

LCMV 方法在卫星多波束天线赋形中的应用

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: 本文提出了用线性约束最小方差(LCMV)方法对卫星多波束天线进行赋形. 它是通过在保证主瓣电平一定的条件下, 使天线的辐射功率最小, 来对卫星天线的方向图赋形. 由于这种方法与目前常用的迭代方法不同, 它是一种解析法, 故它在赋形精度、运算效率方面都高于目前这些常用方法, 同时不会出现不收敛的现象. 最后用两个具有代表性的例子, 分别对方形区域和中国本土进行赋形, 证明了 LCMV 方法的优点.

关键词: 卫星通信; 多波束天线; 赋形

中图分类号: TN822 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 03-0332-03

Application of LCMV Algorithm to Pattern Synthesis for Satellite Multiple-Beam Antenna

ZHANG Yi-xi, FU Jun-mei, WANG Wen-bing

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

Abstract: In this paper linearly constrained minimum variance (LCMV) algorithm is originally applied to pattern synthesis for satellite multiple-beam antenna. Under constraint on main lobe level, the pattern of antenna is synthesized by minimizing the radiation power of antenna. Unlike conventional iterative algorithms, LCMV is an analytic algorithm, which makes it more accurate and efficient than those conventional algorithms and easily converge. In the end, through two representative examples, synthesis of pattern for square area and China mainland, LCMV proves to be superior to conventional iterative algorithms.

Key words: satellite communication; multiple-beam antenna; pattern synthesis

1 引言

目前卫星多波束天线技术已开始广泛地应用于卫星通信中. 它采用数字处理技术先形成许多独立的点波束, 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. 多波束天线技术的使用使卫星天线可以只在指定的任意形状的服务区域内有较高的增益, 而在此服务区域以外则增益很低. 因此这项技术的使用可以有效减小干扰, 提高系统的频谱利用率、提高有效全向辐射功率(EIRP)和接收系统品质因素(G/T), 并能使卫星地面终端设备得到简化和降低成本. 对卫星多波束天线的赋形就是要通过某种算法使天线的方向图成为人们所希望的任意形状. 目前采用最多的赋形方法是最小 p 乘法^[1,2]和最小最大法^[3,4]. 本文着重研究了用线性约束最小方差(linearly constrained minimum variance)方法来对卫星多波束天线进行赋形.

2 卫星多波束天线的数学模型

2.1 卫星多波束天线的物理结构

卫星多波束天线的物理结构如图 1 所示. 它一般由一个微波光学器件、一组馈元以及一个波束成形网络组成^[5]. 微波

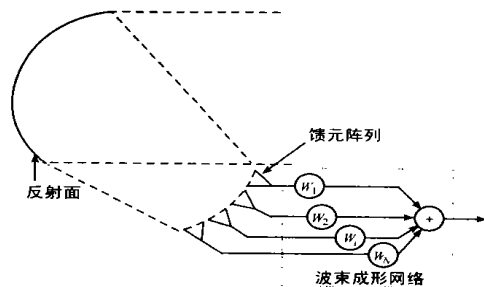


图 1 卫星多波束天线组成框图

光学器件一般为具有聚焦特性的反射面天线或微波透镜. 由于卫星距地球较远, 微波光学器件的使用可以提高天线的增益, 增大有效全向辐射功率, 以克服由卫星与地面站之间的距离所造成的比较大的自由空间损耗. 馈元阵放在微波光学器件的焦平面上, 产生的波照射微波光学器件, 并由微波光学器件的反射或聚焦作用在远场区形成若干相互独立的点波束. 由于各馈元除中心处的馈元外都相对于焦点有一个偏移, 且偏移的方向和大小各不相同, 从而各馈元在远场区所产生的各个点波束的波束中心就各不相同, 在空间中形成一组波束宽度近似相等、均匀分布、互不重叠的点波束. 波束成形网络

收稿日期: 2000-12-18; 修回日期: 2001-04-11

通过调节各馈元的激励系数 $W_1 \sim W_N$ (包括幅度和相位), 来对这些固定的点波束进行加权组合叠加, 从而形成新的赋形波束, 以覆盖服务区域。

2.2 卫星多波束天线的数学模型

为了使卫星多波束天线赋形问题得以简化并可以用数学方法来处理, D Sonderogger 等人经过研究给出了, 在假定天线的口径面被均匀照射时, 单个点波束远区辐射场在空间中场强分布的近似表示式:

$$E_{Bi}(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{d_a f J_1(u)}{c u}} \quad (1)$$

其中:

$$u = \frac{d_a f}{c} \sin \theta \sqrt{(\theta - \theta_i)^2 + (\phi - \phi_i)^2} \quad (2)$$

$J_1(u)$ 是变量为 u 的第一类一阶 Bessel 函数; d_a 为天线有效口径的直径; η 为天线效率; f 为工作频率; c 为光速; θ, ϕ 分别方位角和俯仰角; θ_i, ϕ_i 分别为第 i 个波束中心的方位角和俯仰角坐标。

在式 (1) 的基础上, 由于阵中各馈元的排列方向是相同的, 所以各点波束的远区场的极化方向是一致的。同时考虑到波束成形网络的作用, 因此总的远区辐射场在空间中的场强分布可表示为:

$$E_{\text{Total}}(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^N W_i \cdot E_{Bi}(\theta, \phi) \quad (3)$$

其中: W_i 是对波束的复加权, 也即波束成形网络的激励系数; N 为馈元个数。

卫星多波束天线赋形问题, 就是要在天线辐射功率在空间中的期望分布 $P_D(\theta, \phi)$ 已知的情况下, 求出最佳的权矢量 W_{opt} , 使天线辐射功率在空间中的实际分布 $P_B(\theta, \phi)$

$$P_B(\theta, \phi) = E_{\text{Total}}(\theta, \phi) \cdot E_{\text{Total}}^*(\theta, \phi) \quad (4)$$

与期望分布尽可能地接近, 可用数学公式表示为:

$$\min_w (W) \quad (5)$$

其中: (W) 为 $P_D(\theta, \phi)$ 与 $P_B(\theta, \phi)$ 间的误差函数; W 为权矢量。因此多波束天线的赋形问题实质上就是一个求权矢量 W 使 (W) 达到最小值的优化问题。

2.3 卫星多波束天线与其它常见阵列天线的区别

由于卫星多波束天线是用于卫星上, 卫星与地面站间的自由空间损耗很大, 因此就必须使用微波光学器件 (反射面或微波透镜), 以提高天线的增益, 保证接收端有足够的信噪比。而其它常见阵列天线主要是用在地面上, 信号的传播距离短、损耗小, 故不需使用微波光学器件。由于微波光学器件的聚焦作用, 它将到达口径面的平面波变为了射向焦点的球面波, 又由于馈元阵位于焦平面上的焦点附近, 这样对于来自某个方向上的波到达各馈元的相位几乎是相同的, 而来向不同。而其它常见阵列天线由于没有反射面, 到达的平面波是直接射向阵元, 故到达各阵元的相位是不同的, 而来向是相同的。所以卫星多波束天线就不能象其它常见阵列天线那样用方向性相乘性原理将阵的方向性分解为阵因子和单元因子, 然后再进行处理。因此由于两者使用的场合不同, 从而造成两者在物理结构、工作机理和处理方法上的本质不同。

3 LCMV 赋形方法

3.1 现有的卫星多波束天线赋形方法

卫星多波束天线赋形问题, 从本质上说是一个优化问题。优化目标函数 (W) 定义方法及其最小值求法的不同就形成了不同的赋形方法。目前赋形方法中, 使用较多的主要是最小 p 乘法^[1,2]和最小最大法^[3,4]。这两种赋形方法都存在着许多缺点, 如运算效率和赋形精度都较低, 甚至对于一些较复杂的图形赋形时有可能不收敛。因此本文提出了用线性约束最小方差 (LCMV) 法^[7]来对卫星多波束天线进行赋形。

3.2 LCMV 赋形方法

首先, 在卫星的视场内取 K 个采样点, 其中前 K_m ($K_m < K$) 个点为主瓣区域内的采样点。定义矩阵:

$$E = \begin{bmatrix} E_{B1}(\theta_1, \phi_1) & E_{B2}(\theta_1, \phi_1) & \dots & E_{BN}(\theta_1, \phi_1) \\ E_{B1}(\theta_2, \phi_2) & E_{B2}(\theta_2, \phi_2) & \dots & E_{BN}(\theta_2, \phi_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ E_{B1}(\theta_K, \phi_K) & E_{B2}(\theta_K, \phi_K) & \dots & E_{BN}(\theta_K, \phi_K) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: E 为 $N \times K$ 阶矩阵 (文中黑体符号均表示矩阵或向量)。将矩阵 E 中所有在主瓣区域内的元素 $E_{Bi}(\theta_j, \phi_j)$ (其中 $i = 1 \dots N, j = 1 \dots K_m$) 组成矩阵 E_m :

$$E_m = \begin{bmatrix} E_{B1}(\theta_1, \phi_1) & E_{B2}(\theta_1, \phi_1) & \dots & E_{BN}(\theta_1, \phi_1) \\ E_{B1}(\theta_2, \phi_2) & E_{B2}(\theta_2, \phi_2) & \dots & E_{BN}(\theta_2, \phi_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ E_{B1}(\theta_{K_m}, \phi_{K_m}) & E_{B2}(\theta_{K_m}, \phi_{K_m}) & \dots & E_{BN}(\theta_{K_m}, \phi_{K_m}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

由 E 可得, 总远区辐射场在各采样点处的场强分布的大小组成的向量 E_{Total} 为

$$E_{\text{Total}} = \begin{bmatrix} E_{\text{Total}}(\theta_1, \phi_1) \\ E_{\text{Total}}(\theta_2, \phi_2) \\ \dots \\ E_{\text{Total}}(\theta_K, \phi_K) \end{bmatrix} = E \cdot W \quad (8)$$

LCMV 方法在保证主瓣区域内的采样点上总远区辐射场的场强分布实际值等于期望值的条件下, 使天线总的辐射功率最小, 表示为:

$$\begin{cases} \min_w P_B \\ \text{约束条件: } E_{Dm} = E_m \cdot W \end{cases} \quad (9)$$

其中:

$$P_B = E_{\text{Total}}^H \cdot E_{\text{Total}} = W^H \cdot E^H \cdot E \cdot W = W^H \cdot R \cdot W \quad (10)$$

$$R = E^H \cdot E \quad (11)$$

E_{Dm} 为在主瓣区域内各采样点处的总远区辐射场的场强分布期望值所组成的向量。

应用拉格朗日乘数法, 可求得满足式 (9) 的最佳权矢量:

$$W_{\text{opt}} = R^{-1} E_m^H (E_m R^{-1} E_m^H)^{-1} E_{Dm} \quad (12)$$

因此, 上式所得的权矢量即是满足线性约束条件 $E_{Dm} = E_m \cdot W$ 且使 P_B 为最小的最佳权矢量 W_{opt} 。

4 LCMV 方法的赋形仿真结果

4.1 对矩形区域的赋形结果

本文分别以最小 p 乘法、最小最大法和 LCMV 在 $d_a =$

1.01m, $\alpha = 0.25$, $f = 8.15\text{GHz}$, 波束间隔为 1.5° ; 阵元数为 19 时, 对 $-4.5^\circ \leq \theta \leq 4.5^\circ$, $-4.5^\circ \leq \phi \leq 4.5^\circ$ 的矩形区域进行赋形, 最后得到的天线方向图的等高线图分别如图 2、3、4 所示. 三种算法在赛扬 450 上运行用 MATLAB 编写的程序, 运行时间分别为: 最小 p 乘法为 2.73 分钟、最小最大法为 3.15 分钟、LCMV 法为 0.36 分钟. 由此可见, 在相同条件下 LCMV 方法对矩形区域的赋形精度、主瓣区的平坦性和运算效率的要好于前两种常用的方法.

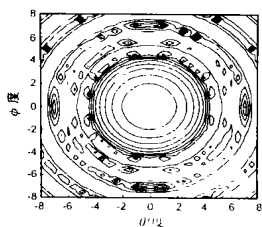


图 2 最小 p 乘法对矩形区域的赋形结果

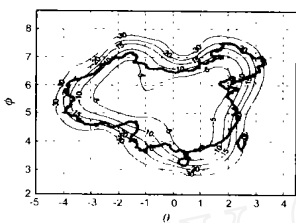


图 5 最小 p 乘法对中国本土的赋形结果

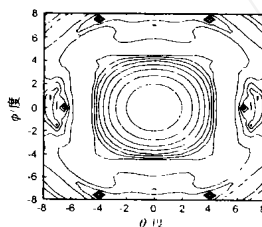


图 3 最小最大法对矩形区域的赋形结果

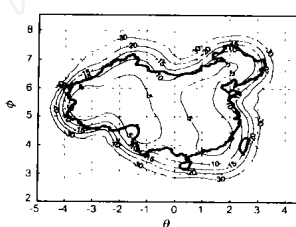


图 6 最小最大法对中国本土的赋形结果

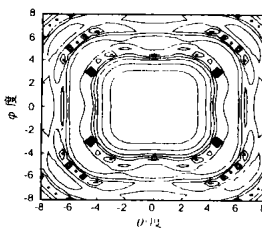


图 4 LCMV 法对矩形区域的赋形结果

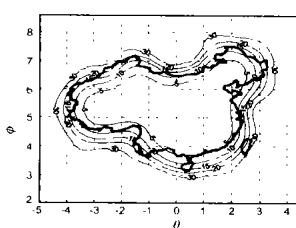


图 7 LCMV 法对中国本土的赋形结果

4.2 对中国本土的赋形结果

用最小 p 乘法、最小最大法和 LCMV 方法分别在 $d_a = 4$ 米, $\alpha = 0.25$, $f = 6\text{GHz}$ (此时的单元波束宽度为 0.85°), 波束间隔为 0.85° , 阵元数为 61 时对中国本土的赋形后, 结果分别如图 5、6、7 所示. 图中的黑色粗线为中国本土的边界线在卫星 (卫星在东经 104 赤道上空) 视场内的投影, 五根黑色细线分别为天线的实际方向图在 -5dB 、 -10dB 、 -15dB 、 -20dB 和 -30dB 的等高线. 三种方法在赛扬 450 上运行 MATLAB 编写的程序, 运行时间分别为: LCMV 方法 2.22 分钟、最小 p 乘法 9.36 分钟、最小最大法 28.02 分钟. 由以上结果可见, 在相同

的条件下 LCMV 方法相对于其它两种方法, 有较高的赋形精度, 在区域的边界上的过渡较陡, 主瓣区较其他两种算法平坦, 同时运算效率也高于其它两种方法.

5 结论

综上所述, 由于 LCMV 方法与其他两种常用的方法——最小 p 乘法和最小最大法不同, 它可以得到最佳权矢量的解析表达式, 而最小 p 乘法和最小最大法则是通过迭代的方法求得最佳权矢量, 故无论在赋形的精度、区域边界的过渡、主瓣区的平坦性和运算效率上都要高于目前常用的方法, 并且一般不会出现不收敛现象. 所以 LCMV 方法相对于传统方法是一种精度高、运算快的好方法.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] S Tantaratana. Minimum p-error design of nonuniformly spaced linear array [J]. Proceedings of IEEE, 1984, 72(11): 1654 - 1655.
- [3] 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.
- [4] C A Klein. Design of shaped-beam antennas through minimax gain optimization [J]. IEEE Trans. on Antenna and Propagation, 1984, 32(9): 963 - 968.
- [5] Y Hwang. Satellite antennas [J]. Proceedings of IEEE, 1992, 80(1): 183 - 193.
- [6] D Sonderogger, et al. Satellite antenna pattern optimization and loading model: Methodology report [R]. Defense Information System Agency Identification Number DCA100-90-C-0058, Jan. 1992.
- [7] 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 月生于陕西西安. 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 1 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.