

## 激光与光电子学进展

## 基于改进樽海鞘算法的 MIMO 雷达正交波形设计

赵子杭<sup>1</sup>, 高振斌<sup>1\*</sup>, 韩壮志<sup>2</sup>, 李琦<sup>1</sup><sup>1</sup>河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401;<sup>2</sup>陆军工程大学石家庄校区电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003

**摘要** 针对多输入多输出(MIMO)雷达相位编码正交波形的优化设计问题,提出一种改进樽海鞘优化算法。该算法引入 Logistic-Tent 混沌映射进行种群的初始化,以更大概率获得最优初始解位置;并改进领导者更新方程,扩大最优解搜寻范围;利用正弦函数设计权重并根据代价函数值灵活调整追随者更新的位置,使收敛精度更加细化。实验结果表明:经过改进樽海鞘算法设计的 MIMO 雷达相位编码波形,较原算法自相关旁瓣峰值和互相关峰值分别减小了 2.6231 dB、1.2572 dB;与现有结果相比,具有较好的正交性能、较高的算法收敛精度。

**关键词** 信号处理; 正交波形; 樽海鞘算法; 相位编码; 相关性

中图分类号 TN95 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1307003

## Orthogonal Waveform Design for MIMO Radar Based on Improved Salp Swarm Algorithm

Zhao Zihang<sup>1</sup>, Gao Zhenbin<sup>1\*</sup>, Han Zhuangzhi<sup>2</sup>, Li Qi<sup>1</sup><sup>1</sup>School of Electronic and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;<sup>2</sup>Department of Electronic and Optical Engineering, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, Hebei, China

**Abstract** An optimization algorithm based on improved salp swarm is proposed to optimize the orthogonal phase-coded waveform of the multiple-input multiple-output (MIMO) radar. The Logistic-Tent chaotic map is introduced into this algorithm to initialize the population, thus increase the probability of obtaining the optimal initial solution position. Then, the leader update equation is improved to expand the range of the optimal solution search. The sine function is applied for weight design, and the followers' updated positions are flexibly adjusted according to the cost function value to further refine the convergence accuracy. The experimental results show that the auto-correlation sidelobe peak and cross-correlation peak of the phase-coded waveform of the MIMO radar designed based on the improved salp swarm algorithm are reduced by 2.6231 dB and 1.2572 dB, respectively, compared with those of the original algorithm. The orthogonal performance and the convergence accuracy of the algorithm reported here are better than those of the existing results.

**Key words** signal processing; orthogonal waveform; salp swarm algorithm; phase encoding; correlation

## 1 引言

多输入多输出(MIMO)雷达作为一种具有较好探测能力的雷达,发射信号采用正交波形,信号能量在空间均匀分布,使雷达拥有较强的探测性<sup>[1]</sup>和低截获性<sup>[2]</sup>。因此,设计正交性较好的 MIMO 雷达波形具有理论以及现实意义<sup>[3]</sup>。

为了使波形具有较好的正交性能,使用信号相关性构造代价函数,在此基础上利用优化算法<sup>[4-6]</sup>得到满足要求的正交波形。文献[7]和[8]分别使用模拟退火和遗传算法进行序列的优化,但是原算法优势并没有得到体现,结果精度较低。文献[9]利用循环算法进行波形的优化设计,以降低信号的互相关性。文献[10]利用多目标微粒群优化算法进行正交波形设计,将代

收稿日期: 2021-07-20; 修回日期: 2021-08-25; 录用日期: 2021-08-27

基金项目: 河北省自然科学基金(F2019506037)

通信作者: \*gaozhenbin@hebut.edu.cn

价函数进行拆分逐步优化,但复杂度较高、收敛速度较慢。文献[11-13]分别使用克隆选择算法、粒子群算法、混合遗传鸡群算法,使得波形相关性得到一些提高。文献[14]将遗传算法与和声算法进行融合,以提高搜索到全局最优解的可能性。文献[15]利用改进人工蜜蜂算法,有效降低了信号的自相关旁瓣以及互相关峰值。

上述波形设计主要使用启发式优化算法进行最优解的搜寻,但仍存在自相关旁瓣以及互相关峰值较高的问题。本文在樽海鞘优化算法(Salp swarm algorithm, SSA)<sup>[16]</sup>的基础上,引入 Logistic-Tent 混沌映射来进行种群的初始化,以更大概率获得优秀初始解位置;并改进领导者更新方程,扩大最优解搜寻范围,使算法具有跳出局部最优的性能;利用正弦函数设计权重并根据代价函数值灵活调整追随者更新的位置,使收敛精度更加细化。实验结果说明,由改进的 SSA 算法设计的 MIMO 雷达相位编码波形,与当前应用到正交波形优化的算法相比,优化后的 MIMO 波形具有较好的正交性能。

## 2 MIMO 雷达正交波形设计原理

设 MIMO 雷达共有  $M$  个发射信号,每个发射信号的相位编码长度均为  $N$ ,则发射信号编码集  $S$  具体形式为

$$S = \{S_m(n) | n = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, M\}, \quad (1)$$

$$S_m(n) = a(t) \exp[j\phi_m(n)], \quad (2)$$

$$a(t) = \begin{cases} 1/\sqrt{\tau N}, & 0 < t < \tau N \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $\tau$  为脉冲宽度;  $\phi_m(n)$  为第  $m$  个天线发射波形所对应的第  $n$  个相位大小。发射信号编码集  $S$  用  $M \times N$  的相位矩阵表征为

$$S = \begin{bmatrix} \phi_1(1) & \phi_1(2) & \dots & \phi_1(N) \\ \phi_2(1) & \phi_2(2) & \dots & \phi_2(N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi_m(1) & \phi_m(2) & \dots & \phi_m(N) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

要使信号符合 MIMO 雷达设计指标,需要满足的正交波形设计要求为

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

$$C(\phi_i, \phi_j, k) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-k} \exp\{j[\phi_i(n) - \phi_j(n+k)]\} = 0, & 0 \leq k < N \\ \frac{1}{N} \sum_{n=-k+1}^N \exp\{j[\phi_i(n) - \phi_j(n+k)]\} = 0, & -N \leq k < 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中:  $m = 1, 2, \dots, M$ ;  $i \neq j$  且  $i, j = 1, 2, \dots, N$ ;  $A(\phi_m, k)$  为第  $m$  个发射信号的非周期自相关函数;  $C(\phi_i, \phi_j, k)$  为不同发射信号之间的非周期互相关函数。

MIMO 雷达波形的正交性能受到多种因素的影响,如果信号的自相关旁瓣峰值(Auto-correlation sidelobe

peak, ASP) 过高,会影响对目标的探测能力;如果信号的互相关峰值(Cross-correlation peak, CP) 过高,将不利于信号的分离与处理。因此,在进行波形设计时要综合考虑这些因素,将 ASP、CP 以及所有的自相关旁瓣能量和互相关能量作为代价函数,至此波形设计问题也就转化为代价函数最小的问题,可表示为

$$E = \omega_1 \times \sum_{m=1}^M \max |A(\phi_m, k)| + \omega_2 \times \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \max |C(\phi_i, \phi_j, k)| + \omega_3 \times \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{N-1} |A(\phi_m, k)|^2 + \omega_4 \times \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \sum_{k=-N+1}^{N-1} |C(\phi_i, \phi_j, k)|^2, \quad (7)$$

式中:  $\sum_{m=1}^M \max |A(\phi_m, k)|$  表示 ASP;  $\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \max |C(\phi_i, \phi_j, k)|$  表示 CP;  $\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{N-1} |A(\phi_m, k)|^2$  表示所有的自相关旁瓣能量;  $\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \sum_{k=-N+1}^{N-1} |C(\phi_i, \phi_j, k)|^2$  表示所有的互相关能量;  $\omega_i$  表示对代价函数  $E$  中各部分能量的加权系数。

## 3 改进樽海鞘算法

### 3.1 樽海鞘优化算法

在海洋中,樽海鞘主要以链状形式进行移动和食物位置的搜寻。在樽海鞘链中共有 2 部分,头部的个体作为领导者,其后的个体作为追随者。领导者主要负责在捕食空间中寻找食物,追随者跟随领导者移动。通过这种方式完成移动以及捕食,而 SSA 算法就模拟

了樽海鞘的行为方式,并以此为基础建立了优化求解模型。领导者位置更新方程为

$$x_j^i = \begin{cases} F_j + c_1[(b_{\max j} - b_{\min j})c_2 + b_{\min j}], & c_3 \geq 0.5 \\ F_j - c_1[(b_{\max j} - b_{\min j})c_2 + b_{\min j}], & c_3 < 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $x_j^i$ 表示在第 $j$ 维搜索空间中位于樽海鞘链头部的领导者个体位置; $F_j$ 表示在当前第 $j$ 维搜索范围内食物源所处的具体位置; $b_{\max j}$ 、 $b_{\min j}$ 分别表示在当前第 $j$ 维搜索范围内的最大值以及最小值; $c_2$ 主要决定领导者下一次迭代时位置更新距离的大小; $c_3$ 主要决定领导者下一次迭代时具体位置更新的方向; $c_1$ 随迭代次数的变化而变化,它主要决定算法的全局搜索和局部搜索能力,具体公式为

$$c_1 = 2\exp[-(4t/T_{\max})^2], \quad (9)$$

式中: $t$ 表示进程中的迭代次数; $T_{\max}$ 为算法定义的迭代次数最大值。

追随者在进行位置更新时,依据牛顿运动定律得出

$$x_j^i = \frac{1}{2}at^2 + v_0\Delta t, \quad (10)$$

式中:因追随者定义从第二个樽海鞘个体开始,所以 $i > 1$ ; $x_j^i$ 表示在第 $j$ 维搜索空间中第 $i$ 个樽海鞘的位置; $v_0$ 表示运动个体初始速度大小; $\Delta t$ 表示个体运动时间; $a$ 表示个体运动的加速度且 $a = (v_{\text{final}} - v_0)/\Delta t$ , $v_{\text{final}} = (x_j^{i-1} - x_j^i)/\Delta t$ 。在 SSA 算法中 $\Delta t$ 由下一次迭代次数与上一次迭代次数作差得到,因此 $\Delta t = 1$ ,一般情况下樽海鞘个体运动初速度大小设为 0,式(10)可写成

$$x_j^i = \frac{1}{2}(x_j^i + x_j^{i-1}). \quad (11)$$

SSA 算法主要依据以上过程进行个体位置的更新以及食物源位置的搜寻,并以此为基础优化工程中的各种指标。

### 3.2 改进 SSA 算法

#### 3.2.1 Logistic-Tent 混沌映射

混沌映射的特点是对初值十分敏感且不同序列间的相关性能较好。Lyapunov 指数是衡量混沌性能的重要指标,Logistic-Tent 级联混沌序列的这一指标最大为 1.2937,而 Tent 混沌序列为 0.6926,Logistic 混沌序列为 0.6930<sup>[17]</sup>。显然 Logistic-Tent 混沌映射的混沌特性更好。所以,为了提高得到优秀初始解的概率,提高算法的搜寻效率,使用在搜索空间遍历能力较好的 Logistic-Tent 混沌映射进行种群的初始化,计算公式<sup>[16]</sup>为

$$y_{n+1}^i = 1 - a|\mu y_n^i(1 - y_n^i) - (1/a)|, \quad (12)$$

$$x_j^i = y_j^i(b_{\max j} - b_{\min j}) + b_{\min j}, \quad (13)$$

式中:可调参数范围为 $\mu \in [0, 4]$ 、 $a \in [0, 2]$ 、 $y_n^i \in [0, 1]$ ; $y_j^i$ 表示取值在 $[0, 1]$ 范围内的混沌序列。得到混沌序列后,再根据式(13)计算得到初始种群的

樽海鞘个体位置。将 Logistic-Tent 混沌映射运用到算法开始时的种群初始化中,不仅可以提高种群覆盖范围,而且可以增大获得优秀初始解的概率。

#### 3.2.2 改进领导者位置更新方程

在 SSA 算法领导者位置更新方程中,将樽海鞘链头部的樽海鞘个体确定为领导者,由它进行食物源的搜寻,追随者进行追随。然而仅仅依靠一个领导者会降低搜寻到全局最优解的可能性,使种群多样性过于单一。所以,需要使领导者和追随者各占一半,进行食物源位置的充分搜寻,使算法的寻优能力得以提高。在此基础上引入随机数机制,使樽海鞘个体在食物源周围跳动寻优,防止以局部较好的值作为全局最优值,改进后的方程为

$$x_j^i = \begin{cases} F_j + 2\pi c_1 c_2 \text{rand}(\cdot), & c_3 \geq 0.5 \\ F_j - 2\pi c_1 c_2 \text{rand}(\cdot), & c_3 < 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $F_j$ 表示在当前第 $j$ 维搜索空间中食物源的具体位置; $\text{rand}(\cdot)$ 为在 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数,通过引入随机数,使算法具有跳出局部最优的性能。

#### 3.2.3 改进追随者位置更新方程

在 SSA 算法追随者更新方程中,主要是根据当前樽海鞘个体与前一个樽海鞘个体的中心来进行位置更新,而两个樽海鞘个体的代价函数值有很大概率是不相等的,即其中一个个体较差,只根据他们的位置中心进行更新,会存在一种盲目跟随的现象,这显然不利于优化算法的寻优。因此根据代价函数值灵活调整追随者更新的位置,使更新结果更偏向于效果较好的个体,从而使算法具有较好的搜索效果。

同时设计基于正弦函数的惯性权重因子来对追随者中前后樽海鞘个体影响程度进行评判,改进后的追随者位置更新方程为

$$x_j^i = \begin{cases} \frac{1}{2}[(1 - \omega)x_j^i + (1 + \omega)x_j^{i-1}], & f(x_j^{i-1}) < f(x_j^i) \\ \frac{1}{2}(x_j^i + x_j^{i-1}), & f(x_j^{i-1}) = f(x_j^i) \\ \frac{1}{2}[(1 + \omega)x_j^i + (1 - \omega)x_j^{i-1}], & f(x_j^{i-1}) > f(x_j^i) \end{cases} \quad (15)$$

$$\omega = k \sin[(t/T_{\max})^2 \cdot \pi/2], \quad (16)$$

式中: $k$ 为常数; $t$ 表示进程中的迭代次数; $T_{\max}$ 为算法定义的迭代次数最大值; $f(\cdot)$ 为樽海鞘个体的代价函数值; $\omega$ 为权重因子。 $\omega$ 设置为随正弦函数规律逐步增加,使得 SSA 在开始时追随者位置均匀改变,这有利于算法进行全局寻优。之后随着 $\omega$ 的增大,如果一个个体影响较大,个体更新后更靠近前一个个体;反之则更靠近后一个个体。通过使用这种方法降低了个体盲目跟随的概率,使算法的搜索效果得以提升。



### 3.2.4 改进 SSA 算法流程

改进 SSA 算法的流程如下:

步骤 1) 参数设定: 设定发射信号个数  $M$ , 每个信号的相位编码位数  $N$ , 算法迭代次数最大值  $T_{\max}$ , 初始种群数量  $P$  以及搜索空间上下界;

步骤 2) 初始化种群: 发射信号参数  $M$ 、 $N$  确定后, 利用 Logistic-Tent 混沌映射按照式 (12)~(13) 产生初始种群  $U = \{u_p, p = 1, 2, \dots, P\}$ , 每个  $u_p$  为一个  $M \times N$  的相位矩阵;

步骤 3) 计算适应度值: 根据式 (7) 计算樽海鞘个体的代价函数, 按照从小到大的顺序排序, 食物源位置由代价函数最小的个体确定;

步骤 4) 更新领导者位置: 将代价函数较小的前一半个体确定为领导者, 根据式 (14) 进行更新, 在食物源周围进行充分搜寻;

步骤 5) 更新追随者位置: 将代价函数较大的后一半个体确定为追随者, 根据式 (16) 计算惯性权重因子  $\omega$ , 根据  $f(x_j^{i-1})$  与  $f(x_j^i)$  的关系按照式 (15) 进行追随者位置更新, 在食物源外围进行充分搜寻;

步骤 6) 食物位置更新: 对更新后的樽海鞘个体按照式 (7) 重新计算其代价函数, 新的食物源位置由代价函数最小的个体确定;

步骤 7) 输出最优解: 判断当前迭代次数是否满足终止要求, 若不满足, 更新食物源位置后继续执行步骤 2)~6), 否则输出最优食物源位置。

## 4 实验结果及分析

实验参数设置: 发射信号个数  $M = 4$ , 每个发射信号中脉冲的相位编码长度  $N = 40$ , 种群数量  $P = 100$ ,

改进 SSA 算法运行时迭代次数最大为  $T_{\max} = 2000$ , 改进追随者公式中权重因子设置为  $\omega = 0.9$ 。在算法执行 2000 次结束时, 由改进 SSA 算法优化所得波形的相位编码结果如表 1 所示。

表 1 设计所得波形的相位编码表  
Table 1 Phase encoding table of the designed waveform

Wave phase						
Signal 1:	4.8017	4.3756	5.4521	1.4806	2.1235	2.1287
	2.6849	3.5461	5.6132	1.8954	1.6259	3.8419
	1.6164	2.3821	4.8126	2.6307	2.7373	0.9315
	6.1495	4.4069	4.4789	0.9544	5.9545	5.2585
	5.5305	5.1021	0.4377	2.9351	5.7522	2.8793
	1.1770	2.6276	0.4266	5.1031	2.3551	5.2516
Signal 2:	5.3351	2.9763	4.7096	4.5337	5.8680	5.0829
	1.7625	5.7810	0.7840	0.7487	4.5683	3.6251
	4.8155	4.1748	2.9968	4.5075	3.0619	1.1798
	3.9021	3.5907	4.8574	2.3106	0.8310	3.7167
	4.4191	4.1204	2.8558	0.8842	1.8905	5.1392
	5.0759	5.3474	2.6671	3.4507	4.9850	6.0398
Signal 3:	2.0757	0.2525	3.2378	5.8207	6.0727	4.8974
	2.6143	2.0286	1.9231	1.7061	0.0854	2.5257
	0.6677	0.4690	2.5815	0.5016	0.5769	5.6949
	4.3278	0.4565	5.3142	2.5479	0.1719	2.2596
	5.9545	1.9466	2.8301	2.5607	3.0547	5.4473
	4.6896	5.0078	0.2310	0.2856	2.4875	5.1640
Signal 4:	2.7423	2.2562	3.1432	5.2536	5.4429	3.2416
	2.2035	2.1181	2.5606	1.7535	3.4337	4.5239
	0.1953	3.5782	3.5210	1.5757	3.7538	0.4793
	6.2669	5.6458	2.9724	5.6885	2.1264	3.3970
	1.0866	2.3532	5.7117	3.8654	6.2819	5.3877
	0.8310	3.2559	5.1689	5.3266	2.6017	2.3232

图 1、图 2 分别是 MIMO 雷达各路信号的自相关函数以及互相关函数。表 2 为相位编码波形的 ASP 值和 CP 值。

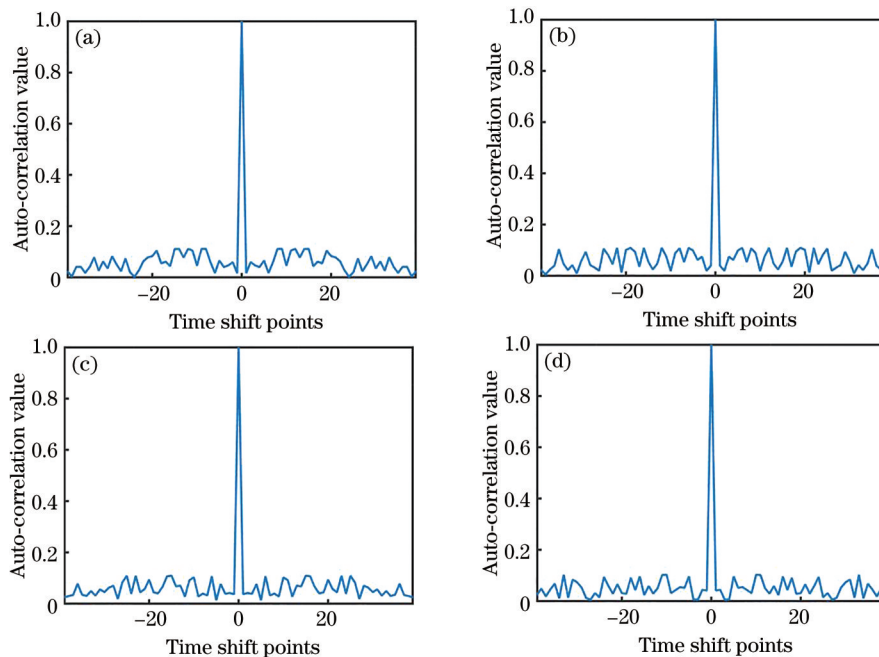


图 1 信号自相关函数。(a)信号 1;(b)信号 2;(c)信号 3;(d)信号 4

Fig. 1 Signal auto-correlation function. (a) Signal 1; (b) signal 2; (c) signal 3; (d) signal 4

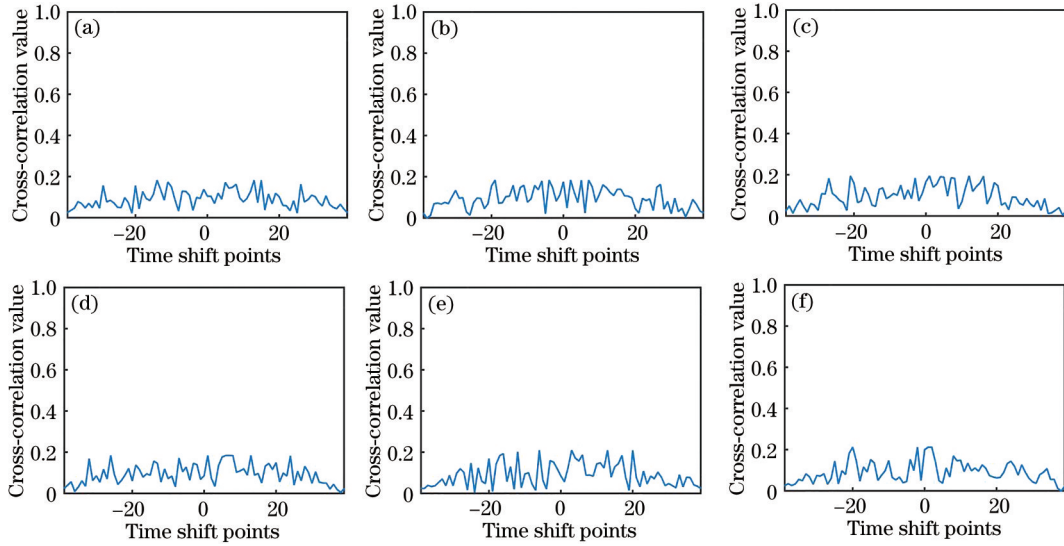


图2 信号互相关函数。(a)信号 1,2;(b)信号 1,3;(c)信号 1,4;(d)信号 2,3;(e)信号 2,4;(f)信号 3,4

Fig. 2 Signal cross-correlation function. (a) Signals 1, 2; (b) signals 1, 3; (c) signals 1, 4; (d) signals 2, 3; (e) signals 2, 4; (f) signals 3, 4

表2 波形的 ASP 和 CP

Table 2 ASP and CP of the waveforms

Sequence number of signal	Signal 1	Signal 2	Signal 3	Signal 4
Signal 1	0.1123	0.1832	0.1846	0.1953
Signal 2	0.1832	0.1102	0.1850	0.2102
Signal 3	0.1846	0.1850	0.1081	0.2127
Signal 4	0.1953	0.2102	0.2127	0.1042

由图 1、图 2 和表 2 可知,优化后所得的相位编码序列自相关旁瓣较低,提高了信号的脉冲压缩特性,同时也提高了对弱目标的探测能力。互相关峰值也取得了较好效果,有效降低了脉冲之间的干扰。因此,利用改进 SSA 算法优化得到的波形具有较好的正交性。

将改进 SSA 算法优化的结果与其他应用到正交波形优化设计算法所得结果进行对比,表 3 为改进 SSA 算法的正交波形优化结果与文献[14]、[15]、[18]、[19]所得结果在 ASP 和 CP 上的比较。

由表 3 可知,使用改进 SSA 算法得到正交波形的 ASP 值和 CP 值均低于文献[14][15][18][19]所得结果。因此,与其他算法相比,改进 SSA 算法的波形优化效果

表3 改进 SSA 算法与其他文献结果的比较

Table 3 Comparison of results from improved SSA with results from other's methods

Method	Average	Max	Average	Max
	ASP	ASP	CP	CP
Method of Ref. [14]	0.1377	0.1474	0.2060	0.2264
Method of Ref. [15]	0.1662	0.1924	0.2131	0.2305
Method of Ref. [18]	0.1443	0.1521	0.1966	0.2151
Method of Ref. [19]	0.1293	0.1346	0.2068	0.2305
Improved SSA	0.1092	0.1123	0.1952	0.2127

较好。同时,分别利用 SSA 算法、改进 SSA 算法对波形优化结果进行比较。图 3 表示 SSA 算法和改进 SSA 算法在改进前后平均 ASP、平均 CP 优化结果的对比。

由图 3 可知,利用原 SSA 算法进行正交波形设计,所得结果平均 ASP 为 0.1477、平均 CP 为 0.2256,最终曲线虽然趋于收敛,但收敛精度较低。改进 SSA 算法在迭代次数达到 1400 时 ASP 和 CP 数值趋于平稳,最终得到平均 ASP 为 0.1092,平均 CP 为 0.1952,较原 SSA 算法所得 ASP 和 CP 分别提高了 2.6231 dB、1.2572 dB。因此,利用改进后 SSA 算法优化 MIMO

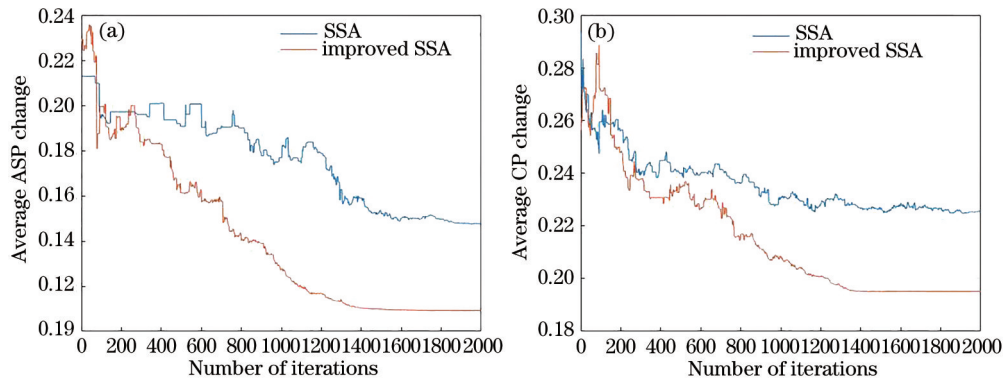


图3 平均 ASP 和平均 CP 的变化曲线。(a)平均 ASP;(b)平均 CP

Fig. 3 Average ASP and average CP change curves. (a) Average ASP; (b) average CP

雷达波形,能够取得较低的 ASP 值和 CP 值,有效提高了波形的正交性,并且具有较好的收敛精度。

## 5 结 论

改进 SSA 算法通过引入 Logistic-Tent 混沌映射进行种群的初始化,改变领导者更新方程,使樽海鞘个体在食物源周围跳动寻优,同时利用正弦函数设计权重,并根据代价函数值灵活调整追随者更新的位置。将此算法应用到 MIMO 雷达正交波形的设计中,实验结果表明,改进 SSA 算法与当前其他应用到正交波形优化设计的算法相比,收敛精度有明显的提高,所得波形正交性能较好,提高了信号的可处理性与能量辐射全向性。

### 参 考 文 献

- [1] 池政刚. MIMO 雷达波形优化设计技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020: 18-24.  
Chi Z G. MIMO radar waveform optimization design technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2020: 18-24.
- [2] 杨少委. 正交波形 MIMO 雷达射频隐身技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015: 26-33.  
Yang S W. Research on radio frequency stealth technology for orthogonal waveform MIMO radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 26-33.
- [3] 赵永波, 刘宏伟. MIMO 雷达技术综述[J]. 数据采集与处理, 2018, 33(3): 389-399.  
Zhao Y B, Liu H W. Overview on MIMO radar[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2018, 33(3): 389-399.
- [4] 孙静, 张伟. 改进正交搜索优化 GPS 信号精捕获[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 131206.  
Sun J, Zhang W. Fast and precise acquisition of GPS signal optimized by improved orthogonal search[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 131206.
- [5] 毛朝阳, 李岚, 魏伟. 基于迁移学习的感知矩阵优化方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 1410021.  
Mao Z Y, Li L, Wei W. Optimization method for sensing matrix based on transfer learning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(14): 1410021.
- [6] 范景韬, 黄翔, 曾琪, 等. 基于免疫优化算法的 iGPS 发射器布局优化方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 1112009.  
Fan J T, Huang X, Zeng Q, et al. Placement optimization of iGPS transmitter based on immune optimization algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(11): 1112009.
- [7] Deng H. Polyphase code design for orthogonal netted radar systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(11): 3126-3135.
- [8] Liu B, He Z S, Zeng J K, et al. Polyphase orthogonal code design for MIMO radar systems[C]//2006 CIE International Conference on Radar, October 16-19, 2006, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2006: 9418238.
- [9] He H, Stoica P, Li J. Designing unimodular sequence sets with good correlations: including an application to MIMO radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(11): 4391-4405.
- [10] Zeng X N, Zhang Y S, Guo Y D. Polyphase coded signal design for MIMO radar using MO-MicPSO[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(3): 381-386.
- [11] Jin Y, Wang H Q, Jiang W D, et al. Complementary-based chaotic phase-coded waveforms design for MIMO radar[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2013, 7(4): 371-382.
- [12] Dunn Z, Yeary M, Uysal F, et al. Low sidelobe pseudo-orthogonal code sets through particle swarm optimization [C]//2016 IEEE Radar Conference (RadarConf), May 2-6, 2016, Philadelphia, PA, USA. New York: IEEE Press, 2016: 16070710.
- [13] 杨俊辉, 刘以安. 基于混合遗传鸡群优化算法的雷达正交波形设计[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 080702.  
Yang J H, Liu Y A. Design of radar orthogonal waveform based on hybrid genetic chicken swarm optimization algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 080702.
- [14] 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.
- [15] Xie L Z, Li K M, Li W Y, et al. Design of MIMO radar orthogonal polyphase code based on improved artificial bee algorithm[C]//2019 IEEE 2nd International Conference on Electronic Information and Communication Technology, January 20-22, 2019, Harbin, China. New York: IEEE Press, 2019: 507-511.
- [16] Mirjalili S, Gandomi A H, Mirjalili S Z, et al. Salp swarm algorithm: a bio-inspired optimizer for engineering design problems[J]. Advances in Engineering Software, 2017, 114: 163-191.
- [17] 王光义, 袁方. 级联混沌及其动力学特性研究[J]. 物理学报, 2013, 62(2): 020506.  
Wang G Y, Yuan F. Cascade chaos and its dynamic characteristics[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(2): 020506.
- [18] 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.  
Wang W, Zhao J J, Wang H. Design of orthogonal polyphase code for MIMO radar based on hybrid algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(2): 294-298.
- [19] Reddy B R, Uttarakumari M. Design of orthogonal waveform for MIMO radar using modified ant colony optimization algorithm[C]//2014 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), September 24-27, 2014, Delhi, India. New York: IEEE Press, 2014: 2554-2559.