

基于多种群分层协作遗传算法的 MIMO 雷达 正交多相编码信号设计

曾祥能¹, 张永顺¹, 陈校平², 王布宏²

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘 要:正交多相编码信号具有大输出主副比和高安全性而倍受关注,利用自相关旁瓣峰值、互相关峰值、总的自相关旁瓣能量和互相关能量最小设计了 MIMO 雷达正交多相编码信号优化的代价函数。基于多种群协作及高层种群高效决策的思想,运用普通群体挖掘优化空间而高层种群引导种群更快的收敛到全局最优解,提出了多种群分层协作遗传算法,并将其应用于 MIMO 雷达正交多相编码信号设计,实现了 MIMO 雷达信号的距离、速度测量的同时提高分辨力,仿真结果表明了本文方法的有效性和可靠性。

关键词:MIMO 雷达;多相正交编码;多种群;分层协作遗传算法

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.04.014

中图分类号:TN959 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2010)04-0068-05

作为常用的脉冲压缩信号^[1],二相码具有容易产生和处理的优点,但是,码长相等的多相码的匹配滤波输出有更大的主副比,且具有更复杂的信号结构,在雷达对抗中具有更高的安全可靠。随着数字信号处理技术和大规模集成电路的发展,多相码脉冲压缩的实现已经变得相对容易,多相码也就越来越广泛地被雷达系统采用。迄今为止,学者们提出了一些方法来设计具有低自相关旁瓣的正交码,Khan 利用正交变换的方法来对多相码进行设计^[2],但难以实现信号个数超过 3 个及码长较长的正交信号设计。智能算法如模拟退火(SA)算法和遗传算法(GA)在复杂问题优化上体现出强大优势,通过最小化代价函数来优化搜索正交多相码是一种可行的选择。对于多相编码信号,文献[3-4]针对正交组网雷达(ONRS),利用 SA 算法设计出了一些有期望自相关和互相关的多相码,但他们都没有考虑多普勒容忍性问题。文献[5]通过模糊函数对 MIMO 雷达正交多相码信号进行了优化设计,本文在此基础上,进一步化简设计多相编码信号的代价函数,使之适合智能优化搜索,并利用社会化多种群协作思想及种群高层的高效决策作用,提出了多种群分层协作遗传算法,并应用本文算法来进行优化设计 MIMO 雷达正交多相编码信号。

1 正交多相码优化设计问题

假设正交多相码集有 L 个信号,每个信号包含 N 个子脉冲,那么信号集可以表示为:

$$\{S_l(t) = a(t)e^{j\phi_l(n)}, n = 1, 2, \dots, N\} \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (1)$$

式中:

$$a(t) = \begin{cases} 1/\sqrt{TN}, & 0 < t < NT \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (2)$$

* 收稿日期:2009-06-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60601016)

作者简介:曾祥能(1983-),男,湖南新宁人,博士生,主要从事 MIMO 雷达信号处理、波束控制及其最优化设计研究;

E-mail:zengxiangneng103@163.com

式中: T 为子脉冲宽度; $\phi_l(n)$ ($0 \leq \phi_l(n) < 2\pi$) 为信号 l 中子脉冲 n 的相位, 如果编码的可用相位数是 M , 那么子脉冲的相位只能从下面的相位集中选择:

$$\phi_l(n) \in \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_M\} = \left\{0, \frac{2\pi}{M}, \dots, (M-1)\frac{2\pi}{M}\right\} \quad (3)$$

所以, 对于一个码长为 N , 信号个数为 L 的多相码集 S , 能用 $L \times N$ 的相位矩阵来表示:

$$S(L, N, M) = \begin{bmatrix} \phi_1(1) & \cdots & \phi_1(N) \\ \cdots & & \cdots \\ \phi_L(1) & \cdots & \phi_L(N) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中第 l ($1 \leq l \leq L$) 行相位序列为信号 l 的相位序列, 矩阵的所有元素只能从式(3)中选择。

根据 MIMO 雷达信号彼此正交的特性, 其自相关和互相关属性可以表示为:

$$A(\phi_l, k) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-k} \exp\{j[\phi_l(n) - \phi_l(n+k)]\} = 0, 0 \leq k < N \\ \frac{1}{N} \sum_{n=-k+1}^N \exp\{j[\phi_l(n) - \phi_l(n+k)]\} = 0, -N < k < 0 \end{cases}, l = 1, 2, \dots, L \quad (5)$$

$$C(\phi_p, \phi_q, k) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-k} \exp\{j[\phi_l(n) - \phi_l(n+k)]\} = 0, 0 \leq k < N \\ \frac{1}{N} \sum_{n=-k+1}^N \exp\{j[\phi_l(n) - \phi_l(n+k)]\} = 0, -N < k < 0 \end{cases}, \begin{cases} p \neq q \\ p, q = 1, 2, \dots, L \end{cases} \quad (6)$$

式中 $A(\phi_l, k)$ 及 $C(\phi_p, \phi_q, k)$ 分别为多相码序列 S_l 的非周期自相关和 S_p 与 S_q 的互相关, k 为时间指数, 所以设计正交多相码集就等效于构建一个满足限制条件(即式(5)和(6))的多相码矩阵(式(4))。

事实上, 对于式(5)所示的自相关函数计算公式, 取 $k > 0$, 有:

$$\begin{aligned} A(\phi_l, -k) &= \frac{1}{N} \sum_{n=-k+1}^N \exp\{j[\phi_l(n) - \phi_l(n+k)]\} = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{N-k} \exp\{j[\phi_l(m+k) - \phi_l(m)]\} = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1-k} \exp\{j[\phi_l(n+1-k) - \phi_l(n)]\}, (l = 1, 2, \dots, L) \end{aligned} \quad (7)$$

则对于任意 $-N < k < N$, 有:

$$A(\phi_l, k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1-k} \exp\{j \operatorname{sign}(k)[\phi_l(n) - \phi_l(n+1-k)]\}, (l = 1, 2, \dots, L) \quad (8)$$

式中 $\operatorname{sign}(k)$ 表示 k 的符号。

对于 MIMO 雷达正交多相码设计问题, 可采用的优化准则为最小化自相关峰值旁瓣和互相关峰及最小化总的自相关旁瓣能量和互相关能量^[6], 代价函数如下:

$$\begin{aligned} E &= w_1 \sum_{l=1}^L \max_{k \neq 0} |A(\phi_l, k)| + w_2 \sum_{p=1}^{L-1} \sum_{q=p+1}^L \max_k |C(\phi_p, \phi_q, k)| + \\ &+ w_3 \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{N-1} |A(\phi_l, k)|^2 + w_4 \sum_{p=1}^{L-1} \sum_{q=p+1}^L \sum_{k=-(N-1)}^{N-1} |C(\phi_p, \phi_q, k)|^2 \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\mathbf{W} = [w_1, w_2, w_3, w_4]$ 为代价函数的加权系数, 如果给定 N, M 和 L , 最小化式(9)就产生一组自动满足式(5)和式(6)的多相序列。

2 正交多相码的遗传算法优化

2.1 标准遗传算法(SGA)

遗传算法(Genetically Algorithm, GA)是模仿生物进化过程的“适者生存”原理而进行的一种多参数、多群体同时优化方法, 是解决搜索和优化问题的鲁棒方法。通常, GA 包括选择、交叉和变异等操作^[6-8]。在本文的优化中, 适应度函数为式(9), 估算出适应度函数各项的量级, 将其统一到同一数量级上, 根据优化要求

自行调整 $\mathbf{W} = [w_1, w_2, w_3, w_4]$, 搜索适应度函数最小值, 个体编码为长度为 N , 相位为 M , 则每个信号的编码由 $\{0, 1, \dots, M-1\}$ 中取值组成的数字串。优化算法的第2步是应用2进制序列中采用的叠代码搜索算法。如多相序列的相位值是 $\psi_m (1 \leq m \leq M)$, 即相位矩阵式(4)的某一行中的一个元素, 将其用另外 $M-1$ 个相位值分别替代, 评估每次替代后代价函数的变化, 保留最小代价函数值的相位值, 依此, 直到没有相位变化被接受。

2.2 多种群分层协作遗传算法

借鉴生物界种群间互助协作, 发挥不同生物种群具备自身优势的思想。首先随机的生成 N_H 个样本, 然后将它们分成 N_H 个种群, 每个种群拥有不同的算法结构, 使一部分加大交叉变异的概率而专注于新解的发掘, 而另一部分围绕历史最优解进化迭代而专注于精细搜索。在每个子种群迭代到一定代数后, 将 N_H 个种群的优化结果记录下来, 并得到每个子种群的历史最优解。由 N_H 个子种群历史最优解组成规模为 N_H 的高层种群, 让高层种群进行优化迭代若干步, 将每个高层种群的局部最优解作为全局最优解分别返回到每个子种群, 以推动整个种群向全局最优解进化。这就好像是生物界的各部门首脑进行磋商来决定整个社会的发展, 算法流程见图1。

多种群分层协作遗传算法既能较好的发挥了种群在社会分工合作上的优势, 既保持了解的多样性又模拟了不同成员在社会进化中体现的角色, 而高层种群策略体现了“英雄人物”在推动社会进化所起的加速作用, 在本算法中高层种群进化迭代就能提高算法的收敛效率。

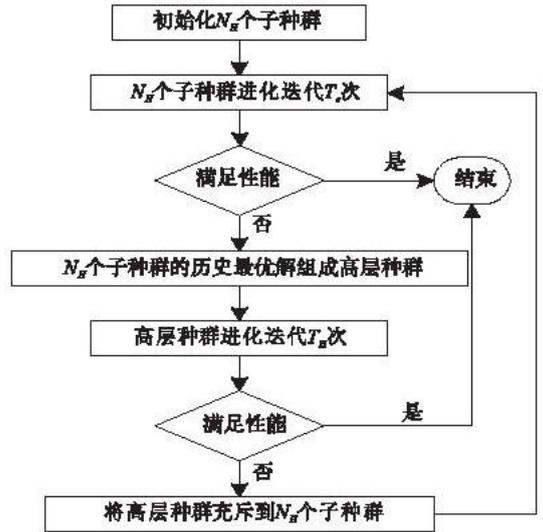


图1 多种群分层协作遗传算法流程

fig. 1 Multi-swarm delaminated cooperation GA flow

3 仿真分析

采用常用的2个标准函数^[9]测试算法性能, 并将与文献[10]的结果对比, 2个标准函数为:

$$f_1(x) = (1 - 2\sin^2(3\pi x) + \sin^{20}(20\pi x))^{20}, x \in (0, 1)$$

$$f_2(x, y) = 0.5 - \frac{\sin^2(x^2 + y^2)^{0.5} - 0.5}{1 + 0.001(x^2 + y^2)^2}, x, y \in [-10, 10]$$
(10)

在本文设计算法的参数设置上, 设置10个子种群, 每个子种群含20个个体, 其交叉概率、变异概率依次设为0.1-1, 对父代的选择采用随机遍历选择, 交叉产生新个体可采用洗牌交叉, 变异函数选为 $\text{mutbga}^{[11]}$, 优化结果与标准遗传算法(SGA)、文献[10]的最优家族遗传算法(OFGA)进行比较, 全局最优解不再更新即终止迭代, 仿真结果见表1。

表1 算法性能比较

Tab. 1 Algorithm performance compare

算法	f_1			f_2		
	迭代次数	t/s	最大值	迭代次数	t/s	最大值
SGA	90	404	0.129 145	120	992.7	0.963 556 5
OFGA	8	37	0.148 00	13	58.5	0.999 877 2
本文	54	31	0.150 11	60	44.8	0.999 985 7

分析比较几个算法性能, 本文算法在优化结果上比文献[10]中所提算法要更优, 且收敛效率有了明显提高, 能在更短时间内逼近全局最优解, 多种群协作充分发挥了不同“特长”种群的特点, 高层种群的“决策”性搜索则极大的提高了算法收敛效率。

算例: MIMO 雷达发射信号数 $L=5$, 信号长度 $N=200$, 相位数 $M=4$ 。

应用多种群分层协作遗传算法进行设计,算法其它参数设置同上, $T_c = 25$, $T_H = 5$,优化的 4 项的权值都取为 0.25,每一代结束后采用 $\text{fix}()$ 函数对操作的结果取整,保证搜索结果为相位的取值。收敛曲线见图 2,并作出获得正交多项编码信号的自相关函数、互相关函数、自模糊图和互模糊图,见图 3。

由图 2 所示的收敛曲线可看出,算法经历 120 代即收敛,根据本文算法获得的 5 个发射信号的自相关、互相关性能基本相同,由图 3 可以看出,获得的正交编码信号的自模糊图有尖锐的峰值,且其自相关旁瓣功率达 -25 dB,有利于获得高分辨力;而互模糊图分布均匀,峰值功率在 10 dB 内,则有利于 MIMO 雷达接收机的匹配滤波输出,对接收信号进行分离,实现发射、接收的全分集。

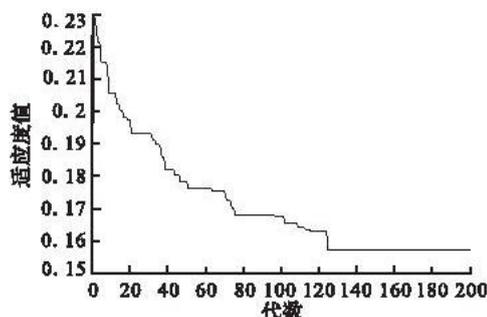


图 2 MIMO 雷达多相编码信号设计寻优过程
Fig. 2 MIMO radar polyphase signal design optimization process

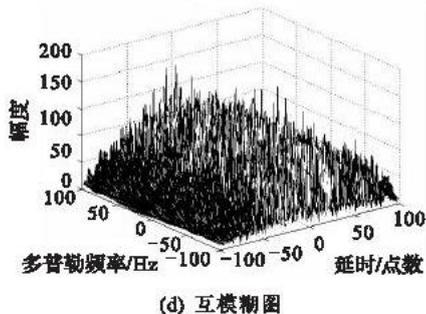
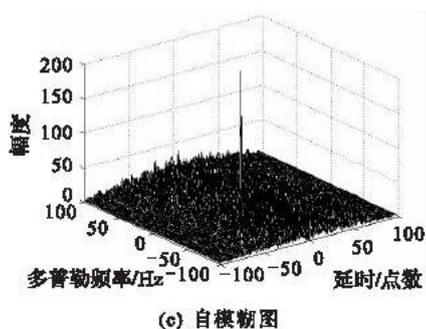
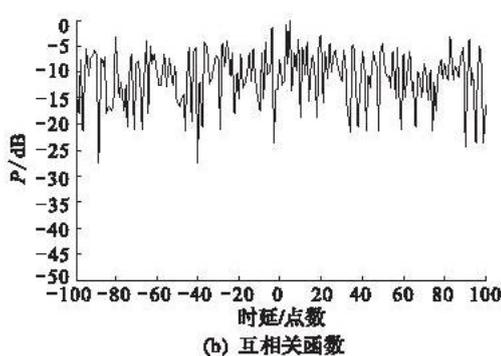
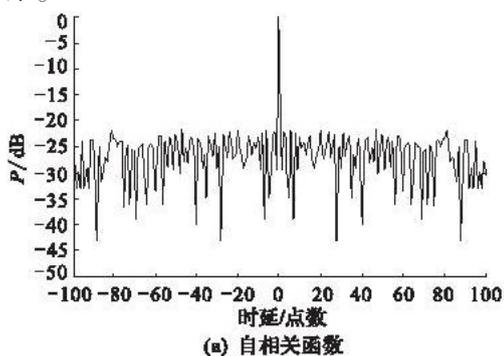


图 3 编码信号的相关情况与模糊图

Fig. 3 Coded signals correlations and ambiguity function properties

4 结束语

本文探讨了 MIMO 雷达正交多相编码信号设计,运用自相关旁瓣功率、互相关峰值功率建立了信号设计优化函数,提出了基于多种群分层协作遗传算法并将其应用于本文的信号设计中,效果良好。

参考文献:

- [1] Cook C E, Bern field M. Radar Signals: An Introduction to Theory and Application [M]. NY: Academic Press, 1967.
- [2] Khan H A, Edwards D J. Doppler Problems in Orthogonal MIMO Radars [C]//2006 IEEE Conference on Radar Verona. NY: IEEE Press, 2006: 24 - 27.
- [3] Deng H. Poly Phase Code Design for Orthogonal Netted Radar Systems [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2004, 52(11): 3126 - 3135.
- [4] Deng H. Discrete Frequency Coding Wave form Design for Netted Radar Systems [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2): 179 - 182.
- [5] 刘波. MIMO 雷达正交波形设计及信号处理研究[D]. 成都:电子科技大学, 2008.

- LIU Bo. Research on Generation of Orthogonal Waveform and Signal Processing for MIMO Radar [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [6] 陈客松. 稀布天线阵列的优化布阵技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
CHEN Kesong. Research on Optimization Technology of Thinned Array [D]. Chengdu: University of Electronic Science University, 2006. (in Chinese)
- [7] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 19–38.
WANG Xiaoping, CAO Liming. GA: Theory, Application and Software Realization [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Publication, 2002: 19–38. (in Chinese)
- [8] Holland G H. Genetic Algorithms [J]. SCI Amer, 1992, 267: 66–72.
- [9] 张铃, 张钊. 遗传算法机理的研究 [J]. 软件学报, 2000, 11(7): 945–952.
ZHANG Ling, ZHANG Bo. Research on GA Mechanism [J]. Software Journal, 2000, 11(7): 945–952. (in Chinese)
- [10] 李建华, 王孙安. 最优家族遗传算法 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(1): 77–80.
LI Jianhua, WANG Sunan. Optimize family GA [J]. Xi'an Jiaotong University Journal, 2004, 38(1): 77–80. (in Chinese)
- [11] 雷英杰, 张善文, 李续武. 遗传算法工具箱在优化设计中的使用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 95–102.
LEI Yingjie, ZHANG Shanwen, LI Xuwu. Application of GA Toolbox in Optimize Design [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002: 95–102. (in Chinese)

(编辑: 田新华)

Multi – swarm Delaminated Cooperation Genetic Algorithm based MIMO Radar Polyphase Code Design

ZENG Xiang – neng¹, ZHANG Yong – shun¹, CHEN Xiao – ping², WANG Bu – hong²

(1. Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 2. Telecommunication Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The polyphase code signals win popularity and attention for its big output main – side ratio and high security, the cost function of the MIMO radar polyphase code optimization is set up based on auto – correlation sidelobe peak, cross correlation peak, the total auto – correlation sidelobe energy and the total cross correlation energy. Then, based on the idea of the multi – swarm cooperation and the high level swarm's high effective decision, the normal particle is utilized to search in optimize space, and the high level particles lead the swarm convergence to the global best solution more quickly. As a result, a new algorithm called Multi – swarm delaminated cooperation Genetic Algorithm is proposed and applied to the MIMO radar polyphase code design, which enables the MIMO radar signals to own high resolutions in both distance and velocity measurements, the computational simulation results show that the proposed algorithm is effective and reliable.

Key words: MIMO radar; polyphase code; multi – swarm; delaminated cooperation genetic algorithm