

基于遗传算法和模拟退火的不等间距稀布阵的设计¹

付云起 袁乃昌 毛钧杰

(国防科技大学电子工程学院 长沙 410073)

摘要 副瓣电平在天线阵列的设计中是很重要的指标, 已经有很多方法进行这方面的改进. 该文在稀布阵概念的基础上, 引入了距离微扰, 提出不等间距稀布阵的模型, 来进一步改善天线阵的副瓣电平, 并且利用遗传算法和模拟退火对这种不等间距稀布阵进行了综合设计, 给出了 200 元线阵和 40×20 面阵的优化结果, 从仿真结果可以看到天线副瓣电平得到了改善.

关键词 稀布阵, 不等间距阵列, 遗传算法, 模拟退火

中图分类号 TN820, TN911.72

1 引言

现在实际所应用的雷达及卫星天线, 动辄需要上千、上万个单元, 而且为改善天线阵方向性还须采用幅度相位加权的办法. 这样一来, 天线阵的馈电网络将非常复杂, 有时甚至难以实现. 稀布阵可以说是解决这一问题的行之有效的方法. 它不仅降低了成本, 也降低了设备的复杂程度和故障率. 目前二维天线阵可以达到 70-60% 的稀布度; 当然, 与同口径的满布阵相比, 它也有增益降低、平均副瓣电平较高等缺点^[1]. 但如果经过优化设计, 可以把主瓣附近的副瓣电平压低, 当然这将以抬高远区副瓣为代价. 这种情况在实际应用中是可以接受的, 而且投入实际应用的天线阵一般都经过了稀布处理. 人们尝试过用各种方法进行稀布阵的设计. 最近几年, 遗传算法 (Genetic Algorithms, GA) 在此领域的应用得到了重视, Randy L.Haupt 用 GA 成功地设计了线阵和面阵^[2]. 此外还有模拟退火方法 (Simulated Annealing, SA) 也用来进行天线阵的综合^[3]. 本文在稀布阵的基础上引入距离微扰以期进一步压低副瓣电平. 在优化算法上, 首先用 GA 得到一个稀布阵的结构, 然后用 SA 再对此天线阵结构进行距离微扰, 此种算法也将 GA 和 SA 的优势有机地结合了起来. 文中给出了线阵和面阵的稀布和距离微扰结果, 从所得到的天线方向图来看, 确实达到了改善近区副瓣电平的效果.

2 算法及线阵的优化设计

2.1 遗传算法

遗传算法作为一种非确定性的拟自然随机优化算法在过去 20 年中得到了广泛地应用. 遗传算法可以认为是一个进化过程, 首先根据具体问题建立评价群体的评价函数, 然后用其对染色体进行评价. 一般遗传算法包括 4 个部分^[2]: 建立初始染色体群、自然选择、交叉配对和基因变异. 近些年在对算法的改善上也有众多的突破, 使得遗传算法在实际应用中更加受到人们的重视. 与传统的优化算法相比, 遗传算法的特点在于: (1) 它对参数的等效染色体 (对参数的编码) 而非对参数本身进行操作. (2) 不需要微分等复杂运算, 只使用评价函数的信息. (3) 采用概率传递规则来代替确定性规则.

遗传算法所采用的大都是二进制编码, 这种方案操作简单. 对于我们所讨论的稀布阵结构来说, 假设各个单元都是相同的, 那么此问题可以很方便、很直观地应用遗传算法来求解. 在此我们首先考虑一个线阵的模型, 有 200 个单元, 假设单元在中心两侧是对称的, 并且用 '1' 表

¹ 1999-05-21 收到, 2000-03-28 定稿

示存在单元, 用 ‘0’ 表示没有单元, 则将此线阵结构等效成染色体时, 将形成长度为 100 的由 ‘1’ 和 ‘0’ 组成的基因串。我们以阵列的副瓣电平作为优化目标, 其计算公式为

$$FF(u) = \max \left| 2 \sum_{n=1}^N a_n \frac{\cos(2\pi nd)}{FF_{\max}} \text{elpat}(u) \right|$$

其中 $2N$ 为阵列的单元数; a_n 为第 n 个单元的幅度 (1 或 0); d 为满布均匀阵的单元间距; $u = \cos(\phi)$, ϕ 是从线阵的方向开始所扫过的角度; $\text{elpat}(u)$ 为单元方向性; FF_{\max} 为主瓣的峰值。当然, u 的取值区间要排除主瓣和较远的副瓣。

在进行基因群初始化时, 为在早期群体中包含有更多的有用信息, 我们在生成阵列结构时即采用一个参考幅度分布函数, 当然它应该是具有锥削分布的特征, 因为比较理想的阵列口径分布是中间的单元数目较多, 而边缘则要稀化。参考函数可以选取 Taylor、正态、或者余弦分布, 我们这里采用 Taylor 函数。

图 1 中给出了用 GA 算法优化得到的稀布阵的阵列组成及方向图 (全向单元), 其最大副瓣电平 (MSLL) 达到 -22.34dB , 阵列的填充率为 71%。在方向图的上方给出的是阵列的排列结构, 可以看出, 阵元的密度在阵列口径上沿径向呈现锥削分布, 这和幅度加权的锥削是一致的, 可得到较低的副瓣电平。

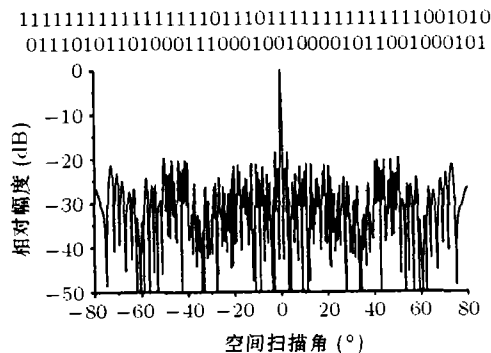


图 1 全向单元的阵列结构及方向图 (MSLL = -22.34dB , 71% 填充)

在由 GA 算法优化得到此稀布阵的结构之后, 再采用 SA 算法对单元的位置进行微扰, 以观察能否进一步压低副瓣电平。

2.2 模拟退火方法

模拟退火亦是一种全局的、只需要利用评价函数信息的优化算法^[3], 其核心在于模仿热力学中液体的冻结与结晶或金属溶液的冷却与退火过程, 已经检验了它在实际优化应用中的有效性。算法可归纳如下: (1) 给定粒子初始状态 X^0 和系统初始温度 T^0 ; (2) 产生随机扰动 ΔX , 得到粒子新状态 $X = X^0 + \Delta X$; (3) 求粒子新旧状态之间的能量差 $\Delta E = E(X) - E(X^0)$; (4) 若 $\Delta E < 0$, 则接受新状态, 否则以概率 $p(\Delta E) \propto e^{-\Delta E/T}$ 接受新状态; T 随迭代过程按照一定的规则下降。

对于我们所得到的稀布阵列, 令存在有源单元的位置允许在法向和轴向上扰动, 微扰值 δ 与单元间距相比应该很小, 以满足微扰的条件。实际上位置扰动值是连续变化的参数, 然而第三位小数后的位置变化对合成波瓣不敏感, 因此扰动值只取到小数点后面两位的精度。对应于单元位置的扰动产生的扰动波瓣可以写成

$$FF(u) = \max \left| 2 \sum_{n=1}^N a_n \frac{\cos(2\pi nd + \delta)}{FF_{\max}} \text{elpat}(u) \right|$$

从上式中可以观察到, 微扰值 ε 的引入在天线阵列中的作用实际上等效为引入了一种随机的相位加权, 但是这种相位加权的幅度是比较小的, 而且满足的是统计规律, 在整体上可以达到比较好的效果。

采用 SA 进行第二次优化时, 初始温度 T 应取得高一些, 这样在前面几步退火过程中, 扰动被接受的概率会比较高, 有利于算法跳出局部最优解; 而 T 的下降一般取倒对数规律比较适合。我们将初始温度取为 2×10^6 , 在经过 50 次退火之后, 全向单元的阵列的副瓣电平又被进一步压低, 达到 -24.46dB 。然后将我们仅用 GA 优化的阵列与用 GA 和 SA 共同优化的结果相比较, 如图 2 所示。但从曲线上也可以看到, 虽然主瓣附近的副瓣电平被压低了, 但是这是以抬高远区的副瓣为代价的。

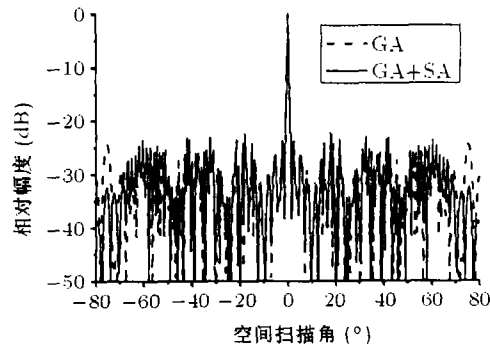


图 2 GA 和 GA+SA 优化结果比较

对于全向单元的阵列 (图 1 的情况), 经微扰后各个单元的位置如下: $\{0.25, 0.69, 1.29, 1.77, 2.33, 2.81, 3.33, 3.75, 4.29, 4.77, 5.27, 5.83, 6.31, 6.81, 7.23, 7.81, 8.33, 8.83, 9.29, 9.75, 10.19, 10.75, 11.15, 11.73, 12.25, 12.73, 13.17, 13.69, 14.15, 14.71, 15.21, 15.67, 16.25, 16.75, 17.19, 17.71, 18.27, 18.75, 19.21, 19.73, 20.23, 20.75, 21.25, 21.77, 22.33, 22.81, 23.31, 23.75, 24.27, 24.81, 25.31, 0, 26.29, 26.71, 27.29, 27.83, 28.31, 0, 0, 29.67, 30.23, 30.77, 31.31, 0, 0, 32.71, 33.25, 0, 34.15, 34.73, 0, 35.65, 0, 36.67, 0, 37.73, 38.29, 0, 39.23, 0, 40.15, 0, 0, 41.65, 0, 0, 43.23, 43.77, 0, 0, 0, 45.79, 46.29, 46.83, 47.33, 47.75, 0, 0, 49.29, 0\}$ (其中的 '0' 表示此处没有单元存在。)

上面所作的工作, 只是对天线单元进行轴向微扰, 也可以对天线单元进行法向距离微扰, 当然单元偏移的幅度亦必须限定在一个很小的范围之内。

3 面阵的优化设计

上述所讨论的都是针对于线阵的, 对于面阵而言, 当阵面两个方向可以分离时, 其分析方法基本上是一样的, 只是方向图的计算要替换为两个方向的乘积, 即改变算法的评价函数, 同时将表示阵列结构的基因修改以满足面阵的结构。这里可以有不同的方法, 可以将基因表示成矩阵的形式, 也可以仍然采用一维的数组。不过在算法的操作上都要作相应的改变, 而算法的基本流程和框架则基本不需要太大的改动, 这也是 GA 和 SA 作为优化算法的优越之处。

二维矩形平面阵列天线, 其按矩形栅格排列, 共有 $M \times N$ 个单元。假定阵列中的单元都是无方向性的, 则其波瓣函数为

$$F(\theta, \phi) = 4 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} a_{mn} \cos[(2m-1)\pi d_y \sin \theta \cos \phi] \cdot \cos[(2n-1)\pi d_x \sin \theta \sin \phi]$$

其中 M 为 y 方向的单元个数; N 为 x 方向的单元个数; d_x 、 d_y 分别为沿着 x 和 y 方向的单元间距。

我们对 40×20 的阵列进行了优化分析, 阵列的构成是在 $1/4$ 个象限的部分, 其余的部分则是对称的。此阵列的最大副瓣电平为 -19.76dB (在 H 面), 阵面的填充率为 64.5% 。它们与均匀阵列相比较, 副瓣电平都得到了比较大的改善。需要注意的是, 在用遗传算法对面阵进行优化综合时, 应该考虑到采取措施保持天线阵列的孔径, 也就是说, 在算法进行过程中, 阵列最边缘上的单元应该保持为非 0。这样就可以使天线的孔径不至于由于算法中的基因重组和基因变异的操作而令阵列边缘上的单元被强制变成 0。否则, 所分析的问题就会缺乏可比性。

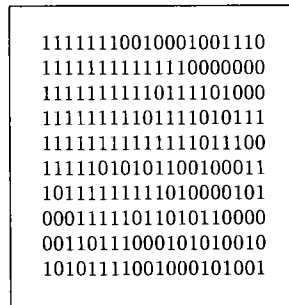


图 3 40×20 面阵的阵列分布

在用遗传算法得到了这样一个面阵的结构以后, 我们仍然采用模拟退火方法, 对阵列单元的位置进行扰动。对于面阵而言, 扰动一般都要在二维上进行。基本的原理与前面线阵的是完全相同的, 在这里我们则直接给出优化的结果。从仿真的结果来看, 阵列在 E 面和 H 面的副瓣电平又被进一步的压低, 分别达到了 -28.22 和 -25.91dB 。为更加清楚的说明这个现象, 将仅用遗传算法和遗传、模拟退火相结合而得到的阵列的方向图加以比较, 如图 4 和图 5。从这里可以很明显的看到二者的差别, 后者在近区的副瓣明显的要低于前者, 不过远区的副瓣则相对的要被抬高, 因为能量是不能消失的。就以上的分析结果, 我们可以得出结论, 在稀布阵的基础上引入距离微扰确实可以在一定程度上压低副瓣电平。

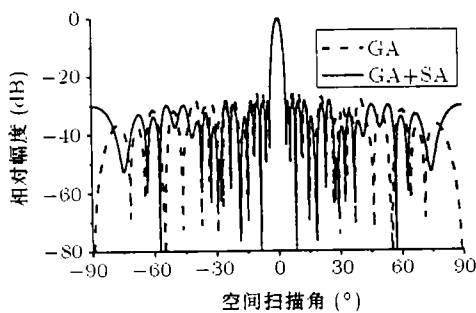


图 4 $\phi = 0^\circ$, 经过 SA 后的方向图与 GA 的对比, $\text{MSLL} = -25.91\text{dB}$

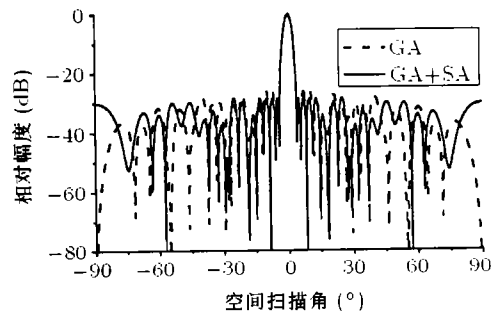


图 5 $\phi = 90^\circ$, 经过 SA 后的方向图与 GA 的对比, $\text{MSLL} = -28.22\text{dB}$

4 结 论

本文在稀布阵的基础上又提出了距离微扰的概念来进一步改善天线阵的副瓣电平。利用 GA 和 SA 对不等间距稀布阵进行了综合, 并且给出了线阵和面阵设计的结果, 确实改善了副瓣电平。此概念及方法在大型相控阵的设计中具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] 刘克成, 宋学诚, 天线原理, 长沙, 国防科技大学出版社, 1989, 第四章.
- [2] L. Randy, Haupt, Thinned arrays using genetic algorithms, IEEE Trans. on AP, 1994, AP-42(7), 993-999.
- [3] Vittotio Murino, Andrea Trucco, S. Carlo Regazzoni, Synthesis of unequally spaced arrays by simulated annealing, IEEE Trans on AP, 1996, AP-44(1), 119-123.

DESIGN OF UNEQUALLY SPACED THINNED ARRAYS BASED ON GENETIC ALGORITHM AND SIMULATED ANNEALING

Fu Yunqi Yuan Naichang Mao Junjie

(College of Electron. Sci. and Eng., National Univ. of Defense Tech., Changsha 410073, China)

Abstract The sidelobe level is an important factor in designing of antenna arrays, and several methods have been developed to improve it. A model of unequally spaced thinned array is given in this paper, which introduces a distance perturbation into the element of a thinned array, in order to improve the sidelobe level. Genetic algorithm and simulated annealing are used to design this kind of array. The pattern of a 200 elements linear array and a 40×20 planar array is presented for the isotropic element pattern, the results verifies the improvement of the sidelobe level.

Key words Thinned arrays, Unequally spaced arrays, Genetic algorithm, Simulated annealing

付云起: 男, 1975 年生, 博士生, 目前从事宽带相控阵天线及毫米波技术的研究。
袁乃昌: 男, 1965 年生, 教授, 目前从事目标特性、超宽带电磁学及电磁兼容的研究。
毛钧杰: 男, 1946 年生, 教授, 目前从事微波电路、毫米波技术与天线的研究。