

多层多参数多项加权分数阶傅里叶变换复合调制通信信号设计方法

杨宇晓 高萍*

(南京航空航天大学航天学院 南京 211100)

摘要: 为提高卫星通信信号的安全性能, 该文提出一种多层多参数多项加权分数阶傅里叶变换(MWFRFT)复合调制通信信号设计方法。该方法针对传统多项加权分数阶傅里叶变换单层结构的被扫描威胁, 将MWFRFT扩展至不同加权系数的多层结构, 降低了系统的被扫描概率。同时, 多层多参数MWFRFT(MPMWFRFT)系统通过对控制参数集的优化设计, 解决了多层结构下的通信信号调制特征模拟。针对复杂电磁环境场景中的目标寄生信号和窄带信号干扰, 引入扩频机制, 设计了3层多项加权分数阶傅里叶变换和直接序列扩频复合调制系统(TL-MWFRFT-DSSS)。仿真结果表明, 该方法在保证较好通信性能的前提下, 实现了多层通信信号的调制特征模拟, 显著提高了系统的抗扫描性能。

关键词: 安全通信; 多层多参数; 多项加权分数阶傅里叶变换; 扩频

中图分类号: TN918.91

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)04-1192-09

DOI: [10.11999/JEIT220266](https://doi.org/10.11999/JEIT220266)

Design Method of Multi-layer Multi-Parameter Multi-term Weighted-type FRactional Fourier Transform Composite Modulation Communication Signal

YANG Yuxiao GAO Ping

(College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to improve the safety performance of satellite communication signal, a multi-layer multi-parameter Multi-term Weighted-type FRactional Fourier Transform (MWFRFT) composite modulation communication signal design method is proposed in this paper. Considering the scanning threat of traditional term MWFRFT single-layer structure, MWFRFT is extended to multi-layer structure with different weighting coefficients, which reduces the scanned probability of the system. At the same time, the simulation of communication signal modulation characteristics under multi-layer structure is solved by optimizing the set of control parameters of multi-layer Multi-Parameter MWFRFT (MPMWFRFT) system. Considering the target parasitic signal and narrowband signal interference in complex electromagnetic environment scene, the multi-layer multi-parameter composite modulation system Three Layer Multinomial Weighted FRactional Fourier Transform and Direct Sequence Spread Spectrum (TL-MWFRFT-DSSS) are designed by introducing the spread spectrum mechanism. Simulation results show that this method realizes the simulation of modulation characteristics of multi-layer communication signals on the premise of ensuring good communication performance, and improves significantly the anti scanning performance of the system.

Key words: Secure communication; Multi-layer and multi-parameter; Multi-term Weighted-type FRactional Fourier Transform (MWFRFT); Spread spectrum

1 引言

无源探测系统^[1]在不辐射电磁波的情况下, 可

以实现飞行器目标的探测和定位, 具有隐蔽性好、探测距离远等优势, 受到各个军事国家的重视。目前, 无源系统的探测距离已可覆盖地球轨道, 对航天器的在轨安全构成了严重威胁。航天器搭载的主动辐射源(通信、雷达等)必须进行射频隐身设计^[2]。

加权分数阶傅里叶变换(Weighted FRactional Fourier Transform, WFRFT)^[3]通过调整系统参数, 可以改变通信信号的调制特征, 将私密信号伪

收稿日期: 2022-03-14; 改回日期: 2022-09-07; 网络出版: 2022-09-16

*通信作者: 高萍 3221606485@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61701226)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61701226)

装电磁环境中的公开信号,显著改善了信号的抗截获、抗识别能力^[4,5]。同时,加权分数阶傅里叶变换在WFRFT变换域内进行通信信号处理,窃听方在传统时频域内难以完成信号的解调解译,进一步提高了信号的安全性能。因此,加权分数阶傅里叶变换在射频隐身领域具有重要的应用价值,引起了国内外学者的广泛关注,相关成果主要集中在WFRFT的调制伪装特性和复合系统设计方面。

文献^[6,7]分析了多参数加权分数阶傅里叶变换(Multi Parameter Weighted FRactional Fourier Transform, MPWFRFT)的时频项特性,总结MPWFRFT调制信号的星座裂变规律,构建了星座裂变函数。文献^[8,9]进一步对MPWFRFT信号的时频分量进行了定量分析,推导出星座裂变函数和星座模糊函数,构建星座预编码优化模型,根据目标信号的星座图裂变特性和模糊特性进行优化设计,通过遗传算法迭代计算得到最优控制参数,达到预期的信号模拟效果,提高了信号的隐蔽性能。

文献^[10]提出将WFRFT与跳频结合,通过跳频序列控制WFRFT调制的离散傅里叶变换矩阵,使矩阵具有不确定性,提高了窃听方解调信号的难度。文献^[11-14]提出将WFRFT与混沌相位扰码结合,提高了窃听方参数扫描的计算代价。文献^[15,16]将WFRFT与人工噪声结合,通过加入人工噪声来降低窃听方的信道质量,从而增加了窃听方解调数据的难度。文献^[17]将WFRFT与多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术结合,提高了信号的抗截获性能和频谱利用率。文献^[18]将WFRFT与变换域通信系统结合,通过动态双随机相位的设计控制WFRFT星座旋转角度和变换域系统基函数,提高了系统的安全性能。

综上所述,加权分数阶傅里叶变换在WFRFT信号的调制特征优化和复合系统的构建方面已形成了较多研究成果。然而,随着研究工作的不断深入,也出现了一些亟待解决的挑战。具体表现在:

(1) 现有方案主要采用单层WFRFT实现信号伪装,但其涉及的关键参数较少,抵御窃听方扫描破译能力较弱,安全性能有限。已有文献^[19]探讨单层WFRFT的被破译风险,由于调制参数较少,若窃听方已知目标信号经过了WFRFT调制,可通过全周期扫描获取调制参数,从而截获解译目标信号;

(2) 现有方案主要基于WFRFT调制构建复合通信系统,用以扩展关键参数集,提高通信系统的抗扫描能力。但在复合系统设计过程中,往往着重考虑WFRFT对传统系统带来的性能提升,较少讨论复合系统和多层扩展带来的调制伪装特性,限制了WFRFT调制的应用。

本文针对上述问题,综合考虑WFRFT系统的安全性能和调制伪装,提出基于多层多参数多项加权分数阶傅里叶变换(Multi-terms Weighted-type FRactional Fourier Transform, MWFRFT)复合调制的通信信号设计方法。本方法构建了3层多项加权分数阶傅里叶变换(Three Layer Multinomial Weighted FRactional Fourier Transform, TL-MWFRFT)和直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)体制的复合通信系统,即TL-MWFRFT-DSSS复合调制系统。将关键参数集扩展为单层系统的3倍,并且增加了调制层数、加权项数和扩频密钥等关键参数,显著提高了窃听方的扫描破译难度。本方法将电磁环境中的公开信号作为目标寄生信号,选定星座图裂变点数、裂变构型、裂变样式、模糊程度和旋转角度等关键参数作为优化对象,引入遗传算法进行迭代计算,在提高信号安全性能的基础上,实现了基于3层MWFRFT结构的调制特征伪装。最后,引入了扩频调制形成复合调制体制,进一步提高了系统的抗干扰和抗截获能力。本文章节安排如下:第1节为引言,介绍了本文研究的背景及研究现状;第2节介绍多层多参数MWFRFT的原理,分析了关键参数的作用机理;第3节提出TL-MWFRFT-DSSS复合调制系统,并对系统的安全性进行了分析;第4节将遗传算法引入TL-MWFRFT-DSSS复合调制系统,提出了复合调制信号优化设计方法;第5节对本文方法进行了仿真实验及分析,并增加对比方案验证本文方法的优越性;第6节对本文进行了总结。

2 多层多参数MWFRFT

多层多参数MWFRFT是将传统单层WFRFT扩展为多层结构,每一层分别进行不同加权项数和调制参数的MWFRFT调制。多层多参数WFRFT显著增加了非合作方的扫描难度。同时,利用MWFRFT系统的多参数优化设计,还可以实现通信信号的调制特征伪装,进一步提高系统安全性。综合考虑系统的复杂度和可实现性,本文以3层多参数MWFRFT为例进行说明。

2.1 MWFRFT原理

若有离散序列 X_0 ,其 M 项加权分数阶傅里叶变换定义如式(1)所示

$$\mathbf{F}^{\alpha, \mathbf{V}}(X_0) = (\omega_0 \mathbf{F}_M^0 + \omega_1 \mathbf{F}_M^1 + \omega_2 \mathbf{F}_M^2 + \dots + \omega_{M-1} \mathbf{F}_M^{M-1}) X_0 \quad (1)$$

其中, ω_l 为加权系数, \mathbf{F}_M 为MWFRFT的离散傅里叶变换矩阵。 M 为加权项数, α 为变换阶数, $\mathbf{V} = [\mathbf{M}\mathbf{V}, \mathbf{N}\mathbf{V}]$ 表示尺度向量, $\mathbf{M}\mathbf{V} = (m_0, m_1, \dots, m_{M-1})$, $\mathbf{N}\mathbf{V} = (n_0, n_1, \dots, n_{M-1})$ 。

ω_l 定义如式(2)所示

$$\omega_l(\alpha, \mathbf{V}) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \exp\{\pm j \frac{2\pi}{M} [(Mm_k + 1)\alpha(k + Mn_k) - lk]\} \quad (2)$$

MWFRFT定义式中的离散傅里叶变换矩阵 \mathbf{F}_M 周期为 M , 表示为矩阵形式 $\mathbf{F}_M = \mathbf{F}^P$, 其中 $P = 4/M$, \mathbf{F} 为4-WFRFT的离散傅里叶变换矩阵。

综上, MWFRFT变换共有加权项数 M 、变换阶数 α 和尺度向量 \mathbf{V} 等控制参数, 通过上述参数的优化设计, 可以实现通信调制特征的可控变化。

2.2 多层MWFRFT原理

本文以3层MWFRFT为例, 阐述多层MWFRFT的基本原理。3层MWFRFT是将调制后的数据分为3层, 3层数据分别进行参数集为 (α_1, \mathbf{V}_1) 的4-WFRFT、 (α_2, \mathbf{V}_2) 的6-WFRFT、 (α_3, \mathbf{V}_3) 的8-WFRFT, 再将3层数据并成1路; 逆变换的过程是将接收到的信号分为3层, 3层数据分别进行参数集为 $(-\alpha_1, \mathbf{V}_1)$ 的4-WFRFT、 $(-\alpha_2, \mathbf{V}_2)$ 的6-WFRFT、 $(-\alpha_3, \mathbf{V}_3)$ 的8-WFRFT逆变换。

相比传统单层WFRFT变换, 3层MWFRFT变换增加了加权项数、变换阶数 α 和尺度向量 \mathbf{V} 等参数的数量, 并新增了调制层数参数, 显著提高了窃听方的参数扫描难度, 增加了3层MWFRFT变换的保密性能。

2.3 关键参数分析

多参数加权分数阶傅里叶变换可以实现通信信号的调制特征伪装, 而多层多参数MWFRFT调制伪装的难点在于多层间调制特征的协同控制, 以减少生成信号的调制特征误差。由于调制特征的控制参数众多, 为便于优化计算, 本文提出了与调制伪装关系密切的关键参数。

(1)星座图裂变点数。MWFRFT调制信号的星座图最多裂变点数由原始信号的调制阶数 T 决定, 当原始信号的基带调制阶数为 T , MWFRFT调制信号的星座图最多可裂变为 T^2 个点。

(2)星座图裂变构型。星座图的分裂特性是由其时域分量的叠加产生的。当加权项数 M 为偶数时, 原始序列 \mathbf{X}_0 及其反转序列 $\mathbf{X}_{M/2}$ 为时域分量, 决定了星座图的裂变构型。MWFRFT星座裂变函数如式(3)所示

$$\xi_{\alpha}^{\mathbf{V}} = \omega_0 \mathbf{X}_0 + \omega_{M/2} \mathbf{X}_{M/2} \quad (3)$$

调制信号星座点的分布由 ω_0 和 $\omega_{M/2}$ 的夹角 $(\omega_0, \omega_{M/2})$ 控制, 当 $\omega_0 \perp \omega_{M/2}$ 时, 星座图裂变构型呈矩形。

(3)星座图裂变样式。由式(3)所示, 时域分量 \mathbf{X}_0 和 $\mathbf{X}_{M/2}$ 被加权后, 星座点开始旋转、分裂, 星座点的旋转幅度和聚散程度由模值比例因子 $\eta = |\omega_0| / |\omega_{M/2}|$ 控制, 当其取0.5时, 调制信号的星座点分布均匀。

(4)星座图模糊程度。具有相同分布特性的多种随机序列, 进行线性组合产生的序列具有类高斯分布特性。因此, 加权后的 $\mathbf{X}_l (l \neq 0, M/2)$ 决定了MWFRFT信号的星座模糊特性。MWFRFT模糊函数如式(4)所示

$$T_{\alpha}^{\mathbf{V}} = \sum_{l=1}^{M-1} \omega_l(\alpha, \mathbf{V}) \mathbf{X}_l, l \neq M/2 \quad (4)$$

由式(4)可知, 通过调节参量 $\sum_{l=1}^{M-1} |\omega_l|^2, l \neq M/2$ 可以控制MWFRFT信号星座图的模糊程度。

(5)星座图旋转角度。MWFRFT信号星座图旋转角度公式为

$$\theta = \arctan \frac{\text{Im}[\omega_l(\alpha, \mathbf{V})]}{\text{Re}[\omega_l(\alpha, \mathbf{V})]} \quad (5)$$

设3层MWFRFT的星座图旋转角度分别为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, 则 $\theta_1 = \theta_2 \pm k_1\pi/2 = \theta_3 \pm k_2\pi/2 (k_1, k_2 \in N)$ 是3层MWFRFT信号调制特征伪装的必需条件。

3 TL-MWFRFT-DSSS复合调制系统

在实际应用场景中, 无线信道中存在各种干扰及噪声信号, 由于目标寄生信号与私密信号具有相同的调制方式和射频特性, 其对合作方的接收解调造成了强干扰, 必须考虑复合调制通信信号的抗干扰设计。

3.1 TL-MWFRFT-DSSS复合调制系统

本文将TL-MWFRFT的安全性能与直接扩频的抗干扰性能相结合, 提出了TL-MWFRFT-DSSS复合调制系统, 既可实现对寄生信号的调制特征伪装, 又能够抵御各种干扰信号的干扰。系统框图如图1所示。

TL-MWFRFT-DSSS复合调制系统在基带部分对数据进行直接扩频和数据映射, 数据流经串并转换后分3路进入TL-MWFRFT调制模块, 生成的调制数据经并串转换、正交上变频和D/A变换后进入信道传输。

复合调制系统接收端将收到的射频信号经A/D变换、正交下变频和串并转换后, 进入TL-MWFRFT解调模块, 生成的解调数据再经过数据逆映射和解扩处理, 恢复出原始数据。

3.2 TL-MWFRFT-DSSS系统安全性分析

TL-MWFRFT-DSSS系统将TL-MWFRFT与DSSS进行了复合使用, 集合了两种调制方式的优

势，显著提高了复合系统的安全性能。由第2节可知，TL-MWFRFT系统通过多参数的优化设计，可以改变原有信号的调制特征，将其伪装为其他调制类型，窃听方由于不掌握先验知识，只能根据伪装后的调制方式进行处理，从而难以实现信号的正确解调，提高了信号安全性。另外，本方案将DSSS系统引入复合系统中，DSSS系统的扩频序列进一步增强了复合系统的加密能力，而且DSSS的抗干扰优势又增加了复合系统抵御寄生信号和窄带信号干扰的能力。最后，TL-MWFRFT-DSSS复合系统的设计参数众多，TL-MWFRFT结构层数、MWFRFT调制参数以及DSSS扩频序列共同构成了复合系统的加密参数集，窃听方仅在完全掌握加密参数集的条件下可以实现信号的正确解调，极大地提高了复合系统的安全性。因此，TL-MWFRFT-

DSSS复合系统的上述特点，保证了该系统具有较好的安全性能。

4 基于遗传算法的TL-MWFRFT-DSSS复合调制信号设计

4.1 TL-MWFRFT系统参数设计

(1)目标信号星座图特征选取。本文的原始待调信号为正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)信号，以标准正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, 16QAM)信号旋转45°后的星座图特征作为待模拟的目标信号星座图特征。两者信号星座图如图2所示。

(2)初始控制参数设置。

(a)目标信号星座图构型为矩形，由2.3节(2)可知 $(\omega_0, \omega_{M/2})$ 设置为90°；

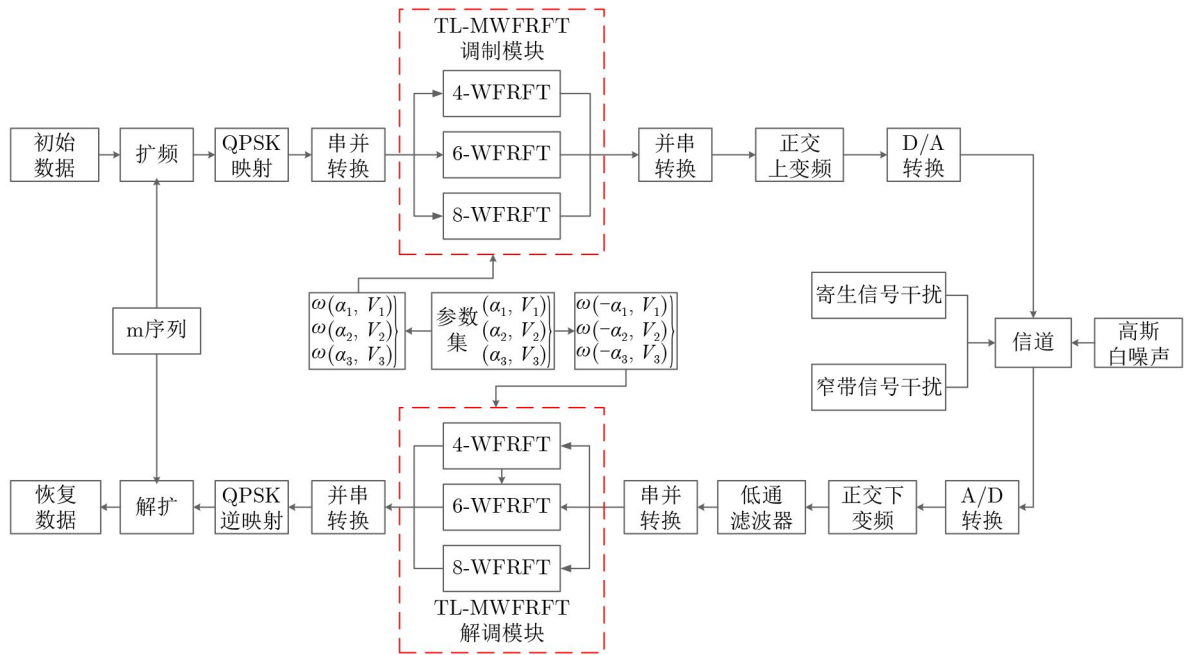


图1 TL-MWFRFT-DSSS复合调制系统框图

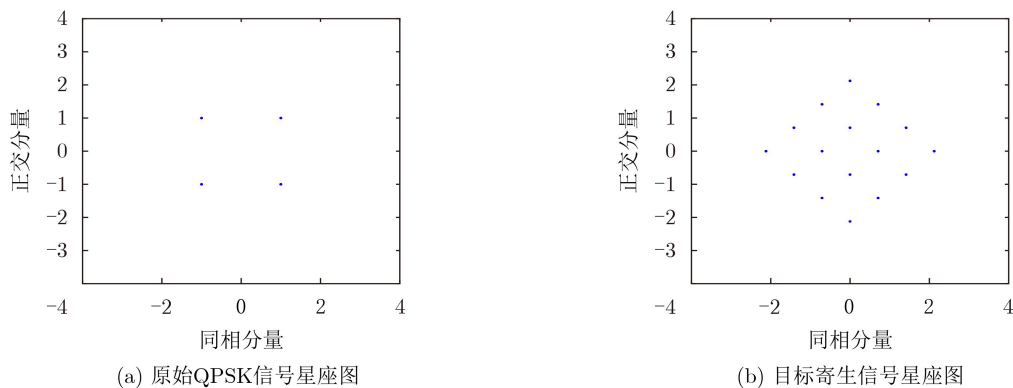


图2 原始信号与寄生信号星座图

(b)目标信号星座图为均匀分布16个点簇,由2.3节(3)可知,模值比例因子 η 设为0.5;

(c)MWFRFT的周期为 M ,故将4-WFRFT的变换阶数 α_1 的取值范围设置为 $[0,4)$;6-WFRFT的变换阶数 α_2 的取值范围设置为 $[0,6)$;8-WFRFT的变换阶数 α_3 的取值范围设置为 $[0,8)$;

(d)目标信号星座点清晰,故调制信号的模糊

$$\begin{aligned} \min f(\alpha, \mathbf{V}) &= f_1(\alpha_1, \mathbf{V}_1) + f_2(\alpha_2, \mathbf{V}_2) + f_3(\alpha_3, \mathbf{V}_3) \\ f_1(\alpha_1, \mathbf{V}_1) &= \sqrt{(|\omega_0| - \eta |\omega_{M_1/2}|)^2} + \sqrt{|\omega_0 \omega_{M_1/2}|^2} + \sum_{l=1}^{M_1-1} |\omega_l|^2 + \sqrt{|\theta_1 \pm \pi/4|^2} \\ M_1 &= 4; l \neq M_1/2; \eta = 0.5; \\ f_2(\alpha_2, \mathbf{V}_2) &= \sqrt{(|\omega_0| - \eta |\omega_{M_2/2}|)^2} + \sqrt{|\omega_0 \omega_{M_2/2}|^2} + \sum_{l=1}^{M_2-1} |\omega_l|^2 + \sqrt{|\theta_2 \pm \pi/4|^2} \\ M_2 &= 6; l \neq M_2/2; \\ f_3(\alpha_3, \mathbf{V}_3) &= \sqrt{(|\omega_0| - \eta |\omega_{M_3/2}|)^2} + \sqrt{|\omega_0 \omega_{M_3/2}|^2} + \sum_{l=1}^{M_3-1} |\omega_l|^2 + \sqrt{|\theta_3 \pm \pi/4|^2} \\ M_3 &= 8; l \neq M_3/2; \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \min f(\alpha, \mathbf{V}) \\ f_1(\alpha_1, \mathbf{V}_1) \\ f_2(\alpha_2, \mathbf{V}_2) \\ f_3(\alpha_3, \mathbf{V}_3) \end{aligned}} \right\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } \omega_l(\alpha, \mathbf{V}) &= \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \exp \left\{ \pm j \frac{2\pi}{M} [(Mm_k + 1)\alpha(Mn_k + k) - lk] \right\} \\ l &= 0, 1, \dots, M-1; \\ \mathbf{V} &= [\mathbf{M}\mathbf{V}, \mathbf{N}\mathbf{V}] = [m_0, m_1, \dots, m_{M-1}, n_0, n_1, \dots, n_{M-1}]; \\ m_k, n_k &\in [0, P], k = 0, 1, \dots, M-1; \\ P &\in \mathbb{N}^+; \\ \alpha_1 &\in [0, 4), \alpha_2 \in [0, 6), \alpha_3 \in [0, 8) \end{aligned}$$

其中, $f_1(\alpha_1, \mathbf{V}_1)$, $f_2(\alpha_2, \mathbf{V}_2)$, $f_3(\alpha_3, \mathbf{V}_3)$ 分别为4-WFRFT, 6-WFRFT, 8-WFRFT的优化目标函数。

4.3 遗传算法

本文所提优化模型有多个需要优化的参数,因此采用基于遗传算法^[20](Genetic Algorithm, GA)的多目标优化算法进行迭代优化,得到TL-MWFRFT信号星座图特征模拟的最优控制参数集如表1所示。

5 仿真结果分析

为验证本文所提方法的有效性,本文针对TL-MWFRFT-DSSS复合调制信号的通信性能、调制伪装性能和安全性能进行仿真验证。仿真参数为:扩频密钥、调制层数、加权项数、变换阶数和尺度向量。

程度应尽可能小,即 $\sum_{l=1}^{M-1} |\omega_l|^2, l \neq M/2$ 取值尽可能趋于0;

(e)目标信号星座图为标准16QAM信号星座图旋转 45° ,故旋转角度 θ 的角度可取值为 $\pm\pi/4$ 。

4.2 优化模型

由4.1节对目标信号星座图特征选取和初始控制参数的设置,构建TL-MWFRFT系统优化模型为

5.1 通信性能仿真

通信系统的射频隐身设计需要在保证通信性能的前提下,提高信号的安全性能,因此需要对系统的通信性能进行仿真分析。以QPSK基带映射为例,对QPSK调制系统、传统单层WFRFT调制系统、传统多层WFRFT调制系统和TL-MWFRFT-DSSS复合调制系统的误码率性能进行仿真对比,结果如图3所示。

如图3,相同信噪比条件下,TL-MWFRFT-DSSS复合调制系统误码率明显低于其他几种系统的误码率。

实际无线信道中存在多种干扰,目标寄生信号也对合作方的正常接收造成了干扰,本文针对寄生信号 a 干扰、窄带干扰两种场景,仿真分析了上述几种系统的抗干扰性能。

表1 控制参数集

WFRFT项数	最优控制参数集		随机控制参数集	
	α	\mathbf{V}	α	\mathbf{V}
4-WFRFT	2.001 000 0	(10,4,5,7;5,3,9,1)	0.504 2	(7,7,7,3;8,8,1,3)
6-WFRFT	3.000 496 6	(6,8,2,7,6,6;3,8,8,9,2,10)	5.446 9	(9,8,9,4,3,5;5,9,7,3,4,8)
8-WFRFT	3.999 130 0	(2,3,5,8,1,4,3,7;3,9,1,3,6,6,2,3)	1.680 0	(3,2,5,0,2,5,2,0;2,0,2,0,3,3,1,6)

由图4和图5可知，叠加寄生信号干扰和窄带信号干扰条件下，QPSK调制系统、单层WFRFT调制系统和多层WFRFT调制系统与TL-MWFRFT-DSSS复合调制系统的误码率均有所提高，而TL-MWFRFT-DSSS系统误码率显著低于其他几种系统。因此，本文所提方法具有较好的通信性能。

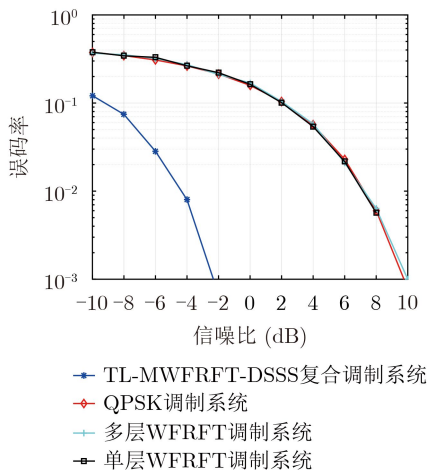


图3 高斯信道下系统误码率曲线

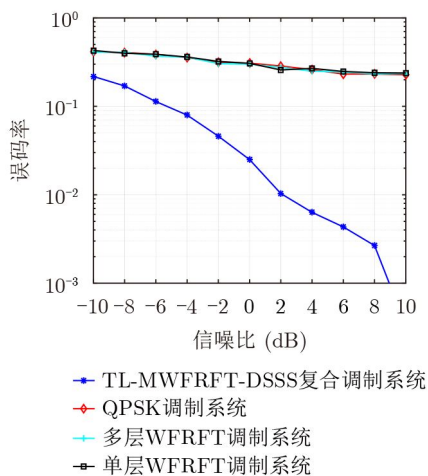


图4 叠加寄生信号干扰的复合调制系统误码率曲线

5.2 调制伪装性能仿真

调制特征伪装是本文所提TL-MWFRFT-DSSS复合调制信号的重要特性，现有多层MWFRFT方案中均较少考虑调制特征伪装问题。为验证该方法的有效性，本文采用图2所示的原始信号和目标寄生信号，将表1的最优控制参数集和随机控制参数集的伪装效果进行对比仿真，结果分别如图6和图7所示。

由上述仿真结果可知，采用最优控制参数集生产信号的调制特征与目标寄生信号调制特征完全一致，而采用随机控制参数集生成信号的调制特征与目标寄生信号调制特征存在较大差异，难以满足寄生伪装的需要。因此，本文所提方法具有较好的调制特征伪装能力。

5.3 安全性能仿真

系统的安全性能主要取决于窃听方获取系统先验参数的难度以及参数误差大小对系统解调误码率的影响程度。为了验证本文所提方法在安全性能方面的优越性，首先在 $\Delta\alpha = 0.001$ 和 $\Delta V = 1$ 两种参数误差情况下，将TL-MWFRFT-DSSS复合调制系

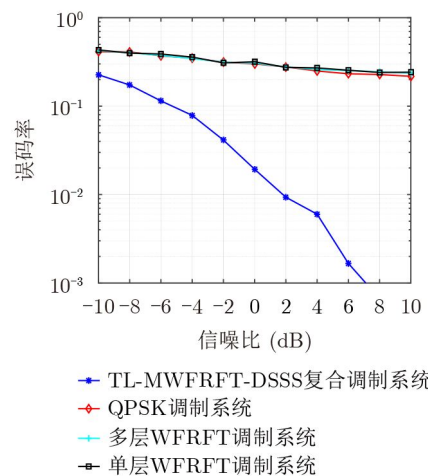


图5 叠加窄带干扰信号的复合调制系统误码率曲线

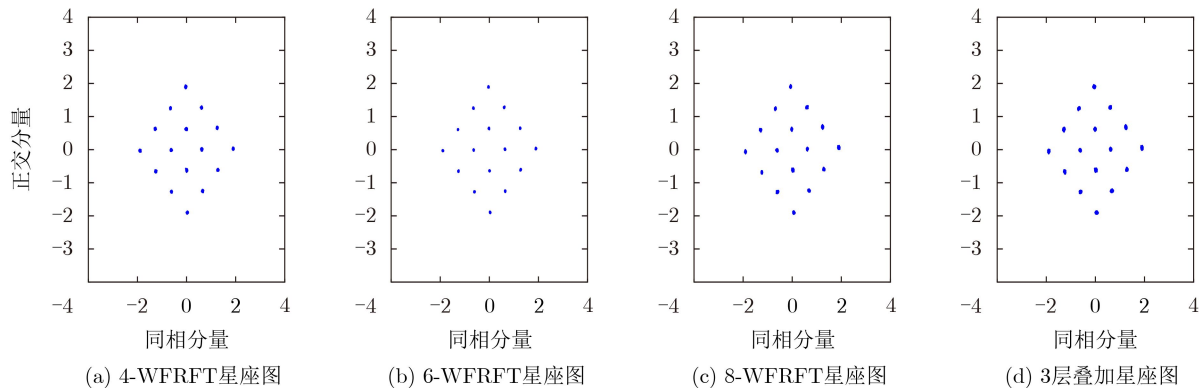


图6 采用最优控制参数集的复合调制信号星座图

统与传统单层WFRFT系统、多层WFRFT系统的误码率进行仿真对比。

由图8、图9仿真结果可知，在相同 $\Delta\alpha, \Delta V$ 误差情况下，TL-MWFRFT-DSSS复合调制系统误码率高于另外两种系统，说明本文所提系统在解调时对参数误差的敏感度更高，具有更好的安全性能。

本文针对扩频密钥、调制层数、MWFRFT项数、变换阶数和尺度向量等先验参数，仿真分析了

窃听方掌握先验参数的不同状态下的解调误码率。仿真结果如图10—图12所示。

首先将窃听方未知所有参数、窃听方未知调制层数，以单层4-WFRFT方式对信号进行解调、窃听方未知扩频密钥3种状态下的窃听方误码率曲线与合法接收方进行对比。仿真结果如图10所示。

由图10仿真结果可知，上述3种状态下的窃听方误码率曲线为恒定值，完全无法正确解调信号。

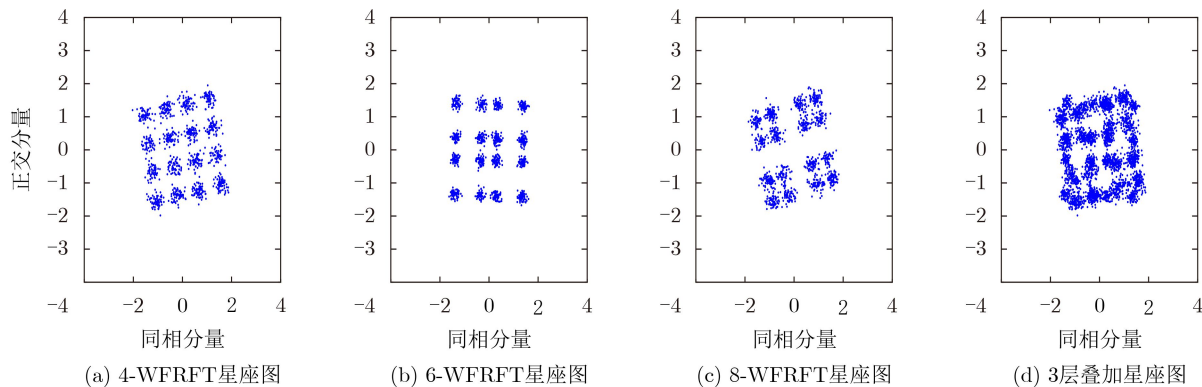


图7 采用随机控制参数集的复合调制信号星座图

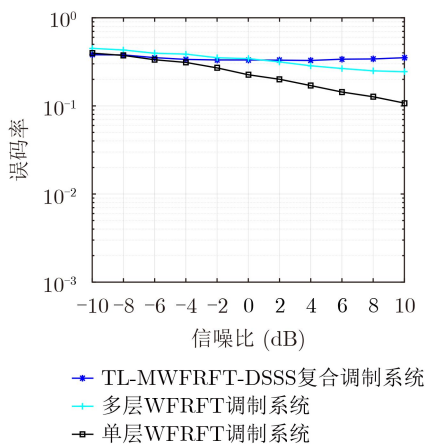


图8 $\Delta\alpha = 0.001$ 时系统误码率曲线

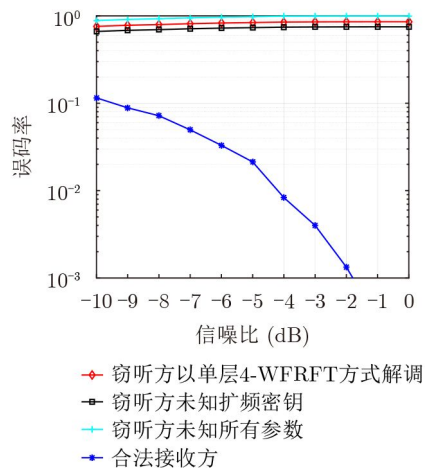


图10 不同状态下的窃听方解调误码率曲线

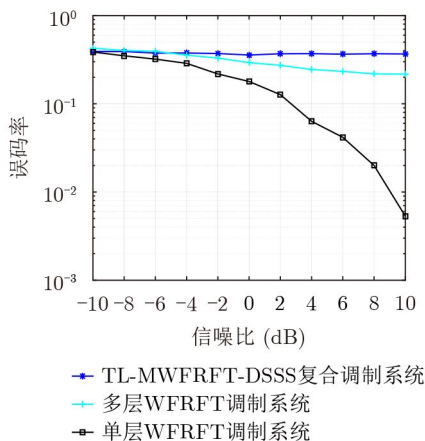


图9 $\Delta V = 1$ 时系统误码率曲线

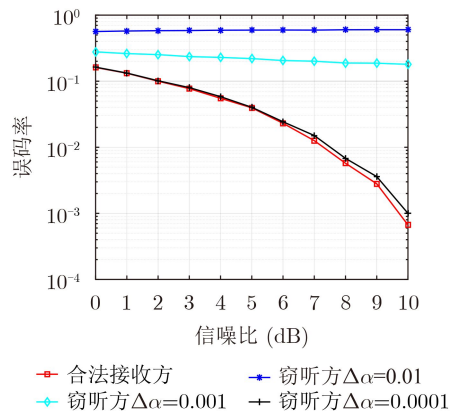
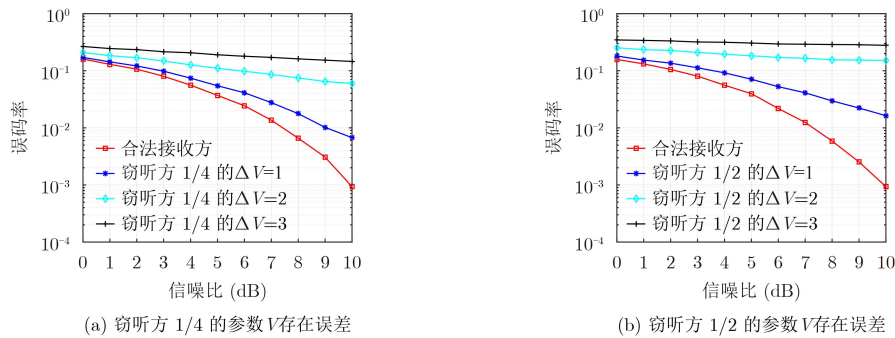


图11 3层MWFRFT系统 α 抗扫描特性

图12 3层MWFRFT系统中参数 V 抗扫描特性

当窃听方掌握变换阶数 α 有误差时，误码率曲线如图11所示。窃听方若要通过参数扫描得到变换阶数数值，对 α 的扫描间隔应小于0.0001，以0.0001为例计算扫描次数，在加权项数为 M 的MWFRFT变换阶数的全周期内，窃听方需检测 $M/0.0001$ 次。窃听方需对3层MWFRFT信号进行3次MWFRFT扫描，3层MWFRFT信号扫描次数应为 $40000 \times 60000 \times 80000 = 192000000000000$ 次，窃听方需要付出巨大的扫描代价。

(3)若窃听方已掌握扩频密钥、调制层数、3层MWFRFT调制项数和3层变换阶数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 。下面分4种情况对窃听方解调误码率进行仿真，分别为：窃听方掌握的尺度向量中有1/4存在误差、有1/2存在误差。误差大小分别设置为1,2,3，误码率曲线如图12所示。

由仿真结果可知，在相同误差值条件下，当窃听方掌握的尺度向量 V 中参数存在误差的比例增大时，解调误码率增大。当参数误差值增大时，解调误码率也增大。3层MWFRFT调制的尺度向量包括36个参数，窃听方几乎无法通过参数扫描得到所有参数，由此说明尺度向量 V 具有较好的参数抗扫描性能。

综上所述，多层多参数MWFRFT复合调制系统具有较好的安全性能。

6 结论

本文提出一种多层多参数TL-MWFRFT-DSSS复合调制信号设计方法，该方法采用多层MWFRFT结构，设置不同加权系数提高系统复杂度，以解决传统MWFRFT的易扫描问题。针对多层多参数带来的信号调制特征模拟难题，将目标寄生信号作为优化目标，引入遗传算法进行迭代优化，实现了信号调制特征模拟。针对实际复杂电磁环境场景中的目标信号和其他干扰信号，将扩频机制与多层多参数MWFRFT系统结合，设计了TL-MWFRFT-DSSS复合系统，进一步提高了系统的安全

性能。仿真结果表明，TL-MWFRFT-DSSS复合系统在叠加寄生和窄带干扰条件下，仍具有较好的误码率性能，在采用最优参数集时，可以实现对目标寄生信号的完全模拟，具有较好的调制特征伪装性能，在窃听方未完全掌握先验知识条件下，可使窃听方误码率显著恶化，具有较好的系统安全性能。

参考文献

- [1] 李一楠, 张林让, 卢海梁, 等. 基于地基综合孔径微波辐射计的空中目标无源探测技术研究[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(5): 1243–1250. doi: 10.11999/JEIT200166.
LI Yi'nan, ZHANG Linrang, LU Hailiang, et al. Research on the aerial target detection by ground-based synthesis aperture microwave radiometers[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(5): 1243–1250. doi: 10.11999/JEIT200166.
- [2] 王谦喆, 何召阳, 宋博文, 等. 射频隐身技术研究综述[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(6): 1505–1514. doi: 10.11999/JEIT170945.
WANG Qianzhe, HE Zhaoyang, SONG Bowen, et al. Overview on RF stealth technology research[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(6): 1505–1514. doi: 10.11999/JEIT170945.
- [3] MEI Lin, SHA Xuejun, RAN Qinwen, et al. Research on the application of 4-weighted fractional Fourier transform in communication system[J]. *Science China Information Sciences*, 2010, 53(6): 1251–1260. doi: 10.1007/s11432-010-0073-1.
- [4] LIANG Yuan, DA Xinyu, WU Jialiang, et al. WFRFT modulation recognition based on HOC and optimal order searching algorithm[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2018, 29(3): 462–470. doi: 10.21629/JSEE.2018.03.03.
- [5] LIANG Yuan, XIANG Xin, SUN Ye, et al. Novel modulation recognition for WFRFT-based system using 4th-order cumulants[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 86018–86025. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2925691.
- [6] LIANG Yuan, DA Xinyu, XU Ruiyang, et al. Research on constellation-splitting criterion in multiple parameters WFRFT modulations[J]. *IEEE Access*, 2018, 6:

- 34354-34364. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2848918](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2848918).
- [7] 王浩波, 达新宇, 徐瑞阳, 等. 双极化卫星MP-WFRFT星座裂变安全传输技术[J]. 西安电子科技大学学报, 2020, 47(3): 121-127. doi: [10.19665/j.issn1001-2400.2020.03.017](https://doi.org/10.19665/j.issn1001-2400.2020.03.017).
WANG Haobo, DA Xinyu, XU Ruiyang, *et al.* Constellation splitting security transmission technology based on the multi-parameter weighted-type fractional Fourier transform for dual-polarized satellites[J]. *Journal of Xidian University*, 2020, 47(3): 121-127. doi: [10.19665/j.issn1001-2400.2020.03.017](https://doi.org/10.19665/j.issn1001-2400.2020.03.017).
- [8] 梁源, 达新宇. 基于多参数加权分数阶傅里叶变换的星座预编码系统研究与实现[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(4): 825-831. doi: [10.11999/JEIT170673](https://doi.org/10.11999/JEIT170673).
LIANG Yuan and DA Xinyu. Analysis and implementation of constellation precoding system based on multiple parameters weighted-type fractional Fourier transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(4): 825-831. doi: [10.11999/JEIT170673](https://doi.org/10.11999/JEIT170673).
- [9] 梁源, 达新宇, 徐瑞阳, 等. 隐蔽通信中MP-WFRFT系统星座预编码设计[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2018, 46(2): 72-78. doi: [10.13245/j.hust.180214](https://doi.org/10.13245/j.hust.180214).
LIANG Yuan, DA Xinyu, XU Ruiyang, *et al.* Design of constellation precoding in MP-WFRFT based system for covert communications[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology:Natural Science Edition*, 2018, 46(2): 72-78. doi: [10.13245/j.hust.180214](https://doi.org/10.13245/j.hust.180214).
- [10] 徐瑞阳, 达新宇, 梁源, 等. 基于跳频的改进加权分数阶傅里叶变换[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2019, 47(2): 30-35. doi: [10.13245/j.hust.190206](https://doi.org/10.13245/j.hust.190206).
XU Ruiyang, DA Xinyu, LIANG Yuan, *et al.* Improved weighted fractional Fourier transform based on frequency hopping[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology:Natural Science Edition*, 2019, 47(2): 30-35. doi: [10.13245/j.hust.190206](https://doi.org/10.13245/j.hust.190206).
- [11] LIU Feng, WANG Ling, XIE Jian, *et al.* MP-WFRFT and chaotic scrambling aided directional modulation technique for physical layer security enhancement[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 74459-74470. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2921109](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2921109).
- [12] WANG Xikang, MENG Qingwei, YANG Jianguang, *et al.* MPWFRFT secure communication scheme based on chaotic CP insertion[C]. 2021 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), Xi'an, China, 2021: 1-5. doi: [10.1109/ICSPCC52875.2021.9564650](https://doi.org/10.1109/ICSPCC52875.2021.9564650).
- [13] 张喆, 达新宇, 刘慧军, 等. 卫星混合载波混沌相位扰码安全传输方案[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(12): 42-48. doi: [10.7652/xjtub201712007](https://doi.org/10.7652/xjtub201712007).
ZHANG Zhe, DA Xinyu, LIU Huijun, *et al.* A secure transmission scheme for satellite communications based on hybrid carrier and chaotic phase scrambling[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(12): 42-48. doi: [10.7652/xjtub201712007](https://doi.org/10.7652/xjtub201712007).
- [14] 倪磊, 达新宇, 胡航, 等. 基于改进Logistic相位扰码的抗截获通信[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2019, 47(6): 35-40. doi: [10.13245/j.hust.190607](https://doi.org/10.13245/j.hust.190607).
NI Lei, DA Xinyu, HU Hang, *et al.* Research on anti-interception communication based on improved Logistic phase scrambling[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology:Natural Science Edition*, 2019, 47(6): 35-40. doi: [10.13245/j.hust.190607](https://doi.org/10.13245/j.hust.190607).
- [15] 达新宇, 翟东, 梁源, 等. 联合多层WFRFT与人工噪声的抗截获通信技术[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2018, 46(10): 86-91. doi: [10.13245/j.hust.181015](https://doi.org/10.13245/j.hust.181015).
DA Xinyu, ZHAI Dong, LIANG Yuan, *et al.* Anti-interception communication technology combining multi-layers WFRFT and artificial noise[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology:Natural Science Edition*, 2018, 46(10): 86-91. doi: [10.13245/j.hust.181015](https://doi.org/10.13245/j.hust.181015).
- [16] 翟东, 达新宇, 王浩波, 等. AN辅助的WFRFT抗截获通信优化设计[J]. 火箭与制导学报, 2018, 38(6): 27-32. doi: [10.15892/j.cnki.djzdx.2018.06.007](https://doi.org/10.15892/j.cnki.djzdx.2018.06.007).
ZHAI Dong, DA Xinyu, WANG Haobo, *et al.* Anti-interception communication technology based on WFRFT and artificial noise[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2018, 38(6): 27-32. doi: [10.15892/j.cnki.djzdx.2018.06.007](https://doi.org/10.15892/j.cnki.djzdx.2018.06.007).
- [17] 翟东, 达新宇, 张喆, 等. 多层WFRFT-MIMO卫星通信系统抗截获性能研究[J]. 火箭与制导学报, 2021, 41(1): 70-75. doi: [10.15892/j.cnki.djzdx.2021.01.015](https://doi.org/10.15892/j.cnki.djzdx.2021.01.015).
ZHAI Dong, DA Xinyu, ZHANG Zhe, *et al.* Research on anti-intercept performance of multi-layer WFRFT-MIMO satellite communication system[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2021, 41(1): 70-75. doi: [10.15892/j.cnki.djzdx.2021.01.015](https://doi.org/10.15892/j.cnki.djzdx.2021.01.015).
- [18] DA Xinyu, LIANG Yuan, HU Hang, *et al.* Embedding WFRFT signals into TDCS for secure communications[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 54938-54951. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2872936](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872936).
- [19] 倪磊, 达新宇, 王舒, 等. 基于物理层信息加密的卫星隐蔽通信研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(1): 133-139. doi: [10.15961/j.jsuese.201700160](https://doi.org/10.15961/j.jsuese.201700160).
NI Lei, DA Xinyu, WANG Shu, *et al.* Research on satellite covert communication based on the information encryption of physical layer[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(1): 133-139. doi: [10.15961/j.jsuese.201700160](https://doi.org/10.15961/j.jsuese.201700160).
- [20] NIKBAKHT S, ANITESCU C, and RABCZUK T. Optimizing the neural network hyperparameters utilizing genetic algorithm[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2021, 22(6): 407-426. doi: [10.1631/jzus.A2000384](https://doi.org/10.1631/jzus.A2000384).
- 杨宇晓: 男, 博士, 副研究员, 研究方向为射频隐身技术、卫星通信等。
高萍: 女, 硕士, 研究方向为射频隐身技术、卫星通信等。