

# 基于混合遗传鸡群优化算法的雷达正交波形设计

杨俊辉\*\*, 刘以安\*

江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122

**摘要** 针对复杂战场环境下同型号舰载雷达发射信号之间容易出现同频干扰的问题, 设计出具有正交特性的调频编码信号。对常规的正交波形编码的搜索方向进行改进, 利用混合遗传鸡群算法找出具有低自相关特性和低互相关特性的编码序列。该算法利用反向学习的鸡群算法进行搜索寻优, 引入学习因子和遗传算法中的变异和交叉思想对个体进行更新迭代。在适应度函数中引入集对分析联系度综合评价, 根据集对分析联系度来引导算法的搜索方向, 得到具有更好正交特性的调频编码序列脉冲信号。对得到的雷达信号的模糊函数、回波信号的匹配滤波情况以及不同雷达数量下仿真信号的正交性分别进行仿真, 仿真结果验证了所设计的调频编码信号能达到抗同频干扰的目的。

**关键词** 信号处理; 调频编码正交信号; 混合遗传鸡群算法; 集对分析综合评价

**中图分类号** TN958

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP55.080702

## Design of Radar Orthogonal Waveform Based on Hybrid Genetic Chicken Swarm Optimization Algorithm

Yang Junhui\*\*, Liu Yian\*

*College of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China*

**Abstract** Considering the problem that the same frequency interference is easy to occur between the radar signals transmitted by the shipborne radar with same type in the complex battlefield environment, we design a frequency modulation (FM) coded signal with orthogonal characteristics. The search direction of conventional waveform coding with the orthogonal characteristic is improved, and the hybrid genetic chicken swarm optimization (HGCSO) is used to identify the coding sequences with low autocorrelation and low cross correlation characteristics. We adopt the back-learning chicken swarm algorithm to search the optimal values, and introduce the learning factor and the idea of mutation and crossover in genetic algorithm to update the individuals. A comprehensive evaluation of set pair analysis is used in fitness function, and the search direction is guided according to the relational degree of setting pair analysis to get a FM coding sequence pulse signal with excellent orthogonality. The fuzzy function of the obtained radar signal, the matched filtering of the echo signal, and the orthogonality of the simulation signal at different radar numbers are simulated respectively, and the results of simulations show that the FM coded signal designed by this algorithm can effectively resist the same frequency interference.

**Key words** signal processing; orthogonal frequency modulation coded signal; hybrid genetic chicken swarm optimization; comprehensive evaluation of set pair analysis

**OCIS codes** 280.5600; 070.1060; 070.5010

## 1 引言

现代战争是集海陆空为一体的电子战, 随着海面舰艇编队规模的日益扩大, 编队内部各舰艇间同型号雷达的数量不断增多, 使得同频干扰现象频繁

发生<sup>[1]</sup>。同频干扰会造成大片虚警, 影响导弹等小目标的探测, 并会破坏雷达对目标的连续跟踪能力<sup>[2]</sup>。在海面战场中, 雷达不仅需要对抗敌方的勘察和干扰, 还要在复杂的战场环境中保持良好的工作性。舰艇编队和雷达组网时会不可避免地面临同

收稿日期: 2018-01-31; 修回日期: 2018-03-16; 录用日期: 2018-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(21706096)、江苏省博士后科研项目(1601009A)

\* E-mail: lya\_wx@jiangnan.edu.cn; \*\* E-mail: yeshenxiaoyu@163.com

频干扰的问题,近距离舰船之间的同频干扰能够遮盖回波信号,严重影响雷达的性能<sup>[3]</sup>。各舰载雷达分别发射相互正交的信号可以大大提高目标回波信号的识别率,从而可以解决同型号雷达之间的同频干扰问题。

理想的正交信号是不存在的,通过对雷达发射信号进行优化设计可以得到具有较低自相关函数旁瓣峰值(ASP)和较低互相关峰值(CP)的雷达信号,以达到多部雷达之间发射出相互正交信号的目的,这是一个目标求解问题。智能算法适用于目标的求解和优化,且已在生产、生活和科研学习中取得了不错的成效。针对雷达正交信号设计的问题,众多学者提出了很多运用智能算法来解决该问题的方案<sup>[7-12]</sup>。文献[8]将模拟退火算法应用到正交波形设计中,该算法具有较强的局部搜索能力,但当搜索空间太大时,不易搜索到全局最优值。文献[9]提出了一种基于混沌序列的随机离散频率编码信号,其在任意编码长度的正交信号库设计上具有更大的优势和潜力,但是其性能却逊于其他算法。文献[11]使用改进的离散粒子群算法验证了正交离散频率编码信号的性能只与其码长和编码顺序有关。以上算法针对离散频率编码信号进行了详细的研究。

本文针对调频编码序列进行优化,以找出正交性良好的调频编码信号。在扩展性良好的鸡群优化(CSO)算法的基础上将遗传(GA)算法中的交叉、变异思想引入CSO的个体迭代更新中,增加反向学习机制,以增加算法的全局搜索能力,防止算法陷入局部最优;引入学习因子以提高算法的收敛速度;考虑到引导算法搜索的主要依据是波形指标以及各个指标权重共同作用的结果,引入集对分析思想计算出

个体指标适应度值与最优适应度值的联系度,并以此联系度综合评价引导算法的最优搜索方向。由此得到混合遗传CSO(HGCSO)算法,并仿真验证了该算法的有效性。

## 2 调频编码信号设计方案

### 2.1 时域表达式

调频编码脉冲信号是在频率步进信号和频率编码信号基础上演变而来的<sup>[13]</sup>。假设一个作战区域内的 $L$ 部雷达均采用的是调频编码脉冲信号,其信号的时域表达式为

$$u_l(t) =$$

$$\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} u_1(t - iT_r^l) \exp(j2\pi b_i^l \Delta f_l t) \exp(j2\pi f_0 t), \quad (1)$$

$$u_1(t) = \frac{1}{\sqrt{T_l}} \text{rect}\left(\frac{t}{T_l}\right) \exp(j\pi k_l t^2), \quad (2)$$

式中: $t$ 为时延; $N$ 为子脉冲个数; $u_1(t)$ 为啁啾子脉冲; $\Delta f_l$ 为第 $l$ 部雷达的啁啾子脉冲带宽( $\Delta f_l > 1/T_l$ ); $k_l = \Delta f_l / T_l$ 为调频斜率; $T_l$ 为雷达 $l$ 的子脉冲宽度; $T_r^l$ 为雷达 $l$ 的脉冲重复周期(PRI); $f_0$ 为载频; $f_0 + b_i \Delta f$ 为第 $i$ 个线性调频子脉冲的载频; $b_i^l$ 为雷达 $l$ 的频率编码序列,且 $b_i^l \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$ ,每个序列内的数字均不相同,所以 $b_i^l$ 一共有 $N!$ 种取法。

### 2.2 模糊函数

根据调频编码脉冲信号的模糊函数可得到新的模糊函数为

$$x(\tau, f_d) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} \exp[j \times 2\pi n T_r (b_n - b_m) \Delta f] \exp(j \times 2\pi f_{dn} T_r) \times \frac{\exp\{j \times \pi t [\Delta f (b_n - b_m) f_d]\}}{\pi [kt + \Delta f (b_n - b_m) + f_d] T} \sin\{\pi [kt + \Delta f (b_n - b_m) + f_d] (T - |t|)\}, \quad (3)$$

式中: $\tau$ 为信号时宽; $f_d$ 为信号带宽; $|\tau - (n-m)T_r| < T$ 。中心主瓣( $n=m, b_n=b_m$ )的模糊函数 $\chi(\tau, f_d)$ 为

$$\chi(\tau, f_d) = \frac{1}{N} \times \frac{T - |\tau|}{T} \sum_{n=0}^{N-1} \exp[j \times 2\pi (f_{dn} T_r + b_n \Delta f \tau)] \times \frac{\sin[\pi (f_d + k\tau)(T - |\tau|)]}{\pi (f_d + k\tau)(T - |\tau|)}, \quad (4)$$

其中 $|\tau| < T$ 。对(4)式取模可得:

$$|\chi(\tau, f_d)| = \begin{cases} \frac{1}{N} \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right) \left| \frac{\sin[\pi (f_d + k\tau)(T - |\tau|)]}{\pi (f_d + k\tau)(T - |\tau|)} \right| \left| \sum_{n=0}^{N-1} \exp[j \times 2\pi (f_{dn} T_r + b_n \Delta f \tau)] \right|, & |\tau| < T \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

### 2.3 适应度函数

根据 1.1 节的分析,第  $l$  部雷达的第  $i$  个调频编码序列可表示为

$$\mathbf{b}_i^l = \begin{bmatrix} b_1^1 & b_2^1 & b_3^1 & \cdots & b_i^1 \\ b_1^2 & b_2^2 & b_3^2 & \cdots & b_i^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_1^l & b_2^l & b_3^l & \cdots & b_i^l \end{bmatrix}. \quad (6)$$

编码信号  $u_l(t)$  的自相关函数可表示为

$$A(u_l, \tau) = \frac{1}{N} \int_{-\infty}^{+\infty} u_l(t) u_l(t - \tau) dt. \quad (7)$$

当  $\tau = 0$  时,  $A(u_l, \tau) = 1$ ; 当  $\tau \neq 0$  时,  $A(u_l, \tau) \approx 0$ .

编码信号  $u_p(t)$  和  $u_q(t)$  的互相关函数可表示为

$$C(u_p, u_q, \tau) = \frac{1}{N} \int_{-\infty}^{+\infty} u_p(t) u_q(t - \tau) dt \approx 0, \quad p \neq q, \quad (8)$$

式中:  $l, p, q = 1, 2, \dots, L$ .

为了设计出具有更好正交特性的雷达信号,需要对(1)式的  $b_i^l$  进行寻优,而  $b_i^l$  的寻优过程就是找出满足(7)式和(8)式的调频编码序列。采用基于集对分析联系度的 HGCSO 算法对调频编码序列进行搜索,使所设计的  $L$  部雷达信号的 ASP 和 CP 取得尽可能小的数值。同时考虑到峰值过高,还需要对自相关旁瓣能量(ASE)和互相关能量(CE)进行优化,使其最低,以获得期望的相关属性。算法的适用度函数可以表示为

$$\begin{aligned} E = & \lambda_1 \sum_{l=1}^L \max_{\tau \neq 0} |A(s_l, \tau)| + \\ & \lambda_2 \sum_{p=1}^{L-1} \sum_{q=p+1}^L \max |C(s_p, s_q, \tau)| + \\ & \lambda_3 \sum_{l=1}^L \int_{\tau} |A(s_l, \tau)|^2 d\tau + \\ & \lambda_4 \sum_{p=1}^{L-1} \sum_{q=p+1}^L \int_{\tau} |C(s_p, s_q, \tau)|^2 d\tau, \quad (9) \end{aligned}$$

式中:  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  分别为 ASP、CP、ASE、CE 的加权系数。

## 3 基于集对分析的 HGCSO 算法

CSO 算法是由 Meng 等<sup>[14]</sup>于 2014 年提出的一种全新的群智能算法。与粒子群优化(PSO)算法和蝙蝠算法(BA)算法相比,该算法具有收敛速度快和收敛精度高等优点。CSO 算法模拟鸡群中的角色

等级制度和觅食行为,利用适应度值将整个群体分为公鸡、母鸡和小鸡 3 种角色。每一个角色的个体都会在自己角色的群体中进行不断搜索成长。GA 算法是模仿自然界生物进化的方式,通过个体的遗传、变异方式进行择优求解的算法,具有较强的全局搜索能力。本研究所提 HGCSO 算法则是将 CSO 和 GA 算法相结合的一种算法。

### 3.1 HGCSO 算法

在鸡群个体初始值的选取上引入一种反向学习机制来优化初始值的选取。反向学习策略是近年来计算智能领域出现的新策略<sup>[15]</sup>,其主要思想是对一个寻优过程中的可行解进行反向求解操作,并对原可行解和反向解进行评估,挑选出较优的个体。反向求解的定义如下:

设  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_r)$  是  $r$  维空间中的一个点,且  $x_1, x_2, \dots, x_r \in \mathbf{R}, x_j \in [a_j, b_j]$ , 则  $\mathbf{x}$  对应的反向点  $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_r^*)$  定义为:

$$x_i = a_i + b_i - x_j. \quad (10)$$

在个体的更新学习中,将 CSO 算法的更新迭代操作更换为 GA 中的交叉和变异操作,则鸡群个体寻优过程中相应的觅食行为分为他向学习觅食行为和自我学习觅食行为两种,前者使用的是 GA 算法中的有序交叉法,后者使用的是 GA 算法中的基因位交换法。

考虑到 CSO 和 GA 算法的全局搜索性较好,在 HGCSO 算法中引入学习因子  $W$ 。 $W$  可以引导适应度值较次的个体向适应度值较好的个体学习觅食。对小鸡来说,前期向母鸡学习,增加全局搜索能力;后期向适应度更好的公鸡学习,加快算法的寻优收敛速度。 $W$  随迭代次数的变化而变化。 $W$  的计算公式为<sup>[16]</sup>

$$W = W_{\text{end}} (W_{\text{start}} / W_{\text{end}})^{1/(1+ct/c_{\text{max}})}, \quad (11)$$

式中:  $W_{\text{start}}$  取 0.9;  $W_{\text{end}}$  取 0.4;  $c$  取 10, 表示当前迭代次数;  $c_{\text{max}}$  表示迭代的总次数。

### 3.2 基于集对分析联系度的综合评价

考虑到引导算法搜索的适应度函数是信号多项指标和指标权重综合作用的结果,故引入基于集对分析的联系度综合进行评价。使用集对分析思想计算出当前个体适应度与当代最优个体适应度的联系度,按照集对分析联系度对个体进行优劣排序,以便于  $G$  代之后确定新的寻优方向。

集对分析是我国学者赵克勤<sup>[17]</sup>于 1989 年提出的集对分析理论(SPA),是一种关于系统同异反(IDO)关系的定量分析法。使用联系系数来定量描述

事物之间的 IDO 关系,在包括计算机在内的众多学科领域得到了广泛应用<sup>[18-20]</sup>。本研究以倒数值对立关系为出发点来研究个体适应度值和最佳适应度值之间的 IDO 关系。

假设适应度函数的取值范围为 $[0, +\infty)$ ,则对应的求解过程如下:

$$s \text{ 在 } \chi \text{ 的一阶对立区间 } [1/\chi, \chi] \text{ 内所占的比例为}$$

$$p = \frac{s}{\chi - 1/\chi} = \frac{s\chi}{\chi^2 - 1}, \quad (12)$$

最后得到  $[s, \chi]$  的 IDO 联系度  $U$  为

$$U = a + bd + co = \frac{s}{\chi} + \frac{s}{\chi(\chi^2 - 1)}d + \frac{\chi^2 - s\chi - 1}{\chi^2 - 1}o = (s, \chi), \quad (13)$$

式中:  $s \in [0, +\infty)$ ,  $\chi \in [0, +\infty)$ , 并且  $1 \leq s \leq \chi$ ;  $d$  和  $o$  分别为差异度标记和对立度标记,  $d \in [1/R, \chi]$ ,  $o = 1/R$ ,  $R$  为所讨论的所有数对中最小的数。

构建集对分析联系度的步骤如下:

1) 构建初始适应度矩阵。设  $P$  为个体集合,  $Q$  为个体属性,  $\lambda$  为属性加权值, 则  $P = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ ,  $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_M\}$ ,  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M\}$ , 其中  $\lambda_i \geq 0$  且  $\sum_{i=1}^M \lambda_i = 1$ 。适应度函数一共涉及到 4 个属性值, 分别是 ASP、CP、ASE、CE, 所以  $M=4$ 。则初始属性矩阵  $A_0$  为

$$A_0 = (A_{i,j})_{N \times 4} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{N1} & A_{N2} & A_{N3} & A_{N4} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

2) 最优参考指标的确定。最优参考指标选取当前所有个体各个属性中的最小值, 即:

$$P_g = \{p_{g1}, p_{g2}, p_{g3}, p_{g4}\}, \quad (15)$$

$$p_{gi} = \min(A_{11}, A_{21}, \dots, A_{N1}). \quad (16)$$

同理, 最差参考指标选取当前所有个体各个属性中的最大值:

$$P_b = \{p_{b1}, p_{b2}, p_{b3}, p_{b4}\}, \quad (17)$$

$$p_{bi} = \max(A_{11}, A_{21}, \dots, A_{N1}). \quad (18)$$

3) 计算关联度。个体  $\alpha$  的  $\beta$  属性的 IDO 联系度为  $U_{g\alpha} = (A_{\alpha\beta}, P_{g\beta})$ , 将其写成矩阵形式为

$$U_{g\alpha} = [u_{g\alpha}(k)]_{\alpha \times 4}$$

$$\begin{bmatrix} u_{g1}(1) & u_{g1}(2) & u_{g1}(3) & u_{g1}(4) \\ u_{g2}(1) & u_{g2}(2) & u_{g2}(3) & u_{g2}(4) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{g\alpha}(1) & u_{g\alpha}(2) & u_{g\alpha}(3) & u_{g\alpha}(4) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

由此可以得到的最优关联度为

$$\xi_{gi} = \sum_{k=1}^4 \lambda_k u_{gi}(k). \quad (20)$$

同理可以得到最差关联度  $\xi_{bi}$ 。

4) 集对分析关联度评价。假设第  $i$  个个体对应的调频序列相对于最优参考指标序列的从属度为  $V_i$ , 则称  $V_i$  为个体  $i$  的优偏离度,  $1-V_i$  为个体  $i$  的劣偏离度。根据最小平方和准则, 目标函数可以写为

$$\min\{F(V) = (V_i \xi_{gi})^2 + [(1-V_i) \xi_{bi}]^2\}, \quad (21)$$

求解可以得到  $V_i$  的最优值为  $V_i = \frac{1}{1 + (\xi_{bi}/\xi_{gi})^2}$ , 最后对  $V_i$  进行排序, 从而得到个体的优劣次序。

### 3.3 应用 HGCSO 算法求解调频序列过程

根据算法描述, 具体的步骤如下:

1) 初始化算法参数  $M$ 、 $\alpha_{pop}$ 、 $G$ 、 $r_{percent}$ 、 $h_{percent}$ 、 $m_{percent}$ 、 $\eta$ 、 $L$ 、 $p_m$ 、 $p_c$ 、 $\lambda$ 。其中:  $M$  为迭代次数;  $\alpha_{pop}$  为群体大小;  $G$  为 HGCSO 算法中个体等级身份更新需要经过的迭代次数;  $r_{percent}$ 、 $h_{percent}$ 、 $m_{percent}$  分别为公鸡、母鸡、小鸡在群体中所占的比例;  $\eta$  为调频编码的位数;  $L$  为雷达的数量;  $p_m$  为自我学习概率;  $p_c$  为他向学习概率;  $\lambda$  为各个属性的初始权重。

2) 将随机产生  $b_i^t$  的  $N!$  种取法中的任意  $\alpha_{pop}$  个调频编码序列作为初始解群, 其中任意一个序列都属于  $\{0, 1, 2, \dots, N-1\}$  的扰动。按照公鸡、母鸡、小鸡在群体中所占的比例计算出初始解中各个等级的个体数量。按照集对分析联系度评价得到个体的优偏离度。

3) 利用反向学习法得到初始解的反向解, 并计算出反向解个体的优偏离度。将初始解的优偏离度和反向解的优偏离度合并排序, 择优选取种群规模为  $\alpha_{pop}$  的新种群, 同时得到较优的解空间。

4) 在选择的新解群中, 如果公鸡当代个体的适应度比上一代好, 则有较大的概率进行自我学习操作, 否则向母鸡进行他向学习操作。针对母鸡, 根据当前学习因子  $W$  判定母鸡是进行自我学习还是向公鸡进行他向学习操作。针对小鸡, 根据当前学习因子判定小鸡是向公鸡还是向母鸡进行他向学习操作。最后根据集对分析联系度评价进行个体的优劣排序。

5) 每经过  $G$  代之后, 根据解群个体的优劣重新编订解群个体的等级身份, 然后按照步骤 4) 进行迭代。

6) 满足收敛条件后, 停止寻优。

HGCSO 算法的流程如图 1 所示。

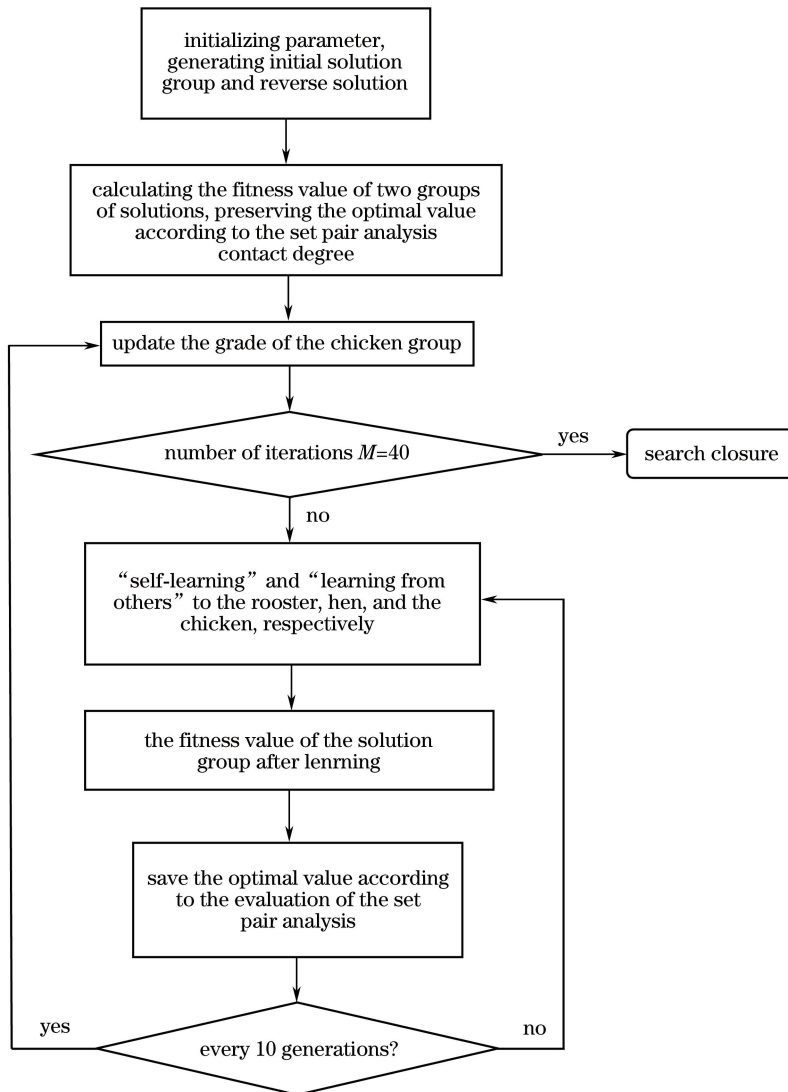


图 1 HGCSO 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of HGCSO algorithm

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真 1 的结果分析

以雷达发射调频编码信号为例,假设复杂战场的同一作战区域下有  $L=3$  部雷达,子脉冲个数  $N=32$ 。设置初始群体规模  $\alpha_{\text{pop}}=200$ ,迭代次数  $M=40$ ,初始属性加权值  $\lambda=\{1,1,1,1\}$ ,等级更新代数  $G=10$ ,  $p_c=0.7$ ,  $p_m=0.1$ ,适应度函数选取(9)式。用上述的 HGCSO 算法对调频编码序列进行寻优。

表 1 所示为寻优得到的 3 组调频编码序列。表 2 所示为调频编码序列对应的调频编码信号的 ASP 和 CP。表 3 所示为所提算法得到的 ASP 和 CP 与其他文献结果的比较。图 2 所示为调频编码序列对应的调频编码信号的归一化自相关函数曲

线。图 3 所示为调频编码序列对应的调频编码信号的归一化互相关函数曲线。

表 1 子脉冲个数为 32 时设计得到的 3 组调频编码序列  
Table 1 Three groups of FM coding sequences when the number of sub-pulses is 32

Signal	FM coding sequence
Sequence 1	9,29,4,0,30,16,20,23,2,18,12,6,1,
	28,25,31,15,21,11,10,14,17,
	5,26,19,22,24,8,7,27,3,13
Sequence 2	30,2,19,28,9,3,17,5,10,23,18,7,12,
	0,8,13,27,24,6,26,22,16,25,21,
	15,29,14,11,31,20,4,1
Sequence 3	9,4,23,29,8,2,31,10,11,21,19,24,
	27,25,18,14,30,13,6,26,1,12,
	15,20,3,0,16,5,7,22,17,28

表2 调频信号的 ASP 和 CP

Table 2 ASP and CP of FM signals

Sequence number of signals	Signal 1	Signal 2	Signal 3
Signal 1	0.0505	0.0747	0.0797
Signal 2	0.0747	0.0544	0.0746
Signal 3	0.0797	0.0746	0.0585

表3 本研究所提算法与其他文献算法结果的比较

Table 3 Comparison between proposed method and other methods from references

Method	Average of ASP	Average of CP
Method of Ref.[8]	0.0820	0.0781
Method of Ref.[10]	0.0833	0.1099
Proposed method	0.0545	0.0763

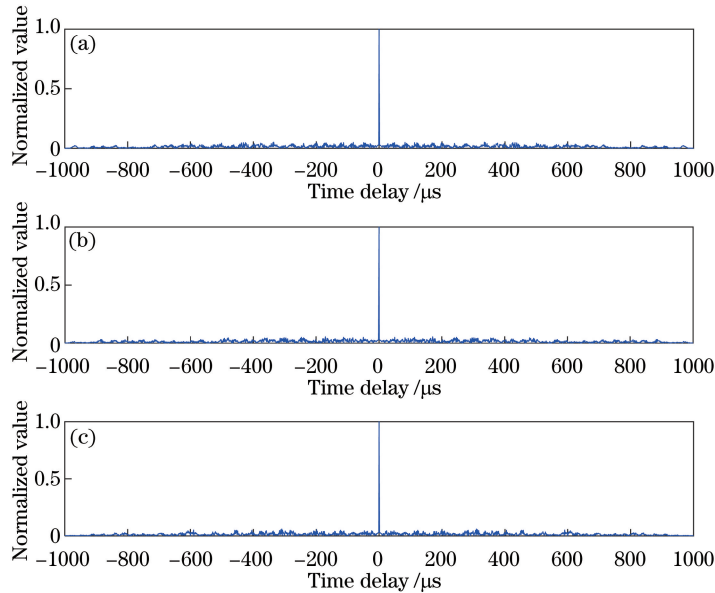


图2 3个调频序列对应信号的归一化自相关函数。(a)序列1;(b)序列2;(c)序列3

Fig. 2 Normalized autocorrelation functions of signals. (a) Sequence 1; (b) sequence 2; (c) sequence 3

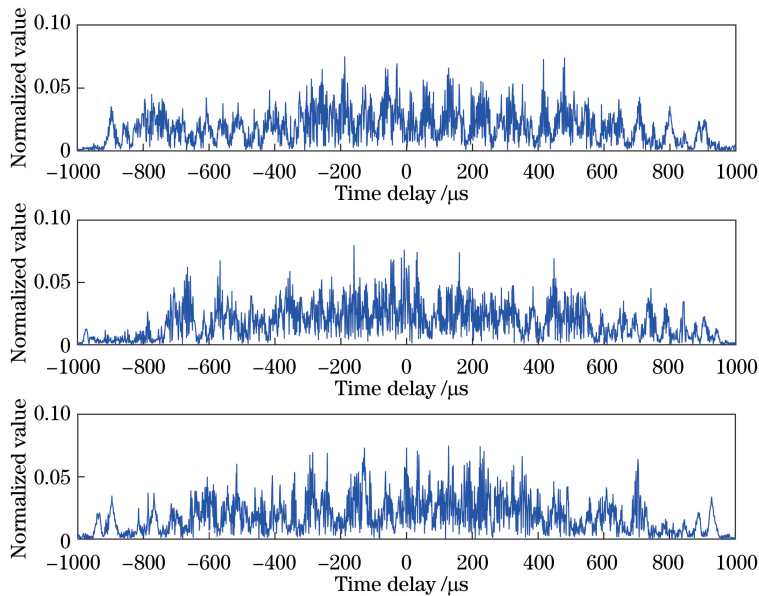


图3 三个调频序列对应信号之间的归一化自相关函数。(a)信号1和信号2;(b)信号1和信号3;(c)信号2和信号3

Fig. 3 Normalized autocorrelation functions of signals. (a) Signal 1 and signal 2; (b) signal 1 and signal 3; (c) signal 2 and signal 3

从表3可以看出,本研究设计的调频编码序列对应正交信号的平均 ASP 为 0.0545(-25.27 dB),平均 CP 为 0.0763(-22.35 dB)。与文献[8]和文献

[10]相比,本研究所提算法的结果均有所改善。由图2可知,3组信号的自相关函数曲线接近于狄拉克函数 $\delta(\cdot)$ ,信号之间的互相关函数值接近于0,表

现出良好的正交特性。

图 4 给出了信号 1 的模糊函数图,此模糊函数图呈图钉状,具有较好的速度分辨率和距离分辨率。图 5 给出了信号 2 作为同频干扰信号时信号 1 的匹配滤波,以及和信号 2、3 同时作为同频干扰信号时信号 1 的匹配滤波。可以看出,当面临同频干扰时,信号 1 仍然具有很好的匹配滤波效果,这说明用所设计的调频编码序列生成的正交信号作为探测信号,可产生较好的抗同频干扰特性。

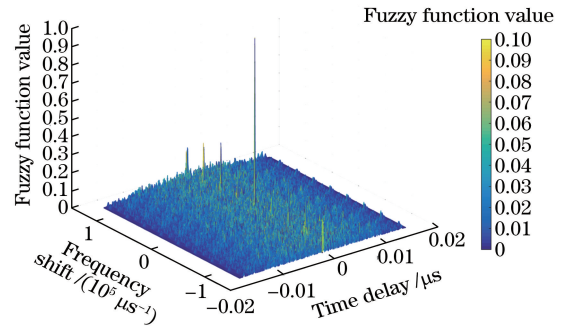


图 4 信号 1 的模糊函数图

Fig. 4 Fuzzy function diagram of signal 1

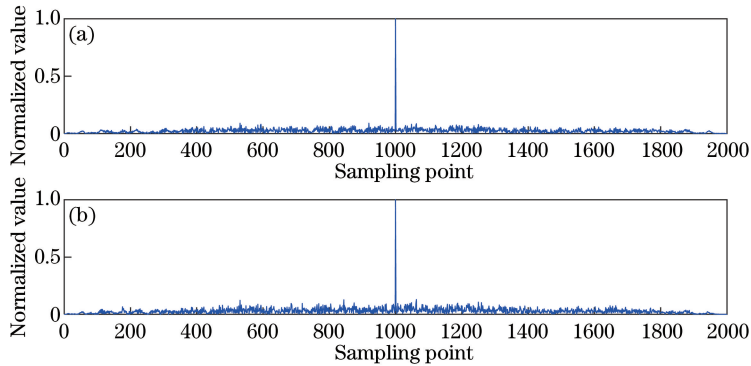


图 5 不同条件下信号 1 的匹配滤波。(a)信号 2 作为同频干扰信号;(b)信号 2、3 作为同频干扰信号

Fig. 5 Matched filtering of signal 1 at different conditions. (a) Signal 2 as a same frequency interference signal; (b) signal 2 and signal 3 as a same frequency interference signal

## 4.2 仿真 2 的结果分析

仿真 1 中反映的是  $L=3$  时的情况,但在实际战场中,舰艇编队通常由 2 艘以上舰艇或者作战小组组成,所载雷达能够达到十几部甚至更多。为了更加贴切地反映实际战备情况,分别对  $L=3$ 、 $L=5$ 、 $L=7$ 、 $L=10$ 、 $L=15$  和  $L=20$  时进行 20 次独立仿真。根据得到的每一条信号序列都可以计算出该序列对应的雷达信号的平均 ASP 和平均 CP,最后对这 6 种情况下 20 组 ASP 和 CP 求平均值。仿真结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,随着  $L$  不断增大,ASP 略有增加,但变化保持在一定范围内,CP

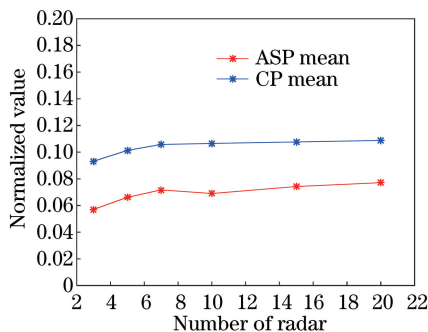


图 6 多部雷达信号的正交性仿真

Fig. 6 Orthogonality simulation of multiple radar signals

值随着  $L$  的增大也有所增大。考虑到信号互相关个数  $H$  随着雷达数量的变化存在如下关系:  $H = \sum_{i=1}^{L-1} (i-1)$ 。当  $L=20$  时,  $H=190$ , 对应算法的维度  $D=640$ , CP 寻优的计算要求明显高于 ASP。本文算法在  $D=640$  时依然保持良好的寻优性能。

## 5 结 论

分析了调频编码信号的时域表达式和模糊函数,并采用 HGCSO 优化调频编码序列,以获取具有更低自相关和互相关特性的正交信号,从而达到抗同频干扰的目的。引入反向学习策略和学习因子增强算法的全局搜索和局部搜索能力,与模拟退火算法和遗传算法相比,所提算法具有收敛速度可控、寻优结果更优等优点。引入集对分析联系度评价,提高了算法的效率。信号滤波仿真结果表明,所设计出的编码信号具有良好的抗同频干扰特性。当雷达数量逐渐增加时,信号间互相关个数和需要处理的数据维度均呈快速增长的态势,导致算法的计算量激增,这对实验用时和实验结果的精度都有不同程度的影响。如何在降低计算量的情况下保持较高的精度将是下一步研究的重点。

## 参 考 文 献

- [1] Huan H, Tao R, Li Y S, *et al.* Co-channel interference suppression for homo-type radars based on joint transform domain and time domain [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(12): 2978-2984.  
 邹浩, 陶然, 李元硕, 等. 基于变换域和时域联合处理的雷达同频干扰抑制方法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(12): 2978-2984.
- [2] Zhao G Q. The principle of radar countermeasure [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1999.  
 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [3] Xue C X. Research on shipboard radar anti-same-frequency interference method in formation [D]. Nanjing: Southeast University, 2007.  
 薛春祥. 编队情况下舰载雷达抗同频干扰方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.
- [4] Gao H, Xue L Y. Back propagation neural network based on improved genetic algorithm fitting LED spectral model [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 072302.  
 高航, 薛凌云. 基于改进遗传算法的反向传播神经网络拟合 LED 光谱模型[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 072302.
- [5] Liu J F, Wang S Y, Zeng X Y, *et al.* PAPR reduction in optical OFDM systems based on swarm intelligence algorithms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0106006.  
 刘剑飞, 王少影, 曾祥焯, 等. 基于群智能算法的光 OFDM 系统 PAPR 抑制[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0106006.
- [6] Duan L L, Liu D, Zhang Y P, *et al.* Lidar data gluing technology based on hybrid intelligent algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0601002.  
 段绿林, 刘东, 张与鹏, 等. 基于混合智能算法的激光雷达数据拼接技术[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0601002.
- [7] Singh S P, Rao K S. Discrete frequency coded radar signal design [J]. *IET Signal Processing*, 2009, 3(1): 7-16.
- [8] Deng H. Discrete frequency-coding waveform design for netted radar systems[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2004, 11(2): 179-182.
- [9] Yang J, Qiu Z K, Li X, *et al.* Random discrete frequency coding signal based on chaotic series [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(11): 2702-2708.  
 杨进, 邱兆坤, 黎湘, 等. 一种基于混沌序列的随机离散频率编码信号[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(11): 2702-2708.
- [10] Wang D Y, Yuan J Q, Ma X Y. Design of discrete frequency-coding waveforms for MIMO radar via genetic algorithm [J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2007, 21(2): 105-107.  
 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.
- [11] Li J J, Jiang Y H, Dan B. Orthogonal discrete frequency coding waveforms design in MIMO radar [J]. *Journal of Signal Processing*, 2013, 29(9): 1176-1181.  
 李敬军, 姜永华, 但波. MIMO 雷达中正交离散频率编码波形的设计[J]. *信号处理*, 2013, 29(9): 1176-1181.
- [12] Liu B, He Z S, He Q. Optimization of orthogonal discrete frequency-coding waveform based on modified genetic algorithm for MIMO radar [C]. *International Conference on Communications, Circuits and Systems*, 2007: 966-970.
- [13] Zhou M, Li H Z. Design and processing of radar frequency modulation coded pulse signal [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2007, 19(5): 68-72.  
 周沫, 李汉钊. 雷达调频编码脉冲信号的设计与处理[J]. *海军工程大学学报*, 2007, 19(5): 68-72.
- [14] Meng X, Liu Y, Gao X, *et al.* A new bio-inspired algorithm: chicken swarm optimization [M] // Tan Y, Shi Y, Coello C A C. *Advances in swarm intelligence*. Germany: Springer International Publishing, 2014: 86-94.
- [15] Wei W Y, Wen Y H. Firefly optimization algorithm utilizing elite opposition-based learning [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2017, 12(5): 710-716.  
 魏伟一, 文雅宏. 一种精英反向学习的萤火虫优化算法[J]. *智能系统学报*, 2017, 12(5): 710-716.
- [16] Chen G M, Jia J Y, Han Q X. Study on the strategy of decreasing inertia weight in particle swarm optimization algorithm [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(1): 53-56.  
 陈贵敏, 贾建援, 韩琪西. 粒子群优化算法的惯性权值递减策略研究[J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(1): 53-56.



- [17] Zhao K Q. Decision making algorithm based on set pair analysis for use when facing multiple uncertain attributes [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2010, 5(1): 41-50.  
赵克勤. 基于集对分析的不确定性多属性决策模型与算法[J]. 智能系统学报, 2010, 5(1): 41-50.
- [18] Wei M H, Zheng Z H, Huang Q, *et al.* Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater environment based on improved set pair analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(10): 1204-1209.  
魏明华, 郑志宏, 黄强, 等. 基于改进 SPA 法的地下水环境模糊综合评判[J]. 水利学报, 2009, 40(10): 1204-1209.
- [19] Wu M, Li Z Y, Liu Z Y, *et al.* Air environment quality assessment based on set pair analysis combined with genetic algorithm[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(2): 168-171.  
邬敏, 李祚泳, 刘智勇, 等. 基于遗传集对分析的空气环境质量评价[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(2): 168-171.
- [20] Kumar K, Garg H. Connection number of set pair analysis based TOPSIS method on intuitionistic fuzzy sets and their application to decision making [J]. Applied Intelligence, 2017(5): 1-8.