



## WFRFT 认知通信系统控制参数联合优化方法研究

杜欣军, 刘鹏飞

(中国电子科技集团公司第三十二研究所, 上海 201808)

**摘要:** 针对 WFRFT 系统难以适应复杂电磁环境及最优控制参数难以选取的问题, 提出一种新型 WFRFT 认知通信系统构建方法。在传统 WFRFT 通信系统的基础上引入信号认知模块, 完成电磁信号的采集及电磁环境中目标信号调制特征的识别。根据 WFRFT 信号调制特征裂变的特性, 分析控制参数间的耦合作用机理, 并设定优化控制参数的目标。将目标信号调制特征参数引入到 WFRFT 控制参数优化模型中, 提出基于目标特征的 WFRFT 认知通信系统控制参数联合优化方法, 并通过粒子群算法的迭代计算, 选取最优控制参数集, 针对最优参数的 WFRFT 认知通信系统, 分别仿真计算高斯、莱斯、瑞利等典型信道条件下的误码率性能。实验结果表明, 该方法可伪装信号调制特征, 能有效提高通信信号的安全性, 且在典型信道条件下的误码率性能较好, 具有较好的抗干扰能力。

**关键词:** 变换域通信; 加权分数阶傅里叶变换; 认知通信; 粒子群算法; 安全通信

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 杜欣军, 刘鹏飞. WFRFT 认知通信系统控制参数联合优化方法研究[J]. 计算机工程, 2021, 47(12): 177-184.

英文引用格式: DU X J, LIU P F. Research on joint optimization method of control parameters in WFRFT cognitive communication system[J]. Computer Engineering, 2021, 47(12): 177-184.

## Research on Joint Optimization Method of Control Parameters in WFRFT Cognitive Communication System

DU Xinjun, LIU Pengfei

(The 32nd Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 201808, China)

**[Abstract]** To deal with the selection of the optimal control parameters in Weighted Fractional Fourier Transform (WFRFT), this paper constructs a novel WFRFT cognitive communication system. On the basis of the traditional WFRFT communication system, a signal recognition module is introduced to realize the recognition of the modulation characteristics of target signals in the electromagnetic environment. At the same time, according to the fission characteristics of the modulation characteristics of WFRFT signals, the coupling mechanism between the control parameters is deeply analyzed, and the goal of control parameter optimization is set. On this basis, the parameters of target signal modulation characteristics are introduced into the optimization model for WFRFT control parameters, so as to form a joint optimization method of control parameters in a WFRFT cognitive communication system based on target characteristics. In addition, the optimal control parameter set is selected through the iterative calculation of the particle swarm algorithm. For the WFRFT cognitive communication system with optimal parameters, the Bit Error Ratio (BER) performance under typical channel conditions such as Gaussian, Rice and Rayleigh are simulated. The experimental results show that the proposed method can realize the camouflage of signal modulation characteristics, and effectively improve the security of communication signals. At the same time, the WFRFT system displays good anti-interference ability, and provides excellent BER performance under typical channel conditions, so it can effectively meet the requirements of engineering applications.

**[Key words]** transform domain communication; Weighted Fractional Fourier Transform (WFRFT); cognitive communication; particle swarm algorithm; secure communication

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0059768

### 0 概述

随着传感器技术的快速发展, 无源探测对飞行器

安全造成的威胁越来越严重。以美国 F-22 战斗机为例, 其装备的无源探测系统最大探测距离达 460 km 以上, 已远大于机载火控雷达 200 km 的作用距离, 无源系统

基金项目: 国家部委基金。

作者简介: 杜欣军 (1974—), 男, 研究员、博士, 主研方向为网络安全、认知通信; 刘鹏飞, 高级工程师、硕士。

收稿日期: 2020-10-20 修回日期: 2021-03-10 E-mail: 18019283020@163.com

将是未来战争中首先发现目标的探测系统<sup>[1-3]</sup>。机载通信系统由于需要在任务周期内不间断工作,暴露风险巨大,因此亟需对其开展抗截获设计。

加权分数阶傅里叶变换(Weighted Fractional Fourier Transform, WFRFT)方法是近年来提出的一种新型通信方法,该方法通过在WFRFT变换域内对信号特征进行处理,使对抗方难以在传统时频域内处理和分析我方信号,从而显著提高通信信号的安全性。同时,WFRFT变换域方法还可实现调制信号星座图的扩散、旋转和分裂,从而改变原始信号调制特征,并将其模拟为其他调制类型信号,进一步提高通信信号的安全性能,因此受到国内外研究人员的广泛关注。DA等<sup>[4]</sup>提出加权傅里叶变换域的通信系统,通过改变加权傅里叶域的信号参数,提高通信信号的低截获能力。LI等<sup>[5]</sup>提出加权分数傅里叶域的双天线发送方法,利用加权分数傅里叶域的信息调制和合成,改善了多天线系统的误码率性能。FANG等<sup>[6]</sup>针对加权傅里叶变换域系统的物理层统计特征,实现了物理层认证和物理层安全传输。

国内外研究人员针对加权分数阶傅里叶域通信系统已有较多研究,主要集中在变换域通信系统设计、调制特征变化原理分析等方面,有效推动了WFRFT方法的发展。WFRFT方法可将原始信号伪装为电磁环境中的目标信号,提高信号抗截获能力。为保证伪装效果,调制特征伪装后的目标信号必须能够适应外界电磁环境变化,与电磁环境中已有信号的调制特征保持一致。然而,现有研究主要集中在WFRFT调制特征伪装的机理和方法,尚未考虑电磁环境中目标信号的调制特征及其变换情况。因此,现有WFRFT伪装信号难以适应实际战场的复杂电磁环境,具有较大的局限性。此外,WFRFT方法通过调整变换域的控制参数,虽然可以实现通信信号的调制特征伪装,但是WFRFT系统涉及的控制参数多,参数耦合性强,最优参数集设计十分困难。特别是引入电磁环境中的目标信号特征后,需考虑的设计约束条件更加复杂。因此,传统的WFRFT系统参数选取方法难以适应日趋复杂的信号伪装要求,严重制约了该方法的深入发展。

本文针对传统WFRFT伪装信号难以适应复杂电磁环境的难题,在传统WFRFT信号的基础上将认知获取的信号调制特征作为约束条件,并参与WFRFT控制参数的联合优化,提出基于目标特征的WFRFT认知通信系统控制参数联合优化方法,以实现信号调制特征伪装,提高通信信号的抗截获性能。

## 1 WFRFT认知通信系统

WFRFT信号通过调制特征伪装设计,将原始信号伪装为电磁环境中已有的公开信号,以降低截获

方敏感程度,实现我方安全通信。因此,WFRFT方法的关键是伪装的目标信号需要与电磁环境中已有的公开信号完全一致。这就要求WFRFT系统必须搭建WFRFT认知通信,具备电磁环境认知能力系统。

### 1.1 传统WFRFT通信系统

WFRFT信号通过在加权分数阶傅里叶变换域内对信号的调制特征进行处理<sup>[7-9]</sup>,从物理层改变信号特征,使截获方难以在传统时频分析域内分析和处理信号,从而提高通信信号的安全性。

WFRFT通信系统在基带调制的基础上,增加了加权分数阶傅里叶变换模块,形成了WFRFT信号的复合调制机制,调制后信号通过正交上变频生成射频信号对外辐射,接收方经正交下变频形成通信基带信号,通过相应的加权分数阶傅里叶逆变换和传统基带解调,生成解译后的有效通信数据。

### 1.2 WFRFT认知通信系统

为使WFRFT通信系统适应电磁环境中的目标信号,本文在传统WFRFT系统基础上加入通信信号认知识别单元。该单元首先完成电磁信号的采集与目标信号的调制特征识别,从而为WFRFT变换域调制提供目标信号的约束条件。

WFRFT认知通信系统发射机框架及接收机框分别如图1、图2所示。

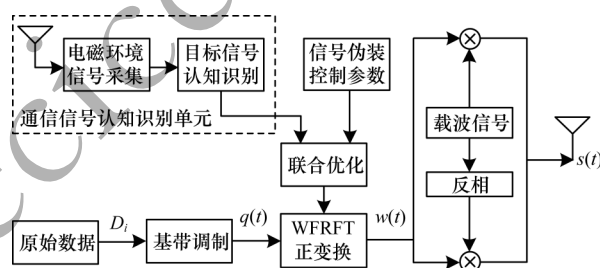


图1 WFRFT认知通信发射机框架

Fig.1 Block of WFRFT cognitive communication transmitter

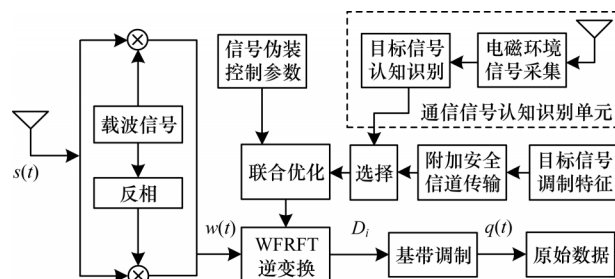


图2 WFRFT认知通信接收机框架

Fig.2 Block of WFRFT cognitive communication receiver

WFRFT认知通信接收机需要获知发射机选用的目标信号调制特征后,才能进行控制参数的联合优化,选取最优参数集进行WFRFT逆变换。由于电

磁环境与收发双方通信距离关系较大,当通信距离较近时,收发机附近的电磁环境可认为一致,当通信距离较远时,收发机附近的电磁环境则有较大区别,接收机认知系统无法获取正确的目标信号调制特征参数。因此,WFRFT认知通信接收机设计两种工作模式,当收发机通信距离较近时,目标信号调制特征参数可由接收机的目标信号认知识别单元获得,或者由发射机通过附加安全信道传输给接收机;当收发机通信距离较远时,目标信号调制特征参数选用附加安全信道传输的参数。

### 1.3 目标信号认知识别

目标信号认知识别是WFRFT认知通信系统的重要组成部分,其主要完成电磁环境中通信信号调制方式的识别。现有的调制识别方法主要分为基于似然比判决方法和基于统计模式的识别方法。基于统计模式的识别方法主要基于接收信号的各类统计特征完成信号识别,更易于工程实现。

高阶累积量调制识别<sup>[10-12]</sup>是一种基于统计模式的识别方法,调制信号的高阶累积量包含信号的星座图信息,而WFRFT方法主要是对通信信号的星座图特征进行重编辑。因此,高阶累积量调制识别十分适用于WFRFT通信系统的目标信号认知识别。

定义 $k$ 维随机矢量为 $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_k]^T$ 的特征函数为:

$$\Phi(\omega) = E(e^{j\omega^T \mathbf{x}}) = E(e^{j(\omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \dots + \omega_k x_k)}) \quad (1)$$

其中, $\omega=(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k)^T$ ,则随机矢量 $\mathbf{x}$ 的第二特征函数为:

$$\Psi(\omega) = \ln \Phi(\omega) = \ln E(e^{j\omega^T \mathbf{x}}) \quad (2)$$

随机矢量 $\mathbf{x}$ 的 $r=v_1+v_2+\dots+v_k$ 阶矩为:

$$m_{v_1 v_2 \dots v_k} = (-j)^r \frac{\partial^r \Phi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k)}{\partial \omega_1^{v_1} \partial \omega_2^{v_2} \dots \partial \omega_k^{v_k}} \bigg|_{\omega_1=\omega_2=\dots=\omega_k=0} \quad (3)$$

随机矢量 $\mathbf{x}$ 的 $r=v_1+v_2+\dots+v_k$ 阶累积量为:

$$c_{v_1 v_2 \dots v_k} = (-j)^r \frac{\partial^r \Psi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k)}{\partial \omega_1^{v_1} \partial \omega_2^{v_2} \dots \partial \omega_k^{v_k}} \bigg|_{\omega_1=\omega_2=\dots=\omega_k=0} \quad (4)$$

根据上述定义,对于零均值复随机过程 $X(k)$ ,令其混合 $p$ 阶矩为 $M_{pq} = E[x(n)^{p-q} x^*(n)^q]$ ,可得 $X(k)$ 的各高阶累积量为:

$$c_{20} = M_{20} \quad (5)$$

$$c_{21} = M_{21} \quad (6)$$

$$c_{40} = M_{40} - 3M_{20}^2 \quad (7)$$

$$c_{41} = M_{41} - 3M_{21}M_{20} \quad (8)$$

$$c_{42} = M_{42} - |M_{20}|^2 - 2M_{21}^2 \quad (9)$$

由上述高阶累积量,可以获得通信信号的调制类型,部分调制方式的高阶累积量期望值如表1所示。

表1 部分调制方式的高阶累积量期望值

Table 1 Expected values of higher-order cumulants for some modulation methods

信号类型	$c_{20}$	$c_{21}$	$c_{40}$	$c_{41}$	$c_{42}$
2ASK	$E$	$E$	$2E^2$	$2E^2$	$2E^2$
4ASK	$E$	$E$	$1.36E^2$	$1.36E^2$	$1.36E^2$
2FSK	0	$E$	0	0	$E^2$
4FSK	0	$E$	0	0	$E^2$
BPSK	$E$	$E$	$2E^2$	$2E^2$	$2E^2$
QPSK	0	$E$	$E^2$	0	$E^2$
16QAM	0	$E$	$0.68E^2$	$0.68E^2$	$0.68E^2$
32QAM	0	$E$	$0.19E^2$	$0.69E^2$	$0.69E^2$

## 2 WFRFT系统控制参数

通信信号的调制特征可以通过信号星座图来直观反映,因此,信号星座图可作为调制特征的衡量方式。WFRFT信号的调制特征处理方法主要包括信号特征的扩散、旋转和分裂,这些处理方法主要通过控制WFRFT信号参数加以实现。本节将重点研究WFRFT的基本原理和控制参数。

### 2.1 基本原理

由于离散傅里叶变换的周期为4,以4为加权系数的4-WFRFT信号研究相对较多,4-WFRFT定义如式(10)所示:

$$F_{4W}^{\alpha,V}(X_0) = r_0^{\alpha,V} X_0 + r_1^{\alpha,V} X_1 + r_2^{\alpha,V} X_2 + r_3^{\alpha,V} X_3 \quad (10)$$

其中: $X_0, X_1, X_2$ 和 $X_3$ 分别为序列 $X_0$ 的0~3次离散傅里叶变换; $r_l$ 为加权系数,定义如式(11)所示:

$$r_l(\alpha, V) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \exp\left(\pm \frac{2\pi i}{M} [(Mm_k + 1)\alpha(k + Mn_k) - lk]\right) \quad (11)$$

其中: $\alpha$ 为变换角度; $M$ 为加权项数; $m_k, n_k$ 分别为 $M_V=[m_0, m_1, \dots, m_{M-1}]$ 和 $N_V=[n_0, n_1, \dots, n_{M-1}]$ 中的第 $k$ 个元素, $V=[M_V, N_V]$ 。在4-WFRFT系统中,加权项数 $M=4$ , $\alpha$ 和 $V$ 共有9个控制参数。

若 $Y_0 = F_{4W}^{\alpha,V}(X_0)$ ,则4-WFRFT的逆变换定义如式(12)所示:

$$X_0 = F_{4W}^{-\alpha,V}(Y_0) = r_0^{-\alpha,V} Y_0 + r_1^{-\alpha,V} Y_1 + r_2^{-\alpha,V} Y_2 + r_3^{-\alpha,V} Y_3 \quad (12)$$

由 $X_0, X_1, X_2, X_3$ 的关系可知, $Y_0, Y_1, Y_2, Y_3$ 分别为 $Y_0$ 的0~3次离散傅里叶变换。

### 2.2 控制参数

由2.1节可知,4-WFRFT信号的控制参数包括 $\alpha$ 和 $V$ ,其中 $V=[m_0, m_1, m_2, m_3, n_0, n_1, n_2, n_3]$ ,共计9个控制参数<sup>[13]</sup>。通过设置不同的参数取值,可以实现



4-WFRFT信号调制特征的扩散、旋转和分裂。

在上述控制参数中,变换角度 $\alpha$ 主要影响调制特征的扩散和旋转特性,而4-WFRFT信号最重要的裂变特性则由9个参数共同控制,其信号调制机制较为复杂,定义裂变函数 $J_a^V(X)$ 如式(13)所示:

$$J_a^V(X) = r_0^{a,V} X_0 + r_2^{a,V} X_2 \quad (13)$$

通过设置控制参数 $\alpha$ 和 $V$ 的不同取值,可产生不同的加权系数 $r_0^{a,V}$ 和 $r_2^{a,V}$ ,进而在信号复平面上形成不同的信号聚集点,实现信号调制特征的改变。信号调制星座图伪装特性如图3所示。

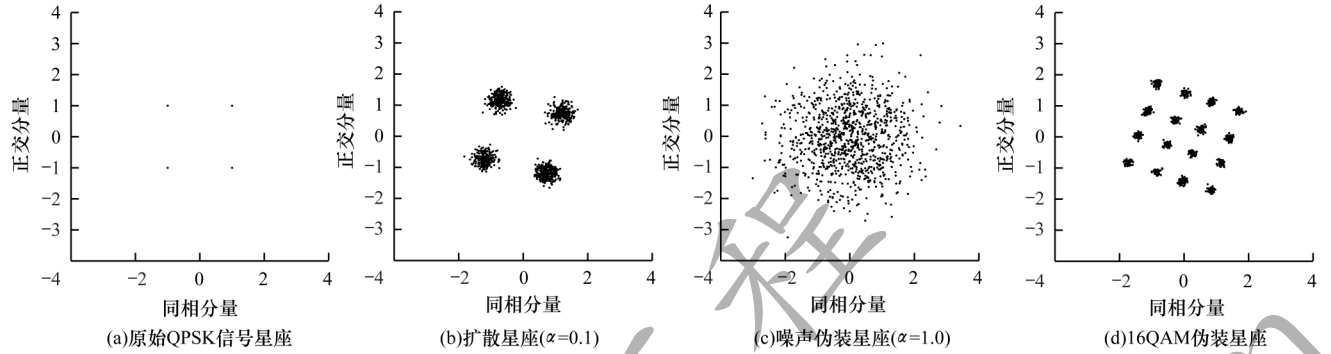


图3 信号调制星座图的伪装特性仿真图

Fig.3 Simulation diagram of camouflage characteristics of signal modulation constellation

通过精确的参数设置,可将原始信号调制特征精确模拟为目标信号。由于加权系数 $r_0^{a,V}$ 和 $r_2^{a,V}$ 对信号复平面的聚集点分布起着决定性作用,为便于定量分析加权系数的效果,定义加权系数因子如式(14)所示:

$$\eta = |r_0^{a,V}| / |r_2^{a,V}| \quad (14)$$

通过调整控制参数 $\alpha$ 和 $V$ ,可以定量计算不同加权系数因子条件下的信号调制特征分裂效果,从而选取最优的控制参数,实现信号调制特征的可控变化。

### 3 WFRFT认知通信系统控制参数联合优化

相较于传统WFRFT系统,WFRFT认知通信系统将目标信号特征引入到优化过程,将目标信号调制特征和WFRFT控制参数进行联合优化。

目标信号调制特征可以通过第1节的目标信号认知识别获得。WFRFT信号伪装的关键是对9个控制参数进行优化设计,使信号的星座图裂变特性与目标信号调制特性一致。由于联合优化方法涉及的控制参数较多,参数间耦合性强,难以通过传统试凑方法实现。因此,本节引入粒子群优化算法,实现目标信号调制特征和WFRFT信号控制参数的联合优化。

#### 3.1 目标信号调制特征与控制参数联合优化原理

本文将目标信号调制方式作为算法输入的调制特征,由于不同调制方式的星座图特征存在较大区别,因此联合优化方法需要根据目标信号的星座图特征设计WFRFT信号控制参数,从而使WFRFT伪装信号的星座图与目标信号一致。目标信号调制特征与控制参数联合优化方法流程见图4。

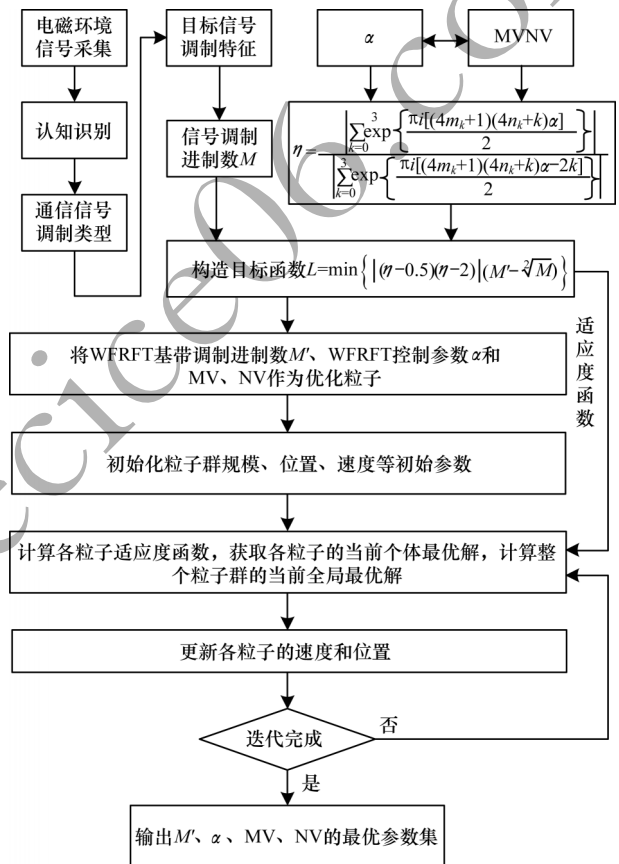


图4 目标信号调制特征与控制参数联合优化流程

Fig.4 Procedure of joint optimization of target signal modulation characteristics and control parameters

#### 3.2 目标函数构造

$X_0$ 和 $X_2$ 对应了信号的时域分量部分,通过两者的相互作用,可以构成不同的星座点分裂特点,由式(11)和式(14)可得:

$$\eta = \frac{\left| \sum_{k=0}^3 \exp \left\{ \frac{\pi i [(4m_k + 1)(4n_k + k)\alpha]}{2} \right\} \right|}{\left| \sum_{k=0}^3 \exp \left\{ \frac{\pi i [(4m_k + 1)(4n_k + k)\alpha - 2k]}{2} \right\} \right|} \quad (15)$$

当  $\eta \in [0.5, 2]$  时,星座点可实现较均匀分布,当  $\eta$  为端点值 0.5 或 2 时,可以使分裂后的星座调制特征的完全均匀分布,因此,设置优化目标函数如式(16)所示:

$$L = \min |(\eta - 0.5)(\eta - 2)| \quad (16)$$

由于 WFRFT 主要通过裂变实现星座图伪装,因此 WFRFT 方法的基带调制方式与目标信号调制方式应当满足裂变规律。当目标信号调制方式为  $M$  进制时, WFRFT 方法的基带调制进制数  $M'$  应满足如式(17)要求:

$$M' = \sqrt[3]{M} \quad (17)$$

因此,可将式(16)目标函数改写为:

$$L = \min |(\eta - 0.5)(\eta - 2)| (M' - \sqrt[3]{M}) \quad (18)$$

### 3.3 粒子群优化算法

粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法<sup>[14-16]</sup>是 KENNEDY 和 EBERHART 提出的群体智能算法。PSO 算法受鸟群觅食行为启发,将群体中的所有个体均抽象为粒子,粒子在搜索空间中通过学习机制寻找最优解,并不断更新自己的速度和位置,其更新的速度和位置公式分别如式(19)和式(20)所示:

$$u_i^d(t+1) = w u_i^d(t) + c_1 k_1 (pbest_i^d(t) - x_i^d(t)) + c_2 k_2 (gbest_i^d(t) - x_i^d(t)) \quad (19)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + u_i^d(t+1) \quad (20)$$

其中:  $t$  为群体当前迭代的代数;  $w$  为惯性权重;  $c_1$  和  $c_2$  为加速度常数;  $k_1$  和  $k_2$  为随机数;  $u_i^d(t)$  和  $x_i^d(t)$  为当前粒子的速度和位置;  $pbest_i^d(t)$  代表粒子本身经历的最好位置;  $gbest_i^d(t)$  代表群体经历的最好位置。

### 3.4 计算模型优化

调用粒子群优化算法,将 WFRFT 基带调制进制数  $M'$  和 WFRFT 系统的 9 个控制参数( $\alpha$  和  $V$ )作为优化粒子,以式(18)作为粒子群算法的适应度函数,经过迭代计算,搜寻  $\eta$  和  $M'$  符合适应度函数最小时的  $M'$ 、 $\alpha$  和  $V = [m_0, m_1, m_2, m_3, n_0, n_1, n_2, n_3]$  的最优解集合。

## 4 实验结果与分析

为验证本文所提 WFRFT 认知通信系统控制参数联合优化方法的有效性,针对 WFRFT 认知通信系统的认知识别单元性能进行了仿真实验。对 WFRFT 认知通信系统的信号伪装性能进行仿真计算,对比采用粒子群优化方法和未采用优化方法的星座图伪装效果,并针对最优参数集,仿真计算了高斯<sup>[17-19]</sup>、莱斯<sup>[20-21]</sup>和瑞利信道条件<sup>[22-23]</sup>下 WFRFT 信号误码率性能。

### 4.1 WFRFT 认知通信系统认知识别单元仿真

分别设置电磁环境中目标信号为 QPSK 和 16QAM 调制信号,信号码速率 10 Mb/s,发射频点为

1 500 MHz,目标信号的调制星座图和时域波形如图 5 的图 6 所示。

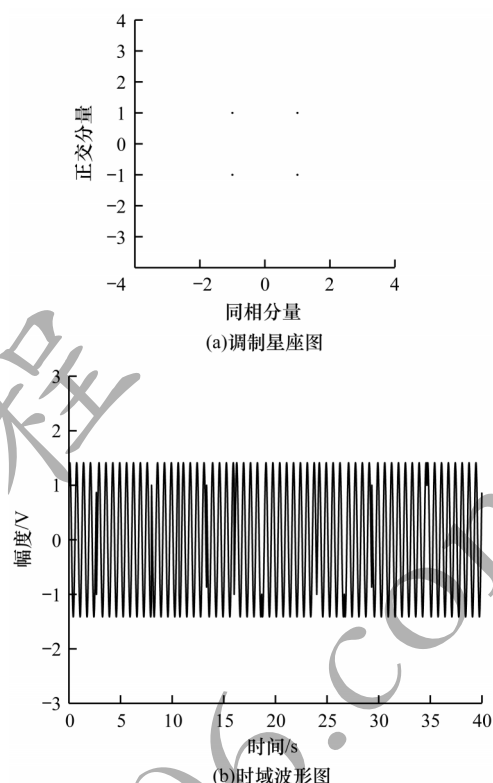


图5 QPSK 目标信号仿真

Fig.5 QPSK target signal simulation

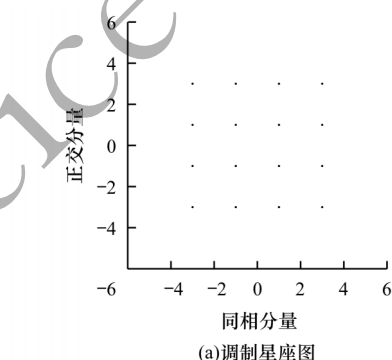


图6 16QAM 目标信号仿真

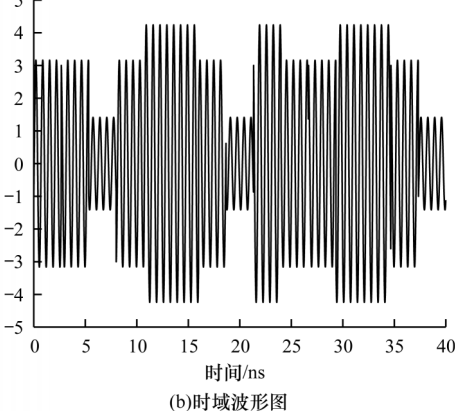


图6 16QAM 目标信号仿真

Fig.6 16QAM target signal simulation

对目标信号进行高阶累积量仿真计算,高阶累积量结果如表2所示。

表2 高阶累积量仿真结果

Table 2 Simulation results of high-order cumulants

调制类型	期望值	仿真值
QPSK	> 14	14.8
16QAM	0~14	12.9

由上述仿真结果可知,WFRFT认知通信系统的认知识别单元可以正确识别出电磁环境中的目标信号调制特征。

#### 4.2 WFRFT认知通信系统伪装性能仿真

以4.1节中的16QAM信号为目标信号,进行WFRFT认知通信系统的信号伪装性能仿真。首先计算WFRFT控制参数的最优参数集,目标信号为QPSK调制,则 $M=16$ ,将 $M'$ 、 $\alpha$ 和 $V$ 作为优化参数,以式(18)为目标函数,经过粒子群算法迭代优化,计算可得最优参数集如表3所示。

表3 最优控制参数

Table 3 Optimal control parameters

参数名称	$\eta=0.5$	$\eta=2$
$\alpha$	0.72	0.05
$m_0$	10.00	0.00
$m_1$	4.00	2.00
$m_2$	10.00	10.00
$m_3$	9.00	3.00
$n_0$	4.00	10.00
$n_1$	7.00	9.00
$n_2$	2.00	4.00
$n_3$	5.00	9.00
$M'$	4.00	4.00

将最优控制参数集代入WFRFT变换单元,产生星座图裂变效果,实现目标信号的调制特征伪装。最优参数集条件下的WFRFT伪装星座如图7和图8所示。其中,图7的参数为: $M'=4$ , $\alpha=0.72$ , $M_v=[10,4,10,9]$ , $N_v=[4,7,2,5]$ ;图8的参数为: $M'=4$ , $\alpha=0.05$ , $M_v=[0,2,10,3]$ , $N_v=[10,9,4,9]$ 。

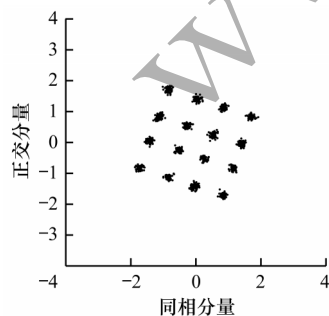


图7 星座图裂变仿真1

Fig.7 Constellation fission simulation 1

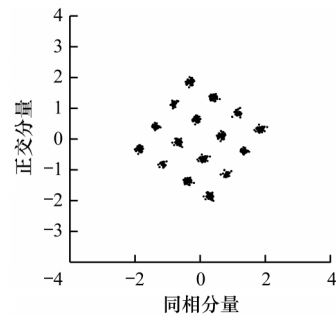


图8 星座图裂变仿真图2

Fig.8 Constellation fission simulation 2

由上述仿真结果可知,利用本文所提方法可以获得与目标信号星座图一致的伪装信号。

为验证本文所提联合优化方法的有效性,进一步对随机控制参数的星座图分裂效果进行仿真计算,其产生的星座图如图9和图10所示。其中,图9的参数是: $M'=4$ , $\alpha=0.04$ , $M_v=[0,0,0,0]$ , $N_v=[1,5,0,6]$ ;图10的参数是: $M'=4$ , $\alpha=0.02$ , $M_v=[0,5,0,0]$ , $N_v=[0,0,0,8]$ ;

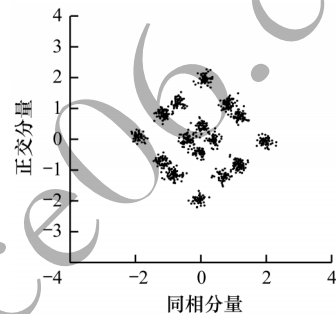


图9 星座图裂变仿真3

Fig.9 Constellation fission simulation 3

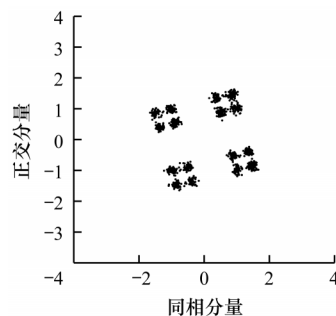


图10 星座图裂变仿真4

Fig.10 Constellation fission simulation 4

由上述仿真数据可知,随机参数生成的裂变星座图不具有均匀分布特性,而经控制参数联合优化方法产生的最优参数集,可以生成星座点均匀分布的裂变星座图,具有更好的信号伪装性能。

#### 4.3 WFRFT系统通信性能仿真

误码率特性是衡量通信系统性能的重要指标,为分析WFRFT方法的误码率性能,本节针对典型的

高斯、莱斯和瑞利信道条件,分别仿真计算了原始QPSK调制和WFRFT认知通信调制的误码率性能。

当设置WFRFT认知通信系统控制参数 $M'=4$ 、 $\alpha=0.05$ , $m_0=0$ , $m_1=2$ , $m_2=10$ , $m_3=3$ , $n_0=10$ , $n_1=9$ , $n_2=4$ , $n_3=9$ 时,两种方法在不同信道条件下的误码率对比结果曲线如图11~图13所示。

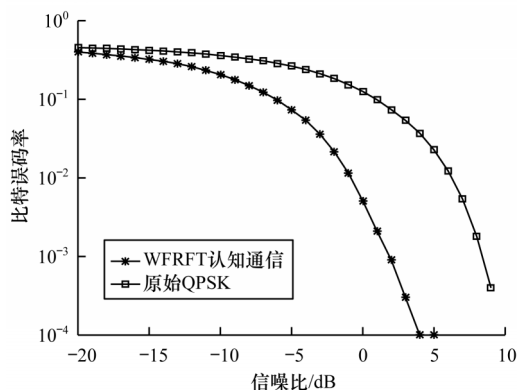


图11 高斯信道下误码率对比

Fig.11 Comparison of bit error ratio under Gaussian channel

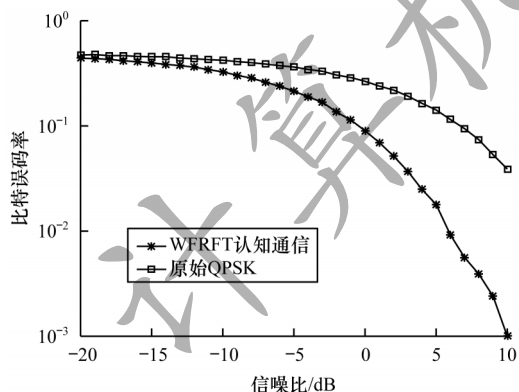


图12 莱斯信道下误码率对比

Fig.12 Comparison of bit error ratio under Rice channel

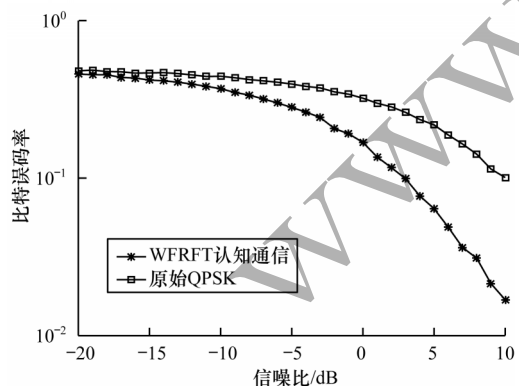


图13 瑞利信道下误码率对比

Fig.13 Comparison of bit error ratio under Rayleigh channel

由上述仿真结果可知,WFRFT认知通信调制信号相比QPSK信号具有更好的抗噪声能力,且信号在3种信道条件下,误码率性能与单参数条件的仿

真结果类似。高斯信道的误码率性能最好,瑞利信道的误码率性能最差。

## 5 结束语

本文针对WFRFT系统难以适应复杂电磁环境的问题,提出一种新型WFRFT认知通信系统构建方法。将电磁环境中的目标信号调制特征引入到参数优化过程中,形成基于目标特征的WFRFT认知通信系统控制参数联合优化方法。采用粒子群算法迭代优化计算以获得WFRFT系统最优控制参数集,实现最优控制参数集产生的WFRFT伪装信号调制特征与电磁环境中目标信号调制特征完全一致的目标。实验结果表明,所提方法具有较好的信号伪装效果,有效提高了通信信号的安全性,且在典型信道条件下的误码率指标较好,能够满足工程应用需求。下一步将重点研究通信距离较远时的目标信号识别问题,拓宽WFRFT认知通信系统的应用范围。

## 参考文献

- [1] 桑建华,陈益临. 发展中的飞行器射频隐身技术[J]. 航空制造技术, 2011, 23(11): 48-50.  
SANG J H, CHEN Y L. Air vehicle RF stealth technology in evolution[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 23(11): 48-50. (in Chinese)
- [2] DAVID L J. Introduction to RF stealth[M]. Raleigh, North Carolina: Science Technology Publishing Incorporation, 2004: 8-12.
- [3] 杨宇晓,汪飞,周建江,等. 跳频周期和跳频间隔的最大条件射频隐身设计方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 841-847.  
YANG Y X, WANG F, ZHOU J J, et al. RF stealth design method for hopping cycle and hopping interval based on conditional maximum entropy[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2015, 37(4): 841-847. (in Chinese)
- [4] 达新宇,廉晨. 一种加权傅里叶变换域通信方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(12): 2853-2859.  
DA X Y, LIAN C. Method of weighted fourier transform domain communication[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(12): 2853-2859. (in Chinese)
- [5] 李婧,沙学军,梅林,等. 基于加权分数傅里叶变换域的2天线发射方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(5): 10-15.  
LI J, SHA X J, MEI L, et al. Two-branch transmit method based on weighted-type fractional fourier transform[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(5): 10-15. (in Chinese)
- [6] 房宵杰. 基于加权分数阶傅里叶变换的物理层安全传输方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
FANG X J. Research on WFRFT-based physical layer security methodologies for wireless communications[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)



- [ 7 ] LIU F, FENG Y. Anti-scanning research for MPWFRFT communication signals[J]. *Wireless Networks*, 2020, 26(1): 723-737.
- [ 8 ] XIAOJIE F, XUEJUN S, YUE L. MP-WFRFT and constellation scrambling based physical layer security system[J]. *China Communications*, 2016, 13(2): 138-145.
- [ 9 ] LUO Z, WANG H, ZHOU K, et al. Combined constellation rotation with weighted FRFT for secure transmission in polarization modulation based dual-polarized satellite communications[J]. *IEEE Access*, 2017, 12: 27061-27073.
- [ 10 ] KHARBECH S, SIMON E P, BELAZI A, et al. Denoising higher-order moments for blind digital modulation identification in multiple-antenna systems [J]. *IEEE Wireless Communication Letters*, 2020, 6(9): 765-769.
- [ 11 ] PAJIC M S, VEINOVIC M, PERIC M, et al. Modulation order reduction method for improving the performance of AMC algorithm based on sixth-order cumulants[J]. *IEEE Access*, 2020, 10: 86-94.
- [ 12 ] GHASEMZADEH P, BANERJEE S, HEMPEL M, et al. A novel deep learning and polar transformation framework for an adaptive automatic modulation classification[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 11(69): 43-58.
- [ 13 ] 达新宇, 王浩波, 罗章凯, 等. 基于双层多参数加权类分数阶傅里叶变换的双极化卫星安全传输方案[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(8): 1974-1982.
- DA X Y, WANG H B, LUO Z K, et al. Dual-polarized satellite security transmission scheme based on double layer multi-parameter weighted-type fractional fourier transform[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2019, 41(8): 1974-1982. (in Chinese)
- [ 14 ] XIA X, GUI L, YU F, et al. Triple archives particle swarm optimization[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 34(9): 1-14.
- [ 15 ] MASOOD M, FOUAD M M, KAMAL R, et al. An improved particle swarm algorithm for multi-objectives based optimization in MPLS/GMPLS networks[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 147-162.
- [ 16 ] SINGH P. A novel hybrid time series forecasting model based on neutrosophic-PSO approach [J]. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2020, 11(8): 1643-1658.
- [ 17 ] DYTISO A, YAGLI S, POOR H V, et al. The capacity achieving distribution for the amplitude constrained additive gaussian channel; an upper bound on the number of mass points [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2020, 66(4): 2006-2022.
- [ 18 ] NOORAIEPOUR A, AGHDAM S R, DUMAN T M. On secure communications over Gaussian wiretap channels via Finite-Length Codes[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(9): 1904-1908.
- [ 19 ] SHAO J, LI X. Generalized zero-shot learning with multi-channel Gaussian mixture VAE[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2020, 27: 456-460.
- [ 20 ] OZDOGAN O, BJORNSEN E, LARSSON E G. Massive MIMO with spatially correlated rician fading channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(5): 3234-3250.
- [ 21 ] VU M, TRAN N H, WIJERATNE D G, et al. Optimal signaling schemes and capacity of non-coherent rician fading channels with low-resolution output quantization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 31(6): 2989-3004.
- [ 22 ] KUMAR S, SINGH A, KUMAR M. Covert communication integrates into wavelet packet transform OFDM system over Rayleigh fading channel[J]. *Wireless Networks*, 2020, 26(1): 81-89.
- [ 23 ] TAHMASBI M, SAVARD A, BLOCH M R. Covert capacity of non-coherent Rayleigh-fading channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2020, 66(4): 1979-2005.