来提高天线的增益. 这是卫星多波束天线与其它阵列天线最显著的不同.

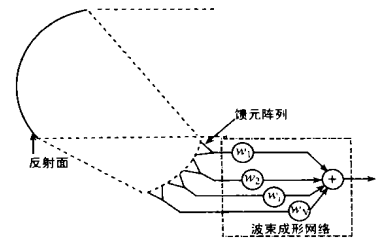


图1 卫星多波束天线组成框图

馈元阵放在微波光学器件的焦平面上, 由一组指向微波光学器件并按一定方式排列的喇叭天线组成. 常用的馈元阵形一般为馈元间距很小的平面六边形蜂窝阵, 如图2所示. 这种阵形各个馈元都放在六边形网格的节点上, 这样可以使各馈元所产生点波束的间隔较小, 从而减小服务区域内天线增益的起伏. 由于各馈元都相对于焦点有一个大小和方向都各不相同的横向偏移量, 故各馈元所产生的波束经反射面或微波透镜的聚焦后, 会在远场区形成一组波束宽度近似相等、均匀分布、互不重叠的点波束, 如图3所示.

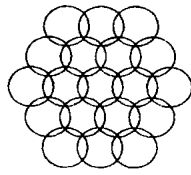
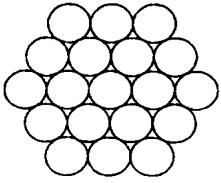


图2 六边形馈元阵

图3 六边形点阵波束的空间分布

波束成形网络,通过调节各馈元的激励系数  $W_1 \sim W_N$  (包括幅度和相位),将固定的点波束进行组合叠加从而形成新的赋形波束。由于各馈元的排列方式相同,所以各点波束的远区场的极化方向是一致的。同时又因为喇叭天线具有较强的方向性且指向相同,故各馈元之间的互耦很小,可以假设各馈元之间没有互耦。这时,总的远区辐射场场强分布为各个点波束的远区辐射场场强分布的线性和,可表示为:

$$E_{\text{Total}}(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^N W_i E_{B_i}(\theta, \phi) \quad (1)$$

其中:  $W_i$  是对点波束的复加权;  $N$  为馈元个数;  $E_{B_i}(\theta, \phi)$  为第  $i$  个点波束远区辐射场的场强分布函数;  $\theta, \phi$  分别为观察点处的方位角和俯仰角坐标。

卫星多波束天线的赋形算法,就是要在天线辐射功率在空间中的期望分布  $P_D(\theta, \phi)$  已知的条件下,求出最佳权矢量  $W_{opt}$ ,使天线辐射功率在空间中的实际分布  $P_B(\theta, \phi)$

$$P_B(\theta, \phi) = E_{\text{Total}}^*(\theta, \phi) \cdot E_{\text{Total}}(\theta, \phi) \quad (2)$$

与期望分布尽可能地接近。因此卫星多波束天线方向图的赋形问题可表示为:

$$\min_w \varepsilon(W) \quad (3)$$

其中:  $\varepsilon(W)$  为  $P_D(\theta, \phi)$  与  $P_B(\theta, \phi)$  间的误差函数;  $W$  为权矢量。因此卫星多波束天线的赋形问题实质上就是一个求权矢量  $W$  使  $\varepsilon(W)$  达到最小值的优化问题。  $\varepsilon(W)$  也就是要优化的目标函数。  $\varepsilon(W)$  的定义方法的不同,就形成了不同的赋形方法。目前使用比较广泛的赋形算法主要有最小  $p$  乘法<sup>[3,4]</sup>和最小最大法<sup>[5,6]</sup>。对最小  $p$  乘法,  $\varepsilon(W)$  定义误差函数为:

$$\varepsilon(W) = \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} |P_B(\theta, \phi) - P_D(\theta, \phi)|^p d\theta d\phi \right\}^{1/p} \quad (4)$$

而最小最大法则定义误差函数为:

$$\varepsilon(W) = \max_{\theta, \phi} |P_B(\theta, \phi) - P_D(\theta, \phi)| \quad (5)$$

### 3 卫星多波束天线的不规则馈元阵

目前常用的馈元阵形状都是各种规则阵,主要有平面正六边形蜂窝阵、平面四边形阵等。其中平面正六边形蜂窝阵的形状如图2所示,所有的馈元都放在一个正六边形内的正六边形网格上。由于这种阵形是一种通用阵形,没有根据要赋形的目标方向图来作相应的调整,故不能充分发挥所有馈元的作用,必然存在着较大的冗余性。假设  $(\theta_0, \phi_0)$  为服务区域外任意一点。由于要求服务区域外天线的辐射功率尽可能的低,故有:

$$P_D(\theta_0, \phi_0) \approx 0$$

因此有:

$$\begin{aligned} |P_B(\theta_0, \phi_0) - P_D(\theta_0, \phi_0)| &= |P_B(\theta_0, \phi_0)| \\ &= \left| \sum_{i=1}^N W_i E_{B_i}(\theta, \phi) \right|^2 \end{aligned}$$

在卫星多波束天线中每个馈元所产生的的波束都很窄,且波束间一般只有 3dB 波束宽度的重叠。故点  $(\theta_0, \phi_0)$  只能落在它周围邻近的七个波束的主瓣内,而会落在其它波束的旁瓣内。设这七个相邻波束的序号分别为  $I+1, I+2, \dots, I+7$ , 由于每个点波束的旁瓣都很低,一般低于 -20dB, 故可认为:

$$E_{B_i}(\theta_0, \phi_0) = 0 \quad i \neq I+1, I+2, \dots, I+7$$

$$|P_B(\theta_0, \phi_0) - P_D(\theta_0, \phi_0)| = |W_{I+1} \cdot E_{B_{I+1}}(\theta_0, \phi_0) + W_{I+2} \cdot E_{B_{I+2}}(\theta_0, \phi_0) + \dots + W_{I+7} \cdot E_{B_{I+7}}(\theta_0, \phi_0)|^2$$

要使  $\varepsilon(W)$  最小,则必须使:

$$W_{I+1} = W_{I+2} = \dots = W_{I+7} = 0$$

即主瓣落在服务区域以外的波束,对应的权值幅度近似为零。

含有这些权值幅度近似为零馈元的馈元阵与不含有这些馈元的馈元阵从使  $\varepsilon(W)$  最小的角度上说,两者是等价的。这些馈元相当于对卫星多波束天线赋形波束的产生没有贡献,所以它们是冗余馈元。以下以一个 61 个馈元的正六边形蜂窝阵对中国本土赋形的实际例子,来验证规则阵中冗余馈元的存在。

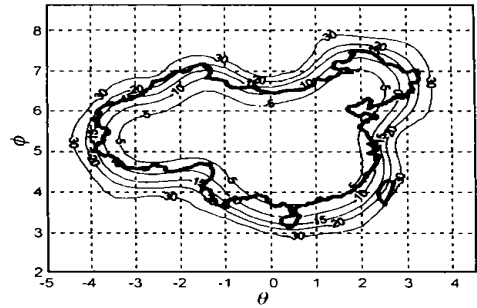


图4 61 馈元正六边形蜂窝阵对中国本土的赋形结果

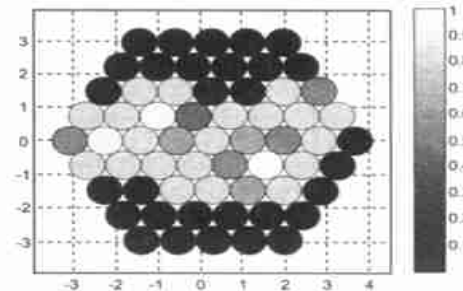


图5 61 馈元正六边形蜂窝阵赋形后权值幅度分布图

图4为61馈元正六边形蜂窝阵对中国本土赋形后天线方向图的等高线图。图4中5根黑色细线分别为赋形后天线实际方向图在-5dB、-10dB、-15dB、-20dB、-30dB时的等高线。黑色粗线为中国本土的轮廓线在卫星(卫星在东经104°赤道上空)视场内的投影。图5为正六边形蜂窝馈元阵赋形后相应馈元权值幅度分布图。图中每个小圆表示相应馈元所产生的波束,每个小圆的直径为波束的3dB波束宽度,深色表示权值幅度很小,浅色则表示权值幅度很大。由图5可见,凡是所产生的波束落在服务区以外的馈元的权值幅度都很小,实

际它们对赋形没有什么贡献, 所以它们都是冗余馈元. 只有所产生的波束落在服务区域以内的馈元的权值幅度较大, 对赋形有贡献, 所以是有效馈元.

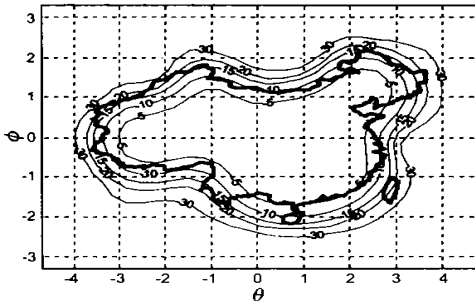


图 6 37 馈元不规则阵对中国本土的赋形结果

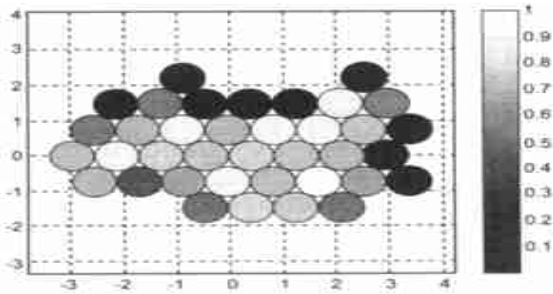


图 7 37 馈元不规则阵赋形后权值幅度分布图

由于在普通的常规阵形中往往存在着许多冗余馈元, 尤其是在目标方向图和常规阵的形状相似程度很低时, 冗余馈元会更多. 由于这些冗余馈元对赋形没有贡献, 反而会使卫星的重量和复杂性增加, 因此我们可以将这些冗余馈元去掉, 只剩下有效馈元, 然后将剩下的有效馈元组成一个与目标方向图外形轮廓很相似的不规则阵. 这种不规则阵从使  $\varepsilon(W)$  最小的角度上说, 与它相应的规则阵是等价的, 因此可以在保证赋形效果不变的条件下, 减少馈元数量.

#### 4 不规则阵的赋形仿真结果

本文分别以一个 61 馈元正六边形蜂窝阵和一个在这个规则阵基础上去掉冗余馈元后剩下的 37 个有效馈元组成的不规则阵, 在相同条件下, 即 3dB 波束宽度和波束间隔都为  $0.8^\circ$ , 用同一种赋形算法(LCMV 算法<sup>[9]</sup>)对中国本土进行赋形. 正六边形蜂窝阵的赋形结果和馈元权值幅度分布分别如图 4 和 5 所示. 37 馈元不规则阵的相应结果如图 6 和 7 所示. 对比图 4 和 6, 可见两种阵形在相同条件下用同一种算法赋形后, 所得天线方向图在赋形精度、主瓣过渡的快慢性和主瓣区域内的起伏程度等方面基本没有区别, 但不规则阵的馈元数却减少了 24 个.

#### 5 结论

卫星多波束天线通用的规则阵形没有考虑到具体的目标方向图的形状, 不可避免地存在着冗余馈元. 这些冗余馈元不但对赋形没有贡献, 反而增加了馈元的数量和卫星的重量以及波束成形网络的复杂性. 因此, 非常有必要根据目标方向图

的形状来选择馈元阵的形状, 以消除规则阵中的冗余馈元. 最简单而有效的不规则阵的布阵方法就是, 将通用阵中所产生波束落在服务区域外、对赋形没有贡献的冗余馈元去掉, 再将剩下的有效馈元在原来规则阵中的位置保持不变即可组成相应的不规则阵. 由于这种不规则阵没有冗余馈元或有很少的冗余馈元, 因此它能带来减轻卫星重量, 减少波束成形网路复杂性等优点.

#### 参考文献:

- [1] 周乐柱, 李斗, 郭文嘉. 卫星通信多波束天线综述 [J]. 电子学报, 2001, 29(6): 824-828.
- [2] A I Zaghoul, Y Hwang, R M Sorbello, F T Assal. Advances of multi beam communications satellite antennas [J]. Proc IEEE, 1990, 78(7): 1214-1232.
- [3] P D Patel, K K Chan. Optimization of contoured beams for satellite antennas [J]. IEE Proc Microwave, Optics and Antenna, 1985, 132(6): 400-406.
- [4] S Tantarantana. Minimum p error design of nonuniformly spaced linear array [J]. Proceedings of IEEE, 1984, 72(11): 1654-1655.
- [5] H Schjaer Jacobsen, K Madsen. Synthesis of nonuniformly spaced arrays using a general nonlinear minimax optimization method [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1976, 24(4): 501-506.
- [6] C A Klein. Design of shaped beam antennas through minimax gain optimization [J]. IEEE Trans on Antenna and Propagation, 1984, 32(9): 963-968.
- [7] 夏文, 王华芝. 遗传算法在多波束赋形天线优化中的研究 [J]. 北京邮电大学学报, 1998(12): 12-16.
- [8] Y Hwang. Satellite antennas [J]. Proceedings of IEEE, 1992, 80(1): 183-193.
- [9] L J Frost. An algorithm for linearly constrained adaptive array processing [J]. Proceedings of IEEE, 1972, 60(8): 926-935.

#### 作者简介:



张亦希 男, 1971 年 6 月生于西安. 1993 年获西安交通大学无线电技术专业学士学位, 1999 年获西安交通大学通信与信息系统专业硕士学位, 现为西安交通大学电磁场与微波技术专业博士研究生. 目前主要从事卫星多波束天线技术、自适应天线技术的研究.

傅君眉 女, 1935 年 6 月生于上海. 1953 年毕业于上海交通大学, 现任西安交通大学微波工程与光通信研究所教授, 博士生导师. 目前主要从事电磁场理论、微波网络、光纤通信、卫星多波束天线、自适应天线的研究.

汪文秉 男, 1929 年 5 月生于常州. 1952 年毕业于上海同济大学电机系, 现为西安交通大学电信学院教授, 博士生导师, 中国电子学会天线专业委员会委员, 《微波学报》及《电波传播学报》编委. 主要从事瞬态电磁场、电磁波散射、电磁兼容等的研究.