

引用格式: 谢雷振, 陈怡君, 康乐, 等. 遗传 - 和声搜索算法下的 MIMO 雷达正交多相码设计 [J]. 电光与控制, 2018, 25(8): 23-27. XIE L Z, CHEN Y J, KANG L, et al. Design of MIMO radar orthogonal polyphase code based on genetic-harmony search algorithm [J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(8): 23-27.

遗传 - 和声搜索算法下的 MIMO 雷达正交多相码设计

谢雷振¹, 陈怡君¹, 康乐¹, 张群¹, 梁贤姣²

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077; 2. 中国人民解放军 95100 部队, 广州 510405)

摘要: 针对现有多输入多输出(MIMO)雷达正交多相码的设计中存在的自相关旁瓣峰值和互相关峰值高、算法收敛速度慢的问题, 提出了一种基于遗传 - 和声搜索算法的 MIMO 雷达正交多相码设计方法。该算法将和声搜索算法和遗传算法相结合, 在遗传算法多次迭代获得一个较好的初始解的基础上, 再使用和声搜索算法进一步搜寻邻近区域可能的解。该算法既具有遗传算法全局寻优的特性, 又具备和声搜索算法的邻域寻优特性。所提方法能够加快发射信号自相关旁瓣峰值和互相关峰的收敛速度, 同时增大主瓣和旁瓣的比值。仿真实验的结果证明了所提混合算法的优良性能。

关键词: 多输入多输出雷达; 正交多相码; 遗传 - 和声搜索算法

中图分类号: TN911.7 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.08.005

Design of MIMO Radar Orthogonal Polyphase Code Based on Genetic-Harmony Search Algorithm

XIE Lei-zhen¹, CHEN Yi-jun¹, KANG Le¹, ZHANG Qun¹, LIANG Xian-jiao²

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. No. 95100 Unit of PLA, Guangzhou 510405, China)

Abstract: To solve the problems of high autocorrelation sidelobe peak, high cross-correlation peak, and low convergence rate of the algorithm in the orthogonal polyphase code design for Multiple Input Multiple Output (MIMO) radar, a method based on the Genetic Algorithm (GA) and the Harmony Search (HS) algorithm is proposed for the design of the orthogonal polyphase code of MIMO radar. Each time when the GA has been optimized to a certain extent after iterating several times, the HS algorithm is used to search possible solutions in its neighborhood. This hybrid algorithm possesses the global convergence ability of GA and the neighborhood search ability of the HS algorithm. By adding the HS algorithm, the convergence rates of the autocorrelation sidelobe peak and the cross-correlation peak are faster, and the mainlobe-to-sidelobe ratio is higher. Simulation results show that the proposed method is feasible and effective.

Key words: Multiple Input Multiple Output (MIMO) radar; orthogonal polyphase code; genetic-harmony search algorithm

0 引言

多输入多输出雷达是一种新兴的有源探测性雷达, 其在低慢目标检测、反隐身等方面具有极大优势^[1]。它继承了相控阵雷达优点的同时, 因为其波形的正交性而能够在整个空域中进行全方位探测, 所以研究 MIMO

雷达在理论上和实际中都有重要的价值^[2-3]。

发射波形的优劣是影响 MIMO 雷达目标识别等性能的关键因素。MIMO 雷达从产生至今, 正交波形设计都是其中一个重要的研究方向^[4-5]。主要通过构造合适的代价函数, 使用适合的优化算法来得到全局最优的信号波形^[1-10]。在构造代价函数方面, 文献[6]利用信息论的方法, 通过回波的互信息以及最小均方误差准则对波形进行优化; 文献[7]提出零相关区域的概念, 它关心该区域内的旁瓣, 忽略区域外的旁瓣, 使得邻近距离单元回波间的干扰得到有效的消除。在优化算法方面, 文献[8]提出利用模拟退火算法设计

收稿日期: 2017-07-21 修回日期: 2017-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(61631019)

作者简介: 谢雷振(1994—), 男, 河南周口人, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理。

正交多相码信号,得到了比较低的自相关旁瓣;文献[9]用遗传算法来设计正交多相编码和正交离散频率编码波形,降低了发射信号的自相关旁瓣峰(Autocorrelation Sidelobe Peak, ASP)和互相关峰(Cross-correlation Peak, CP);文献[10]用遗传禁忌混合算法进行优化,使得自相关旁瓣峰值和互相关峰值进一步降低。由于上述波形设计方法直接应用相应的启发式算法,没有考虑代价函数在全局最优解附近变化不大的特点,存在自相关旁瓣峰值和互相关峰值比较高^[9],并且收敛速度慢的问题^[10]。

本文提出了一种新的 MIMO 雷达正交多相码设计方法,它基于和声搜索算法和遗传算法,将和声搜索算法的邻域搜索思想加入到遗传算法之中,能够在提高收敛速度的条件下有效降低正交波形的自相关旁瓣峰值和互相关峰值。

1 MIMO 雷达正交多相码设计准则

假设这样一个雷达系统,它有 L 个发射信号,每个信号的长度为 N ,那么可以将发射信号表示为

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

式中: l 表示第 l 个信号; n 表示第 n 个相位^[9-10]。如果多相码有 M 个可选离散相位,那么相位可以选择的值表示为

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

所以对于一个码长为 N 、信号为 l 的多相码集 S ,用 $L \times N$ 的相位矩阵表示为^[9-10]

$$S(L, N, M) = \begin{bmatrix} \phi_1(1) & \phi_1(2) & \cdots & \phi_1(N) \\ \phi_2(1) & \phi_2(2) & \cdots & \phi_2(N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_L(1) & \phi_L(2) & \cdots & \phi_L(N) \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据信号的相关属性,可以得到

$$A(\phi_l, k) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-k} e^{j[\phi_l(n)-\phi_l(n+k)]} & 0 \leq k < N \\ \frac{1}{N} \sum_{n=-k+1}^N e^{j[\phi_l(n)-\phi_l(n+k)]} & -N < k < 0 \end{cases} \quad (4)$$

及

$$C(\phi_p, \phi_q, k) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-k} e^{j[\phi_p(n)-\phi_q(n+k)]} & 0 \leq k < N \\ \frac{1}{N} \sum_{n=-k+1}^N e^{j[\phi_p(n)-\phi_q(n+k)]} & -N < k < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $p \neq q$ 并且 $l, p, q = 1, 2, \dots, L$; $A(\phi_l, k)$ 是信号的非周期自相关函数; $C(\phi_p, \phi_q, k)$ 是任意两个信号的非周期互相关函数^[9-10]。

为了得到尽可能优良的正交信号,所得信号应满足

$$A(\phi_l, k) = \begin{cases} 1 & k=0 \\ 0 & -N < k < N \text{ 且 } k \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

及

$$C(\phi_p, \phi_q, k) = 0 \quad -N < k < N. \quad (7)$$

然而,由能量守恒定律可知,设计的波形只能近似满足上式。

在 MIMO 雷达正交多相码的设计中,多个方面的因素都会对最后的结果有所影响,这些因素包括自相关旁瓣峰值能量、互相关峰值能量、总的自相关旁瓣能量以及互相关能量,综合这些因素可以使得到的信号性能更加稳定。所以,代价函数可以选取为以上因素的总和,表示如下^[9-10]

$$E = w_1 \sum_{l=1}^L \max_{k \neq 0} |A(\phi_l, k)|^2 + \\ w_2 \sum_{p=1}^{L-1} \sum_{q=p+1}^L \max_{k \neq 0} |C(\phi_p, \phi_q, k)|^2 + \\ w_3 \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{L-1} |A(\phi_l, k)|^2 + w_4 \sum_{p=1}^{L-1} \sum_{q=p+1}^L \sum_{k=-N+1}^{N-1} |C(\phi_p, \phi_q, k)|^2 \quad (8)$$

式中: $w = [w_1, w_2, w_3, w_4]$ 为代价函数的加权系数; L 为发射信号个数; M 为可选离散相位个数。

MIMO 雷达正交多相码优化可以转化为最小化相应代价函数^[9]

$$\min E(x) \quad x = \phi_l(n), \quad n=1,2,\dots,N, \quad l=1,2,\dots,L \quad (9)$$

式中: E 为式中的代价函数; $\phi_l(n)$ ($0 \leq \phi_l(n) < 2\pi$) 为第 l 个信号中第 n 个脉冲的相位。

2 遗传-和声搜索算法的步骤

遗传算法是一种模拟自然界中生物自然演化规律的算法^[11],通过设定初始的种群,然后以迭代的方式对种群进行选择、交叉、变异操作,最终得到适应性更强的种群^[12]。和声搜索算法是一种模拟乐队中乐师反复演奏音乐直到音律达到一个和谐状态的算法,它通过设定初始的和声库,然后对和声库邻近的可能解反复进行搜索,最终得到问题的最优解^[13]。

本文通过将遗传算法与和声搜索算法结合来解决式(9)这一最优化问题。将和声搜索算法应用到遗传算法之中,先进行遗传算法,这样可以得到优化到一定程度的序列,在得到的序列基础上再使用和声算法。

假设遗传算法种群大小为 C 、搜索总次数为 Y 、和声搜索算法搜索总次数为 Z 。每次搜索的代价函数结果可以表示为

$$E(x)_{yz} \quad y=1,2,\dots,Y, \quad z=1,2,\dots,Z \quad (10)$$

式中, x 为正交多相码序列 $\phi_l(n)$ 。设 n 和 m 分别为遗传算法与和声搜索算法的搜索次数,则相应的种群可以表示为 $T^{(n,m)}$,种群的每个个体可以表示为 x_i ($i=1$,

$2, 3, \dots, C$ 。

混合算法的主要步骤如下。

1) 编码。采用二进制编码方式。设定单一个体的序列个数为 n , 其中每一个序列都用二进制编码表示, 序列分别为 l_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 位, 那么这个个体 x 可以表示为

$$\underbrace{b_{11} b_{12} b_{13} \cdots b_{1l_1}}_{x_1} \underbrace{b_{21} b_{22} b_{23} \cdots b_{2l_2}}_{x_2} \cdots \underbrace{b_{nl_1} b_{n2} b_{n3} \cdots b_{nl_n}}_{x_n} \quad (11)$$

该编码串的总长度表示为

$$L_T = \sum_{i=1}^n l_i \quad (12)$$

如果参数编码采用二进制编码, 则四相码的 4 个相位分别为 $\{0 \quad \pi/2 \quad \pi \quad 3\pi/2\}$, 对应的编码为 $\{00 \quad 01 \quad 10 \quad 11\}$ 。

2) 初始化。随机产生一个初始的种群 $T^{(0,0)}$, 令加权系数为 $w = [w_1, w_2, w_3, w_4] = [1, 1, 1, 1]$ 。确定遗传算法的参数, 包括遗传代数 G , 种群大小 C , 交叉概率 p_c , 变异概率 p_m 等^[9]。确定和声搜索算法的参数, 包括和声记忆库的大小 H_s (Harmony Memory Size, HMS), 记忆库取值概率 H_r (Harmony Memory Considering Rate, HMCR), 音调微调概率 P_h (Pitch Adjusting Rate, PAR) 以及最大搜索次数 G_h ^[12]。

3) 适应度计算。适应度越强的越容易选择到下一代, 适应度可以用代价函数的倒数来表示

$$F(x) = 1/E(x) \quad x \in T^{(n,m)} \quad (13)$$

式中: $T^{(n,m)}$ 为遗传算法搜索 n 次, 和声搜索算法搜索 m 次后的种群; F 越大表示个体的适应度越强^[11]。

4) 选择操作。轮盘赌算法是进行种群选择的常用算法, 同时可以配合最优保存策略, 具体做法是将种群中最佳个体 $T_b^{(n,m)}$ 选择出来直接保存到下一代, 这样能够加快向最优解收敛的速度。轮盘赌算法操作方法如下。

① 根据适应度值的大小对种群中各个个体进行排列^[11], 得到每个个体排列好的种群 $T^{*(n,m)}$, 并计算新的适应度。

$$P(x) = \frac{F(x)}{\sum_x F(x)} \quad x \in T^{*(n,m)} \quad (14)$$

② 计算出每个个体的累积概率为

$$q_i = \sum_{i=1}^c P(x_i) \quad (15)$$

③ 生成 $(0, 1)$ 之间的随机数 r_s 。

④ 若 $r_s < q_1$, 则选择个体 1; 否则, 选择个体 k , 使得 $q[k-1] < r_s \leq q[k]$ 成立。

⑤ 重复③, ④共 C 次。

⑥ 然后对 $T_b^{(n,m)}$ 按照式(8)计算各项的值, 记为 $[x_1, x_2, x_3, x_4]$, 各项相除得到量级之间差别, 最后根据整体的要求对 $[w_1, w_2, w_3, w_4]$ 进行调整。

5) 交叉操作。对群体中所有个体进行两两配对, 并且根据交叉概率 p_c 判断是否需要进行交叉, 交叉采用单点交叉。单点交叉操作如下:

① 从种群中每次随机取出不同的配对好的个体 x_1 和 x_2 , 并设定掩码 c (0 或者 1)。

② 生成 $(1, \sum_{i=1}^n l_i)$ 之间的随机数 r_m 。

③ 将 x_1 和 x_2 中第 r_m 位上的值与 c 进行异或操作, 并用所得值代替 x_1 和 x_2 中的值^[11]。

④ 重复①, ②, ③共 $\frac{C}{2}$ 次。

6) 停止准则判断。判断搜索次数是否达到优化的要求。如果满足, 继续进行下一步; 否则返回 3)。

7) 变异操作。本文将遗传算法中的变异算子替换为和声搜索算法, 具体操作如下。

① 对种群中的所有个体, 首先生成 $(0, 1)$ 之间的随机值 r , 如果 $r \leq p_m$, 则进行和声搜索算法的操作; 否则继续对下一个个体进行①操作。

② 和声搜索算法的初始化。将当前种群中的所有个体作为和声搜索算法的初始解。对和声搜索算法的各项参数进行初始化, 包括和声记忆库的取值概率 H_r , 音调的微调概率 P_h 。

③ 判断和声搜索算法的次数是否达到要求。如果满足, 结束 7); 否则继续以下步骤。

④ 将遗传算法的结果作为初始化的和声记忆库, 更新和声记忆库大小 H_s 。生成 $(0, 1)$ 之间的随机数 r_h , 如果 $r_h \leq H_r$, 那么在上面初始化的和声记忆库中得到一组和声, 否则就随机得到一组和声。对于最终得到的这组和声 x' , 如果是从和声记忆库中得到的, 则对这组和声进行微调, 在 $(0, 1)$ 之间生成一个随机数 r'_h , 如果 $r'_h \leq P_h$, 对这组和声进行微调, 得到一组新的和声 x'' , 否则不做调整^[13]。

⑤ 对新得到的和声 x'' 进行适应度计算, 如果它比上面和声记忆库中最差的解 $T_w^{(n,m)}$ 适应度更高, 那么就用新的和声取代适应度最差的和声, 表示为

$$T_w^{(n,m)} = x'' \quad (16)$$

否则继续进行和声搜索算法。

⑥ 转至③。

8) 判断遗传算法的搜索次数是否达到要求。如果满足, 停止算法, 输出结果; 否则, 返回 3), 采用新的种群继续进行遗传算法的搜索。

图 1 为遗传-和声搜索算法的流程图。

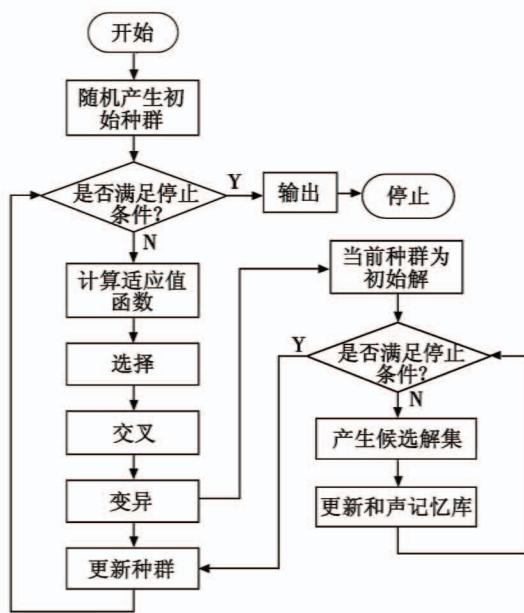


图1 混合算法的流程图

Fig. 1 Flow chart of the hybrid algorithm

3 实验结果及分析

仿真基本参数设置为:码长 $N=40$,发射信号个数 $L=4$,可选离散相位个数 $M=4$,即发射 4 个长度为 40 的四相码脉冲序列,相位为 $\{0 \pi/2 \pi 3\pi/2\}$,表示为 $\{1 2 3 4\}^{[10]}$ 。遗传算法部分的初始参数设置:交叉概率 p_c 为 0.95,变异概率 p_m 为 0.1。和声搜索算法部分的初始参数:和声记忆库概率 H_r 为 0.99,音调微调概率 P_h 为 0.1。遗传算法的种群大小与和声搜索算法的和声库大小保持一致,为 40。通过迭代的方法更新种群与和声库,最小化式(8),产生一组满足式(6)和式(7)的多相码序列,然后分别求出序列的自相关和互相关。表 1 为优化后的正交多相码序列。表 2 为所得序列的相关特征,其中主对角线是归一化的 ASP,表中其他部分是归一化的 CP。图 2 为各脉冲序列自相关曲线。

表1 优化得到的相位序列($N=40, L=4, M=4$)Table 1 Phase sequences of a designed polyphase code set when $N=40, L=4$, and $M=4$

多相码序号	相位序列
序列 1	1 2 1 0 0 3 1 1 1 3 0 0 3 3 0 2 3 2 0 1 2 0 2 0 3 3 0 0 0 1 3 3 0 2 1 0 3 3 0
序列 2	3 1 2 3 1 2 2 2 3 2 1 0 1 2 2 0 2 0 0 0 3 0 2 1 0 0 2 3 2 1 1 3 2 0 0 3 3 2 0 2
序列 3	3 3 2 0 2 3 1 1 0 0 3 2 0 2 1 3 1 3 1 1 1 2 1 1 3 0 1 0 1 1 1 2 1 0 0 2 2 0 0 3
序列 4	3 0 1 1 3 1 2 3 3 3 1 0 3 1 1 3 1 3 3 2 1 2 2 3 3 0 3 3 3 3 1 2 1 1 1 0 2 0 1

表2 正交多相码的 ASP 和 CP($N=40, L=4, M=4$)Table 2 Autocorrelation sidelobe peaks and cross-correlation peaks when $N=40, L=4$, and $M=4$

	序列 1	序列 2	序列 3	序列 4
序列 1	0.127 5	0.225 0	0.212 1	0.226 4
序列 2	0.225 0	0.126 4	0.213 6	0.182 0
序列 3	0.212 1	0.213 6	0.147 4	0.176 8
序列 4	0.226 4	0.182 0	0.176 8	0.149 5

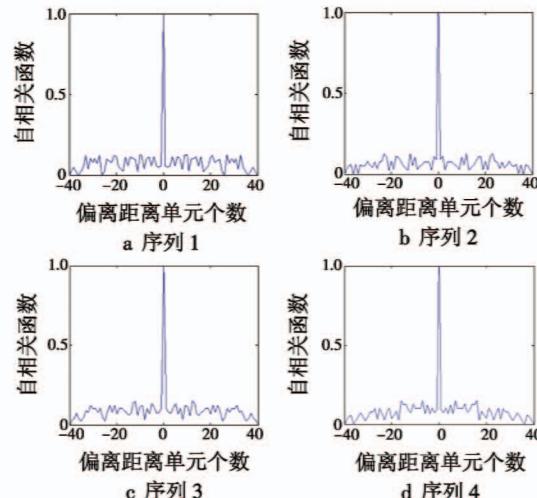
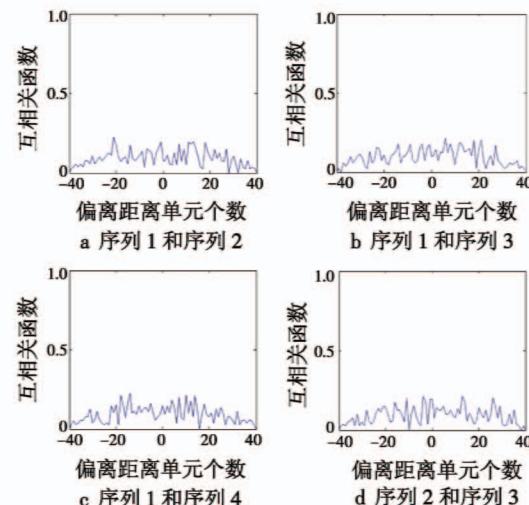


图2 各序列的自相关曲线

Fig. 2 Autocorrelation curves of each sequence

表 3 为本文算法和其他算法的结果比较,容易看出,本文算法得到的序列平均 ASP 为 0.137 7,平均 CP 为 0.206 0,相对于文献[9]中的算法都有所下降,并且通过图 2 和图 3 能够看到,所得序列的能量分布比较均匀。与同样在遗传算法基础上改进的文献[10]相比,本文算法 ASP 明显降低,同时 CP 也表现出了良好的效果。图 4 为不同算法的收敛曲线,容易看出,本文方法的收敛速度高于文献[9~10]中的方法。



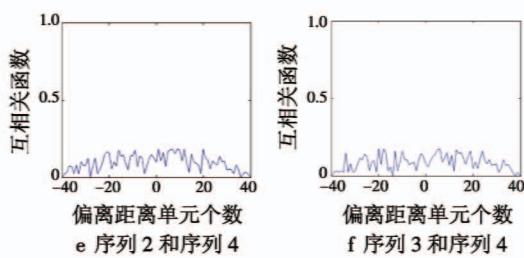


图3 各序列的互相关曲线

Fig. 3 Cross-correlation curves of each sequence

表3 本文算法与其他算法的结果比较

Table 3 Comparison between the proposed method and other methods

算法	最大 ASP	平均 ASP	最大 CP	平均 CP
文献[9]算法	0.158 1	0.147 0	0.230 5	0.207 8
文献[10]算法	0.152 1	0.144 3	0.215 1	0.196 6
本文算法	0.147 4	0.137 7	0.226 4	0.206 0

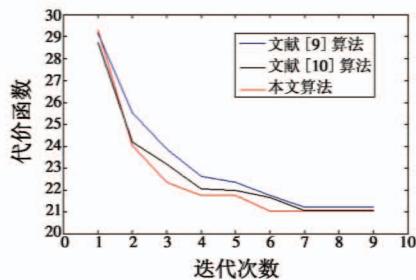


图4 不同算法的迭代曲线

Fig. 4 Iterative curves of different algorithms

通过仿真结果可知,本文算法的结果优于文献[9]中仅使用遗传算法的优化结果,同时在保持互相关性较好的前提下,又在自相关性方面优于文献[10]中提出的算法,收敛速度也有所提高。本文算法由于结合了两种算法的优点,因而具有很快的收敛速度,同样的迭代次数,所得结果优于文献[9-10]中的算法。仿真结果验证了所提算法的优势。

4 结论

本文提出的基于遗传-和声搜索算法的 MIMO 雷达正交多相码设计方法,通过将两种算法相结合,使得遗传算法的全局寻优能力及和声搜索算法优良的邻域寻优能力得到共同发挥,因此得到了更强的优化能力。同时,采用了最优保存策略,使得每次迭代得到的最优解不易被破坏,从而进一步加快了向最优解靠拢的速度。相比于已有的方法,在得到良好互相关峰值的同时,

降低了自相关旁瓣,加快了收敛速度,更适合 MIMO 雷达目标探测使用,增强其目标检测能力。

参 考 文 献

- [1] 徐武军,张西川,王睿,等.发射波形合成下的机载 MIMO 雷达杂波统一模型[J].电光与控制,2010,17(10):41-45.
- [2] 刘嵩. MIMO 雷达波形设计及参数估计研究[D].南京:南京理工大学,2013.
- [3] 孙明亮. 基于混沌信号的 MIMO 雷达波形设计方法研究[D].长春:吉林大学,2014.
- [4] 庄珊娜. 雷达自适应波形优化设计研究[D].南京:南京理工大学,2012.
- [5] 张筱,魏钰洁,姬伟杰,等.基于改进粒子群算法的 MIMO 雷达布阵优化[J].指挥控制与仿真,2016,38(5):75-78.
- [6] YANG Y, BLUM R S. MIMO radar waveform design based on mutual information and minimum mean-square error estimation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(1):330-343.
- [7] 金明,廖桂生,李军.基于遗传算法的类零相关多相码设计[J].系统工程与电子技术,2010,32(1):14-17.
- [8] DENG H. Polyphase code design for orthogonal netted radar systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(11):3126-3135.
- [9] LIU B, HE Z S, ZENG J K, et al. Polyphase orthogonal code design for MIMO radar systems [C]//CIE International Conference on Radar, 2006:1-4.
- [10] 王伟,赵俊杰,王辉.基于混合算法的 MIMO 雷达正交多相码设计[J].系统工程与电子技术,2013,35(2):294-298.
- [11] 欧阳森,王建华,宋政湘,等.一种新的改进遗传算法及其应用[J].系统仿真学报,2003,15(8):1066-1068,1073.
- [12] CHEN Y J, ZHANG Q, LUO Y, et al. Measurement matrix optimization for ISAR sparse imaging based on genetic algorithm[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2016, 13(12):1875-1879.
- [13] 雍龙泉. 和声搜索算法研究进展[J].计算机系统应用,2011,20(7):244-248.