

# 基于 SCPSO 算法的 MCPC 雷达波形优化设计\*

刘雅静, 张振华, 陈浩川, 张 彬, 张剑琦  
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 针对多载波互补相位编码 MCPC 信号在应用中存在包络起伏大等问题, 结合混沌映射和自适应混沌粒子群 SCPSO 算法提出了一种优化设计。设计将编码信号的主瓣峰值与最大旁瓣值比 PSLR 作为单独的评判依据, 结合混沌序列类随机的性质对混沌序列进行两级筛选, 得到自相关函数旁瓣较低的混沌编码序列组。考虑到 MCPC 信号结构的特点, 应用 SCPSO 算法调整子载波权重因子来优化信号的 PMEPR。仿真分析表明, 优化设计能在保证 MCPC 信号优良自相关特性的情况下, 有效降低信号的包络起伏。

**关键词:** MCPC 信号; 混沌映射; SCPSO 算法; 包络起伏; PMEPR; 自相关性能

**中图分类号:** TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2021)01-0070-07

## Optimal waveform design based on SCPSO algorithm for MCPC radar

LIU Yajing, ZHANG Zhenhua, CHEN Haochuan, ZHANG Bin, ZHANG Jianqi  
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of large envelope fluctuation in the application of MCPC radar signal, this paper proposes an optimization design based on chaotic mapping and SCPSO algorithm, and makes relevant simulation analysis. PSLR of the coded signal is used as a separate evaluation basis. Combined with the random-like property of the chaotic sequence, the sequence is screened by two levels, and a group of chaotic coded sequences with lower autocorrelation function sidelobes is obtained. Considering the characteristics of MCPC signal structure, SCPSO algorithm is applied to adjust the subcarrier weight factor to optimize the PMEPR of the signal. As a result, the design can effectively reduce the signal envelope fluctuation while ensuring the excellent autocorrelation characteristics of MCPC signal.

**Key words:** MCPC signal; Chaotic mapping; SCPSO algorithm; Envelope fluctuation; PMEPR; Autocorrelation characteristics

## 引 言

1998 年, Jankiraman 等人将正交频分复用 OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) 技术引入雷达系统, 设计了名叫“PANDORA”的雷达<sup>[1,2]</sup>。2000 年, Levanon 等人首次提出将正交频分复用结构和相位编码技术相结合的 MCPC 信号<sup>[3]</sup>。同年, Levanon 等人提出一种普适的自适应补码编码方法以降低 MCPC 信号 PMEPR。对比传统的单载波信号, MCPC 信号凭借其波形设计灵活、距离分辨率和目标参数测量精度高、杂波抑制和低截获能力好、抗干扰性能强等优势, 近年来被广泛关注。

现有的多载波互补相位编码信号 MCPC (Multicarrier Complementary Phase Coded) 波形设计方法集中在调整子载波加权因子和相位编码来实现控制信号包络起伏<sup>[4]</sup>、改善信号自相关特性等方面。包络峰值平均功率比 PMEPR (Peak-to-Mean Envelope Power Ratio) 过高是 MCPC 信号一个不可忽视的主要缺点, 雷达信号包络起伏过大容易引起功率放大器产生非线性失真, 所产生的谐波会造成子载波间的相互干扰, 从而影响雷达的性能。此外, 具有高峰均比的 MCPC 信号极易被采用峰值功率检测法的传统截获接收机截获, 因此, 必须寻找方法降低信号 PMEPR。在减小信号包络起伏的同时降低信号自相关函数图的边锋和凸起, 同时对发射信号多方面进行改善, 可有效提高雷达在作战环境中的竞争力。

\*基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFCXXX201)

收稿日期: 2020-11-24 收修改稿日期: 2021-01-06

为了降低对功率放大器线性动态范围的要求，减小信号包络起伏并提高距离分辨力，本文首先将编码信号的主瓣峰值与最大旁瓣值比 PSLR (Peak-to-Sidelobe Level Ratio) 作为单独的评判依据，结合混沌序列类随机的性质，对混沌序列进行两级筛选，得到自相关函数旁瓣较低的混沌编码序列组。接着考虑 MCPC 信号结构的特点，应用 SCPSO 算法调整子载波权重因子来优化信号的 PMEPR。仿真结果验证了方法的有效性，生成的 MCPC-Chaos 信号形式类似噪声，其 PMEPR 能得到一定降低，自相关旁瓣较低且模糊函数具有类图钉特性。

### 1 基于混沌映射的多载频类随机相位编码雷达信号

#### 1.1 MCPC 信号模型

MCPC 信号同时发射  $N$  个子载波，并且每个子载波都是相位调制信号<sup>[5]</sup>。单脉冲 MCPC 信号复包络  $f(t)$  表达式为

$$f(t) = \begin{cases} \sum_{n=1}^N \omega_n s_n(t) \exp\left(j2\pi\left(n - \frac{N+1}{2}\right)\Delta f t\right), & 0 \leq t \leq Mt_b \\ 0 & t < 0, t > Mt_b \end{cases} \quad (1)$$

式中，

$$s_n(t) = \sum_{m=1}^M a_{n,m} s[t - (m-1)t_b] \quad (2)$$

$N$  为子载波个数，可根据实际需要进行调整以获取不同带宽的雷达信号； $M$  为码元个数； $a_{n,m} = e^{j\phi_{n,m}}$  为第  $n$  个子载波上第  $m$  个码元的相位编码， $|a_{n,m}| = 1$ ； $s(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < t_b \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$ ， $t_b$  为码元时宽， $\Delta f$  为载频间隔，为了最小限度地保证各载频之间的正交性，选取  $\Delta f = 1/t_b$ ； $\omega_n$  为各子载波的加权方式， $\omega_n = |\omega_n| e^{j\theta_n}$ ，功率约束为  $\sum_{n=0}^{N-1} |\omega_n|^2 = 1$ 。MCPC 信号结构如图 1 所示。

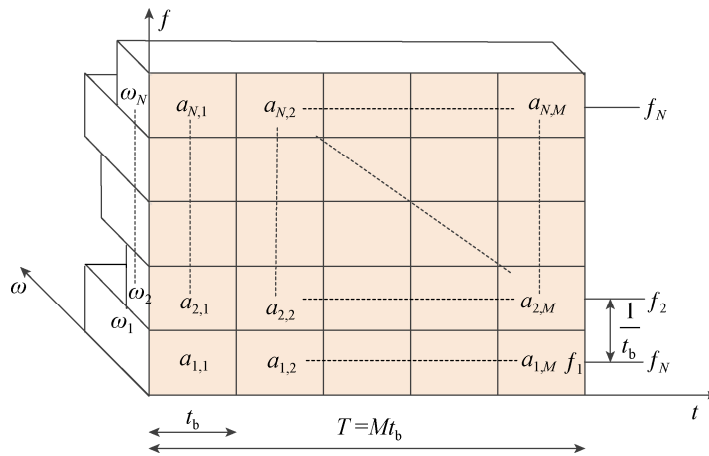


图 1 MCPC 信号结构示意图  
Fig. 1 MCPC signal structure diagram

#### 1.2 混沌二相编码 MCPC 信号

离散混沌系统较为简单，通常由一个（或一组）迭代方程（或方程组）组成，直接设置一个初值进行迭代即可产生混沌序列，其产生的序列是非周期的、不收敛的。混沌映射广泛应用于产生混沌二相码，通过选择不同的混沌映射函数组合和初值即可获得不同的编码信号形式，增加信号的不确定性、复杂性和设计灵活性，使信号的结构更类似于噪声，可更好地提高雷达的低截获、抗干扰性能。

本文采用改进型 Logistic 混沌映射产生 MCPC 信号的二相编码序列, 其数学表达式为

$$x_{n+1} = 1 - 2x_n^2 \quad x_n \in [-1, 1] \quad (3)$$

改进型 Logistic 映射具有初值敏感性, 映射初值发生细微变化就会导致生成序列完全不相关。因此, 变化混沌映射初值就可以产生大量互相关性较小的序列, 从而满足多个发射波形正交的要求。

首先, 选取  $N$  个初值  $x_n(0), n=1, 2, \dots, N$ , 经过式 (3) 预迭代后,  $N$  个序列进入混沌状态, 再将式 (3) 迭代  $M$  次, 生成  $N$  个长度为  $M$  的混沌序列。混沌序列组表示为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,M} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & x_{N,2} & \cdots & x_{N,M} \end{bmatrix}_{N \times M}$$

第  $n$  个序列的均值为

$$E_n = \frac{\sum_{m=1}^M x_{n,m}}{M} \quad (4)$$

每个序列根据其均值进行二值量化, 形成混沌二相编码  $\phi_{n,m}$ 。

$$\begin{cases} \phi_{n,m} = 1, & x_{n,m} \geq E_n \\ \phi_{n,m} = -1, & x_{n,m} < E_n \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $n=1, 2, \dots, N; m=1, 2, \dots, M$ 。

根据式  $\phi_{n,m} (m=1, 2, \dots, M)$  对 MCPC 信号第  $n$  个载波上的信号相位进行调制, 从而得到 MCPC-Chaos 信号。

## 2 MCPC-Chaos 雷达发射单脉冲优化

### 2.1 MCPC-Chaos 信号优化目标

本文对 MCPC-Chaos 雷达单脉冲的分析集中在波形优化上。首先定义目标函数, 其次通过调整 MCPC-Chaos 信号参数和变量进行优化过程。

MCPC-Chaos 信号有两个重要方面需要考虑, 首先是自相关函数的旁瓣值。对雷达性能而言, 压缩脉冲的旁瓣值越小越好, 所以, 在众多的 MCPC-Chaos 信号中, 可以舍弃有些自相关性能差的序列。本文第一个目标函数是自相关函数, 用  $R(\tau)$  来表示如下:

$$R(\tau) = \int_0^{MT_b} f(t)f^*(t-\tau)dt \quad (6)$$

离散形式为

$$R[k] = \sum_{p=1}^P f[p]f^*[p-k] \quad (7)$$

其中,  $f[p]$  表示以  $f_s$  采样率对 MCPC-Chaos 离散采样得到的离散信号值,  $P$  为最接近  $f_s \cdot Mt_b$  的整数,  $p$  取 0 到  $P-1$  之间的整数,  $k$  为  $-P+1$  到  $P-1$  之间的整数。在众多 MCPC 信号中, 以最好的自相关性能为准则, 选取主旁瓣比最大的作为多载波相位编码相位。本文基于编码信号的主瓣峰值与最大旁瓣值比 PSLR<sup>[6]</sup>对信号的自相关性能进行分析。

$$PSLR = \frac{\max_{k \in \text{旁瓣}} |R[k]|}{\max_{k \in \text{主瓣}} |R[k]|} \quad (8)$$

另一个改进方面是 PMEPR。MCPC-Chaos 雷达信号是在典型 OFDM 信号框架上加入混沌映射生成的二相编码, 因此继承了 OFDM 信号包络起伏大的特性。PMEPR 描绘了信号在时域上包络的变化, 信

号的 PMEPR 过大不但会导致经过功率放大器的信号失真，而且会增加信号被截获的概率，因此降低 PMEPR 显得尤为重要。

$$PMEPR = \frac{\max |x[p]|^2}{\frac{1}{P} \sum_{p=1}^P x[p]} \quad (9)$$

### 2.2 基于混沌序列筛选编码信号

同一混沌映射生成序列时由于映射初值、采样间隔和起始点不同，得到的混沌序列的自相关函数有很大的差别。混沌序列两级筛选流程如图 2 所示。首先，混沌映射的初值对其生成序列的自相关函数影响较大，可以在规定的范围内根据不同精度以不同初值映射得到  $Q$  个不同的长度为  $G \times M$  的序列，每个序列根据其均值进行门限量化后得到长二相编码序列，计算各个序列自相关函数的峰值旁瓣水平后从中选取  $N$  个自相关性能较好的长序列。另外，对于较好初值生成的自相关性能较好的长序列，采样生成的固定码长的二相编码的自相关性能也具有差异性。对每个长度为  $G \times M$  的序列进行等间隔采样，得到  $G$  个长度为  $M$  的编码序列， $N$  个长序列中的第  $g (g=1, 2, \dots, G)$  个编码序列按行置位组成混沌序列组  $\phi_g$ 。根据自相关性最大准则，选出行平均 PSLR 最小的  $\phi_{\min}$  调制 MCPC-Chaos 信号相位。

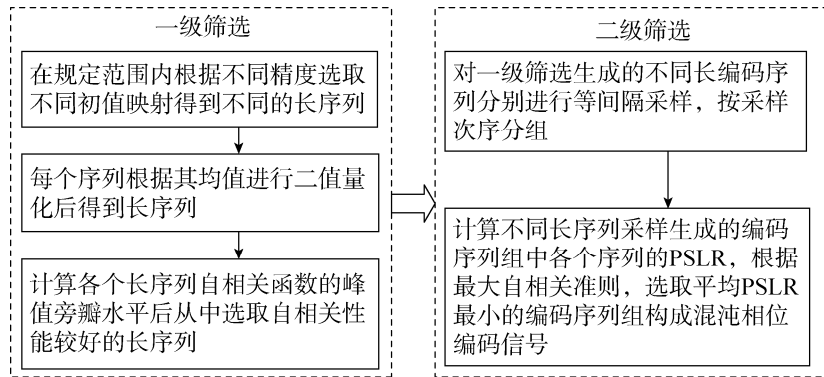


图 2 混沌序列两级筛选流程

Fig. 2 Two stage screening process of chaotic sequences

### 2.3 基于 SCPSO 算法优化信号的 PMEPR

考虑 MCPC-Chaos 信号结构的特点，本文采用调整子载波权重因子  $\omega_n$  的方法，将 PMEPR 作为单独的优化目标函数，在功率约束的前提下应用 SCPSO 算法得到尽可能低的 PMEPR。

作为群智能优化算法，粒子群 (PSO) 算法首先在目标空间内随机初始化种群。种群中每个粒子代表优化问题中的一个可能解，对应着一个由优化函数决定的适应值，其空间位置和“飞行”速度均用向量来表示。在每次寻优迭代中，每个粒子通过自身找到的最优解和在整个种群中目前找到的最优解来更新飞行速度和空间位置。SCPSO 算法的数学描述如下：

设种群规模为  $S$ ，搜索维数为  $N$ ，第  $i (i=1, 2, \dots, S)$  个粒子的位置为  $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})$ ，速度为  $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN})$ ，粒子所经历的最优位置为  $\mathbf{p}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iN})$ ，种群所经历的全局最优位置为  $\mathbf{pg} = (pg_1, pg_2, \dots, pg_N)$ 。每个粒子的飞行速度和位置分别按如式 (10)、式 (11) 更新：

$$\mathbf{v}_{ij}^{d+1} = w\mathbf{v}_{ij}^d + c_1r_1^d (\mathbf{p}_{ij}^d - \mathbf{x}_{ij}^d) + c_2r_2^d (\mathbf{pg}_j^d - \mathbf{x}_{ij}^d) \quad (10)$$

$$\mathbf{x}_{ij}^{d+1} = \mathbf{x}_{ij}^d + \mathbf{v}_{ij}^{d+1} \quad (11)$$

其中， $d$  为当前迭代次数； $w$  为使粒子保持运动惯性的惯性权重，使其有扩展搜索空间的趋势，对算法的全局与局部搜索能力有着很大的影响。大的惯性权重有利于全局搜索，小的惯性权重有利于局部搜索，本文应用式 (12) 线性递减的惯性权重：

$$\omega = \omega_{\max} - d \times \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})}{d_{\max}} \quad (12)$$

其中,  $d_{\max}$  为算法迭代总数;  $c_1$  和  $c_2$  为学习因子, 也称加速常数, 可调节个体最好粒子和全局最好粒子飞行的最大步长, 通常取  $c_1 = c_2 = 2$ ;  $r_1^0$  和  $r_2^0$  是介于  $[0,1]$  之间的随机数,  $r_1^d$  和  $r_2^d$  通过 Lyapunov 指数为  $4\pi$  的混沌映射式 (13) 迭代计算<sup>[7]</sup>:

$$r^{d+1} = \frac{[\sin(8 \times \pi \times r^d) + 1]^2}{4} \quad (13)$$

将混沌映射融入 PSO 算法, 有利于种群搜索全局最优点, 提高算法的全局搜索能力。

与传统 PSO 算法不同, 为加强种群的多样性、避免算法在搜索中陷入局部最优, 除了更新惯性权重  $\omega$  和  $r_1^d$ 、 $r_2^d$  外, SCPSO 算法还引入自适应变异和杂交。自适应变异具体操作如下: 在每次迭代中, 产生一个随机数  $c$ , 若  $c < pm$ , 则执行式 (14) 完成变异操作:

$$pg = pg \times rand \quad (14)$$

其中,  $rand$  表示  $(0,1)$  上的均匀分布的随机数。通过该随机扰动, 粒子能够跳出局部最优并朝着全局最优的方向进化; 自适应杂交操作借鉴了遗传算法中杂交的概念, 在每次迭代中, 根据杂交率  $bs$  选取指定数量的粒子放入杂交池内, 池内的粒子随机两两杂交, 产生同样数目的子代粒子, 并用于代替父代粒子。子代位置由父代位置进行交叉得到:

$$cx = i \times dx(1) + (1-i) \times dx(2) \quad (15)$$

其中,  $cx$  为子代粒子的位置;  $dx$  为父代粒子的位置;  $i$  为  $0$  到  $1$  之间的随机数。子代的速度公式为

$$cv = \frac{dv(1) + dv(2)}{|dv(1) + dv(2)|} |dv| \quad (16)$$

其中,  $cv$  为子代粒子的速度;  $dv$  为父代粒子的速度。SCPSO 算法具体操作流程如图 3 所示。

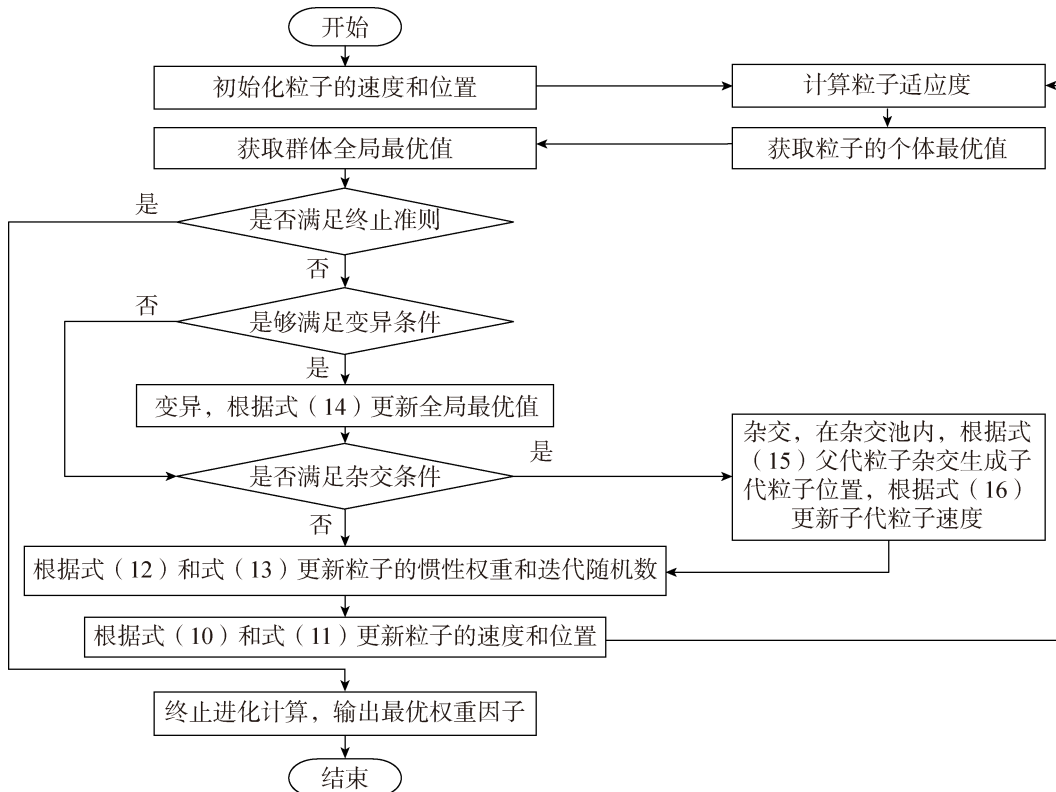


图 3 SCPSO 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of SCPSO algorithm operation

### 3 仿真结果与分析

本文首先通过筛选得到 PSLR 较小的混沌二相编码序列, 进而通过调整 MCPC-Chaos 信号的子载波权重来降低信号的 PMEPR, 设计灵活, 实现较为容易。其中, MCPC-Chaos 信号参数设置如下: 子载波数  $N=5$ , 混沌二相编码长度  $M=5$ ,  $t_b = 0.1\mu s$ 。

将编码序列的 PSLR 作为评判依据, 通过二次筛选得到 PSLR 较好的混沌二相编码序列 (筛选前混沌映射初值经 200 次预迭代), 结果如图 4 所示。

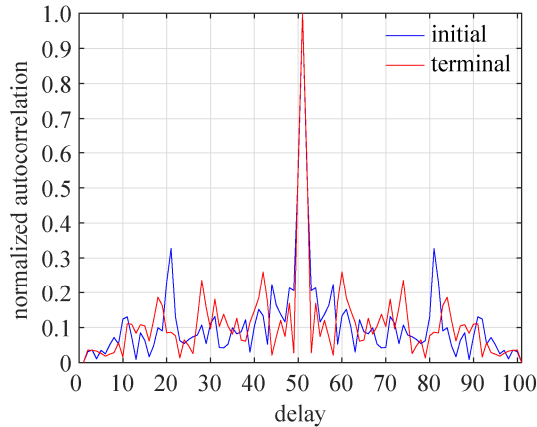


图 4 两级筛选前后载频等权重混沌二相编码信号自相关函数图

Fig. 4 Signal autocorrelation function before and after screening

将 PSLR 作为单独优化目标, SCPSO 算法参数设置如下: 粒子群数为  $S=50$ , 搜索维数为  $N=5$ , 学习因子为  $c1=2$ ,  $c2=2$ , 惯性权重为  $w_{max} = 0.8$ ,  $w_{min} = 0.2$ , 杂交概率  $pm = 0.05$ , 终止准则  $PMEPR < 2$ 。结果如下: 从图 5、图 6 可以看出, 采用 SCPSO 算法调整 MCPC 信号的子载波权重可以使 PMEPR 下降。初始选用  $\omega_n = 1/\sqrt{N}$  (满足功率约束),  $PMEPR = 7.94\text{dB}$ 。迭代至第 3 代时, 信号的子载波权重为  $\omega = [-0.1069 - 0.2282 \ 0.1091 \ 0.6441 \ 0.7140]$ , PMEPR 下降 6.80dB 左右,  $PMEPR = 1.14\text{dB}$ 。优化后的时域信号结构类似于噪声, 比初始时域信号起伏更加平稳。同时, 从图 7、图 8 可以看出, 最后生成的 MCPC 信号自相关函数主瓣较窄且旁瓣值较低,  $PSLR = -5.85\text{dB}$ , 模糊函数具有类图钉特性。

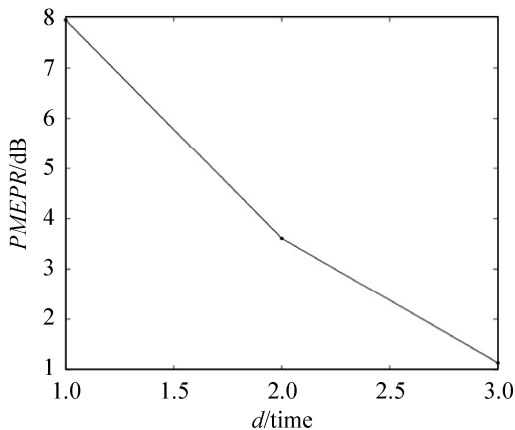


图 5 应用 SCPSO 算法优化 PMEPR  
Fig. 5 Optimization of PMEPR by SCPSO

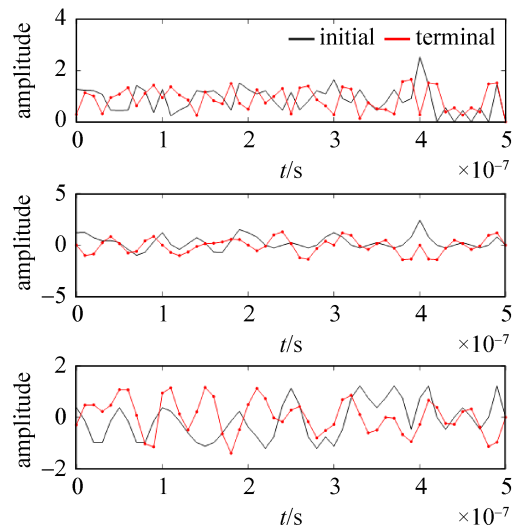


图 6 优化 PMEPR 后时域信号  
Fig. 6 Time domain signal optimized by PMEPR

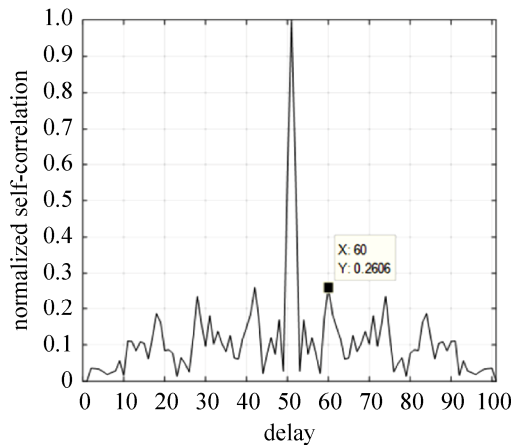


图 7 优化 PMEPR 后信号自相关函数图

Fig. 7 Signal ACF graph optimized by PMEPR

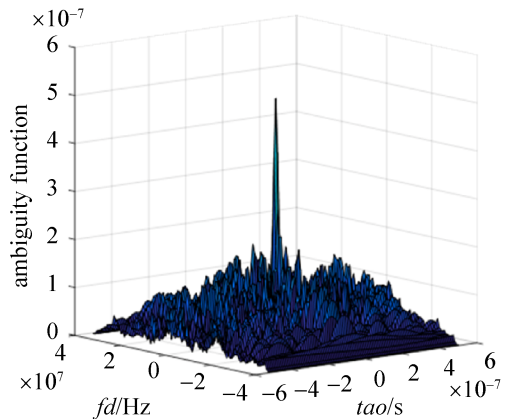


图 8 优化 PMEPR 后信号模糊函数图

Fig. 8 Signal AF graph optimized by PMEPR

#### 4 结束语

本文通过混沌序列两级筛选和调整 MCPC 信号的子载波权重对发射波形进行设计。首先, 以编码信号的 PSLR 为评判依据, 筛选优质的混沌编码序列构造 MCPC-Chaos 雷达信号模型; 其次, 将 PMEPR 作为约束条件, 采用 SCPSO 算法对波形进行优化。本文方法在保证 MCPC 信号自相关特性的情况下, 改善雷达信号包络峰均比, 有利于减小包络起伏, 优化后的 MCPC-Chaos 雷达信号结构类似噪声, 模糊函数呈现类图钉特性, 具有实际应用价值。

#### 参考文献

- [1] JANKIRAMAN M, WESSELS B J, VAN G P. Design of a multifrequency FMCW radar[C]. The 28th European Microwave Conference, 1998: 548–589.
- [2] JANKIRAMAN M, WESSELS B J, VAN G P. Pandora multifrequency FMCW/SFCW radar[C]. IEEE National Radar Conference, 2000: 750–757.
- [3] LEVANON N. Multifrequency radar signals[C]. IEEE International Radar Conference, 2000: 683–688.
- [4] DENG Bin. Ambiguity function analysis for MCPC radar signal[C]. International Conference on Industrial Mechatronics and Automation, 2010: 650–653.
- [5] MOZESON E, LEVANON N. Multicarrier radar signals with low peak-to-mean envelope power ratio[J]. IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2008, 150(2): 71–77.
- [6] LEVANON N, MOZESON E. Radar signals[M]. New York: Wiley InterScience, 2004.
- [7] 李建美, 高兴宝. 基于自适应变异的混沌粒子群优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(10): 44–49.  
LI Jianmei, GAO Xingbao. Chaotic particle swarm optimization algorithm with adaptive mutation[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(10): 44–49.

#### [作者简介]

- 刘雅静 1996 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理。  
 张振华 1977 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷达信号处理。  
 陈浩川 1979 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为雷达信号处理。  
 张 彬 1981 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为雷达信号处理。  
 张剑琦 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为雷达信号处理。