



专题：星地融合移动通信及卫星互联网

星地场景下 OTFS 系统的一种峰均比抑制算法

宋强健, 陈雨濛, 朱立东

(电子科技大学通信抗干扰全国重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要: 正交时频空 (orthogonal time frequency space, OTFS) 调制在高多普勒环境下可实现可靠通信, 适用于卫星通信等高动态场景。然而, 其峰值与平均功率比 (peak-to-average power ratio, PAPR) 易超出功放线性范围, 导致非线性失真。部分传输序列 (partial transfer sequence, PTS) 算法通过对数据符号分块再选取合适的旋转因子可以抑制 PAPR。为提高 PTS 算法抑制 PAPR 的能力, 提出了一种基于改进的灰狼优化 (improved grey wolf optimizer, IGWO) 算法的 PTS 算法, 即 IGWO-PTS 算法, 以适应离散组合优化问题并获得更优的子块划分方案, 从而获得更好的 PAPR 抑制能力。推导证明了当相位旋转因子集合元素具有旋转对称性时, 相位旋转因子组合空间可以收缩为原来的 $1/K$ (K 为集合中元素个数), 极大程度上降低了系统复杂度。仿真实验表明, IGWO-PTS 算法相对于传统算法具有更好的 PAPR 抑制性能, 并且在星地高动态场景下可以保持良好的传输可靠性。

关键词: 峰值与平均功率比; 部分传输序列算法; 改进的灰狼优化算法; 空间域收缩; 正交时频空

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025132

A peak-to-average power ratio reduction algorithm for OTFS systems in satellite-to-ground scenarios

SONG Qiangjian, CHEN Yumeng, ZHU Lidong

National Key Laboratory of Wireless Communications of UESTC, Chengdu 611731, China

Abstract: Orthogonal time frequency space (OTFS) modulation is shown to enable reliable communication in high-Doppler environments, making it suitable for high-mobility scenarios such as satellite communication. However, its high peak-to-average power ratio (PAPR) often exceeded the linear range of power amplifiers, causing nonlinear distortion. The partial transmit sequence (PTS) algorithm was utilized to mitigate PAPR by dividing data symbols into subblocks and selecting appropriate phase rotation factors. To enhance the PAPR suppression capability of the PTS algorithm, an improved grey wolf optimizer-based PTS algorithm, termed IGWO-PTS, was proposed to address the discrete combinatorial optimization problem, achieving a more optimal subblock partitioning scheme and better PAPR re-

收稿日期: 2025-01-16; 修回日期: 2025-04-29

通信作者: 朱立东, zld@uestc.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62371098)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.62371098)

duction. It was mathematically proven that when the elements of the phase rotation factor set exhibited rotational symmetry, the phase rotation factor combination space could be reduced to $1/K$ of its original size (where K denotes the number of set elements), resulting in significant reduction in system complexity. Simulation results demonstrate that the IGWO-PTS algorithm outperforms traditional methods in PAPR reduction, maintains reliable transmission in high-mobility satellite-to-ground scenarios.

Key words: peak-to-average power ratio, partial transfer sequence algorithm, improved grey wolf optimizer algorithm, space domain reduction, orthogonal time frequency space

0 引言

近年来,随着地面移动通信网络技术、空间通信网络技术与海洋通信网络技术的不断融合以及卫星技术的不断进步,空天地海一体化通信系统逐渐成为未来发展的趋势^[1]。卫星通信作为空天地海一体化通信网络架构重要的子系统,具有覆盖范围广、通信距离远、成本低、受地面极端情况影响小等优势,被认为是实现空天地海一体化通信最有前景的方案之一^[2]。但是,卫星尤其是低轨卫星相对地面移动速度大,系统将面临时变信道和高多普勒频移的巨大挑战^[3]。正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)调制技术被广泛应用于4G和5G中。在高动态场景下,OFDM系统子载波正交性被破坏,存在严重的载波间干扰(inter-carrier interference, ICI),极大影响通信的可靠性^[4]。因此,实现星地高动态场景下可靠通信是目前的一大挑战。正交时频空(orthogonal time frequency space, OTFS)调制作为一种新型的二维调制方案^[5],在时延-多普勒(delay-Doppler, DD)域上进行处理变换,可以将高动态通信中的双色散信道转换为DD域中的准平稳信道^[6],保证了通信的可靠性。与OFDM类似,OTFS也会因为同相位信号叠加出现较高的峰值与平均功率比,简称峰均比(peak-to-average power ratio, PAPR)。当高功率信号进入功率放大器的非线性区域时,会导致信号非线性畸变,进而影响系统的整体性能。因此,降低PAPR对提升通信的可靠性有着

重要意义。文献[7]中分析证明了OTFS系统的最大PAPR与多普勒格数 N 成正比,但是并没有提出抑制PAPR的方法。在文献[8]中,使用了传统的 μ 律压扩技术解决OTFS系统的PAPR问题。文献[9]中提出了一种基于迭代限幅滤波(iterative clipping and filtering, ICF)的框架,该方案通过设置不同的限幅参数与滤波参数实现PAPR和误码率(bit error rate, BER)之间的平衡。文献[10]通过求解约束优化问题以设计最优的预编码矩阵来降低OTFS系统的PAPR。选择映射(selective mapping, SLM)算法^[11-14]通过设置多组相位序列矢量并与原始信息符号点乘,再从多组数据序列中选择PAPR最低的一组进行传输,通过干扰子载波相位,降低高功率信号出现的概率。与SLM算法原理相似,部分传输序列(partial transfer sequence, PTS)算法^[11,15]也是常见的概率类方法。PTS算法先对数据符号分块,再选取合适的相位旋转因子,以获得PAPR比较低的信号。但是,传统的PTS算法对OTFS系统PAPR的抑制能力有限,难以满足低PAPR通信系统的需求。为了提升PTS算法抑制PAPR的能力, Mirjalilis等^[16]受到灰狼捕猎的启发,通过模拟灰狼等级、包围、捕猎等一系列社会行为,提出了灰狼优化(grey wolf optimizer, GWO)算法。然而,原始的GWO算法是在连续域内优化问题,无法直接对离散组合问题进行求解,且容易陷入局部最优。针对上述问题,本文提出了基于改进的灰狼优化(improved grey wolf optimizer, IGWO)算法的PIS算法,即IGWO-PTS,使用IGWO算法在PTS



算法中选取最优的子块划分方案, 进一步提升 PTS 算法对 OTFS 系统的 PAPR 抑制能力。具体而言, 本文提出了离散编解码策略以适应离散组合优化问题, 并引入遗传算法中的交叉操作和变异操作^[17]以适应原 GWO 算法的“捕食行为”和提升全局搜索能力, 引入邻域搜索算法的破坏修复操作进一步加强局部搜索能力^[18]。此外, 本文推导分析了当相位旋转因子集合元素具有旋转对称性时, 在保证降低 PAPR 性能不变的情况下, 相位旋转因子组合空间可以收缩为原来的 $1/K$ (K 为集合中元素个数), IGWO-PTS 算法可以在原 PTS 算法基础上进一步降低系统的 PAPR。在低轨星地高移动性场景下, 使用 TDL-A、TDL-B、TDL-C 和 TDL-D 信道模型进行仿真研究^[19], 结果表明 IGWO-PTS 算法依然可以保持有效的传输可靠性。

1 OTFS 系统模型与 PAPR 分析

1.1 OTFS 信号模型

OTFS 系统示意图如图 1 所示。在系统发射端, 经过星座映射后的数据符号 $x[k, l]$, $k=0, 1, \dots, N-1$, $l=0, 1, \dots, M-1$ 排列在二维 DD 格内。通过逆辛有限傅里叶变换 (inverse symplectic finite Fourier transform, ISFFT) 转换为二维时频域信号 $X[n, m]$ 。接着, 利用 Heisenberg 变换进行多载波调制, 将二维时频域信号转换为时域信号 $s(t)$ 。发射信号经过无线信道传输后, 在接收端通过 Wigner 变换进行多载波解调得到二维时频域信号 $Y[n, m]$ 。最后, 信号经过辛有限傅里叶变换 (symplectic finite Fourier transform, SFFT) 恢

复为二维 DD 域信号。其中, SFFT 和 Wigner 变换分别是 ISFFT 和 Heisenberg 变换的逆变换。OTFS 调制将时频域的双色散信道转换为 DD 域准平坦信道, 更能抵抗信道的时变特性。此外, OTFS 系统与 OFDM 系统有很好的兼容性, 可在 OFDM 系统基础上通过添加相关的模块来实现。

DD 域符号 $x[k, l]$ 通过 ISFFT 转换为时频域信号 $X[n, m]$, 可用式 (1) 表示。

$$X[n, m] = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} x[k, l] e^{j2\pi \left(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M} \right)} \quad (1)$$

通过 Heisenberg 变换得到发射信号 $s(t)$:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} X[n, m] g_{tx}(t-nT) e^{j2\pi m \Delta f (t-nT)} \quad (2)$$

其中, $g_{tx}(t)$ 为发射脉冲波形, N 为多普勒格数 (符号数), M 为时延格数 (子载波数), T 为时域采样持续时间, Δf 为子载波间隔。

当发射信号 $s(t)$ 经过无线信道 $h(\tau, \nu)$ 后, 接收信号 $r(t)$ 可表示为:

$$r(t) = \iint h(\tau, \nu) s(t-\tau) e^{j2\pi \nu (t-\tau)} d\nu d\tau + n(t) \quad (3)$$

其中, $n(t)$ 表示加性高斯白噪声。

无线信道 $h(\tau, \nu)$ 可表示为:

$$h(\tau, \nu) = \sum_{i=1}^P h_i \delta(\tau - \tau_i) \delta(\nu - \nu_i) \quad (4)$$

其中, $\delta(\cdot)$ 为 Dirichlet 函数, P 为多径数量, τ_i 和 ν_i 分别表示第 i 条路径的时延和多普勒频移。

在接收端, 接收信号 $r(t)$ 经过 Wigner 变换转换为时频域信号 $Y[m, n]$:

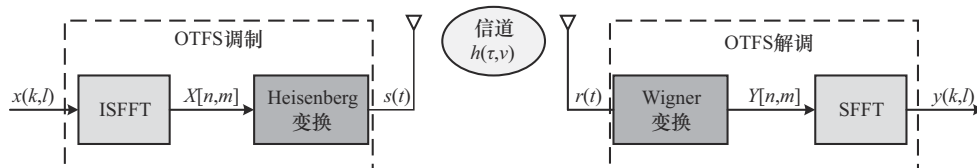


图 1 OTFS 系统示意图

$$Y[m, n] = \int r(t) g_{rx}(t - nT) e^{-j2\pi m \Delta f (t - nT)} dt \quad (5)$$

其中, g_{rx} 为接收脉冲波形。

最后通过 SFFT 将其重新转换到 DD 域上, SFFT 的具体计算过程如下。

$$y[k, l] = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} Y[m, n] e^{j2\pi \left(-\frac{nk}{N} + \frac{ml}{M} \right)} \quad (6)$$

1.2 PAPR 分析

若以采样率 $f_s = 1/T_s = B = M\Delta f$ 对式 (2) 进行采样, 则 OTFS 离散信号可表示为:

$$s_u = s(uT_s) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} X[n, m] \cdot g_{tx}(uT_s - nT) e^{j2\pi m \Delta f (uT_s - nT)} \quad (7)$$

其中, $u = 0, 1, \dots, NM - 1$ 。

在发射端, 信号必须通过功率放大器才能进入无线信道进行传输, 则一帧 OTFS 离散信号的 PAPR 为:

$$\text{PAPR}_{\text{otfs}} = \frac{\max_{u=0, 1, \dots, NM-1} |s_u|^2}{E[|s_u|^2]} \quad (8)$$

其中, $E[\cdot]$ 为期望运算符。

当 $g_{tx}(t)$ 为理想矩形脉冲时, 可以得到 OTFS 信号 PAPR 的上界为:

$$\text{PAPR}_{\text{max}} = \frac{N \max_{k, l} \left\{ |x[k, l]|^2 \right\}}{E \left\{ |x[k, l]|^2 \right\}} \quad (9)$$

从式 (9) 可以看出, 与 OFDM 信号不同, OTFS 信号的 PAPR 随多普勒格数 N 呈线性增加。

由于通信数据的随机性, OTFS 的时域发送信号表现出包络波动特性, 通常使用互补累积分布函数 (complementary cumulative distribution function, CCDF) 来描述 OTFS 信号的 PAPR 性能, CCDF 曲线表示 PAPR 超过 OTFS 信号某一阈值的概率。OTFS 信号的 CCDF 表达式为:

$$\begin{aligned} \text{CCDF}_{\text{otfs}} &= \Pr(\text{PAPR}_{\text{otfs}} > \gamma) = \\ &= 1 - \Pr(\text{PAPR}_{\text{otfs}} \leq \gamma) \approx 1 - (1 - e^{-\gamma})^{MN} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $\Pr(\cdot)$ 表示概率函数, γ 为常数。

2 PTS 算法

2.1 算法描述

PTS 算法主要通过选择最优相位旋转因子来降低信号高峰值功率的概率。PTS 算法将映射的数据符号划分成多个子块, 然后对子块执行相位旋转, 最后将子块合并选择 PAPR 最小的信号进行数据传输。由于相位旋转是线性变换, PTS 算法是一个线性过程, 因此, 不存在信号的畸变失真。

由式 (9) 可知, OTFS 信号 PAPR 的上界与多普勒格数 N 有关。因此, 将多普勒格划分为多个子块, 然后选择最优的相位旋转因子以降低 PAPR。

DD 域数据符号 $x[k, l]$ 经过 ISFFT 转换为时频域信号 $X[n, m]$, 根据某种特定的划分方法将时频信号 $X[n, m]$ 划分为 V 组相互独立的子数据块, 记为 $X_v[n, m]$, $v = 1, 2, \dots, V$, 其中每 2 组数据块之间互不相交, 每个数据块中的时延格信息数为 N/V , 具体可用表达式 (11) 表示。常见的划分方式有随机划分、相邻划分和交织划分等。

$$X[n, m] = \sum_{v=1}^V X_v[n, m] \quad (11)$$

接下来, 引入相位旋转因子 $b_v = e^{j\varphi_v}$, $v = 1, 2, \dots, V$, 其中 φ_v 在 $[0, 2\pi)$ 服从均匀分布, 划分后的子数据块与对应的相位旋转因子相乘, 实现子数据块的相位旋转, 得到新时频域信号 $X'[n, m]$:

$$X'[n, m] = \sum_{v=1}^V b_v X_v[n, m] \quad (12)$$

对新时频域信号进行 Heisenberg 变换, 得到新时域信号 $s'(t)$:



$$s'(t) = \sum_{v=1}^V b_v \left(\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} X_v[n, m] g_{\text{tx}}(t-nT) e^{j2\pi m \Delta f (t-nT)} \right) = \sum_{v=1}^V b_v s_v(t) \quad (13)$$

其中, $s_v(t)$ 为第 v 组时频信号 $X_v[n, m]$ 经过 Heisenberg 变换得到的时域信号。

$$s_v(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} X_v[n, m] g_{\text{tx}}(t-nT) e^{j2\pi m \Delta f (t-nT)} \quad (14)$$

PTS 算法的目标是寻找一组最优的相位旋转因子, 使得经过相位旋转后的 OTFS 信号的 PAPR 最小。当 PAPR 最小时, 相位旋转因子可表示为^[11]:

$$\{b_1, b_2, \dots, b_V\} = \arg \min_{\{b_1, b_2, \dots, b_V\}} \left(\max \left(\left| \sum_{v=1}^V b_v s_v \right|^2 \right) \right) = \arg \min_{\{b_1, b_2, \dots, b_V\}} \left(\max \left(|s(t)|^2 \right) \right) \quad (15)$$

其中, $\arg \min(\cdot)$ 表示取最小值, $\max(\cdot)$ 表示取最大值。

由式 (15) 可以看出, 时域发射信号峰值功率最小时, 相位旋转因子组合为最优。

2.2 相位旋转因子组合空间收缩

在传统的 PTS 算法中, 相位旋转因子 b_v 通常在一个有限集合中均匀取值, 即 $b_v \in G$ 。其中 G 为包含有限元素的集合。设集合 G 包含 K 个元素, 时频信号划分为 V 组相互独立的子数据块, 则获得最优的一组相位旋转因子需要遍历全部值, 即 K^V 。为了降低计算量和系统复杂度, 本节推导证明了当集合 G 中的元素满足旋转对称特性时, 在实现信号 PAPR 性能不变的条件下, 相位旋转因子组合空间可以收缩为原来的 $1/K$, 即 K^{V-1} , 极大程度上降低了系统复杂度。具体的证明过程如下。

若集合 G 具有旋转对称特性, 则集合 G 中元素 $g \in G$, $g' = g \cdot e^{j2\pi k/K} \in G$, $k=0, 1, \dots, K-1$ 。相位旋转因子 b_v 在集合 G 中均匀取值, 设一组相位旋转因子 $\{b_1, b_2, \dots, b_V\} \in G$, 则存在相位旋转因子 $\{b'_1, b'_2, \dots, b'_V\} = \{b_1, b_2, \dots, b_V\} \cdot e^{j2\pi k/K} \in G$, $k=0, 1, \dots, K-1$ 。将上述 K 组相位旋转因子编为一列, 则一列相位旋转因子可以统一表示成该列中某组相位旋转因子 $\{b_1, b_2, \dots, b_V\}$ 乘上旋转常量 $e^{j2\pi k/K}$ 。

将式 (13) 改写成矩阵的形式:

$$s' = \left(\mathbf{G}_{\text{tx}} \otimes \left(\sum_{v=1}^V b_v [\mathbf{F}_N^H]_v \right) \right) \mathbf{x} \quad (16)$$

其中, \mathbf{F}_N^H 为 N 点 IDFT 矩阵, 且 $\mathbf{F}_N^H = \sum_{v=1}^V [\mathbf{F}_N^H]_v$; \otimes 表示克罗内克积计算; \mathbf{G}_{tx} 为发射脉冲矩阵; \mathbf{x} 为二维 DD 符号的向量表示。

将相位旋转因子 $\{b'_1, b'_2, \dots, b'_V\} = \{b_1, b_2, \dots, b_V\} \cdot e^{j2\pi k/K} \in G$ 代入式 (16), 可得:

$$s'' = \left(\mathbf{G}_{\text{tx}} \otimes \left(\sum_{v=1}^V b'_v [\mathbf{F}_N^H]_v \right) \right) \mathbf{x} = \left(\mathbf{G}_{\text{tx}} \otimes \left(\sum_{v=1}^V e^{j2\pi k/K} b_v [\mathbf{F}_N^H]_v \right) \right) \mathbf{x} = e^{j2\pi k/K} \left(\mathbf{G}_{\text{tx}} \otimes \left(\sum_{v=1}^V b_v [\mathbf{F}_N^H]_v \right) \right) \mathbf{x} = e^{j2\pi k/K} \cdot s' \quad (17)$$

根据 IDFT 的齐次性可知, 上述一列中的相位旋转因子将会得到统一的时域信号。设经过该列某组相位旋转因子变换后的时域发射信号为 $s(t)$, 则经过该列相位旋转因子变换后的时域发射信号可统一表示为 $C \cdot s(t)$, C 为常量。因此, 经过该列相位旋转因子变换后的时域发射信号峰均比相同, 在搜索遍历的时候可以只计算一次。在实现最优 PAPR 的条件下, 通过上述操作, 可将原相位旋转因子组合空间缩小为原来的 $1/K$ 。接下来通过具体实例验证上述结论。

设相位旋转因子集合 $G = [1, j, -1, -j]$, 时频

信号划分为4组相互独立的子数据块，从集合 G 中取一组相位旋转因子组合 $\{1, 1, -1, -1\}$ ，则存在其他3组相位旋转因子组合 $\{j, j, -j, -j\}$ 、 $\{-1, -1, 1, 1\}$ 、 $\{-j, -j, j, j\}$ ，满足以下关系：

$$\begin{aligned} \{j, j, -j, -j\} &= j \cdot \{1, 1, -1, -1\} \\ \{-1, -1, 1, 1\} &= -1 \cdot \{1, 1, -1, -1\} \\ \{-j, -j, j, j\} &= -j \cdot \{1, 1, -1, -1\} \end{aligned} \quad (18)$$

发射信号满足以下关系：

$$\begin{aligned} s'_{\{j, j, -j, -j\}} &= j \cdot s'_{\{1, 1, -1, -1\}} \\ s'_{\{-1, -1, 1, 1\}} &= -1 \cdot s'_{\{1, 1, -1, -1\}} \\ s'_{\{-j, -j, j, j\}} &= -j \cdot s'_{\{1, 1, -1, -1\}} \end{aligned} \quad (19)$$

上述时域信号的 PAPR 相同，在遍历搜索过程中只需要搜索其中一组即可。

3 基于 IGWO 改进的 PTS 算法

PTS 算法将多普勒格 N 划分为 V 个子块，根据排列组合原理共有 $N! / \left(((N/V)!)^V \cdot V! \right)$ 种情况，其中 $!$ 为阶乘运算。若 $N=16$ 、 $V=4$ ，则共有 2 627 625 种子块划分方案，无法全域遍历搜索。

本节提出一种基于 IGWO 策略改进 PTS 的算法，即 IGWO-PTS 算法。基本思想是将子块划分方案编码为灰狼个体位置，由于本问题为离散优化问题，引入遗传算法中的交叉操作替代灰狼个体位置在头狼的引导下进行优化。为了提升全局

搜索能力，引入遗传算法中的变异操作，同时引入领域搜索操作提升局部搜索能力。通过交叉、变异和邻域搜索等优化过程获得更优质的灰狼个体位置，最后通过解码获得 PAPR 最低的子块划分方案以及对应的相位旋转因子。与原 PTS 算法相比，IGWO-PTS 算法具有更高的搜索效率，从而获得更优的 PAPR 抑制能力。IGWO-PTS 算法示意图如图 2 所示。

通过 IGWO 算法寻找最优子块划分方案的操作步骤如下。

步骤 1 初始化。 设置灰狼种群数量为 I ，分别设置 3 匹头狼，按等级高低分别为灰狼 α 、灰狼 β 、灰狼 δ ，其他的灰狼为最低等级的灰狼 ω 。灰狼位置优化最大迭代次数为 G_{\max} 。每个灰狼个体位置由 $1 \sim NN$ 个不同的整数随机排列编码而成，将该编码序列按顺序独立均匀划分成 V 组。则按照上述划分，每个灰狼个体位置表示一种子块划分方案。

步骤 2 交叉。 设当前灰狼个体为 w ，灰狼 α 的位置为 w_α 、灰狼 β 的位置为 w_β 、灰狼 δ 的位置为 w_δ ，则灰狼个体 w 的位置更新策略如下。

$$w' = \begin{cases} \text{cross}[w, w_\alpha], \text{rand} \leq 1/3 \\ \text{cross}[w, w_\beta], 1/3 < \text{rand} \leq 2/3 \\ \text{cross}[w, w_\delta], \text{rand} \geq 2/3 \end{cases} \quad (20)$$

其中， $\text{cross}[\cdot]$ 表示 2 个灰狼个体位置进行交叉操

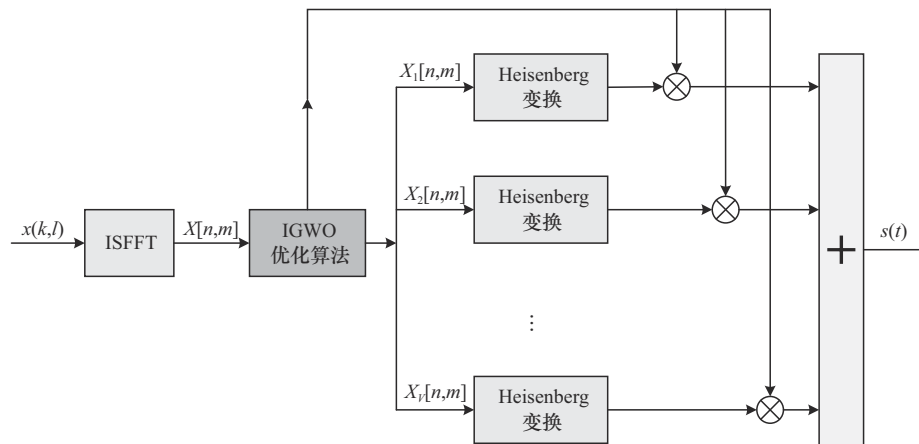


图 2 IGWO-PTS 算法示意图



作, rand为0~1的随机数。

交叉操作如图3所示。随机生成交叉位置 L_l 和 L_r (图3中为2和5),将2个个体交叉位置间的片段复制粘贴到对方个体序列前,然后分别从头至尾删除第2个位置的重复元素,最后只更新当前灰狼个体位置,保留头狼个体位置。

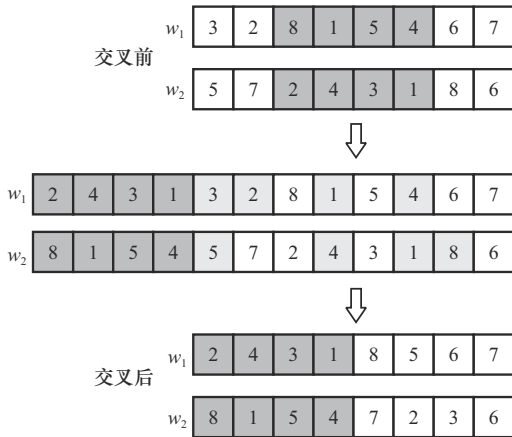


图3 交叉操作

步骤3 变异。任意灰狼 ω 个体位置都以一定的概率 P_m 发生变异,提升全局搜索能力。变异的方式类似于遗传学中的染色体易位。变异操作如图4所示。先随机生成两组长为 L 的序列,其中 $L \leq N/2$,序列元素在 $1 \sim N$ 中取值且互不相同,再将灰狼个体位置中对应位置的元素相互替换。

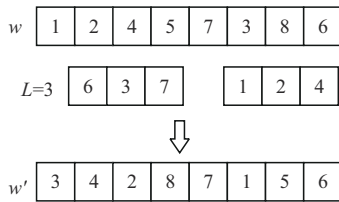


图4 变异操作

步骤4 领域搜索。灰狼 α 、灰狼 β 、灰狼 δ 用于引导狼群捕猎行为,进行领域搜索可以获得更优的灰狼个体位置,进而带领狼群实现更有效的猎杀。本节引入邻域搜索的破坏修复操作,破坏算子操作如图5所示。使用破坏算子随机取出灰狼个体中 D 个元素。再使用修复算子,将 D 个元

素置乱填充到灰狼个体位置中被取出的编码元素的位置,完成修复。修复算子操作如图6所示。在所有修复结果中选取目标函数最低的修复灰狼个体位置作为最终领域搜索结果。

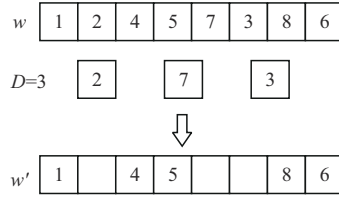


图5 破坏算子操作

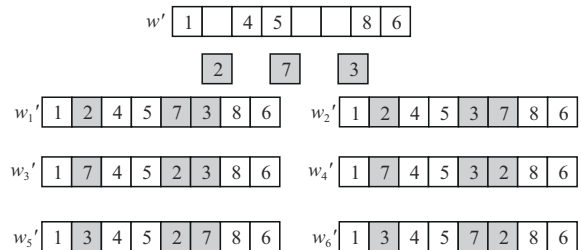


图6 修复算子操作

最后,将经过优化后的狼群个体按各自位置的质量高低(即目标函数, PAPR)重新划分等级。

为了更直观地解释IGWO算法寻找最优子块的全过程,IGWO算法流程如图7所示。

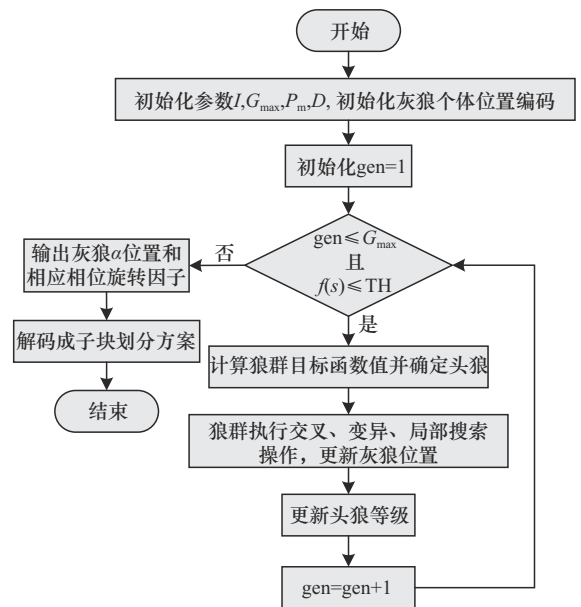


图7 IGWO算法流程

在图 7 中, $f(s)$ 为目标函数, 即灰狼 α 对应的子块划分方案的最优 PAPR, TH 为设置的 PAPR 阈值。

4 仿真实验与分析

本节通过数值仿真验证了所提出的 IGWO-PTS 算法抑制 OTFS 系统 PAPR 的有效性, 并与原始 OTFS、传统 PTS 算法、SLM 算法等进行性能对比。与此同时, 还验证了相位旋转因子组合空间域收缩的可行性。仿真实验算法参数设置^[20]见表 1。

表 1 仿真实验算法参数设置^[20]

参数	取值
子载波数 M	128
符号数 N	16、32
子载波间隔 Δf	15 kHz
载波频率 f_c	4 GHz
调制方式	QPSK
随机相位序列矢量数 Q	10
划分子块数 V	4
狼群种群数量 I	10
最大迭代次数 G_{\max}	30
变异概率 P_m	0.2
破坏修复元素个数 D	3
PAPR 阈值 TH	7 dB

仿真实验采用星地 TDL-A、TDL-B、TDL-C 和 TDL-D 信道模型评估算法性能, 相关信道参数与卫星参数^[19]分别见表 2、表 3。仿真过程中各信道模型的第 i 条径的多普勒频移 v_i 由 $v_i = v_{\max} \cos \alpha_i$ 得出。其中 α_i 在 $[-\pi, \pi)$ 上服从均匀分布, v_{\max} 是由卫星参数决定的最大多普勒频移, 其数学式如下^[20]。

$$v_{\max} = \frac{f_c V_s \sin \alpha}{c \sqrt{1 + \zeta^2 - 2\zeta \cos \alpha}} \quad (21)$$

其中, f_c 为载波频率; V_s 为卫星速度; α 为地心角; c 为光速, 通常取 3×10^8 m/s; $\zeta = (R+H)/R$, R 为地球半径, H 为卫星轨道高度。

表 2 TDL-A、TDL-B、TDL-C、TDL-D 信道模型参数

信道模型	功率延迟参数	K 因子
TDL-A	时延(归一化)=[0 1.081 1 2.841 6] 功率/dB=[0 -4.675 -6.482]	—
TDL-B	时延(归一化)=[0 0.724 9 0.741 0 5.739 2] 功率/dB=[0 -1.973 -4.332 -11.914]	—
TDL-C	时延(归一化)=[0 0 14.812 4] 功率/dB=[-0.394 -10.618 -23.373]	10.224 dB
TDL-D	时延(归一化)=[0 0 0.559 6 7.334 0] 功率/dB=[-0.284 -11.991 -9.887 -16.771]	11.707 dB

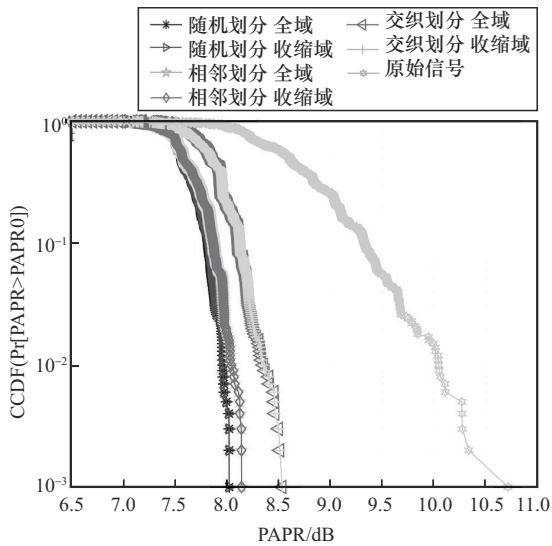
表 3 卫星通信参数设置

参数	取值
卫星轨道高度	1 500 km
卫星速度	7.11 km/h
地心角	40°

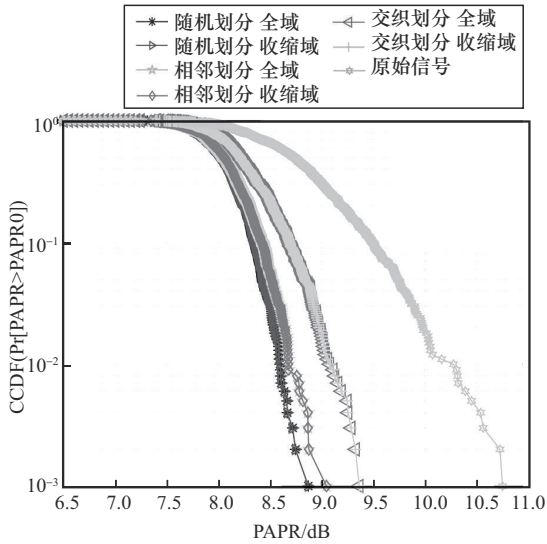
发射机与接收机的脉冲波形均为矩形波, 具体可表示为式 (22)。接收机的检测算法采用最小均方误差 (minimum mean square error, MMSE) 检测^[21]。

$$g_{\text{rectangle}}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

多普勒格数 N 为 16, PTS 算法在不同子块划分条件下采用全域和收缩域 2 种不同搜索模式的 PAPR 性能对比结果如图 8 所示。全域表示遍历搜索全部的相位因子组合结果, 分别为 $4^4 = 256$ 种、 $2^4 = 16$ 种; 收缩域表示只遍历搜索相位因子组合不成比例的结果, 分别为 $4^{4-1} = 64$ 种、 $2^{4-1} = 8$ 种。从图 8 可以看出, 在任何子块划分方式下 (随机划分、相邻划分、交织划分), 如果相位旋转因子集合中的元素满足旋转对称性, 基于收缩域搜索模式的 PTS 算法的 PAPR 性能与基于全域搜索模式相同。该结论验证了第 2.2 节提出的证明猜想: 当相位旋转因子集合中的元素满足旋转对称特性时, 在实现信号 PAPR 性能不变的条件下, 相位旋转因子组合空间可以收缩为原来的 $1/K$, K 为集合元素个数。



(a) 相位旋转因子集合为[1,j,-1,-j]

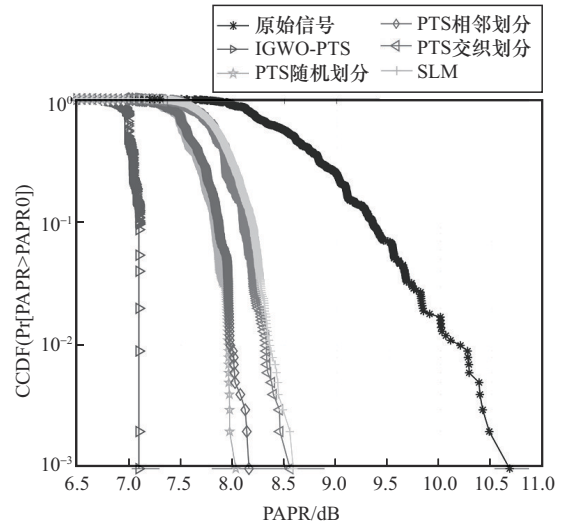


(b) 相位旋转因子集合为[1,-1]

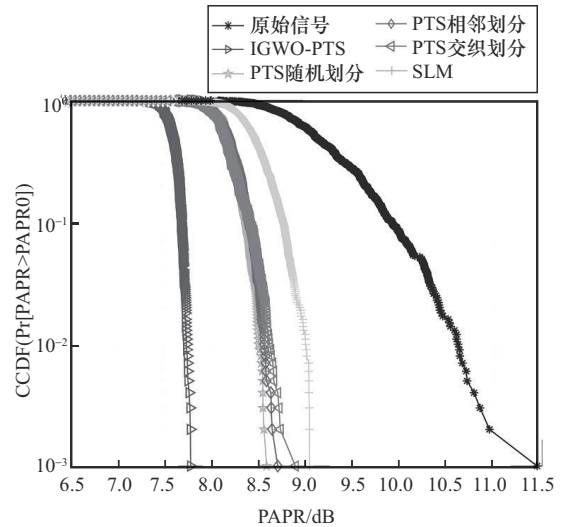
图8 PTS算法全域和收缩域搜索下PAPR性能

在相位旋转因子集合为 $[1, j, -1, -j]$ 条件下，将IGWO-PTS算法与原始信号、传统PTS算法、SLM算法等的PAPR性能进行了对比，如图9所示。从图9(a)可以观察到，IGWO-PTS算法相较于其他的方法具有更好的PAPR抑制性能。当 $CCDF = 10^{-3}$ 时，相较于原始信号，IGWO-PTS算法的PAPR性能降低约3.6 dB。与传统PTS算法相比，IGWO-PTS算法的PAPR性能改善了1~1.5 dB。对比SLM算法，IGWO-PTS算法约有

1.5 dB的优势。综合图9(a)和图9(b)，当多普勒格数 N 增大时，系统的PAPR也随 N 增大而增大。此外，当 N 增大，即多普勒格数 N 为32时，IGWO-PTS算法与其他方法相比依然具有一定的性能优势。这一结果也再次验证了IGWO-PTS算法的有效性。



(a) 多普勒格数N为16



(b) 多普勒格数N为32

图9 IGWO-PTS算法与不同方法的PAPR性能对比

在相位旋转因子集合为 $[1, j, -1, -j]$ 条件下，IGWO算法的收敛曲线如图10所示。从图10中可以看出，在未达到阈值条件下，IGWO在多次迭代过程中逐渐收敛到次优解。

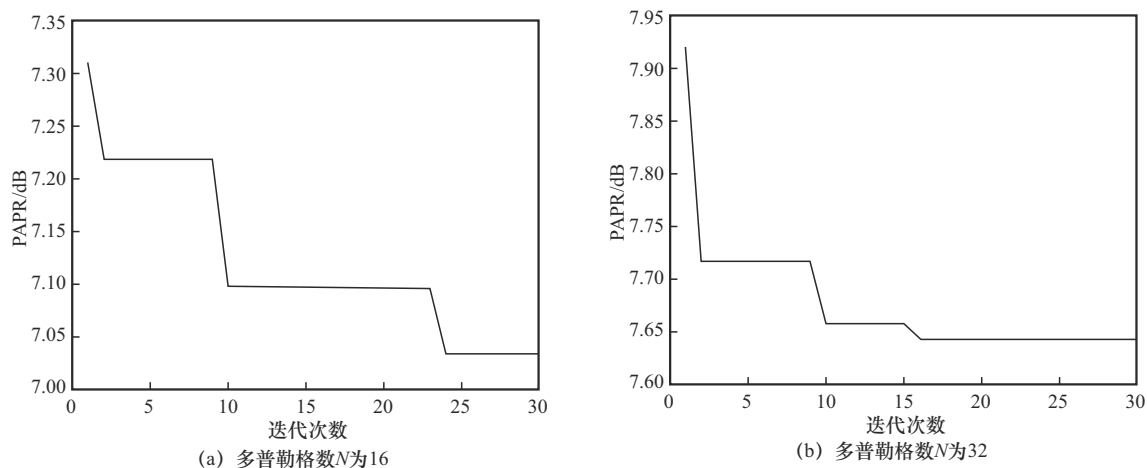


图10 IGWO算法的收敛曲线

在相位旋转因子集合为 $[1, j, -1, -j]$ 、多普勒格数 N 为16的条件下，将IGWO-PTS算法与其他方法的BER性能在不同星地TDL信道模型进行

对比，如图11所示。从图11可以看出，对于任意的星地通信场景，卫星移动速度快，将产生较大的多普勒频移，相较于OFDM，OTFS系统

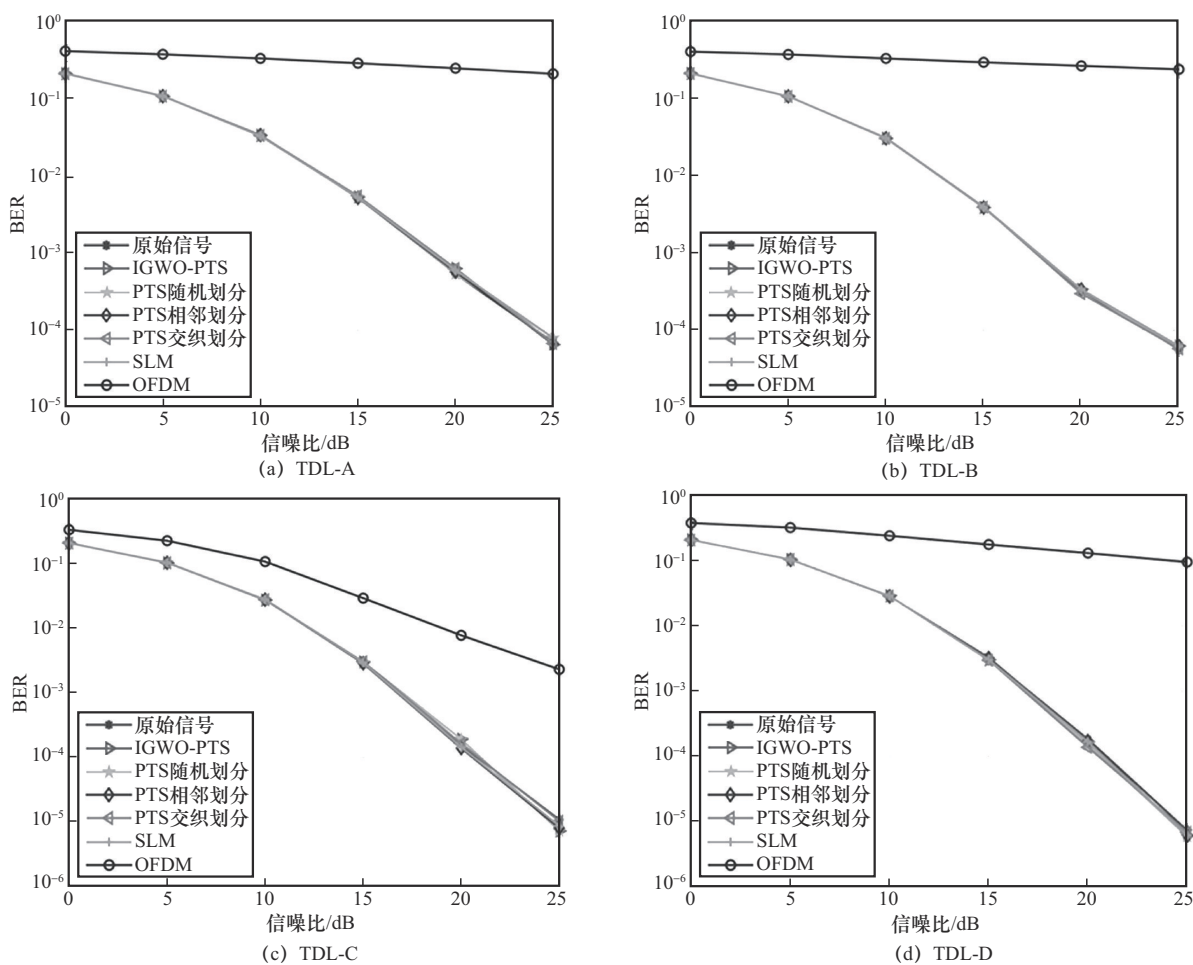


图11 不同星地TDL信道模型下IGWO-PTS与其他方法的BER性能



由于其频偏不敏感性，在星地高动态场景下依然可以保持传输可靠性，具有较好的BER性能。IGWO-PTS算法、PTS算法和SLM算法具有和原始OTFS几乎相同的BER性能，因为上述算法的处理过程均为线性变换，在接收端信号可以无失真恢复。

5 结束语

本文提出了一种基于IGWO-PTS算法的OTFS系统PAPR抑制方案。该方案基于IGWO算法，使用PTS对灰狼个体进行离散编解码，同时引入交叉、变异和邻域搜索操作适应本文的离散组合优化问题，进一步降低OTFS系统的PAPR。此外，本文推导证明了当相位旋转因子集合元素具有旋转对称性时，在相同PAPR性能下，相位旋转因子组合空间可以收缩为原来的 $1/K$ ，极大降低了运算复杂度。利用星地场景TDL-A、TDL-B、TDL-C、TDL-D信道模型进行仿真研究，仿真结果表明，本文所提出的IGWO-PTS算法对OTFS系统PAPR抑制的有效性，OTFS系统在星地高动态场景下的BER性能优势以及所证明相位旋转因子组合空间收缩的正确性。

参考文献：

- [1] 罗志勇, 朱贝贝. 卫星MIMO-OTFS通信系统低复杂度的信道均衡算法研究[C]//第十九届卫星通信学术年会论文集, 北京: 中国通信学会, 2023: 179-186.
LUO Z Y, ZHU B B. Research on low-complexity channel equalization of satellite MIMO-OTFS communication system [C]// Proceedings of 19th Academic Conference on Satellite Communications. Beijing: China Institute of Communications(CIC), 2023:179-186.
- [2] 孙耀华, 彭木根. 面向手机直连的低轨卫星通信: 关键技术、发展现状与未来展望[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 25-36.
SUN Y H, PENG M G. Low earth orbit satellite communication supporting direct connection with mobile phones: key technologies, recent progress and future directions[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 25-36.
- [3] LI T S, HE R S, AI B, et al. OTFS modulation performance in a satellite-to-ground channel at sub-6-GHz and millimeter-wave bands with high mobility[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2021, 22(4): 517-526.
- [4] 孙宇彤. 低轨卫星通信下的OTFS信号检测算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
SUN Y T. Research on OTFS signal detection algorithm in LEO satellite communication[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [5] HADANI R, MONK A. OTFS: a new generation of modulation addressing the challenges of 5G[J]. arXiv preprint, 2018: arXiv: 1802.02623.
- [6] 郭晟, 余乐, 燕贺云, 等. 基于DNN的OTFS系统信号检测方法[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(6): 808-814.
GUO C, YU L, YAN H Y, et al. A DNN based signal detection method for OTFS systems[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(6): 808-814.
- [7] SURABHI G D, AUGUSTINE R M, CHOCKALINGAM A. Peak-to-average power ratio of OTFS modulation[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(6): 999-1002.
- [8] NAVEEN C, SUDHA V. Peak-to-average power ratio reduction in OTFS modulation using companding technique[C]//Proceedings of the 2020 5th International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 140-143.
- [9] GAO S, ZHENG J P. Peak-to-average power ratio reduction in pilot-embedded OTFS modulation through iterative clipping and filtering[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(9): 2055-2059.
- [10] SU J Y, LIU S H, HUANG Y M, et al. Peak-to-average power ratio reduction via symbol precoding in OTFS modulation[C]// Proceedings of the 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [11] 张李峰. 正交时频空峰均比降低方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
ZHANG L F. Research on the method of reducing peak-to-average power ratio in orthogonal time frequency space[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [12] XU X N, YANG P, ZHANG B, et al. An improved PAPR reduction method based on imperialist competition algorithm for OTFS system[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.
- [13] LIU X, CAO L, ZHANG Z, et al. Low complexity design of

- peak-to-average power ration (PAPR) reduction scheme for OTFS modulation[C]//Proceedings of the 2022 10th International Conference on Information Systems and Computing Technology (ISCTech). Piscataway: IEEE Press, 2022: 151-155.
- [14] CHENNAMSETTY S, BODDU S, CHANDHAR P, et al. Analysis of PAPR in OTFS modulation with classical selected mapping technique[C]//Proceedings of the 2023 15th International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS). Piscataway: IEEE Press, 2023: 319-322.
- [15] SHANG X K, ZHANG Z K, XIAO Y, et al. A method for reducing PAPR of OTFS radar communication integrated signal[C]//Proceedings of the 2022 14th International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS). Piscataway: IEEE Press, 2022: 567-572.
- [16] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46-61.
- [17] WHITLEY D. A genetic algorithm tutorial[J]. Statistics and Computing, 1994, 4(2): 65-85.
- [18] ROPKE S, PISINGER D. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows[J]. Transportation Science, 2006, 40(4): 455-472.
- [19] DEVARAJALU S K, JOSE D. Performance evaluation of OTFS under different channel conditions for LEO satellite downlink[C]//Proceedings of the 2023 10th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [20] 郭晟, 余乐, 朱立东. 星地场景下基于 CNN 的 OTFS 系统信道估计方法[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(3): 37-45.
- GUO C, YU L, ZHU L D. CNN-based channel estimation method for OTFS system in satellite-ground scenario[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(3): 37-45.
- [21] SURABHI G D, CHOCKALINGAM A. Low-complexity linear equalization for OTFS modulation[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(2): 330-334.

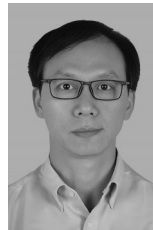
[作者简介]



宋强健 (2001-), 男, 电子科技大学硕士生, 主要研究方向为卫星通信、通信信号处理。



陈雨濛 (1997-), 男, 电子科技大学博士生, 主要研究方向为卫星通信系统资源分配和嵌入式多处理器系统。



朱立东 (1968-), 男, 博士, 电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星通信、星地网络融合、通信信号处理、通信抗干扰/抗截获等。