

六边形平面天线阵优化稀疏布阵研究

李东风, 龚中麟

(北京大学电子学系, 北京 100871)

摘 要: 本文首先对遗传算法进行改良, 并精心设计了适应函数, 以确保遗传算法快速收敛; 然后, 应用改良后的遗传算法对天线单元正三角形排列的六边形平面阵进行优化稀疏布阵处理, 以改善其辐射特性. 本文还研究了优化稀疏阵的频率特性, 并提出了仅对阵列天线外边缘部分进行优化稀疏处理以达到改善整个阵列天线辐射特性的方法, 该方法具有优化区间小和计算量少等优点, 为以改善性能和降低造价为目的的大型阵列天线优化稀疏处理提供了一条有效途径. 结果表明通过优化稀疏处理, 六边形平面阵的辐射特性可以获得相当大的改善, 天线阵的最大旁瓣电平降低了 7.5~9.4 dB, 仅对阵列天线外边缘部分单元进行优化稀疏处理可以达到与对全部单元进行优化稀疏处理相同的性能改进.

关键词: 遗传算法; 阵列天线; 稀疏布阵

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 03-0376-05

Research on Thinning the Hexagonal Planar Antenna Array

LI Dong-feng, GONG Zhong-lin

(Dept. of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The concept of optimizing the field pattern of a given equally spaced array by thinning process represents a very challenging problem with considerable practical advantages. In this paper, a properly modified genetic algorithm (GA) is applied at the first time to design a low sidelobe hexagonal planar array by thinning process. A study of the frequency characteristics of the thinned hexagonal planar array is made, and a new method, which has less computational work and is especially useful for large antenna arrays, is proposed for performance improvement of antenna arrays by thinning partially the array. The results show that the performance of the hexagonal planar array could be greatly improved by thinning, the maximum relative sidelobe level was reduced by 7.5~9.4 dB, and thinning partially the array could attain the same performance as that of fully thinning.

Key words: genetic algorithms; antenna arrays; thinned arrays

1 引言

阵列天线稀疏布阵是指从线阵或面阵中去掉一些天线单元, 在过去几十年中, 阵列天线稀疏布阵研究一直是一项重要的和有意义的工作. 通过优化稀疏布阵, 可以改善阵列天线的辐射特性, 实现阵列天线的方向图综合, 以最少的单元数达到技术指标(如波束宽度)要求, 在技术指标和天线造价之间达到一种折衷. 但目前还没有找到一种解决阵列天线优化稀疏布阵的十分理想的方法. 遗传算法是模拟自然淘汰和遗传选择生物进化过程的随机化搜索计算模型, 它是由美国 J Holland 教授于 1975 年首先提出的^[1], 其主要特点是群体搜索策略和群体中个体之间的信息交换. 另外, 遗传算法具有很强的鲁棒性和很好的全局搜索性, 其搜索不依赖于具体问题的梯度信息和搜索空间的信息^[2, 3, 11]. 由于以上特点, 遗传算法已成为了一种强有力的优化设计工具, 近几年来, 它在阵列天线的优化设计方面^[4~9], 尤其是在阵列天线稀疏布阵方面获得

了广泛的应用^[4, 5, 7, 9].

从已发表的文献来看, 目前应用遗传算法进行优化稀疏布阵处理的都是线阵和天线单元矩形排列的方形平面阵, 还未见报道应用遗传算法对天线单元三角形排列的近圆形平面阵进行优化稀疏布阵处理的文献. 本文应用一种改良的遗传算法对工程上广泛应用的三角形排列的六边形平面阵进行优化稀疏布阵处理, 以改善六边形平面阵的辐射特性. 在第 2 节中本文首先根据阵列天线理论, 推导出了天线单元正三角形排列的六边形平面阵辐射方向图的解析表达式, 并利用六边形平面阵天线的几何对称性和圆锥扫描的空间对称性, 确定了六边形平面阵辐射方向图解析表达式中独立单元的数量, 建立了辐射方向图解析表达式的快速计算表达式. 然后, 在第 3 节中通过改良标准简单遗传算法的选择机制, 建立了一种改良的遗传算法, 并将其应用于三角形排列的六边形平面阵, 进行优化稀疏布阵处理以降低天

线的旁瓣电平。在第 4 节中,介绍了第 3 节中所描述的改良遗传算法在天线单元正三角形排列的六边形平面阵具体应用的三个例子,并给出了具体计算结果:在第一个例子中,将改良遗传算法应用于一个有 1027 个单元的六边形平面阵,在天线波束不扫描的情况下,以降低天线旁瓣最大辐射电平为目标,对其进行优化稀疏布阵处理,并讨论了所得到的稀疏阵的频率特性;在第二个例子中,仍将改良遗传算法应用于一个有 1027 个单元的六边形平面阵,在天线波束进行 60° 圆锥扫描的情况下,以降低天线旁瓣最大辐射电平为目标,对其进行优化稀疏布阵处理;在第三个例子中,为了克服计算量大,以解决对大型平面阵进行优化稀疏布阵的问题,本文提出了一种对六边形平面阵部分单元进行优化稀疏布阵处理以改善其辐射特性的方法,本小节先在具有 1027 个单元的小型六边形平面阵上验证了该方法,然后将该方法应用于一个有 6211 个单元的大型六边形平面阵,在天线波束进行 70° 圆锥扫描的情况下,以降低天线旁瓣最大辐射电平为目标,对其进行了优化稀疏布阵处理,所得结果十分令人满意。第五节对全部研究工作进行了总结和讨论。

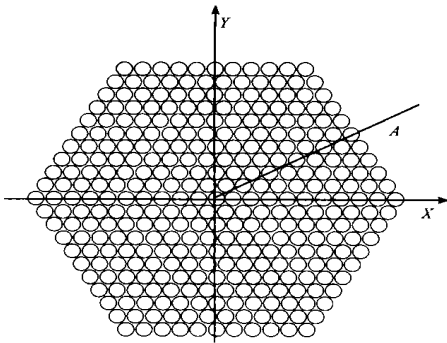


图 1 六边形平面天线阵结构图

2 六边形平面阵辐射方向图表达式的理论推导

六边形平面天线阵被广泛应用在通信和雷达工程中,尤其是在大型相控阵雷达中。六边形平面天线阵的几何结构如图 1 所示,它是由按等边三角形排列的天线单元组成。通过仔细分析图 1 中的天线阵结构,可以看出六边形平面天线阵是由一个位于中心的天线单元被若干个同心的六边形环阵环绕所组成,而每一个六边形环阵又是由若干个半径不同的单元均匀分布的同心六单元圆环阵组成。下面将利用六边形平面天线阵的这一结构特性推导它的辐射方向图解析表达式。

由阵列天线理论可知,位于 xy 平面半径为 r 的圆环天线阵的阵因子可以表示为^[10]

$$E_N(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{j[kr \sin\theta \cos(\varphi_n - \varphi) + \alpha_n]} \quad (1)$$

其中, N 为组成圆环天线阵的单元总数, θ 和 φ 为空间球坐标变量, I_n 为圆环天线阵中位于 $\varphi_n = \varphi_n$ 处第 n 个单元的激励电流幅度, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长, α_n 为圆环天线阵中位于 $\varphi_n = \varphi_n$ 处第 n 个单元的激励电流相位,对于常规的同相位激励有 $\alpha_n = -kr \sin\theta_0 \cos(\varphi_0 - \varphi_n)$ 。

根据式(1),由 M 个半径不同的同心六单元圆环阵组成的六边形环阵的阵因子可以表示为

$$E_M(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^6 I_{mn} e^{j[kr_m \sin\theta \cos(\varphi_n - \varphi) + \alpha_{mn}]} \quad (2)$$

其中, r_m 为第 m 个同心六单元圆环阵的半径。

对于由一个位于中心的天线单元被若干个同心的六边形环阵环绕所组成的六边形平面天线阵,天线阵结构分析表明,它的第 l 个同心六边形环阵是由 l 个半径不同的单元均匀分布的同心六单元圆环阵组成。因此,六边形平面天线阵的阵因子可以表示为

$$E_L(\theta, \varphi) = I_0 + \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^l \sum_{n=1}^6 I_{lmn} e^{j[lkr_{lm} \sin\theta \cos(\varphi_n - \varphi) + \alpha_{lmn}]} \quad (3)$$

其中, I_0 是中心单元的激励电流幅度,对于常规的同相位激励有 $\alpha_0 = 0$, L 是六边形平面天线阵中六边形环阵的总数。对于单元间距为 d 的六边形平面天线阵有

$$r_{lm} = d \sqrt{l^2 + (m-1)^2 - l(m-1)} \quad (4)$$

$$\varphi_{lmn} = \cos^{-1} \left[\frac{r_{lm}^2 + d^2 l^2 - d^2 (m-1)^2}{2dlr_{lm}} \right] + \frac{(n-1)\pi}{3} \quad (5)$$

$$\alpha_{lmn} = -lkr_{lm} \sin\theta_0 \cos(\varphi_0 - \varphi_{lmn}) \quad (6)$$

一个具有 L 个同心六边形环阵的六边形平面天线阵的单元总数可由下式确定

$$N_L = 6 \sum_{l=1}^L l + 1 = 3L(L+1) + 1 \quad (7)$$

对于圆锥扫描空域,由于六边形平面天线阵的结构对称性和扫描空域的几何对称性,分析指出六边形平面天线阵独立单元数等于天线阵中独立的半径不同的同心圆环阵数,即在阵列稀疏过场中如果一个单元被选定去掉,则在半径相同的同心圆周上所有的单元都将去掉;这样一来,对于一个大型六边形平面天线阵,独立单元数不到阵中单元总数的十一分之一,如图 1 所示,位于图中标记为 A 的 30° 扇形区内和边线上的单元即为该天线阵的独立单元。为了方便讨论起见,假定阵面幅度为均匀分布,这样,式(3)可改写为

$$E_L(\theta, \varphi) = I_0 + \sum_{l=1}^L \left(\sum_{m=1}^l \sum_{n=0}^{l-1} I_{lm} \left[\sum_{n=0}^{l-1} e^{j[kr_{lm} \sin\theta \cos(\varphi_n - \varphi) + \alpha_{lmn}]} + \delta_m e^{j[kr_{lm} \sin\theta \cos(\varphi_n - \varphi) + \alpha_{l(l+2-m)n}]} \right] \right) \quad (8)$$

$$I_0/I_{lm} = \begin{cases} 1, & \text{单元在工作} \\ 0, & \text{单元被剔除} \end{cases} \quad (9)$$

$$\delta_m = \begin{cases} 0, & m=1 \text{ 或 } m = \text{int}\left(\frac{l}{2}\right) + 1, \text{ 而 } l=2, 4, 6, \dots \\ 1, & \text{其余} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\text{int}(\cdot)$ 为取整数函数。

一个具有 L 个同心六边形环阵的六边形平面天线阵的独立单元数可由下式确定

$$N'_L = 1 + \sum_{l=1}^L \left[\text{int}\left(\frac{l}{2} + 1\right) \right] = 1 + L + \sum_{l=1}^L \text{int}\left(\frac{l}{2}\right) \quad (11)$$

3 遗传算法计算模型

文献[1~3]对遗传算法进行了详细的论述,与传统的阵

列天线优化稀疏方法(如统计密度锥削法)相比,遗传算法具有简单通用、鲁棒性强、全局搜索性好、适于并行处理和基本上不用搜索空间的知识或其它辅助信息等特点,且对所优化的变量数没有限制。因此,遗传算法能在复杂而庞大的搜索空间中寻找最优解和准最优解,是一种理想的阵列天线优化稀疏方法^[4]。在阵列天线优化稀疏处理过程中,一个阵列天线被表示成一个二进制数码串,数码串的位数等于需进行优化处理的独立单元数,且数字与单元一一对应,如图1所示,二进制数码串中的第一位数字表示位于天线阵中心单元的状态,第二位数字表示天线阵中第一个六边形环的第一个独立单元,依此类推。在遗传算法中,这种二进制数码串的每一位被叫做基因,整个二进制数码串被叫做染色体。在二进制数码串中,数字1代表天线单元在工作,而数字0代表天线单元已被去掉。每个染色体对应一个适应值,遗传算法搜索染色体群体,给出适应值最高的解。本文将遗传算法用于六边形平面天线阵的优化稀疏处理,去掉阵中一些不必要的单元,以降低天线阵的最大旁瓣电平,改善天线阵的辐射特性。为了确保遗传算法收敛^[11,12],我们对传统遗传算法的选择机制进行了改良,在我们建立的遗传算法计算模型中, P 个父代个体经过交叉和变异产生 P 个子代个体后,将 $2P$ 个个体中的每一个个体与从 $2P$ 个个体中随机选取的 $Q(2P \geq Q \geq 1)$ 个个体按适应值进行比较,计算出其中比它差的个体数,并作为它的得分,按得分下降的顺序对 $2P$ 个体排序,选择 P 个具有最高得分的个体作为下一代群体。

在实际应用中,经过反复计算和分析,我们取群体中染色体总数 P 等于二进制数码串位数的二倍^[5],取 $Q = P/10$,并在其中包含父代中的最优个体,选择单点交叉,变异概率取0.001,计算代数取为100。

4 六边形平面天线阵的优化稀疏处理实例

将式(8)取绝对值,即得到六边形平面天线阵的辐射方向图。在应用遗传算法进行优化稀疏布阵处理时,首先需要确定优化区间,即需要降低旁瓣电平的区间,优化区间从方向图的第一个零点角度位置开始至某一角度止。根据天线理论^[13,14]和经验,对于六边形平面天线阵,优化起始角度位置选为

$$\theta_0 = \theta_0 - \arcsin(cN(2Ld)/\cos\theta_0) \quad (12)$$

其中, c 为常数,取值范围依赖于六边形平面天线阵的大小, θ_0 为天线阵最大扫描角。然后,为提高优化收敛速度和获得满意的解,需对目标函数进行定标。对方向图归一化后,选取 $f(\varphi, \theta) = 1 - rsl_{\max}(\varphi, \theta)$ 作为目标函数,其中, $rsl_{\max}(\varphi, \theta)$ 为天线阵在 φ 平面扫描角为 θ 时的相对旁瓣最大值。本文采用了两种定标相结合的定标方式,即幂函数定标和加权定标,对目标函数进行定标以构造适应函数,适应函数为

$$F = \{[f(\varphi_1, 0) + f(\varphi_2, 0) + f(\varphi_1, \theta_0) + f(\varphi_2, \theta_0)]/4\}^a + h \quad (13)$$

$$h = \begin{cases} \varepsilon, & f(\varphi_1, 0), f(\varphi_2, 0), f(\varphi_1, \theta_0) \text{ 和 } f(\varphi_2, \theta_0) \geq f_1 \\ \varepsilon + \tau, & f(\varphi_1, 0), f(\varphi_2, 0), f(\varphi_1, \theta_0) \text{ 和 } f(\varphi_2, \theta_0) \geq f_2 > f_1 \\ \varepsilon + 2\tau, & f(\varphi_1, 0), f(\varphi_2, 0), f(\varphi_1, \theta_0) \text{ 和 } f(\varphi_2, \theta_0) \geq f_3 > f_2 \\ \dots & \dots \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (14)$$

其中, a 为一正整数, ε 为一小正数, $\tau = \varepsilon/4$, h 为一阶跃权值函数,加它是为了保证不同面的相对旁瓣最大值在优化过程中尽量保持相等。在下面的例子中,我们取 $d = \lambda/2$, $\varphi_1 = 0^\circ$, $\varphi_2 = 90^\circ$, $a = 20$, $\varepsilon = 0.1$ 。

4.1 小阵的优化稀疏处理

本小节应用本文所介绍的遗传算法模型,对一个有1027个单元($L = 18$)的六边形平面天线阵进行了优化稀疏处理,以改善其辐射特性。为确定优化区间,通过计算,在式(13)中取 $c = 1.5$,优化区间定为 -90° 至 -4.78° 。图2中给出了优化稀疏处理后天线阵的方向图,表示天线阵独立单元状态的二进制数码串在图的下部给出。此时,天线阵的最大旁瓣电平约为 -26.4 dB。在图3中给出了该天线阵的频率特性曲线,从频率特性曲线可看出优化稀疏处理后的天线阵具有极宽的频带。

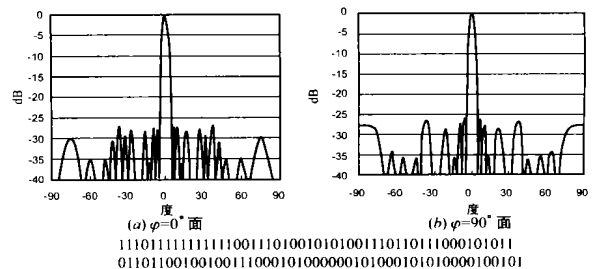


图2 一个优化稀疏处理后的 $L = 18$ 六边形平面天线阵的远场方向图

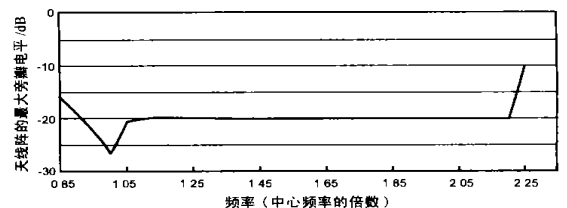


图3 优化稀疏六边形平面天线阵的频率特性曲线

4.2 扫描小阵的优化稀疏处理

本小节给出了一个应用遗传算法以改善辐射特性为目的对扫描六边形平面天线阵进行优化稀疏处理的例子,该天线阵有1027个单元($L = 18$),要求该天线阵可在 60° 圆锥空域内进行扫描。由于天线扫描,需要在两个不同的区间对目标函数进行优化,在式(13)中取 $c = 1.5$,优化区间定为 -90° 至 -4.78° 和 -90° 至 50.41° 。图4中给出了优化稀疏处理后天线阵的方向图,表示天线阵独立单元状态的二进制数码串在图的下部给出。此时,在 60° 圆锥扫描空域内,天线阵的最大旁瓣电平约为 -24.6 dB。

4.3 扫描大阵的优化稀疏处理

由前两小节的阵列天线优化稀疏处理例子和通过分析许多以前的阵列天线优化稀疏处理设计实例^[4,5,7]可得出,在阵列天线的优化稀疏处理中,边缘部分的稀疏程度要比中心部分的大许多,优化稀疏阵大都有一个正常密度的中心核阵。据此,我们提出通过优化稀疏处理阵列天线的边缘部分来达到整个阵列天线优化稀疏处理的方法。在图5中,给出了一个利用该方法进行优化稀疏处理的阵列天线的方向图,该天线阵与

另外,我们应该注意到,阵列天线稀疏布阵是一个多极值问题,对于大型阵列天线,其搜索空间极大,由于计算机资源的限制和遗传算法的随机搜索本质等种种原因,我们所能得到的常常是准最优解,且每一次搜索都得到不同的解.在我们的遗传算法计算模型中,这些解具有几乎相同的最大旁瓣电平,但其它特性(如频率特性等)却大不相同.在实际应用中,如对天线阵的其它特性有特别的要求,可在适应函数的构造时反映这些要求.

参考文献:

- [1] J Holland. Adaptation in Nature and Artificial Systems [M]. Ann Arbor, The University of Michigan Press, 1975.
- [2] D E Goldberg. Genetic Algorithms Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning [M]. New York, Addison Wesley, 1989.
- [3] L Davis, Ed. Genetic Algorithms and Simulated Annealing [M]. Los Altos, CA, Morgan Kaufmann, 1987.
- [4] R L Haupt. Thinned arrays using genetic algorithms [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1994, 42(7): 993-999.
- [5] S Weile, E Michielssen. Integer code pareto genetic algorithm design of constrained antenna arrays [J]. Electron. Lett., 1996, 32(19): 1744-1745.
- [6] K K Yan, Y Lu. Sidelobe reduction in array pattern synthesis using genetic algorithms [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1997, 45(7): 1117-1122.
- [7] F J Ares Pera, J A Rodriguez Gonzalez, E Villanueva Lopez, S R Rengarajan. Genetic algorithms in the design and optimization of antenna array patterns [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1999, 47(3): 506-510.
- [8] D Marciano, F Duñán. Synthesis of antenna arrays using genetic algorithms [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2000, 42(3): 12-20.
- [9] Dong Feng Li, Zhong Lin Gong. Design of hexagonal planar arrays using

genetic algorithms for performance improvement [A]. 2000 2nd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings [C], Beijing, China, Sept. 2000: 455-460.

- [10] M T Ma. Theory and Application of Antenna Arrays [M]. New York, Wiley, 1974.
- [11] 陈国良, 王煦发, 庄镇泉, 王东生. 遗传算法及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.
- [12] 余春峰, 杨华中, 胡冠章, 汪蕙. 浮点遗传算法的收敛性及其在模型参数提取问题中的应用 [J]. 电子学报, 2000, 28(3): 134-136.
- [13] R C Johnson. Antenna Engineering Handbook [M]. Third Edition. New York, McGraw-Hill, Inc., 1993.
- [14] R J Mailloux. Phased Array Antenna Handbook [M]. Boston, Artech House, 1993.

作者简介:



李东风 男. 1961年7月生于天津市. 研究员, 电子学会高级会员, IEEE 会员, 1982年获得学士学位, 1989年获得硕士学位, 现为北京大学博士研究生, 主要从事天线和雷达系统方面的研究工作.



龚中麟 男. 1940年5月生于重庆市. 1963年毕业于北京大学无线电电子学系, 现为北京大学教授, 博士研究生导师, 电子学会会士, 真空电子学分会委员, IEEE 高级会员, IEEE 北京分会执委会委员, IEEE 天线与传播学会北京 Chapter 主席. 主要研究方向包括: 电磁场理论、天线与电波传播、微波电子学等. 已发表论文 40 余篇, 出版

专著两部.