

# Design of Antenna Array Using Harmony Search Algorithm

Siang-Kuan Yu, Kun-Chou Lee

Department of Systems and Naval Mechatronic Engineering, National Cheng Kung University, Tainan  
Email: kclee@mail.ncku.edu.tw

Received: Feb. 9th, 2012; revised: Feb. 26th, 2012; accepted: Mar. 8th, 2012

**Abstract:** In this study, the Harmony Search Algorithm is applied to adjustment of optimum position for antenna arrays. Optimization is implemented by minimizing the side-lobe level under the constraint of desired main-beam width. Initially, fundamentals of antenna arrays and functions of radiation patterns are introduced. Next, detailed procedures for achieving the optimization are given. Simulation results show that optimization of radiation patterns based on Harmony Search Algorithm is very efficient. It spends less time to achieve global convergence, and is thus suitable to treat linear and nonlinear problems in engineering. In addition, the proposed scheme can also be extended to treat optimization problems in many other fields of engineering.

**Keywords:** Antenna Array; Harmony Search Algorithm; Optimization

## 应用和声搜寻法于设计阵列天线

余相宽, 李坤洲

国立成功大学, 系统及船舶机电工程系, 台南  
Email: kclee@mail.ncku.edu.tw

收稿日期: 2012年2月9日; 修回日期: 2012年2月26日; 录用日期: 2012年3月8日

**摘要:** 本研究采用和声搜寻法, 调整阵列元素之位置, 且须符合主波瓣束宽之限制条件, 用以达成阵列波束函数旁波瓣级之极小化, 达成阵列问题最佳化之目的。首先, 介绍阵列天线之相关知识和阵列波束函数方程, 以及如何在限制条件内做最佳化处理。仿真结果显示, 应用和声搜寻法能有效率的达成最佳化目标, 收敛至全域解所需花费时间较少, 能有效处理线性和非线性最佳化问题, 并能应用于其它研究领域, 非常适合用于工程领域之最佳化问题。

**关键词:** 阵列天线; 和声搜寻法; 最佳化

### 1. 引言

19世纪物理学家赫兹发现电磁波以后开启了无线通讯<sup>[1]</sup>的发展, 回顾以往通讯的发展是为了战争的需求, 所以在二次大战时, 通讯技术进步的相当迅速, 当时通讯阵列除了应用在语音通讯外, 雷达、声纳等皆源自于此时。直到现在, 通讯科技的发展, 变成人与人之间密不可分的部分。就目前天线通信知识和技术的迅速发展, 以及国际上对天线的诸多研究方向的提出, 都促使了新型天线的诞生, 阵列天线就是研究

的一种方向。本研究之目的主要是设计一个阵列天线。一般来说, 均匀的阵列天线较容易分析和应用, 但在现实环境下, 常会因为地形因素而影响到阵列元素的摆放, 故我们将在此对非均匀阵列天线做一些探讨。阵列天线为通讯的基本媒介工具, 且以往也有多位学者致力于此方面的研究。1968年 R. K. Arora 对线性天线阵列作出仅调整位置的对称阵列研究<sup>[2]</sup>; 1988年 P. Jarske 针对对称阵列的线性阵列天线作出调整权重与位置的研究<sup>[3]</sup>; 1996年 V. Murino 针对非对称的

线性阵列天线调整位置找出全域最佳解<sup>[4]</sup>。另外也有许多知名的随机法应用于通讯阵列设计,例如基因算法<sup>[5]</sup>、蚁群算法<sup>[6]</sup>和粒子群算法<sup>[7]</sup>等等,其中基因算法是最常用于此类问题的算法。若欲提升天线之性能,其首要课题为抑制旁波瓣级(side-lobe level)之能量,大体来说,旁波瓣(side-lobe)的数量越多,数据会越容易遭到外泄,所以必须对旁波瓣之数量有所控制。然而主波瓣(main-beam)之辐射方向也是一大关心课题,若其束宽(beam-width)越窄,表示聚束效果好,越能得到好的指向性。通讯技术发展至今,拉近了人与人的距离,提高了经济的效率,深深的改变了人类的生活方式与社会。

## 2. 阵列波束函数

在分析与设计阵列天线的过程中,问题的难度将会随着所需设计的参数数目的增加而提高,而多参数的最佳化设计,更是设计上十分具有挑战性的问题,以下略述本研究之阵列问题所需设定的参数设计。

1) 束宽与辐射轴向的控制。所有的阵列设计几乎都是依照主波瓣之特性为重要设计目标,主波瓣的束宽愈窄,表示聚束效果愈好,越能有较佳的指向性。

2) 阵列的型式。不同维度和外型的阵列,其辐射场型和推导公式皆不相同,通常选定所需之维度空间、阵列长度和简单外形之辐射场型进行设计。

3) 阵列元素的摆放。一个波束函数的辐射效能取决于阵列元素的摆放位置和排列方式,但事实上,常常会受限于阵列的型式和摆设地形等因素,因此而更增添设计的难度,一般习惯上各元素间的距离皆采用半波长。

若想要缩小主波瓣的束宽,可以增加阵列长度和波长比值,发射的讯号也会比较集中,但是缺点为旁波瓣的数量会跟着增加,造成发射的讯号会送到非接受端,最明显之处就是会造成辐射功率的浪费。一般的天线可以当作发射端亦可作接收端。当发射端使用时,我们会希望发射出的讯号能够较为集中,若当作接收端使用时,则需要降低所收到的杂讯,才能收到完整的讯号。所以应用在阵列问题上时会希望主波瓣之束宽越窄越好,并且要尽量抑制旁波瓣的产生。

现考虑对称线性阵列场型图之合成,即所有阵列元素皆沿一直线排列。假设阵列元素皆为等向性元素,且忽略阵列中的耦合效应,其波束函数方程<sup>[8]</sup>可

记为(1)式

$$F(\theta) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{jkuX_n} \quad (1)$$

其中  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长,  $A_n$  表激发权重的振幅,  $X_n = \lambda/2 \cdot q_n$  表位置,  $u = (\sin\theta - \sin\theta_0)$ ,  $\theta$  为方向角,  $\theta_0$  为主波瓣峰值方向。现假设若有奇数个元素  $N$  为  $2M+1$ , 中央的元素坐标定为原点,且以原点呈左右对称,故亦可将(1)式简化为(2)式<sup>[9]</sup>

$$F(\theta) = A_0 + \sum_{m=1}^M 2A_m \cdot \cos(kuX_m) \quad (2)$$

欲达到一完善的通讯阵列,最主要是要调整阵列天线的位置与权重,一个好的通讯阵列所产生的天线辐射场型图包括高增益、低旁波瓣级和最小的主波瓣波束宽度。综合上述,本研究找寻旁波瓣级的方式为先将波束函数方程做正规化并取 dB 值如(3)式所示,接着我们要从(3)式找出各波瓣的峰值,研究方法则用(4)式来表示,最后将所找到的峰值比较其大小,最大的峰值为主波瓣波束,第二大的峰值则为我们要找的旁波瓣级。束宽为主波瓣在辐射场型图里的宽度。习惯上用  $1/\sqrt{2}$  发生处来当束宽的边界,且从此定义出来的也称 3 dB 频宽。然而寻找束宽的方式为以主波瓣峰值为基准,将其减去其余各个辐射值后再加上 3 并取绝对值,比较所得到的值若为最小者,即为所要之束宽。图 1 为天线辐射场型图之介绍。

$$F(\theta)_{\text{dB}} = 20 \log \left[ \frac{F(\theta)}{F(\theta)_{\text{max}}} \right] \quad (3)$$

$$\text{if} (F(\theta)_{\text{dB}} > F(\theta+1)_{\text{dB}} \ \& \ F(\theta)_{\text{dB}} > F(\theta-1)_{\text{dB}}) \quad (4)$$

$$\text{Peak}(a) = F(\theta)_{\text{dB}}$$

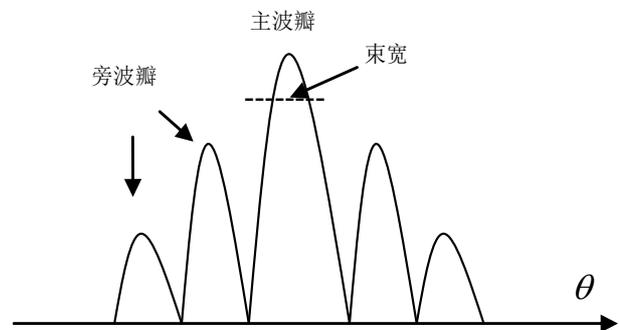


Figure 1. Antenna radiation pattern  
图 1. 天线辐射场型图

### 3. 和声搜寻法

和声搜寻法<sup>[10]</sup>是 Geem 等人通过模拟音乐和最佳化问题的相似性而提出的一种现代启发式进化算法, 算法优点为可处理离散变量和连续变量, 且在使用上和知名的遗传算法相较之下显得相当容易, 至目前为止和声搜寻法也有应用在各项工程领域<sup>[11-13]</sup>, 是一个相当有前景的研究方法。算法首先须初始化和声记忆库(HM), 然后从和声记忆库中随机产生新的和声, 如果新的和声比记忆库中最差的和声好, 则用新的和声替换记忆库中最差的和声, 如此循环一直到满足停止条件才结束。和声搜寻法的主要步骤如下:

#### Step 1: 定义问题与设定参数

需要设定的参数有和声记忆库的大小 HMS、记忆库取值概率 HMCR、音调微调概率 PAR、音调微调频宽 bw 和创作的次数  $T_{\max}$ 。

#### Step 2: 初始化和声记忆库

随机产生 HMS 个和声  $X^1, X^2, \dots, X^{HMS}$  放入和声记忆库, 此记忆库可以模拟于遗传算法中的种群。和声记忆库形式如下:

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & \dots & x_N^1 & | & f(X^1) \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots \\ x_1^{HMS} & \dots & x_N^{HMS} & | & f(X^{HMS}) \end{bmatrix}$$

#### Step 3: 产生一个新的和声

假设产生的新和声为  $X' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$ , 则新和声里的每一个音调  $x'_j (j=1, 2, \dots, N)$  是通过三种方式所产生, 分别为学习和声记忆库、音调微调和随机选择音调。举例来说, 新解的变量  $x'_j$  有 HMCR 的机率选自记忆库里  $X_j^1 \sim X_j^{HMS}$  的任何一个值, 有  $1-HMCR$  的机率选自记忆库以外的任何值, 变量产生方式可用(5)式来表示。其中因 HMCR 的值会影响新解产生的方式, 故因选取较大之值, 一般取值范围为 0 至 1 之间的数, rand 为 0 到 1 之间的均匀分布的随机数。

$$x'_j \in (x_j^1, x_j^2, \dots, x_j^{HMS}), \text{ if rand} < \text{HMCR} \quad (5)$$

若新的和声  $x'_j$  选自和声记忆库, 则会有 PAR 的机率对其进行音调微调, 否则维持不变。此机制在和声搜寻中起局部搜索之作用, 其值一般取 0.1 至 0.5 之间。具体操作如(6)式。其中 rand1 为 0 到 1 之间的均匀分布的随机数, bw 通常取 0.01。

$$x'_j = x'_j + \text{rand1} \times \text{bw}, \text{ if rand1} < \text{PAR} \quad (6)$$

#### Step 4: 更新和声记忆库

对 Step 3 中的新解和记忆库里的解做比较, 若新解优于记忆库里最差的解, 则将新解更新至记忆库中。

#### Step 5: 检查停止条件

重复 Step 3 和 Step 4, 直到满足创作(迭代)次数为  $T_{\max}$  才停止。

### 4. 仿真结果

以下我们提出三个例子来对阵列天线做位置和振幅的最佳化设计。为求理论和所选用之算法的可行性, 相关参数均仿照参考文献[3]来设定。模型参数设置为  $\theta_0 = 0$ ,  $\theta$  设定在 0 度到 90 度之间, 阵列元素数量  $N = 25$ , 即  $M = 12$ , 通讯阵列长度  $L = 50$ , 所要摆放的元素只能落在半波长的整数倍位置, 且同一个位置只能放置 1 个元素, 换句话说, 不可多个元素放在同一地点, 并限制主波瓣束宽必须小于或等于 4.6 度。算法所需设定参数为  $HMS = 20$ ,  $HMCR = 0.8$ ,  $PAR = 0.3$ ,  $bw = 0.01$ 。最大迭代次数  $T_{\max}$  设为 20,000 次, 目标是尽可能使旁波瓣级越小越好, 以达到一良好之通讯阵列。

第一个例子为使用对称线性阵列天线, 做只调整阵列元素的位置进行最佳化设计。故阵列元素位置之振幅均设为 1, 两端的边界元素固定于  $q_1 = -50$  和  $q_{25} = 50$ , 中心单元天线  $q_{13} = 0$  固定于原点, 其余单元天线之位置则须透过算法做摆放, 并和原点做左右对称, 因此, 问题维度由 25 变为 11, 其最佳化结果为旁波瓣级为 10.75, 即旁波瓣级为 -10.75 分贝, 其最佳化位置分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 7.0, 9.0, 11.5, 16.0, 束宽为  $1.6^\circ(\text{degree})$ , 结果明显优于<sup>[2]</sup>旁波瓣级为 -10.14 分贝。图 2 为最佳化后之阵列场型图。

第二个例子是使用对称线性阵列天线, 做同时调整阵列元素之位置和振幅的最佳化设计。本例的研究方法为沿用例子一之设定, 找出最佳位置后并固定, 接着藉由算法将振幅从原本为 1 进行调整, 由于振幅对称于中心单元天线, 故问题维度为 13, 模拟结果旁波瓣级为 -12.51 分贝, 最佳化振幅分别为 1.71, 1.30, 1.54, 1.82, 1.00, 1.48, 1.15, 1.17, 1.31, 1.54, 1.11,

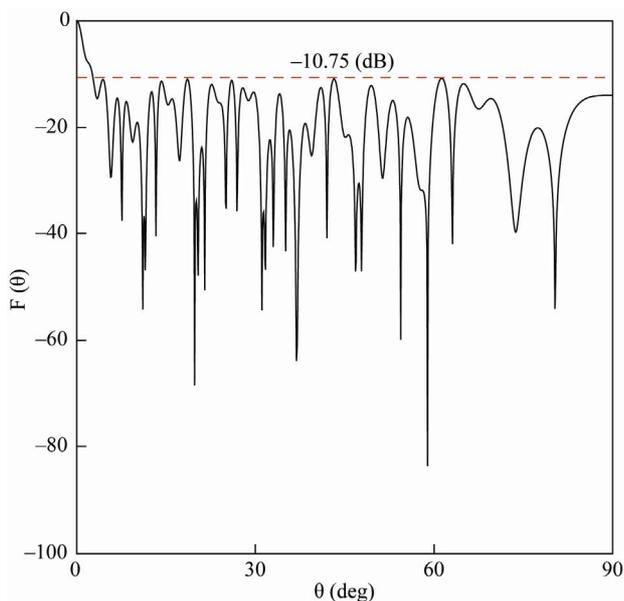


Figure 2. Case 1: radiation pattern  
图 2. 例子一：阵列场型图

0.98, 0.93, 束宽为  $2.2^\circ$ (degree), 结果明显大幅降低旁波瓣级位准, 且优于<sup>[3]</sup>旁波瓣级为-12.20 分贝, 图 3 为最佳化后之阵列场型图。

第三个例子为对非对称线性阵列天线做探讨, 本例子参数仿照<sup>[4]</sup>的设定, 只对阵列位置元素做调整, 故振幅均设为 1, 两端的边界元素固定于  $q_1 = 0$  和  $q_{25} = 100$ , 对其余 23 个单元天线做位置之最佳化, 因此问题维度为 23, 经模拟后旁波瓣级为-12.23 分贝, 最佳化位置分别为 0.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.5, 5.0, 5.5, 6.5, 7.0, 8.0, 9.0, 10, 10.5, 11, 11.5, 12, 14.5, 16, 19, 22, 32.5, 束宽  $2.0^\circ$ (degree), 结果明显优于<sup>[4]</sup>旁波瓣级为-12.07 分贝。图 4 为最佳化后之阵列场型图。

## 5. 结论

由以上三个例子可以发现, 若只调整位置进行天线设计, 所绘出的阵列场型图其主波瓣束宽差异不大, 且较无法抑制旁波瓣的产生, 此法难以应用在已实体化的阵列。但若对位置和振幅一起做调整, 可大幅抑制旁波瓣位准, 且搭配束宽之限制条件, 更能够加强其聚束效果, 目前此法经常应用在水下通讯之中。本研究所使用之和声搜寻法, 是近年来才发表的算法, 应用研究范围还不算广, 算法本身也有尚待修改的空间, 比如可在 PAR 机率参数加上上下限<sup>[14]</sup>,

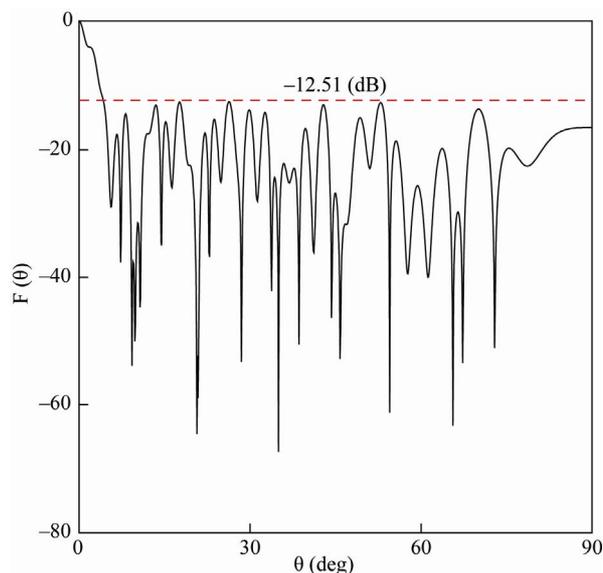


Figure 3. Case 2: radiation pattern  
图 3. 例子二：阵列场型图

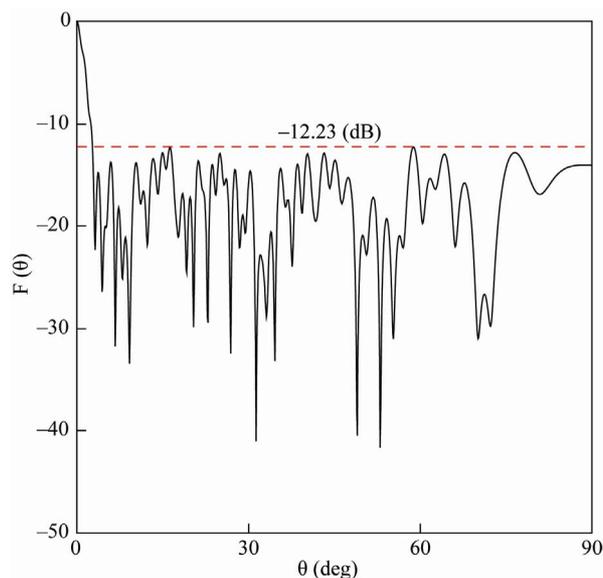


Figure 4. Case 3: radiation pattern  
图 4. 例子三：阵列场型图

增加其收敛性, 且此方法和其它较主流的算法相较之下, 具备的优势包含参数设定少、实作容易以及收敛快速等特性, 对于解决通讯阵列之问题有很大的帮助。

## 6. 致谢

在此感谢我的导师李坤洲教授, 当我在论文中有问题时, 提供我方向去解决, 也感谢审稿老师指正文中的缺失。

## 参考文献 (References)

- [1] E. Z. Rodger, H. T. William. Principle of communication. River Street Hoboken: Wiley, 2002.
- [2] R. K. Arora, N. C. V. Krishnamacharyulu. Synthesis of unequally spaced arrays using dynamic programming. IEEE Transactions on Antennas Propag, 1968, AP-16: 593-595.
- [3] P. Jarske, T. Saramaki, S. K. Mitra and Y. Neuvo. On properties and design of nonuniformly spaced linear arrays. IEEE Transactions on Acoustics, Speech Signal Process, 1988, 36(3): 372-380.
- [4] V. Murino, A. Trucco and C. S. Regazzoni. Synthesis of unequally spaced arrays by simulated annealing. IEEE Trans Signal Processing, 1996, 44(1): 119-123.
- [5] M. A. Panduro. Design of coherently radiating structures in a linear array geometry using genetic algorithms. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2007, 61(8): 515-520.
- [6] E. Rajo-Iglesias, O. Quevedo-Teruel. Linear array synthesis using an ant-colony-optimization-based algorithm. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2007, 49(2): 70-79.
- [7] P. J. Bevelacqua, C. A. Balanis. Minimum sidelobe levels for linear arrays. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(12): 3442-3449.
- [8] C. H. Rober. Phased array antennas. River Street Hoboken: Wiley, 2009.
- [9] C. A. Balanis. Antenna theory: Analysis and design. River Street Hoboken: Wiley, 2005.
- [10] Z. W. Geem, J. H. Kim and G. V. Loganathan. A new heuristic optimization algorithm: Harmony search algorithm. Simulation, 2001, 76(2): 60-68.
- [11] 王蕊, 夏军, 张文华. 和声搜索在非线性马斯京根模型参数率定中的应用[J]. 水电能源科学, 2008, 26(4): 36-39.
- [12] 金勇强, 苏怀智, 李子阳. 机于和声搜索的边坡稳定性投影寻踪聚类分析[J]. 水利学报, 2007, S1: 682-686.
- [13] 宋志宇, 李俊杰. 和声搜索最小二乘支持向量机预测模型及其应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(8): 207-210.
- [14] M. Mahdavi, M. Fesanghary and E. Damangir. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. Applied Mathematics and Computation, 2005, 188(2): 1567-1579.