

模拟退火粒子群算法的同心圆阵稀疏优化设计

王倩, 王布宏, 李龙军, 刘通

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 提出一种基于模拟退火粒子群算法(SAPSO)的同心圆阵稀疏优化方法,该方法以同心圆阵阵元位置为优化参量,以第一零点波束宽度和峰值旁瓣电平为优化目标,结合了模拟退火算法和粒子群算法的优点,提高了算法的收敛速度,具有摆脱局部最优的能力。仿真结果表明,相比于目前常用的4种优化算法,相同迭代次数下,该方法收敛迭代次数最小,且在约束同心圆阵第一零点波束宽度的同时得到的稀疏同心圆阵具有最低的峰值旁瓣电平。

关键词 同心圆阵;模拟退火;粒子群算法;旁瓣电平

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.06.009

中图分类号 TN820 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)06-0042-04

A Design of Thinned Concentric Ring Arrays Based on SAPSO

WANG Qian, WANG Buhong, LI Longjun, LIU Tong

(Information and Navigation College, Air Force Engineer University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In this paper, a design method of thinned concentric ring arrays base on Simulated-Annealing-based Particle Swarm Optimization (SAPSO) is proposed. Taking the position of elements as variables, first null beam-width (FNBW) and peak side lobe level as fitness function, the convergence velocity of the method is improved and the local optimum can be effectively escaped combined with the advantages of the simulated annealing algorithm and the particle swarm optimization algorithm. The simulation results demonstrate that compared with the existing four popular methods of thinning concentric ring array, the first null beam-width of the obtained thinned array is retainable equal to that of the full array and the peak side lobe level is reduced considerably.

Key words: concentric ring array; simulated annealing (SA); particle swarm optimization (PSO); side lobe level

同心圆阵天线由于其特殊的性能,广泛应用于雷达、通信、电子战系统。它具有结构简单、扫描范围宽、波束方位控制灵活等特点,但同时存在阵列阵元数目较多,系统成本大,旁瓣电平高的缺点。稀疏同心圆阵天线能有效解决以上问题,它具有阵元数量小,阵列结构简单,系统成本低等优点。但稀疏后的阵列天线的旁瓣电平往往比较高,阵列天线的性

能降低。

如何在不降低天线性能的情况下,对满阵进行有效稀疏,是迫切需要解决的问题。近年来,随着计算机技术的飞速发展,出现了许多高效的优化方法,最优稀疏布阵方法研究在理论分析方面获得了较大进步,用于同心圆阵稀疏布阵的算法主要有遗传算法^[1-2],粒子群算法^[3-4],模拟退火算法^[5]以及萤火虫

收稿日期: 2015-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61172148)

作者简介: 王倩(1988-),女,河北唐山人,硕士生,主要从事阵列信号处理研究, E-mail: wqing0601@163.com

引用格式: 王倩,王布宏,李龙军,等. 模拟退火粒子群算法的同心圆阵稀疏优化设计[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(6):42-45. WANG Qian, WANG Buhong, LI Longjun, et al. A Design of Thinned Concentric Ring Arrays Based on SAPSO[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(6): 42-45.

算法^[6-7]等。鉴于粒子群算法并行性搜索速度快、效率高,算法简单,模拟退火算法具有很强的全局优化搜索能力,在一定程度上可以接受恶化解,能很好地跳出局部最优,本文提出了一种基于模拟退火粒子群算法的同心圆阵稀疏优化方法。

1 同心圆阵

同心圆阵是由多个具有共同圆心的均匀圆阵组成的平面阵。

设均匀同心圆阵由 M 个均匀圆环构成,每个圆环之间间隔 $d_c = \lambda/2$,第 m 个圆环的半径为 $r_m = m\lambda/2$ 。

假设阵元为理想的全向性天线单元,各阵元具有等幅同相激励,阵列主波束指向阵列中心法线方向,则同心圆阵方向图函数可以表示为:

$$G(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=1}^{N_m} a_{mn} \exp[jk(r_m \sin\theta \cos(\varphi - \varphi_{mn}))] \quad (1)$$

式中: φ_{mn} 为第 m 个圆环上第 n 个阵元对应的方位角, N_m 为第 m 个圆环上阵元数目, a_{mn} 为第 m 个圆环上第 n 个阵元的激励, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为信号波长。

将 $G(\theta, \varphi)$ 由直角坐标系转换到极坐标系,极坐标系中的 2 个新变量 ρ_m 和 ξ 为:

$$\begin{cases} \rho_m = r_m \sin\theta \\ \xi = \varphi \end{cases} \quad (2)$$

式(1)可以写成简洁的形式:

$$G(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=1}^{N_m} a_{mn} \exp[jk\rho_m \cos(\varphi_{mn} - \xi)] \quad (3)$$

若同心圆阵中各单元为等幅激励,并沿着圆周等距排列成角对称,即 $a_{mn} = a$, $\varphi_{mn} = 2\pi(n-1)/N_m$,则式(3)中各项可以展成贝塞尔函数级数^{[10]301-321},即:

$$G(\theta, \varphi) = a \sum_{m=0}^M \sum_{n=1}^{N_m} \sum_{p=-\infty}^{+\infty} \exp \left[j p \left(\frac{\pi}{2} - \xi + \frac{2\pi(n-1)}{N_m} \right) \right] J_{pN_m}(k\rho_m) \quad (4)$$

交换上式中求和顺序,并考虑到:

$$\sum_{n=1}^{N_m} \exp \left[j p \frac{2\pi(n-1)}{N_m} \right] = \frac{\exp(j2\pi p/N_m) [1 - \exp(j2\pi p)]}{1 - \exp(j2\pi p/N_m)} = \begin{cases} N_m, \frac{p}{N_m} \text{ 为零和偶数} \\ 0, \frac{p}{N_m} \text{ 为其他数} \end{cases} \quad (5)$$

式(4)变成:

$$G(\theta, \varphi) = a \sum_{m=0}^M \sum_{p=-\infty}^{\infty} N_m \exp \left[j p N_m \left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) \right] J_{pN_m}(k\rho_m) \quad (6)$$

式中: pN_m 指贝塞尔函数的阶数,含有零阶贝塞尔

函数 $J_0(k\rho_m)$ 的项为主项,其余各项为余项。

高阶贝塞尔函数在其可见区的数值很小,即 $pN_m \gg 1$ 时 $J_{pN_m}(k\rho_m) \rightarrow 0$,所以当 N_m 很大时, $G(\theta, \varphi)$ 可以只取主项来近似,此时阵列的总方向图可表示为:

$$G(\theta, \varphi) \approx \sum_{m=0}^M a_m J_0(k\rho_m) \quad (7)$$

式中: $a_m = aN_m$, N_m 是第 m 个圆环单元的激励的个数。

通过公式(1)到式(7)的转换,可以将同心圆阵的三维优化问题转换为二维问题进行求解,减少了计算量,提高了收敛速度。

2 模拟退火粒子群算法

粒子群算法的速度和位置进化公式为:

$$\begin{aligned} v_n^i &= \omega v_n^{i-1} + c_1 \text{rand}(p_n^{i-1} - x_n^{i-1}) + c_2 \text{rand}(g_n^{i-1} - x_n^{i-1}) \\ x_n^i &= x_n^{i-1} + v_n^i \end{aligned} \quad (8)$$

式中: ω 是惯性权重; c_1 、 c_2 是学习因子; v 是速度变量; x 是位置变量; p 是个体到达的最好位置; g 是群体到达的最好位置。 i 表示第 i 次迭代, n 表示 N 维搜索空间的第 n 维。rand 是一个随机数产生函数,产生 0 到 1 之间均匀分布的随机数。

将式(8)中的位置进化公式改为:

$$x_n^i = \begin{cases} 1, \text{rand} < S(v_n^i) \\ 0, \text{rand} \geq S(v_n^i) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $S(v_n^i) = \frac{1}{1 + e^{-v_n^i}}$, v 代表 x 取值为 0 或 1 的几率。模拟退火粒子群算法以式(9)作为位置进化公式。

模拟退火粒子群算法将粒子群算法速度式(8)作为速度进化公式,并引入变异项^[8],变异项在种群离散时对优化结果影响不大,但当种群聚集时能防止收敛,公式如下:

$$v_n^i = \omega v_n^{i-1} + c_1 \text{rand}(p_n^{i-1} - x_n^{i-1}) + c_2 \text{rand}(g_n^{i-1} - x_n^{i-1}) + d \text{randn} \quad (10)$$

式中: randn 是正态随机数函数,均值 0,方差 1。

模拟退火粒子群算法利用模拟退火算法中的 Metropolis 准则,以一定的概率接受某个粒子替代式(10)中的 g ,利用接受的“恶化解”对速度 v 进行一定程度的扰动,有效避免算法陷入局部最优。

本文模拟退火粒子群算法对 Metropolis 准则进行了改进,接受概率变为:

$$P = (e^{-(f(p_i) - f(g))/t}) / (\sum_{i=1}^N e^{-(f(p_i) - f(g))/t}) \quad (11)$$

式中: $f(\cdot)$ 为个体的适应度值; t 为当前温度; N

为种群个数; g 为当前粒子群中的最优; p_i 为第 i 个粒子。 P 是一个小于 1 的数。产生一个 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数, 若 P 大于这个随机数, 则接受粒子替代式(10)中的 g , 反之, 不接受。

利用式(11), 将当前某粒子接受概率与粒子群接受概率联系起来, 根据种群的优化程度来接受“恶化解”, 而且随着温度越来越低, 接受“恶化解”的概率越来越小, 从而提高了收敛性能。模拟退火算法要求初始温度足够高, 本文初始温度由初始粒子群中最优个体的适应度值确定: $T = Kf(g)$, K 为常数, 保证 T 为正数并且足够大。同时引入温度衰减参数 δ , 其中 $0 < \delta < 1$, 随着迭代次数的增加, 温度 T 随衰减参数缓慢下降。

将同心圆阵的阵元位置映射为一个粒子, 粒子中的一个变量对应于一个阵元, 采用模拟退火粒子群算法对同心圆阵进行稀疏优化, 具体算法流程如图 1。

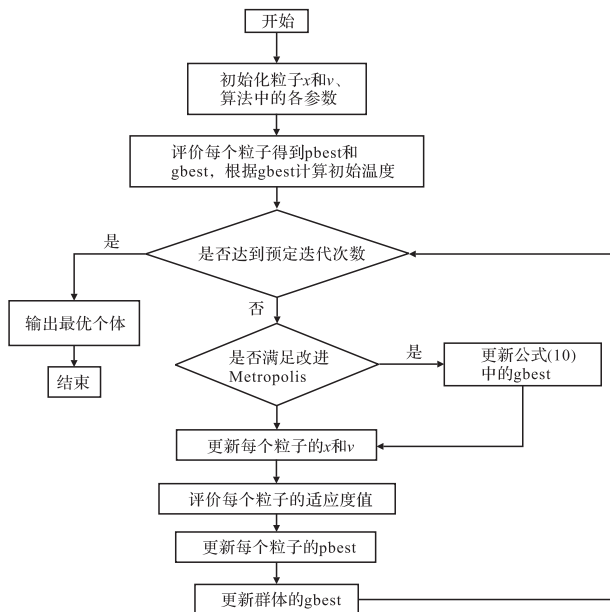


图 1 SAPSO 算法流程图

Fig.1 Flow chart of SAPSO

3 适应度函数

基于模拟退火粒子群算法的同心圆阵稀疏优化设计方法以约束第一零点波束宽度、优化旁瓣电平为目标, 其适应度函数设计为:

$$f = S_{\max} + k(F_o - F_d)^2 H(T) \quad (12)$$

式中: S_{\max} 为峰值旁瓣电平; F_o 和 F_d 为得到的和期望的第一零点波束宽度; k 是权重系数; $H(T)$ 为单位阶跃函数, 可表述为:

$$H(T) = \begin{cases} 0, & T \leq 0 \\ 1, & T > 0 \end{cases}, \text{其中 } T = F_o - F_d$$

适应度函数的意义为: 当得到稀疏阵的 F_o 小于

等于 F_d 时, $H(T)$ 的值为 0, 式(12)的第 2 项为 0, 此时适应度值只与峰值旁瓣电平有关; 当 F_o 大于 F_d 时, $H(T)$ 的值为 1, 适应度值就会变大, 由此剔除第一零点波束宽度较大的稀疏阵列。

4 仿真结果

为了验证算法的可行性和有效性, 本文对一个由 279 个阵元组成, 圆环间距为 $\lambda/2$ 的 9 圆环均匀同心圆阵进行稀疏优化。位于同一圆环上的阵元等间隔均匀分布, 每个圆环上阵元间距 $d_m \cong \lambda/2$, 则第 m 个圆环上的阵元个数 $N_m = 2\pi r_m / d_m = 2\pi m$, 由于阵元数必须是整数, 对 N_m 进行向下取整。计算得到该均匀同心圆阵峰值旁瓣电平为 -17.40 dB, 第一零点波束宽度为 14.8° 。

采用模拟退火粒子群算法对同心圆阵进行稀疏优化, 设其基本参数为: 粒子群数为 20, 迭代次数 100, $K = 1/\lg 0.9$, $\delta = 0.8$, $\omega = 0.9$, $c_1 = 3.9$, $c_2 = 3.9$, $d = 0.02$ 。得到的稀疏阵单元数为 146, 峰值旁瓣电平为 -22.65 dB, 第一零点波束宽度为 14.8° 。表 1 给出了得到的稀疏同心圆阵的阵元激励分布。

表 1 阵元激励分布

Tab.1 Distribution of element excitation

圆环数	利用本文算法稀疏同心圆阵后的阵元激励分布(0 或 1)
1	110010
2	001001011100
3	000110011000011111
4	0111100011000101101101010
5	0000010100110110011100110100110
6	0011010101110001100010011011110000101
7	0100111110001001000000111011010011101000001
8	001001011110001100011100011100110111001110111011
9	11111101010111010110010111111110000010110111100110000111

优化后的同心圆阵的方向图见图 2, 相对于均匀同心圆阵, 基于 3 种优化算法的稀疏同心圆阵的峰值旁瓣电平都有所减小, 采用模拟退火粒子群算法优化得到的稀疏同心圆阵的峰值旁瓣电平最小。图 3 为采用本文算法稀疏优化同心圆阵的峰值旁瓣电平收敛曲线。随机产生的稀疏同心圆阵的初始峰值旁瓣电平为 -18.5 dB, 当迭代次数为 42 时, 曲线收敛, 得到的峰值旁瓣电平比初始时降低了 4.15 dB。上述结果验证了相比于粒子群算法和模拟退火算法, 本文提出的模拟退火粒子群算法的收敛速度和优化效果都有所提高。

为了进一步分析本算法的性能优势, 表 2 从峰值旁瓣电平、收敛迭代次数(设定迭代次数为 100)2 个方面对 5 种算法进行比较。在第一零点波束宽度相同(14.8°)情况下, 采用本算法得到的峰值旁瓣电

平,与均匀同心圆阵的相比改善了 5.25 dB;比采用粒子群算法和模拟退火算法得到的稀疏同心圆阵的分别降低了 3.04 dB 和 2.44 dB;与文献[6]中采用萤火虫算法得到的稀疏阵的峰值旁瓣电平-20.30 dB 相比降低了 2.35 dB;与文献[9]中采用 BBO 算法得到的稀疏阵的峰值旁瓣电平-21.20 dB 相比降低了 1.45 dB。从峰值旁瓣电平收敛迭代次数上看,本文算法的收敛迭代次数是 42,相比于其它 4 种优化算法,其收敛迭代次数最小,收敛速度最快。综上所述可知,本文提出的算法能够在保证收敛速度最快的情况下,获得更低的峰值旁瓣电平。

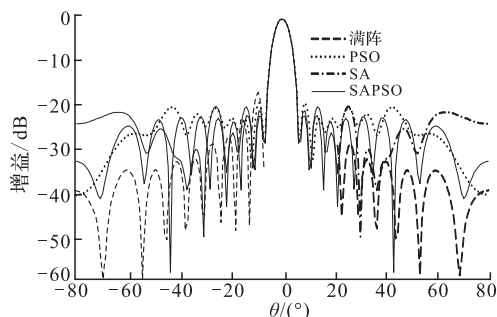


图 2 阵列方向图

Fig.2 Array pattern

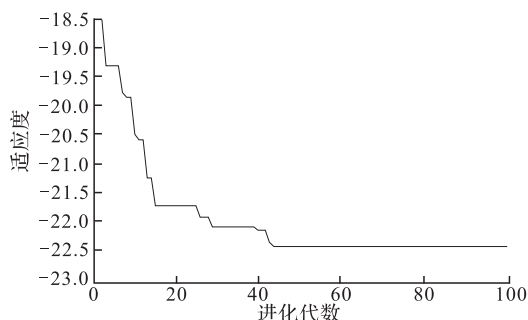


图 3 SAPSO 收敛曲线

Fig.3 Convergent curve of SAPSO

表 2 不同算法的比较

Tab.2 Comparison of different algorithms

阵列	峰值旁瓣电平/dB	收敛迭代次数
满阵	-17.40	0
PSO 算法	-19.61	45
SA 算法	-20.21	78
FA 算法	-20.30	50
BBO 算法	-21.20	85
本文算法	-22.65	42

5 结语

本文根据同心圆阵具有圆对称的特点,将同心圆阵方向图由直角坐标系向极坐标系转换,把同心圆阵的三维优化问题转换为二维问题进行求解。将模拟退火算法的思想引入到粒子群算法中,结合 2 种算法的优点,提出了基于模拟退火粒子群算法的

同心圆阵稀疏优化方法。仿真实验表明,相比于目前常用的几种优化算法,在第一零点波束宽度相同的前提下,本文提出的算法得到了更低的峰值旁瓣电平,而且计算效率更高,收敛速度更快,适合对阵元数目较多的大型同心圆阵列天线进行优化设计。

参考文献(References):

- [1] Haupt R L. Optimized Element Spacing for Low Sidelobe Concentric Ring Arrays[J], IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2008, 56(1): 266-268.
- [2] Haupt R L. Thinned Arrays Using Genetic Algorithms[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(7):993-999.
- [3] Pathak N N, Mahanti G K, Singh S K, et al. Synthesis of Thinned Planar Circular Array Antennas Using Modified Particle Swarm Optimization[J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2009, 12: 87-97.
- [4] Mandal D, Sadhu D, Ghoshal S.P. Thinned Concentric Circular Array Antennas Synthesis Using Improved Particle Swarm Optimization[J].Acee International Journal on Communication, 2011, 2(2): 21-25.
- [5] Meijer C A. Simulated Annealing in the Design of Thinned Arrays Having low Sidelobe Levels[C]// Proceedings of the 1998 South African Symposium on Communications and Signal Processing, 1998: 361-366.
- [6] Singh U, Singh D, Kaur C. Thinning of Planar Circular Array Antennas Using Firefly Algorithm[C]// Engineering and Computational Sciences(RAECS), 2014 Recent Advances in. IEEE, 2014: 1-5.
- [7] Pavani T, Raju G S N.Synthesis of Thinned Concentric Ring Array with Dipole Radiators Using Firefly Algorithm [J]. ISOR Journal of Electronics and Communication Engineer, 2014, 5(9): 40-48.
- [8] 陈定,何炳发.一种新的二进制粒子群算法在稀疏阵列综合中的应用[C]//全国天线年会,2009.
- [9] CHEN Ding, HE Bingfa. Synthesis of Thinned Array Using A New Binary Particle Swarm Optimization Algorithm[C]// The Annual Meeting of the Antenna,2009.(in Chinese)
- [9] Singh U, Kamal T S. Synthesis of Thinned Planar Circular Array Antennas Using Biogeography Based Optimization [C]//Emerging Technology Trends in Electronics, Communication and Networking(ET2ECN), 2012 1st International Conference on IEEE, 2012: 1-5.
- [10] 薛正辉,李伟明,任伍.阵列天线分析与综合[M].北京:北京航空航天大学出版社,2011.
- [11] XUE Zhenghui, LI Weiming, REN Wu. Analysis and Synthesis of Antenna Array[M].Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2011.(in Chinese)
- [11] Dib N, Sharaq A. Synthesis of Thinned Concentric Circular Antenna Arrays Using Teaching-Learning-Based Optimization[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2014, 24(4): 443-450.

(编辑:姚树峰)