

文章编号:1001-9081(2010)10-2585-03

改进粒子群算法在正交编码优化中的应用

殷 华¹, 刘以安¹, 吴少鹏², 唐霜天²

(1. 江南大学 信息工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 船舶重工集团公司 724 研究所, 南京 210003)

(wxyinhua@126.com)

摘 要: 为了避免同型号雷达发射信号之间产生的相互干扰, 一般要求各雷达发射的信号是正交的, 所以设计具有低自相关和互相关的正交编码信号是雷达抗干扰的关键。针对频率编码雷达信号, 提出一种基于改进粒子群的正交编码信号优化算法, 引入遗传算法中的交叉变异思想, 从而克服基本粒子群算法 (SPSO) 收敛速度慢、易陷局部最优的缺点, 最后对设计结果进行了分析。仿真结果表明, 该方法是有有效和可行的, 在性能上要优于基本粒子群算法、模拟退火算法 (SA) 和混合遗传算法 (HGA)。

关键词: 粒子群算法; 正交编码; 自相关; 互相关; 雷达; 抗干扰

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A

Application of improved particle swarm optimization in orthogonal codes

YIN Hua¹, LIU Yi-an¹, WU Shao-peng², TANG Shuang-tian²

(1. School of Information Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China;

2. The 724 Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Nanjing Jiangsu 210003, China)

Abstract: In order to avoid the interference between the same model radars, the radar signals are generally asked to be orthogonal, so to design orthogonal signals with low auto-correlation and cross-correlation is the key to anti-jamming. Concerning the frequency-coded radar signals, improved Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm was used to optimize the signal-coding sequences selected from which to meet the objective function to find the orthogonal codes group. Crossover and mutation idea of Genetic Algorithm (GA) was introduced to overcome the slow convergence and local optimum of Simple PSO (SPSO) algorithm, and design results were analyzed at last. The results show that the method is effective and feasible, and the performance is superior to that of SPSO, Simulated Annealing (SA) and Hybrid Genetic Algorithm (HGA).

Key words: Particle Swarm Optimization (PSO); orthogonal coding; auto-correlation; cross-correlation; radar; anti-jamming

0 引言

目前, 消除同型号雷达间的同频干扰^[1], 最根本的方法是使每部雷达所发射的信号都可以采取某种方法进行严格区分, 从而使每部雷达都能够将自己所发射信号与其他雷达所发射信号区分开来, 达到抗干扰的目的。如对舰艇编队之间可能出现的同频干扰问题, 可通过资源管理控制和调度各雷达发射的信号编码形式, 可以是同频正交, 也可以是多频正交, 从而使各雷达在不同的方位获得独立的分集增益, 降低雷达间干扰带来的虚警概率。对此, 许多学者提出了不同算法来进行正交编码设计。文献[2]提出了基于模拟退火算法的正交编码优化设计, 文献[3]提出了基于混合遗传算法的正交编码优化设计, 文献[4]提出了基于蚁群算法和模拟退火算法的正交编码优化设计。

正交编码问题的实质是求解满足多目标约束的组合优化问题。本文针对频率编码信号编码序列, 采用粒子群算法进行优化选取, 并引入了遗传算法中的交叉和变异思想, 对该多目标优化问题进行了求解。

1 问题建模

假设同一作战区域内共有 L 部同型号雷达, 每部雷达发

射的波形包含 N 个子脉冲, 每部雷达的子脉冲宽度为 T_l , 重复周期为 T_l^r , 则对不同雷达的子脉冲进行不同的频率调制, 其编码信号可表示为:

$$s_l(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} u(t - nT_l^r) \exp(j2\pi b_n^l \Delta f_l t) + \exp(j2\pi f_0 t) \quad (1)$$

其中:

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{T_l}} \text{rect}\left(\frac{t}{T_l}\right) \exp(j\pi k_l t^2) \quad (2)$$

为 Chirp 子脉冲; Δf_l 为第 l 部雷达的 Chirp 子脉冲带宽 ($\Delta f_l > 1/T_l$); $k_l = \Delta f_l/T_l$; $\{b_n^l\}$ 表示第 l 部雷达的频率编码序列, 一般 $b_n^l \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$, 它是由 $\{0, 1, 2, \dots, N-1\}$ 进行排列而来, $l = 1, 2, \dots, L$ 。

为了对抗同型雷达之间产生的同频干扰, 雷达信号的设计应根据式 (1) 选择编码信号形式, 使其自相关函数的旁瓣尽可能低且互相关函数值尽可能小, 即雷达信号的设计应满足正交特性。即编码信号应具有如下特性:

$$A(s_l, \tau) = \frac{1}{N} \int_{-\infty}^{+\infty} s_l(t) s_l(t - \tau) dt \begin{cases} = 1, & \tau = 0 \\ = 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

收稿日期: 2010-03-31; 修回日期: 2010-05-28。 基金项目: 国防预研应用基础研究基金资助项目 (A1420061266)。

作者简介: 殷华 (1986-), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 人工智能、模式识别、信号处理、雷达对抗; 刘以安 (1963-), 男, 江苏涟水人, 教授, 博士, 主要研究方向: 数据融合、雷达对抗、模式识别与智能系统; 吴少鹏 (1960-), 男, 江苏南京人, 研究员, 主要研究方向: 雷达系统设计、信号处理; 唐霜天 (1968-), 男, 江苏南京人, 研究员, 主要研究方向: 雷达系统设计与仿真。

$$C(s_p, s_q, \tau) = \frac{1}{N} \int_{-\infty}^{+\infty} s_p(t) s_q(t - \tau) dt \approx 0, p \neq q \quad (4)$$

其中: $A(s_l, \tau)$ 是编码信号 $s_l(t)$ 的自相关函数, $C(s_p, s_q, \tau)$ 是编码信号 $s_p(t)$ 和 $s_q(t)$ 的互相关函数, $l, p, q = 1, 2, \dots, L_0$ 。

于是,问题的求解就可归结为找出尽量满足式(3)和式(4)要求的正交编码优化问题。为了避免问题解的自相关函数的旁瓣峰值(Autocorrelation Sidelobe Peak, ASP)与互相关函数的峰值(Cross correlation Peak, CP)过高,目标函数还应考虑自相关旁瓣能量与互相关能量。因此,目标函数可表示为:

$$E = (1 - \lambda) \left(\sum_{l=1}^L \max_{\tau \neq 0} |A(s_l, \tau)| + \sum_{p=1}^{L-1} \sum_{q=p+1}^L \max_{\tau} |C(s_p, s_q, \tau)| \right) + \lambda \left(\sum_{l=1}^L \int_{\tau} |A(s_l, \tau)|^2 d\tau + \sum_{p=1}^{L-1} \sum_{q=p+1}^L \int_{\tau} |C(s_p, s_q, \tau)|^2 d\tau \right) \quad (5)$$

其中 λ 为加权系数,目的是通过调整 λ 来改变峰值与能量之间的权重关系。

2 基本粒子群算法

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)^[5-6]是一种基于群智能方法的演化计算技术,源于对鸟群捕食行为的研究。它是一种全局优化算法,采用概率变换规则通过搜索空间求解。PSO算法的本质是利用个体极值信息和全局极值两个信息来指导粒子下一步迭代位置,但是存在易陷局部最优问题。近年来,许多学者对其进行了改进,如自适应PSO算法^[7]、混沌PSO算法^[8]、协同PSO算法^[9]等,均取得了较好的结果。

假设在一个 D 维空间中有 M 个粒子组成一个群落,其中第 i 个粒子的位置矢量和速度矢量分别为 $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ ($i = 1, 2, \dots, M$)。记 $\mathbf{p}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ ($i = 1, 2, \dots, M$) 为第 i 个粒子迄今为止搜索到的最优位置; $\mathbf{p}_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ 为整个粒子迄今为止搜索到的最优位置。则将每个粒子 i 代入目标函数计算其适应值 $f(\mathbf{x}_i)$, 并按如下公式更新粒子的状态:

$$v_{id} = wv_{id} + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}) \quad (6)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (7)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, M, d = 1, 2, \dots, D; w \geq 0$ 为惯性因子,适用于对解空间进行大范围的搜索; c_1, c_2 为非负的学习因子, r_1, r_2 均为 $[0, 1]$ 内的随机数; 粒子的飞行速度 $v_{id} \in [-v_{\max}, v_{\max}]$, v_{\max} 为常数,可根据问题人为设定。

3 改进粒子群算法正交编码优化算法描述

这里,对于正交编码寻优问题,因基本粒子群算法收敛速度慢、易陷局部最优,故采用遗传算法的交叉操作思想,让当前个体粒子极值与全局极值作交叉操作,并对个体粒子的极值重新评估,以加快粒子向全局最优方向移动。同时,对全局极值应用变异操作,以克服其解陷于局部最优问题。

为了寻找满足式(5)代价函数最小的频率编码设计雷达信号,改进粒子群算法的具体步骤描述为:

①置 $k = 1$, 最大迭代次数为 num_{\max} , 从 $\{0, 1, 2, \dots, N-1\}$ 组成的 $N!$ 个排列中随机选取 M 个排列 $t_k^1, t_k^2, \dots, t_k^M$ 。其中每个排列 $t_k^p = (b_{k,0}^p, b_{k,1}^p, \dots, b_{k,N-1}^p)$ ($p = 1, 2, \dots, M$) 组成的 N 个数值分别对应于式(1)中的雷达频率编码。若将每个

排列视为一粒子,则由 M 个排列组成的集合 $T_k = \{t_k^1, t_k^2, \dots, t_k^M\}$ 称为初始粒子群。显然集合中的每个元素,即粒子 t_k^p , 对应于式(1)中的雷达信号频率编码。记 $\min(E(t_k^1), E(t_k^2), \dots, E(t_k^M))$ 所对应的 $t_k^g = (b_{k,0}^g, b_{k,1}^g, \dots, b_{k,N-1}^g)$ 为整个粒子的最优排列, $t_k^{p,q} = (b_{k,0}^{p,q}, b_{k,1}^{p,q}, \dots, b_{k,N-1}^{p,q})$ 为当前粒子的最优状态排列;

②对 T_k 中的每个粒子在 $[-v_{\max}, v_{\max}]$ 内随机产生初始速度 v_p ($P = 1, 2, \dots, M$);

③将第 P 个粒子的当前最优状态 $t_k^{p,q} = (b_{k,0}^{p,q}, b_{k,1}^{p,q}, \dots, b_{k,N-1}^{p,q})$ 与 $t_k^g = (b_{k,0}^g, b_{k,1}^g, \dots, b_{k,N-1}^g)$ 进行交叉操作获得的新状态排列 $t_k^{p,q'} = (t_{k,0}^{p,q'}, t_{k,1}^{p,q'}, \dots, t_{k,N-1}^{p,q'})$ ($P = 1, 2, \dots, M$)。如果适应度函数值 $E(t_k^p) < E(t_k^{p,q'})$, 则令 $t_k^{p,q} = t_k^{p,q'}$, 否则 $t_k^{p,q} = t_k^{p,q'}$ 。但为了保持粒子交叉后仍为 $\{0, 1, 2, \dots, N-1\}$ 中 N 个不重复数构成的排列,这里采用交换的原则进行交叉运算,即对两个父代粒子个体,当在所选段内杂交时,用杂交段内元的对应关系来定义一系列交换,以保持在每个父代个体上分别多次进行。比如, $m = 12, n = 10$, 序列为 $\{1, 2, \dots, 10\}$, 现有两个父代个体分别为:

$$P_1(n_1): 2 \ 5 \ 6 \ 10 \ 1 \ | \ 3 \ 9 \ 4 \ 8 \ 4$$

$$P_2(n_2): 8 \ 3 \ 2 \ 11 \ 6 \ | \ 4 \ 10 \ 1 \ 7 \ 5$$

若杂交在第6位,则利用3:4,9:10,11:1,8:7,4:5对应关系,可得杂交生成后的个体为:

$$P_1'(n_1): 2 \ 3 \ 6 \ 9 \ 11 \ | \ 4 \ 10 \ 1 \ 7 \ 5$$

$$P_2'(n_2): 7 \ 5 \ 2 \ 1 \ 6 \ | \ 3 \ 9 \ 11 \ 8 \ 4$$

④按式(6)和(7)更新各粒子 t_k^p 的状态,更新后的粒子状态记为 $t_{k+1}^p = (b_{k+1,0}^p, b_{k+1,1}^p, \dots, b_{k+1,N-1}^p)$ ($P = 1, 2, \dots, M$)。重新计算 $E(t_{k+1}^p)$, 记 $\min(E(t_{k+1}^1), E(t_{k+1}^2), \dots, E(t_{k+1}^M))$ 所对应的 $t_{k+1}^g = (b_{k+1,0}^g, b_{k+1,1}^g, \dots, b_{k+1,N-1}^g)$ 为整个粒子迄今为止搜索到的最优位置;

⑤若 $\|t_{k+1}^g - t_k^g\| < \delta$, 且 $k+1 > num_{\max}$, 则取 $t_{k+1}^g = (b_{k+1,0}^g, b_{k+1,1}^g, \dots, b_{k+1,N-1}^g)$ 和任意 $L-1$ 个此状态的粒子 $t_{k+1}^p = (b_{k+1,0}^p, b_{k+1,1}^p, \dots, b_{k+1,N-1}^p)$ ($P = 1, 2, \dots, L-1$) 所对应的编码为 L 部雷达寻找的最优编码,算法结束。否则,对 $t_{k+1}^g = (b_{k+1,0}^g, b_{k+1,1}^g, \dots, b_{k+1,N-1}^g)$ 进行变异操作。这里,变异采取交换操作实现。如对 t_{k+1}^g 中的任两元素 $b_{k+1,i}^g$ 和 $b_{k+1,j}^g$ 位置进行交换,即 $b_{k+1,i}^g \leftrightarrow b_{k+1,j}^g$, 并令 $k = k+1$, 转至步骤③。

4 性能仿真

本文使用 Matlab 7.0.1 实现了本文的改进粒子群算法。基本参数设置为:最大迭代次数为 200,群体规模为 40,学习因子 c_1 和 c_2 的值为 2,粒子最大飞行速度为 40,惯性因子 w 从 0.8 线性递减到 0.3。用上述的改进粒子群算法对正交编码进行优化设计,表 1 为本文方法产生的正交编码序列组,表 2 为该正交序列组的自相关特性和互相关特性,对角值为对应编码的自相关旁瓣峰值,非对角值为相应两编码的互相关峰值。图 1 为本文产生的正交编码的自相关函数图,图 2 为本文产生的正交编码的互相关函数图。从图中可以看出,其自相关旁瓣峰值和互相关峰值均接近于 0。

为了评价本文算法产生的正交编码的性能,将本文算法得出的结果与基本粒子群算法(Simple PSO, SPSO)、模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)及混合遗传算法(Hybrid Genetic

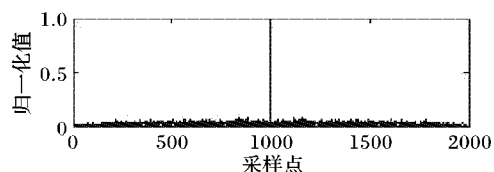
Algorithm, HCA)的结果进行了对比。在表 3 中,本文算法的 ASP 与 CP 分别为 0.066 1、0.073 9,明显优于 SPSO,同时低于 HCA 和 SA。所以,本文算法产生的正交编码性能更优。

表 1 正交编码序列组

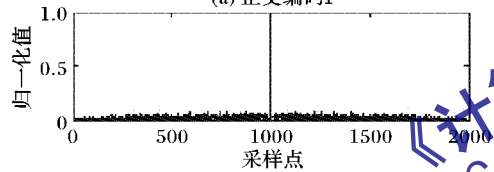
序列	正交编码
1	23, 10, 16, 1, 15, 24, 5, 13, 9, 31, 8, 29, 0, 11, 7, 18, 22, 21, 3, 30, 28, 2, 17, 20, 27, 6, 12, 19, 25, 4, 14, 26
2	10, 26, 9, 19, 30, 13, 8, 11, 15, 24, 4, 16, 2, 14, 28, 7, 27, 25, 23, 6, 1, 22, 31, 18, 5, 3, 20, 0, 17, 29, 21, 12
3	27, 26, 20, 29, 23, 22, 3, 30, 7, 4, 2, 10, 13, 18, 5, 12, 9, 15, 1, 31, 14, 11, 6, 25, 16, 0, 8, 24, 19, 28, 17, 21

表 2 正交编码序列组的 ASP 与 CP

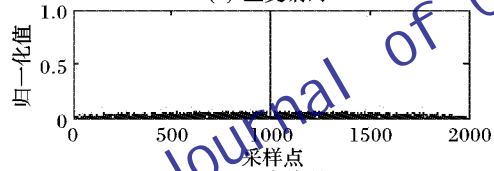
序列	序列		
	1	2	3
1	0.066 8	0.074 8	0.072 9
2	0.074 8	0.061 2	0.074 1
3	0.072 9	0.074 1	0.070 2



(a) 正交编码1

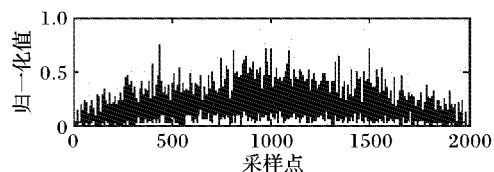


(b) 正交编码2

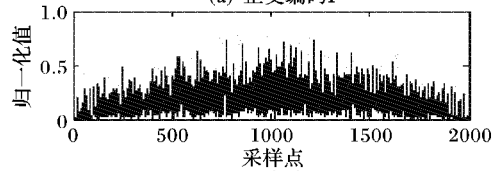


(c) 正交编码3

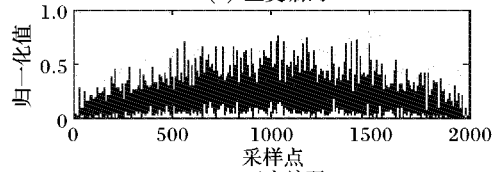
图 1 正交编码组的自相关函数



(a) 正交编码1



(b) 正交编码2



(c) 正交编码3

图 2 正交编码组的互相关函数

为了进一步验证本文算法相对于 SPSO、SA、HGA 具有快速收敛、优化精度提高等优势,表 4 为采用上述四种算法对正

交编码问题的优化结果对比,每种算法独立运行 20 次,群体规模都为 80,最大迭代次数设置为 200。 n 为每种算法收敛到最优解时的迭代次数, T 为收敛到最优解时花费的时间代价。

从表 4 可以看出,本文算法与 SPSO、HGA 和 SA 相比,不但可以提供更优质的解,而且算法的鲁棒性更强,不易陷入局部最优,收敛速度更快,求解精度更高,这正是由于本文在 SPSO 的基础上增加了避免早熟的交叉变异机制,全局优化能力增强,从而使改进后的算法能跳出局部最优解,获得全局最优解,达到了本文算法设计的目的。但由于本文算法时间复杂度高于 BPSO、GA 和 SA,所以在求解花费时间方面优势不明显,这也是算法需要继续改进之处。

表 3 本文算法与其他算法性能比较

算法	ASP	CP
本文算法	0.066 1	0.073 9
SPSO	0.099 7	0.093 1
HGA	0.082 0	0.078 1
SA	0.083 3	0.109 9

表 4 四种算法实验结果对比

算法	最优解 (E-10)	平均值 (E-10)	方差	n	T/s
SA	1.609 5	1.643 3	5.837 3E-23	169	45.768
HGA	1.582 4	1.609 5	6.791 2E-24	142	36.927
SPSO	1.623 3	1.730 9	1.070 8E-22	186	96.842
本文算法	1.527 6	1.531 9	5.108 2E-25	37	38.361

3 结语

本文提出了一种带交叉和变异思想的改进粒子群算法用来求解正交编码优化问题。这种方法综合了粒子群算法和遗传算法的优点,提高了粒子的多样性,增强了算法跳出局部最优的能力,具有较好的全局优化能力,优化效果好,在收敛性和精度上有了很大提高。

参考文献:

- [1] 张文祥,李进华. 雷达同频干扰现象分析研究[J]. 火控雷达技术,2007,36(2): 50-53.
- [2] DENG HAI. Discrete frequency-coding waveform design for netted radar systems [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2): 179-182.
- [3] 王敦勇,袁俊泉,马晓岩. 基于遗传算法的 MIMO 雷达离散频率编码波形设计[J]. 空军雷达学院学报,2007,21(2): 105-107.
- [4] 姚铭君,袁伟明,邢文革. 基于混合优化算法的正交多码的设计[J]. 现代雷达,2007,29(7): 55-57.
- [5] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]// Proceedings of International Conference on Neural Networks. Washington, DC: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [6] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory [C]// Proceedings of International Symposium on Micro Machine and Human Science. Piscataway: IEEE Service Center, 1995: 39-43.
- [7] 郑春颖,郑全弟,王晓丹,等. 基于试探的变步长自适应粒子群算法[J]. 计算机科学,2009,36(11): 193-195.
- [8] 刘军民,高岳林. 混沌粒子群优化算法[J]. 计算机应用,2008,28(12): 322-325.
- [9] 刘怀亮,苏瑞娟,许若宁,等. 协同粒子群优化算法[J]. 计算机应用,2009,29(11): 3068-3073.