

混沌低截获概率通信技术研究综述

周昂¹, 王世练¹, 陈炜宇¹, 夏国江²

(1. 国防科技大学电子科学学院, 湖南长沙 410073; 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 混沌信号因具有初值敏感性、类噪声、宽频谱等特点, 在低截获概率 (LPI) 通信领域受到了广泛关注。基于此, 讨论了混沌通信系统模型及其抗截获理论基础, 从类噪声扩频、消息驱动控制、参数置乱3类不同方法阐述了混沌LPI通信波形设计方法, 进一步比较了各类混沌LPI通信体制优缺点, 指出其在抗截获能力、传输性能、工程实现中的关键问题, 并结合当前研究热点对后续研究进行了展望。

关键词: 混沌通信; 低截获概率通信; 物理层安全; 信息安全

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025176

Survey on chaos-based low probability of interception communication technology

ZHOU Ang¹, WANG Shilian¹, CHEN Weiyu¹, XIA Guojiang²

1. College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China

Abstract: Chaotic signals have attracted widespread attention in the field of low probability of interception (LPI) communication due to their sensitivity to initial conditions, noise-like properties, and broadband spectrum. The general model of chaos-based communication systems and the theoretical foundation of anti-interception capabilities were discussed. Subsequently, a comprehensive survey of design methods for chaos-based LPI waveforms was presented, classifying the methodologies into three distinct categories: noise-like spread spectrum, information-driven control, and parameter randomization. Furthermore, a comparative analysis assessed the advantages and disadvantages of various chaos-based LPI schemes. Finally, the key challenges in anti-interception capability, transmission performance, and physical implementation were identified, and the future research directions in the context of current research trends were outlined.

Keywords: chaotic communication, LPI communication, physical layer security, information security

0 引言

无线信道开放性使得通信链路极易受到窃听和攻击, 低截获概率 (LPI, low probability of interception) 通信从防止信号被检测、特征被提取、信息被获取等角度为无线传输提供安全保障。以直接序列扩频、跳频等体制为代表的经典LPI通信手段随着侦察截获设备硬件水平、信号检测理论、智能

信号处理等发展实践, 面临日益增长的被截获风险, 因此发展新型LPI通信波形具有重要意义。

混沌是一类确定性非线性系统表现出来的内在随机现象, 具有初始条件敏感性、长期不可预测等特点。混沌系统产生的信号具有非周期、类噪声、宽频谱等特性, 在LPI通信领域展现出应用潜力。根据接收方是否需本地生成同步的混沌信号, 可分

收稿日期: 2025-06-17; 修回日期: 2025-09-23

通信作者: 王世练, wangsl@nudt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62171445, No.62201590, No.62301582)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62171445, No.62201590, No.62301582)

为相干混沌通信和非相干混沌通信。典型相干方案包括混沌掩盖 (CM, chaotic masking)^[1]、混沌参数调制 (CPM, chaotic parameter modulation)^[2]、混沌移位键控 (CSK, chaos shift keying)^[3] 等。CM 将混沌信号与消息信号线性叠加, CPM 将消息嵌入系统参数, CSK 将消息映射为不同吸引子或参数, 但均需严格混沌同步, 然而无线信道下鲁棒混沌同步难以实现^[4]。典型非相干方案为差分混沌移位键控 (DCSK, differential chaos shift keying), 通过时域延迟引入参考信号实现非相干检测, 不需要混沌同步, 但引入与信息承载信号等长的参考信号导致其频谱效率低、传输可靠性差、抗截获性差。近年来, 研究人员利用时、频、空、码等域资源提出多载波 DCSK^[5-7]、索引调制 DCSK^[8-12]、可重构反射面辅助 DCSK^[13-16]、深度学习辅助 DCSK^[17-19] 等各类改进方案, 以提升其频谱效率、传输可靠性, 但难以从根本上解决因引入参考序列导致的其作为扩频波形的抗截获能力和安全性下降问题。

与传统数字通信波形相比, 以 CM、CPM、CSK、DCSK 等为代表的混沌通信波形普遍存在安全性、传输效率、可靠性上差距, 且工程实现存在宽带延迟线实现和无线信道鲁棒混沌同步困难等问题, 严重制约混沌通信落地应用。近年来, 大量新型混沌映射及伪随机序列生成、波形设计及改进优化方法不断被提出, 应用场景也从低功耗物联网、个人域网等低速短距通信, 扩展至物理层安全、通感干一体化、无线携能传输等, 展现出较大应用潜力。

本文从混沌 LPI 通信理论基础和实现手段出发, 并从类噪声扩频、消息驱动控制、参数置乱 3 个角度分类综述当前混沌 LPI 通信研究进展, 重点分析不同技术路线优缺点, 归纳梳理当前挑战, 并提出应对思路, 以期对相关研究人员提供参考。

1 混沌 LPI 通信理论基础

1.1 系统模型

混沌系统通常分为连续时间混沌系统和离散时间混沌系统 2 类。连续时间混沌系统表示为 n 维微分方程组 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{g}(\mathbf{p}, \mathbf{x}, t)$, 其中 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 表示 t 时刻 n 维状态矢量, $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ 表示 m 维系统参数, $\mathbf{g}(\cdot)$ 表示微分方程组。离散时间混沌系统表示为迭代方程 $\mathbf{x}_k = \mathbf{f}(\mathbf{p}, \mathbf{x}_{k-1})$, $k \in \mathbb{N}^+$, 其中 $\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 表示第 k 次

迭代对应 n 维状态矢量, $\mathbf{f}(\cdot)$ 表示迭代方程, 也称为映射函数。混沌系统演进由初始条件开始, 即初始时刻或首次迭代对应状态矢量, 不同时刻或迭代次数对应状态矢量按演进方向组成混沌轨道。

混沌系统主要特性为: ①初始条件敏感性。其微小变化导致长时间演进后状态出现显著差别, 可用 Lyapunov 指数表征; ②遍历性。混沌运动轨道局限于确定区域, 即吸引子, 轨道遍历吸引子中每个状态点; ③轨道不稳定性及分岔。动力学行为类型变化处对应参数为分岔点, 分岔点处存在轨道不稳定性; ④长期不可预测性。因轨道不稳定性和初始条件敏感性, 不可长期预测未来某一时刻状态。

图 1 给出混沌通信系统基本模型。收发双方事先约定混沌信号发生器参数 \mathbf{p} 。发送方生成混沌信号 x , 对消息 m 调制得到发送信号 y_t 。如图 1 中虚线所示, m 也可直接作用于混沌信号发生器。与传统通信系统相比, 区别主要为混沌信号发生器的引入使得仅获悉先验知识 (如初始条件、系统参数、信号结构等) 的接收方能正确恢复信息。

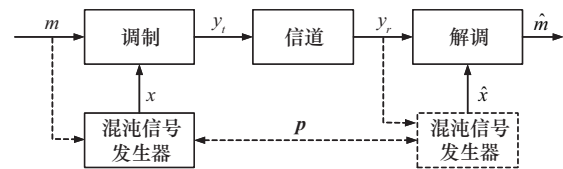


图 1 混沌通信系统基本模型

根据接收方是否需生成本地混沌信号, 可将混沌通信分为相干和非相干体制。相干体制下接收方生成同步的本地信号 \hat{x} 。同步方式可分为混沌同步或辅助同步。辅助同步也称数据辅助同步, 接收方依据 y_r 中辅助信息生成 \hat{x} 。非相干体制下接收方利用信号结构或收发双方预先约定参数等恢复信息。

1.2 抗截获能力

文献[20]指出 LPI 通信是为“合作收发方成功建立通信并最小化被非授权接收机截获的概率”。文献[21]定性地将通信截获概率 $\Pr(I)$ 定义为

$$\Pr(I) = \Pr(I|D) \times \Pr(D|C) \times \Pr(C) \quad (1)$$

其中, $\Pr(C)$ 表示覆盖概率, 即信号在时频空等维度上被截获机接收到的概率, 可理解为信号各域资源占用比例, 如时域为占空比, 频域为带宽; $\Pr(D|C)$ 表示在已接收到信号时对信号检测概率; $\Pr(I|D)$ 表示已检测到信号时对信号参数估计概率。

实际上，LPI 通信还应考虑信息利用概率 $\Pr(E|I)$ ，即截获机已获知波形参数条件下信息恢复概率。

信号隐蔽角度，也即隐蔽通信或低检测概率 (LPD, low probability of detection) 通信，评价指标为检测概率，建模为监察方关于合法发送方不发射/发射信号的二元假设检验问题，假设监察方采用辐射计 (能量检测器)。由于通信信号通常为循环平稳，基于循环平稳特征的检测器相比能量检测可提升检测性能，文献[22]认为需从频域、波形域、时频域、谱分析等方面提出隐蔽指标体系，如循环平稳度定量表示循环谱起伏程度[23]。特征隐藏角度，评价指标通常为参数估计概率，如载波频率、符号速率、码片速率。信息隐匿角度，评价指标通常为窃听方误码率、保密中断概率、保密容量等。

混沌系统可视为一类可控、可重构熵源，对于未知或部分获知先验信息的截获方，此类熵源具有高度不确定性，这构成了混沌系统可应用于 LPI 通信的理论基础。首先，混沌非周期、类随机特性适合生成低循环平稳特征波形，降低信号检测概率和参数估计概率。其次，混沌系统对初始条件和参数敏感性可提供较大密钥空间，提高窃听方误码率。最后，混沌系统的柯尔莫哥洛夫 (Kolmogorov) 熵与信息熵存在紧密关系，在时间演进中逐渐积累关于其初始状态的信息[24]，混沌波形自身可承载信息。

2 混沌 LPI 通信波形设计

2.1 基于类噪声扩频的混沌 LPI 通信

利用类噪声特性降低功率谱密度并掩盖特征，挑战在于克服残留特征、高峰均比等对截获能力及传输性能影响，最新进展集中于通过信号变换和结构创新削弱特征，结合新型硬件辅助提升性能。

2.1.1 混沌直接序列扩频

混沌直接序列扩频 (CD3S, chaotic direct sequence spread spectrum) 原理如图 2 所示，类噪声混沌信号 x 与消息 m 相乘生成扩频信号 y_t ，接收机利用同步的混沌信号相关积分解扩及符号判决。

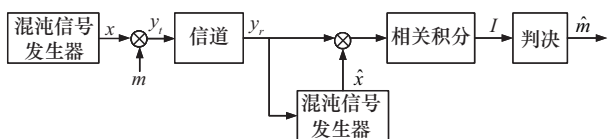


图 2 混沌直接序列扩频原理

类噪声混沌信号通常通过非线性变换产生。一种典型方案采用 Box-Muller 变换将均匀分布的随机变量变换为标准正态分布序列[25]，然而此类变换后序列仍保留迭代特征、易被检测，且要求输入序列服从均匀分布，多数混沌系统难以严格满足。另一种方案采用加权分数傅里叶变换 (WFRFT, weighted fractional Fourier transform) [26]，可有效扰乱相空间轨迹、消除原有迭代特征，但计算复杂度高。

波形设计上，文献[27]提出“无特征”混沌扩频波形，结合正交多级调制提升频谱效率，结合初始密钥分配实现自加密多址接入。文献[28]将混沌序列经 WFRFT 后用于直扩序列，采用双向相关搜索实现同步。需指出的是，CD3S 峰均比普遍较高，且传输性能依赖序列精确稳定同步，实现难度大。

2.1.2 差分混沌移位键控

DCSK 原理如图 3 所示，分时隙传输参考信号 x 和信息承载信号 mx_d ，接收端通过延迟相关恢复信息。由于参考信号与信息承载信号间的强延迟相关性，其平方谱呈现周期性谱峰，易被截获与分析。

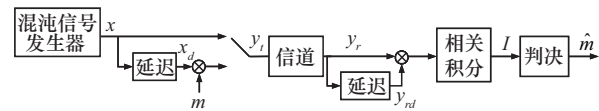


图 3 DCSK 原理

已有研究针对消除延迟相关性进行改进，如利用置换矩阵码片级乱序排列调制信号[29]，但增加控制难度，无显著传输性能增益。参考信号移位 DCSK 对参考信号循环移位后调制[30]，减弱延迟相关性且相比 DCSK 传输速率提升了一倍。基于置换和索引调制思想，可在消除延迟相关性同时提升传输性能。置换索引 DCSK (PI-DCSK, permutation index DCSK) [9]将部分信息映射为矩阵索引，进一步与多载波结合提高传输速率[31]；文献[10]利用参考信号调制置换索引；文献[32]提出置乱索引将信息承载信号置乱与参考信号叠加，避免延迟线结构，利于物理实现；文献[33]提出脉冲位置调制 DCSK，将部分比特映射为脉冲位置，但相应需要与索引比特数量指数级的延迟线结构进行相关处理，增大了复杂度。为提高抗截获能力，文献[34-35]

在正交频分复用 DCSK 框架下通过正交混沌序列分别进行幅相变换和子载波顺序置乱,但需事先约定初值等密钥参数。

尽管上述方案尝试消除延迟相关性,但窃听方仍可能通过循环谱检测信号,通过穷举或深度学习破译信息。文献[36]提出块交织可重构智能表面(RIS, reconfigurable intelligent surface)辅助多进制 DCSK,通过差异化调控合法信道和窃听信道,即使窃听者获知交织模式仍无法正确恢复信息。

2.2 基于消息驱动控制的混沌 LPI 通信

利用混沌系统特性将信息直接嵌入信号生成,提升波形内在不可预测性。挑战在于解决同步困难及窃听者对映射规则潜在分析破译风险。最新进展集中于深度学习辅助检测及高阶调制扩展等。

2.2.1 混沌参数调制

CPM 原理如图 4 所示,信息 m 映射为参数 p ,驱动混沌信号发生器生成发送信号 y_t ,接收端通过自适应控制器从 y_r 恢复参数 \hat{p} 以估计 \hat{m} 。

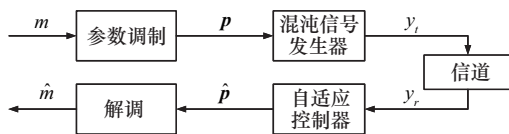


图 4 CPM 原理

经典 CPM 属相干体制,基于连续混沌系统(如 Chua^[2]、洛伦兹^[37])设置不同映射参数集,但噪声鲁棒性较差。遍历 CPM (ECPM, ergodic chaotic parameter modulation) 属非相干体制,基于伯克霍夫(Birkhoff)遍历定理,某些混沌系统的均值随参数变化具有统计不变特性及局部近似单调性。文献[38]提出双极性参数扩频 ECPM,具有接近二进制相移键控(BPSK)的误码性能且不需要复杂同步。文献[39]将 ECPM 应用于超宽带多址通信,表现出平坦功率谱和无明显谱峰,展现出良好的 LPI 特性。文献[40]通过遗传算法设计低硬件复杂度映射,在小扩展比下误码性能损失较小。文献[41]将 ECPM 与正交相移键控(QPSK)结合提出正交 ECPM (QECPM),因遍历特性,在非视距信道上误码性能优于 QPSK。

需指出,尽管 ECPM 具有可靠性、不需要同步等诸多优势,但其波形与参数映射规律明显,通过简单的低通滤波可恢复信息,其 LPI 能力亟待提升。

2.2.2 混沌移位键控

CSK 原理如图 5 所示,信息 m 映射为混沌信号发生器索引 i ,接收方判别信号对应混沌系统解调。

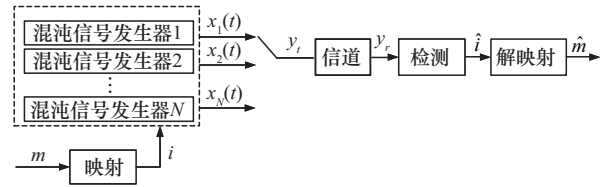


图 5 CSK 原理

传统方案依赖混沌同步进行判别^[3],但同步困难限制其应用。近年来不需要同步的广义 CSK 逐渐兴起。文献[42]提出初始条件索引 CSK,将信息映射为系统不同初始条件,接收机遍历候选条件以恢复信息。文献[43]将不同混沌序列视为“载波”(基函数),提出广义多载波 CSK (GMC-CSK, generalized multi-carrier CSK),选择若干候选载波叠加传输。文献[44]提出反极 CSK 采用类似映射思想构造正交基底以提升频谱效率。但此类方案随映射数增加,接收方复杂度指数级增大。

近年来,深度学习(DL, deep learning)被用于 CSK,核心思想是利用神经网络对混沌信号特征提取,直接从失真的接收信号中识别 CSK 基函数。文献[45]针对初始条件索引 CSK 设计基于门控递归单元网络的检测器,在多径衰落信道下误码性能显著优于文献[42]。文献[46]提出多进制深度学习 CSK 以提升频谱效率,并引入迁移学习框架在不同信噪比下训练,不需要额外导频辅助信道估计,达到瑞利衰落信道下理论 CSK 误码性能,但 AWGN 信道下误码性能较差。文献[47]利用多载波传输同一符号实现噪声平滑,但相应频谱效率下降。文献[48]将信息映射为具有不同功率谱密度的混沌映射,将功率谱密度作为特征训练,实现二分类,虽误码性能优于 DCSK,但计算功率谱密度带来额外复杂度。

需指出,窃听方可分析接收信号与有限状态对应的规律,从而实现破译,因此安全性有待提升,且 DL 类方案面临实际部署泛化能力挑战。

2.2.3 混沌联合加密调制

混沌联合加密调制(CJEM, chaos-based joint encryption and modulation)原理如图 6 所示, N_c 个比特 b_n 通过密钥 $c_0 \in \mathbb{C}$ 调制为系统初值 $x_0, y_0 \in \mathbb{R}$, 经

伯努利 (Bernoulli) 移位映射迭代生成的符号 $c_k \in \mathbb{C}$ 再经 Box-Muller 变换得到服从正态分布的符号 $s_k \in \mathbb{C}$, 接收机通过最大似然序列估计符号, 因引入密钥及类高斯波形, 降低信号检测概率同时实现加密^[49]。

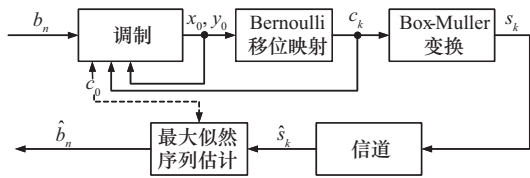


图6 混沌联合加密调制原理

CJEM 因迭代机制引入块内符号相关性, 产生随分块长度增大而逐渐显著的编码增益, 但符号检测复杂度相应呈指数级增大。为提高频谱效率, 文献[50]引入多进制调制, 但复杂度进一步增加。研究人员进一步将其与 OFDM、非正交多址、正交多级调制等技术结合^[51-53], 以实现更高容量、可靠性、频谱效率。然而上述方案需信道状态信息估计, 对此文献[54]提出基于差分编码构建的非相干高斯信号, 显著降低译码复杂度且满足以 KL 散度为准则的隐蔽约束, 但帧头插入的参考矩阵带来额外开销。此外需指出该类波形近似高斯分布, 峰均比高。

2.2.4 符号动力学混沌调制

通过对空间和时间离散化可将动力学系统演进表征为符号序列变化, 反之通过调控动力学行为可映射信息。符号动力学混沌调制 (CSDM, chaotic symbolic dynamics modulation) 原理如图 7 所示, 消息 m 调控生成 x , 通过分析接收信号 y_r 可恢复 \hat{m} 。

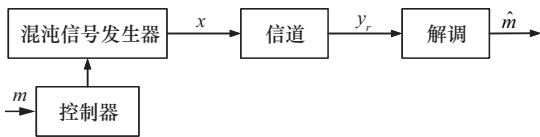


图7 符号动力学混沌调制原理

针对连续时间混沌系统, 文献[55]和文献[56]分别对洛伦兹和 Sprott D 吸引子庞加莱截面分割, 将动力学行为表示为状态转移图, 进而映射为截面轨迹坐标变化, 提出网格编码混沌调制 (TCCM, trellis-coded chaotic modulation), 因动力学行为约束赋予符号序列“语法”规则, 从而获得编码增益。

针对离散混沌映射, 文献[57]基于初始条件敏感性提出混沌编码调制 (CCM, chaos-based coded

modulation), 通过施加微小扰动控制混沌轨迹。文献[58]提出基于二区间分段线性映射反向迭代的符号动力学混沌调制, 将信息映射为状态区间, 但在区间间隔与安全性折中问题: 间隔增大改善误码性能, 但混沌特性退化导致更易被破译分析。对此文献[59]提出基于 tanh 映射的改进方案, 在不同参数下均保持较大 Lyapunov 指数。为提升 LPI 能力, 文献[60-61]分别引入相位和符号定时随机化以削弱循环谱特征, 文献[62]引入直扩。为提高频谱效率, 文献[63]提出 8 区间分段线性映射, 通过增加区间数量实现与 64QAM 相当的频谱效率。

需指出, 基于符号动力学的混沌调制波形与特定动力学行为相对应, 窃听方可通过对检测信号中不同动力学行为进行识别和破译, 亟待改进。

2.3 基于参数置乱的混沌 LPI 通信

利用混沌随机特性在信号各域动态置乱参数, 同时实现抗检测、抗参数估计和抗信息破译。挑战在于同步鲁棒性、密钥管理、高峰均比、频谱效率损失等。最新进展体现在多维置乱方案设计。

2.3.1 基于混沌置乱变换的安全传输

基于混沌置乱变换的安全传输原理如图 8 所示, 类随机混沌信号 x , 驱动参数 θ 动态变化, 接收方仅在参数同步条件下可正确解调。

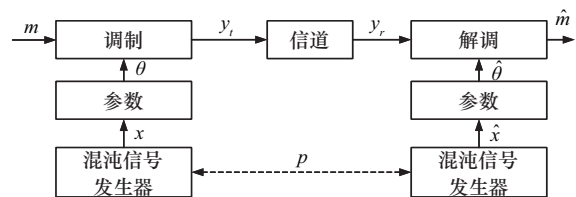


图8 基于混沌置乱变换的安全传输原理

调制域上, 文献[64]通过洛伦兹系统生成密钥, 通过幅相变换进行星座图置乱, 文献[65]提出星座旋转加密和多参数 WFRFT, 类似机制用于基于极化的多维联合调制星座旋转加密^[66]、星座缩放加密^[67]、三维星座映射与旋转联合加密^[68], 但增加计算复杂度, 且与传统加密方式本质无异。

频域上, 文献[69]将传统 BPSK 的窄带载波替换为受混沌序列控制的载频, 得到宽带信号。非周期的混沌序列也用于跳频序列设计^[70-72], 但由于确定性机制, 一些简单序列存在被破译的可能性。

码域上, 文献[73]将多个混沌序列与周期性序列叠加以削弱符号间相关性, 但牺牲能量效率。文

献[74]通过随机控制扩频周期和码速率生成具有弱循环平稳特征的跳码波形,但增大控制复杂度。

时域上,文献[75]提出由混沌序列动态控制的可变长循环前缀方案,但动态变化的前缀使得接收端相应需额外处理开销,且可能导致整体频谱效率增大。文献[76]提出符号周期置乱方案,结合相位削减BPSK和线性调频,生成具有弱循环平稳特征的通感一体LPD波形,但接收机相应地进行逆处理需额外的运算复杂度。

需指出,上述方案需收发双方约定初值参数等密钥,具体实现除混沌同步问题待解决外,还需考虑密钥(或参数和初始条件)安全分发与管理问题。

2.3.2 混沌超宽带通信

超宽带通信通过发送短脉冲承载信息,具有对信道衰落不敏感、发射功率低、抗截获能力强等优点。文献[77]提出混沌脉冲位置调制(CPPM, chaotic pulse position modulation),利用混沌映射控制脉冲间隔,生成具有平坦类噪声功率谱的波形,原理如图9所示。得益于混沌序列随机特性,仅合法用户

能实现脉冲间隔同步,非法用户难以确定脉冲间隔序列。不同混沌序列近似正交性可实现多址CPPM。

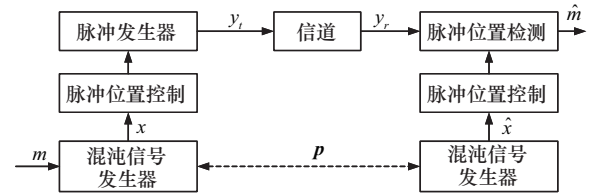


图9 混沌脉冲位置调制原理

然而, CPPM每脉冲仅传输1 bit, 能量效率较低, 文献[78]提出双极性混沌脉冲调制, 每脉冲传输2 bit以提升能量效率。文献[79]提出混沌脉冲位置编码协议数据单元, 传输相同数量比特所需脉冲数显著减少, 相比蓝牙功耗更低, 频域、时域均表现类噪声特性, 适用于能量受限的无线物联网低功耗传感器安全通信等应用场景。

3 方案对比

表1对典型方案的类型及优缺点进行了简要总

表1 混沌LPI通信典型方案对比

方案	类别	典型方案	类型	优点	缺点
基于类噪声扩频的方案	混沌直接序列扩频	文献[27-28]	相干	低循环平稳特征	高峰均比
		文献[30]	非相干	消除相关性特征	需共享置乱规则
		文献[9]	非相干	频谱效率提升	需共享映射规则
		文献[33]	非相干	频谱效率提升	时隙资源浪费
基于消息驱动控制的方案	差分混沌移位键控	文献[36]	非相干	安全容量大	需共享交织规则
		混沌参数调制	文献[2,37]	相干	高安全性
	混沌移位键控	文献[39]	非相干	不需要混沌同步	存在被破译风险
		文献[42,46]	相干	不需要混沌同步	存在被破译风险
		文献[43-44]	相干	低循环平稳特征	需预先共享密钥
		文献[49]	相干	具有编码增益	译码复杂度高
混沌联合加密调制	文献[54]	非相干	译码复杂度低	需预先共享密钥	
	符号动力学混沌调制	文献[55-56]	非相干	控制简单	存在被破译风险
基于参数置乱的方案	混沌超宽带通信	文献[57-58]	非相干	高可靠性	存在被破译风险
		文献[64-68]	相干	减弱星座图特征	高峰均比
		文献[69]	相干	宽频谱、恒包络	频谱利用率低
		文献[73]	相干	削弱符号间相关性	能量效率低
		文献[75]	相干	有效应对盲破解	相关性未消除
		文献[76]	相干	低循环平稳特征	接收复杂度增加

结, 本节重点对比分析抗截获能力和传输性能。

3.1 抗截获能力

基于类噪声扩频的方案。①CD3S 优势在于符号级变化的扩频码使得波形通常无明显循环平稳特征, 能有效抵抗符号速率估计和扩频码盲分析^[27-28]。然而其抗截获能力存在两大瓶颈: 一是性能依赖稳定的混沌同步, 其中辅助同步本身可能成为被攻击的薄弱环节; 二是高峰均比特特性导致实际系统常需通过信号削峰或截断进行峰均比抑制, 但破坏混沌信号优良特性、引入可检测特征, 直接削弱其 LPI 性能, 形成性能与抗截获能力的权衡。②DCSK 改进方案共性思路是消除或掩盖参考信号与信息承载信号之间固有相关性, 但安全性很大程度依赖预先共享置乱、映射或交织规则等^[9,30,33], 本质上回归传统通信安全密码学范畴, 安全瓶颈为共享规则保密性和密钥复杂度。而 RIS 提供了独立于共享密钥的额外物理层安全保障^[36]。

基于消息驱动控制的方案。①相干 CPM 波形通常无显著循环平稳特征, 且窃听方难以直接从波形反演系统参数, 但经典 CPM 方案依赖混沌同步, 实际应用面临鲁棒同步瓶颈^[2,37]。ECPM 虽结构简单、不需要同步且在非视距信道下可靠性较 QPSK 更高^[39], 但其信息到参数的映射关系可通过分析波形统计特性 (如均值变化规律) 被窃听方逆推, 存在严重的被识别破译风险, 不适用于高安全要求场景, 亟待改进。②基于映射思想的 CSK 其安全性依赖于具体实现: 初始条件索引 CSK^[42]和深度学习 CSK^[46]将信息映射为有限的、可重复的状态集, 这为窃听方通过长时间观测进行模式识别和机器学习分类攻击提供了可能; 广义多载波^[43]和反极 CSK^[44]虽然循环平稳特征较弱, 但其安全性同样依赖预先共享密钥或码本的保密性。③相干 CJEM 生成低特征波形的同时通过混沌迭代将加密和信道编码功能融合^[49], 能够提供编码增益, 但复杂度是其制约因素; 非相干方案虽降低了复杂度且不需要信道状态估计, 但仍需预共享密钥^[54]。④TCCM^[55-56]、CCM^[57]、CSDM^[58]等方案将信息编码不同动力学行为上, 波形循环平稳特征不明显, 然而这些由动力学行为控制的相空间转移本身可被分析, 窃听方可通过相空间重构、回归图分析等非线性动力学手段挖掘波形规律、推断映射规则进而实施破译, 其安全性依赖于动力学行为模式的

隐蔽性与复杂性, 有待持续深入研究。

基于参数置乱的方案。①通过在多个域动态随机化信号参数, 有效增加信号分析难度, 具有抗部分参数估计 (星座图识别、载频估计、码型分析) 能力, 但其安全性基石仍为预共享的密钥, 本质上与传统通信安全无异, 且置乱操作通常伴随高峰均比、低频谱效率、接收复杂度增加等问题。②以 CPPM 为代表的混沌超宽带通信具有突出的低功率谱密度特性, 但安全性同样依赖密钥和同步^[77-78,80]。

3.2 传输性能

图 10 比较了典型混沌 LPI 通信方案 AWGN 信道下误比特率曲线, CD3S 及基于混沌置乱的安全传输性能主要与其基带调制方式相关, 本文不做比较。除 CJEM 为仿真结果外, 其余均由理论公式得到。由对比可知, 相干体制中, 块长 $N_c=10$ 的 CJEM 在误比特率为 10^{-3} 时较 BPSK 展现出约 1 dB 编码增益, GMC-CSK 较 BPSK 约有 3 dB 损失, CPPM 性能最差; 非相干体制中, QECPM 接近 BPSK 性能, 间隔参数 $p = 0.1$ 的 CSDM 次之, PI-DCSK 性能最差, 但随每符号传输比特数 M 增加而改善。需指出, 误码性能与相干/非相干体制无必然联系, 而与调制原理、检测机制设计、信息承载维度等相关, 且高可靠性通常需在高复杂度、低频谱效率、安全性风险之间进行权衡。

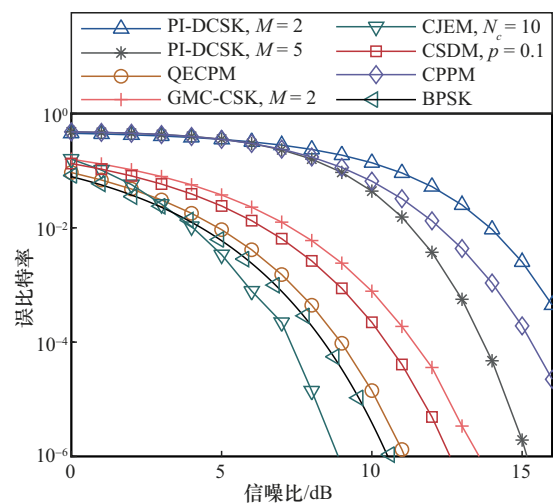


图 10 典型混沌 LPI 通信方案 AWGN 信道下误比特率曲线

表 2 对比了典型方案频谱效率和能量效率, 为确保比较公平, 假设扩频序列与参考信号长度均为 L , 码片周期为 T_c , 带宽为 B , CD3S、GMC-CSK 采用 M 进制, PI-DCSK 每符号传输 M bit, CPPM

脉冲重复周期为 T_p , PI-DCSK 中置换索引映射 M bit。频谱效率定义为数据速率与带宽之比, 能量效率定义为信息承载信号能量与比特能量比。从表 2 可知, CJEM 和 CSDM 具有更高频谱效率, CPPM 属超宽带体制因此其频谱效率最低。多进制调制或索引调制显著提高能量效率, 但相同进制下 DCSK 改进方案因引入参考信号, 其能量效率存在固有损失。

表 2 典型混沌 LPI 通信方案频谱效率和能量效率对比

典型方案名称	频谱效率	能量效率
CD3S ^[27]	$\frac{M}{BLT_c}$	M
PI-DCSK ^[9]	$\frac{M}{2BLT_c}$	$\frac{M}{2}$
QECPM ^[41]	$\frac{2}{BLT_c}$	2
GMC-CSK ^[43]	$\frac{M}{BLT_c}$	M
CJEM ^[49]	$\frac{1}{BT_c}$	1
CSDM ^[58]	$\frac{1}{BT_c}$	1
CPPM ^[77]	$\frac{1}{BT_p}$	1

4 挑战及展望

4.1 抗截获能力

4.1.1 抗检测能力

混沌信号的类噪声特点是其应用于 LPI 通信的重要理论基础。然而并非全部混沌信号均表现出类噪声特点, 且混沌信号从产生机理上与真随机信号有本质区别, 其确定性内在结构可被截获方利用, 除能量检测外截获方具有多种检测手段, 如文献[81]针对 CD3S 提出已知序列分布的检测器, 相比传统直扩码无法显著降低检测概率, 进一步结合隐蔽通信理论, 应选择具有类高斯分布波形以实现 LPD^[82]。

此外, 部分研究从混沌固有特征出发区分混沌与噪声, 典型方案为回归图分析^[25], 近年来卷积神经网络、循环神经网络被用于混沌时间序列预测^[83-84], 对波形隐蔽性构成挑战。对此, 一是设计新型混沌系统以增加复杂度, 如复杂级联映射^[85]、恒 Lyapunov 指数谱系统^[86]等, 对单个或多个吸引

子非线性变换, 抵抗回归图分析等检测手段。二是采用对抗样本攻击思想抵抗深度学习检测或时序预测。

4.1.2 抗参数估计能力

部分混沌 LPI 通信波形, 如 ECPM^[39], 存在可识别参数, 本质原因是调制过程等间隔采样、固定码扩频等操作引入周期性, 导致窃听方可通过循环谱、高阶循环统计量等信号处理手段实施估计。

对此, 可借鉴现有针对低循环平稳特征的改进方案, 例如通过对滤波器定时参数抖动、跳码扩频等在时域、码域等引入随机性, 以降低符号速率估计概率, 以循环平稳度等反映波形循环平稳特征的指标为设计原则指导设计。更进一步考虑对混沌系统本身参数随机化, 使生成信号呈现时变和非平稳特性, 截获方难以实施有效精确的检测和估计。

4.1.3 抗信息破译能力

部分波形如 ECPM^[39]、部分 CSK 改进方案^[42,46]、CSDM^[58]、TCCM^[55-56]、CCM^[57], 波形承载信息方式存在固定规律, 即信息与波形存在映射关系, 存在被信息破译风险。对此, 可增加规则模式复杂度, 窃听方需长期连续积累波形才能有效实施分析, 如文献[87]引入正交伪随机序列, 交替偏移控制混沌系统参数以抵抗扩频码盲估计。

针对波形时延相关特征, 可通过时域置乱^[30]、码域掩盖^[73]等方式减弱或消除; 也可通过将加密与其他物理层技术联合, 如 CJEM 将加密、调制、纠错编码融合一体, 使破译信息复杂度倍增^[49]。

4.2 传输性能

4.2.1 频谱效率

与传统数字通信波形相比, 混沌通信波形相比传输信息通常具有大带宽, 存在传输速率有限、频谱效率较低等问题, 特别是 DCSK 参考信号本身不承载信息, 导致频谱利用率固有损失。近年来大量工作结合索引调制思想对 DCSK、CSK 改进, 将信息隐式映射在扩频码、频率、时间等单域或多域正交资源对应索引, 提升频谱效率和能量效率。一方面, 通过探索新的信息嵌入维度特别是结合混沌内在特性的维度或其他混沌通信方案进行信息隐式承载, 可实现频谱效率跃升^[48]。另一方面, 针对索引调制普遍存在的符号检测复杂度随索引资源维度及索引比特数增加而显著增大的问题, 可针对性设计低复杂度的解映射算法^[88]或结合 DL 实现数据驱

动的检测^[46]。此外,未激活索引对应调制资源未使用,例如脉冲位置调制 DCSK 仅在激活时隙传输,吞吐量较低,对此文献^[89]提出双模索引调制 DCSK,利用全部时隙传输信息,提高频谱效率。

4.2.2 可靠性

混沌调制方案在可靠性上相较经典数字通信方案通常存在差距。一方面,实际混沌系统随机性、遍历性等与理想模型不同,难以达到理论性能;另一方面,DCSK 等波形结构本身存在理论性能上限。

近年来,部分工作通过设计新型混沌映射提高可靠性,例如基于离散忆阻器的二维混沌映射^[90]及保体积混沌映射^[91]、广义二维多项式混沌映射^[92]、二维循环混沌系统^[93],通过构造具有复杂动力学行为、相空间均匀分布、低自相关性和平坦功率谱等特点的混沌信号,从而提升系统抗噪声能力。

此外,已有大量工作利用 DL 强大的特征提取能力及非线性建模能力,对混沌映射、复杂信道环境耦合作用进行有效描述,从而提升可靠性,例如各类 DL 辅助 CSK^[42,45-48],DL 辅助 DCSK^[17-19,94],DL 辅助 TCCM 译码^[55]。同时,利用 DL 进行混沌信号降噪^[95]、信道估计^[96]也成为提高可靠性的重要手段。需指出,目前 DL 在混沌通信中的应用仍然较为基础,主要采用分类识别、时序预测等通用框架,而结合物理模型有望进一步提高可靠性或降低复杂度,如文献^[55]通过捕获动力学行为特征和调制波形结构实现符号动力学调制联合解调译码。

近年来,RIS 作为可控制及改善信道条件的低功耗、低成本手段持续受到关注,文献^[97]将 RIS 与 DCSK 结合,提出不需要信道状态信息的非相干传输方案及降噪算法,大幅改善误码性能,文献^[16]和文献^[98]分别将 RIS 与置换索引、联合索引结合实现 DCSK 高效可靠传输,但结合 RIS 的辅助方案不应停留在仅改善信噪比,还应发挥其丰富、精细的调控作用,在提升可靠性同时内生增强安全性。

非扩频体制中,CSDM 利用混沌本身演进特性传输信息,兼具高可靠性、高谱效和工程可实现性^[58],进一步可利用相邻符号迭代关系实现基于前序接收符号的最优门限提升多径信道下可靠性^[99]。

4.3 工程实现

4.3.1 有限精度下无周期数字混沌序列生成

相干混沌通信需收发双方稳定生成一致的混沌序列,在工程实现上重点需解决有限精度下无周期序列生成及鲁棒混沌同步问题。针对数字器件在有限精度下生成的混沌序列长期演进陷入周期环或不动点问题,已有工作开展周期现象检测与抵抗^[100],对状态变量和控制参数施加外部或自反馈扰动以增大序列复杂度,但额外增加控制难度。

此外,硬件实现还需综合考虑低复杂度、低时延和高吞吐量等,减少非线性函数使用。文献^[40]基于低复杂度的算子集采用遗传算法优化映射,文献^[101]采用剩余数表示系统生成多项式混沌映射,为低复杂度无周期混沌序列生成提供了新思路。

4.3.2 无线信道中鲁棒混沌同步

针对鲁棒混沌同步问题,一方面可对接收混沌信号降噪,引入小波阈值^[102]、经验模式分解^[103]、自相似性协同滤波^[104]、深度学习等预处理^[105],但额外增加接收机复杂度;另一方面受时序预测启发,基于卷积神经网络^[106]、储备池计算^[107]、长短期记忆网络^[108]的混沌同步受到广泛关注,但在不同信道环境下的鲁棒性和泛化能力还需验证。

为便于工程实现,通过辅助信息可实现稳定同步,但降低频谱效率且额外引入可检测特征,需重点设计兼顾高谱效、低检测特征的安全辅助同步。

4.3.3 无线信道密钥提取与加密

基于事先共享密钥或规则方案还需解决密钥等参数安全分发问题。文献^[109]提出基于动态参数控制的密钥分发方法,收发双方事先约定好静态参数和动态参数生成二进制同步序列,合法接收方在全部可能的参数集中生成本地序列,并与接收信号相关运算,实现混沌同步。文献^[110]将洛伦兹信号用于导频信号,提取宽频谱混沌信号在频率选择性衰落信道下丰富的频谱特征,从而生成信道密钥,为解决密钥分发管理问题提供了新思路。

4.4 研究前沿热点

4.4.1 物理层安全

物理层安全从信息论角度出发,通过波束成形、人工噪声等手段提供与传统通信安全有别的新型安全机制,虽与 LPI 通信在狭义内涵上不同,但二者存在天然共性、共同支撑传输安全。

近年来,基于混沌内在随机性的物理层安全技

术不断被提出。文献[111]将交替发送的混沌键控调制隐蔽信号及人工噪声信号嵌入 QPSK 信号。文献[112]首次利用全双工接收机生成基于混沌的人工噪声,协助合法发送方隐蔽传输信息。文献[113]提出基于 CSK 的上行非正交多址,结合 CSK 密钥空间大的优势,通过功率控制实现物理层安全与传统通信安全结合的多用户安全传输。文献[114]提出基于混沌序列和信道密钥的联合星座旋转加密。需说明,此类方案除具有物理层安全本身局限性外,混沌信号的生成与同步仍是实际系统必须考虑的,对现有通信硬件架构的兼容性提出挑战。此外,在基带引入混沌信号的计算复杂度通常较高。

近年部分研究利用新型射频器件实现射频域轻量化安全,如文献[115]利用时间调制阵列通过混沌相位调制实现方向调制,文献[116]利用频率分集阵列通过混沌索引调制实现角度-距离维方向调制,文献[117]利用 1 bit RIS 同时传输未加密信号和混沌噪声信号以实现方向调制。通过射频端注入混沌可降低基带处理复杂度和对硬件兼容性要求,是一类具有应用潜力和落地前景的方案。

4.4.2 通感干一体化波形

混沌信号具有宽频谱、良好的相关特性等,可满足通信、感知、干扰所需,通过共享设备和波形,充分利用有限频谱资源实现多功能射频一体化。

通感一体方面,基于解析解混沌系统^[118]、非稳正交基函数^[119]、基于二维混沌映射 CSK^[120]、基于混合 DCSK 线性调频^[121]等方案相继被提出,主要利用混沌信号“图钉型”模糊函数实现高分辨探测,但通信性能较好的相干方案仍需精确同步。

感干一体方面,文献[122]提出利用混沌映射通过频域调制群延迟、再经时域傅里叶变换生成超低旁瓣、功率谱平坦的类噪声波形,虽然其设计目标是 LPI/LPD 检测,但也可同时作为噪声释放干扰。

通感干一体方面,文献[123]基于滤波器组多载波提出混沌调频/调相复合调制,通过频分复用方式,将子载波功能分配给通信/雷达,引入混沌进行时频捷变,生成的类噪声信号用于干扰。

需指出,实际系统还应考虑通信部分同步以及不同功能如何实现资源最优分配等问题。此外,射

频隐身需求持续凸显,而现有研究普遍对波形的抗截性能考虑不足,未充分利用混沌特性来提升 LPI 性能。现有干扰方案仅利用类噪声特性,与实际被干扰对象日益发展的抗干扰能力相比,存在能效低、干扰效果有限、易被频谱感知等缺陷,还需结合混沌信号及被干扰对象特点研究欺骗干扰等手段。

4.4.3 无线携能传输

无线能量传输(WPT, wireless power transfer)从环境射频信号中收集能量对设备供电,无线携能传输(SWIPT, simultaneous wireless information and power transfer)进一步实现信息传输。

混沌信号通常具有高峰均比,可提高非线性整流电路能量转化效率。文献[124]将 Colpitts 振荡器用于 WPT,相比单音信号、OFDM 显著提升能量转换效率。文献[125]将 DCSK 用于 WPT,引入模拟相关器提高能量收集器处的峰均比。近年来已有研究将 DCSK 用于 SWIPT,如短参考信号 DCSK^[126]、载波索引 DCSK^[127]、时间索引调制 DCSK^[128]、RIS 辅助 DCSK^[129],一方面利用混沌信号的高峰均比带来高能量转化效率,另一方面通过索引调制、RIS 等辅助手段提升频谱效率或可靠性。

需指出,上述方案普遍未考虑波形抗截获能力,特别是 DCSK 本身存在被截获利用风险,针对一些对安全性、隐蔽性需求更高的物联网、传感器网络等实际应用需求,还需考虑其他 LPI 性能更优的混沌波形作为环境射频信号。

5 结束语

混沌信号具有非周期、难长期预测等优良特性,在 LPI 通信中具有应用潜力。首先从混沌通信基本模型和 LPI 通信基本理论出发,分析混沌信号用于 LPI 通信的理论依据,按照类噪声扩频、消息驱动、参数置乱 3 类技术路线,对现有各种混沌 LPI 通信波形分类详细介绍,对比抗截获能力、传输性能等优缺点,从抗截获能力、传输性能、工程实现 3 个方面对关键技术挑战梳理总结,提出解决思路,归纳当前研究热点。后续可针对潜在应用场景中具体问题研究,充分发挥混沌系统特点,在提升抗截获能力同时,实现高可靠性、频谱效率,着力解决制约工程实现的实际困难,推动混沌 LPI 通信应用实践。

参考文献:

- [1] CUOMO K M, OPPENHEIM A V. Chaotic signals and systems for communications[C]//Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 1993: 137-140.
- [2] YANG T, CHUA L O. Secure communication via chaotic parameter modulation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 1996, 43(9): 817-819.
- [3] DEDIEU H, KENNEDY M P, HASLER M. Chaos shift keying: modulation and demodulation of a chaotic carrier using self-synchronizing Chua's circuits[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 1993, 40(10): 634-642.
- [4] JOVIC B. Synchronization techniques for chaotic communication systems[M]. Heidelberg: Springer, 2011.
- [5] WANG S L, WANG X D. M-DCSK-based chaotic communications in MIMO multipath channels with no channel state information[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2010, 57(12): 1001-1005.
- [6] CAI X M, XU W K, WANG L, et al. Design and performance analysis of a robust multi-carrier M-ary DCSK system: a noise suppression perspective[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(3): 1623-1637.
- [7] TAO Y W, FANG Y, CHEN P P, et al. Matrix reconstruction algorithm-assisted multi-carrier DCSK scheme: an effective solution for frequency-selective fading channel[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(11): 1941-1945.
- [8] XU W K, TAN Y S, LAU F C M, et al. Design and optimization of differential chaos shift keying scheme with code index modulation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(5): 1970-1980.
- [9] HERCEG M, KADDOUM G, VRANJEŠ D, et al. Permutation index DCSK modulation technique for secure multiuser high-data-rate communication systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(4): 2997-3011.
- [10] CHEN H P, CHEN P P, WANG S H, et al. Reference-modulated PI-DCSK: a new efficient chaotic permutation index modulation scheme[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(9): 9663-9673.
- [11] TAO Y W, FANG Y, MA H, et al. Multi-carrier DCSK with hybrid index modulation: a new perspective on frequency-index-aided chaotic communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(6): 3760-3773.
- [12] ZHANG G, CHEN X B, LAI R C. Joint time-slot configuration and discrete W transform for dual-mode index modulation DCSK system with noise reduction[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 72(12): 7435-7448.
- [13] MA H, FANG Y, CHEN P P, et al. Reconfigurable intelligent surface-aided M-ary FM-DCSK system: a new design for noncoherent chaos-based communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 72(4): 4829-4843.
- [14] XIE K Y, CAI G F, KADDOUM G. Design and performance analysis of RIS-aided DCSK-WPC system with energy buffer[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(3): 1726-1739.
- [15] CAI X M, HUANG C W, CHEN P P, et al. Design of non-coherent RIS-empowered DCSK with two-level nested index modulation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2025, 24(4): 3044-3058.
- [16] CAI X M, XU W K, WANG L, et al. Toward non-coherent chaotic communications: an RIS-aided dual M-ary DCSK system[J]. IEEE Communications Letters, 2025, 29(3): 472-476.
- [17] ZHANG H T, ZHANG L, JIANG Y, et al. Reliable and secure deep learning-based OFDM-DCSK transceiver design without delivery of reference chaotic sequences[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(8): 8059-8074.
- [18] ZHANG H T, ZHANG L, CHENG J L, et al. An intelligent detection based on deep learning for multilevel code shifted differential chaos shift keying system with M-ary modulation[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 8(1): 155-169.
- [19] FANG Y, PENG D Y, MA H, et al. A neural network-aided detection scheme for index-modulation DCSK system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 73(2): 2109-2121.
- [20] GUTMAN L L, PRESCOTT G E. System quality factors for LPI communications[C]//Proceedings of the IEEE 1989 International Conference on Systems Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2002: 475-478.
- [21] LI B G, LEI J, WANG S L, et al. Performance evaluation of LPI communication system: a novel index system[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Communications and Networking in China. Piscataway: IEEE Press, 2012: 368-373.
- [22] WANG Z D, ZHANG Z H, WANG Y J, et al. An integrated evaluation framework of covert performance for LPI signals in IoT security[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(15): 29860-29872.
- [23] KOUMPOUZI C, SPASOJEVIĆ P, DAGEFU F T. Improved LPD characteristics for QS-DS-CDMA employing randomization techniques[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2021, 16: 4762-4771.
- [24] SCHIMMING T. Chaos based modulations from an information theory perspective[C]//Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2002: 309-312.
- [25] EISENCRAFT M, MONTEIRO L H A, SORIANO D C. White Gaussian chaos[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(8): 1719-1722.
- [26] WANG X L, MEI L, WANG Z D, et al. On the probability density function of the real and imaginary parts in WFRFT signals[J]. China Communications, 2016, 13(9): 44-52.
- [27] ALAN J M, DAVID B C. Efficient and flexible chaotic communication waveform family[C]//Proceedings of the 2010 Military Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1250-1255.
- [28] YUAN G G, CHEN Z L, GAO X J, et al. Enhancing the security of chaotic direct sequence spread spectrum communication through WFRFT[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(9): 2834-2838.
- [29] LAU F C M, CHEONG K Y, TSE C K. Permutation-based DCSK and multiple-access DCSK systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2003, 50(6): 733-742.
- [30] YANG H, JIANG G P, XIA L L, et al. Reference-shifted DCSK modulation scheme for secure communication[C]//Proceedings of the 2017 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1073-1076.
- [31] WANG B R, PIAO X Y, GUO Q, et al. Permutation index aided multi-

- carrier differential chaos shift keying modulation[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(17): 36370-36379.
- [32] HERCEG M, VRANJEŠ D, KADDOUM G, et al. Commutation code index DCSK modulation technique for high-data-rate communication systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2018, 65(12): 1954-1958.
- [33] MIAO M Y, WANG L, KATZ M, et al. Hybrid modulation scheme combining PPM with differential chaos shift keying modulation[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(2): 340-343.
- [34] LIU Z F, ZHANG L, WU Z Q. Reliable and secure pre-coding OFDM-DCSK design for practical cognitive radio systems with the carrier frequency offset[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2019, 6(1): 189-200.
- [35] LIU Z F, ZHANG L, WU Z Q, et al. A secure and robust frequency and time diversity aided OFDM - DCSK modulation system not requiring channel state information[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 68(3): 1684-1697.
- [36] CAI X M, YUEN C, HUANG C W, et al. Toward chaotic secure communications: an RIS enabled M-ary differential chaos shift keying system with block interleaving[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(6): 3541-3558.
- [37] REDDELL N F, WELCH T B, BOLLT E M. A covert communication system using an optimized wideband chaotic carrier[C]//*Proceedings of the MILCOM 2002*. Piscataway: IEEE Press, 2003: 1330-1334.
- [38] LEUNG H, YU H, MURALI K. Ergodic chaos-based communication schemes[J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2002, 66(3 Pt 2A): 036203.
- [39] LEUNG H, SHANMUGAM S, XIE N, et al. An ergodic approach for chaotic signal estimation at low SNR with application to ultra-wideband communication[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(3): 1091-1103.
- [40] MAJUMDAR D, MORITZ R, LEUNG H, et al. An enhanced data rate chaos-based multilevel transceiver design exploiting ergodicity[C]//*Proceedings of the 2010 Military Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1256-1261.
- [41] LI B. Chaos modulation and equalization for robust wireless communications[D]. Calgary: University of Calgary, 2022.
- [42] SOUJERI E, KADDOUM G, HERCEG M. Design of an initial condition-index chaos shift keying modulation[J]. *Electronics Letters*, 2018, 54(7): 447-449.
- [43] MICHAELS A J, LAU C. Generalized multi-carrier chaotic shift keying[C]//*Proceedings of the 2014 IEEE Military Communications Conference*. New York: ACM Press, 2014: 657-662.
- [44] CARROLL T L. Chaos for low probability of detection communications[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2017, 103: 238-245.
- [45] ZOU J, TAO Y W, FANG Y, et al. Receiver design for ICI-CSK system: a new perspective based on GRU neural network[J]. *IEEE Communications Letters*, 2023, 27(11): 2983-2987.
- [46] MOBINI M, HERCEG M, KADDOUM G. Design of an M-ary DLCSK communication system using deep transfer learning[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2023, 4: 2318-2342.
- [47] MOBINI M, KADDOUM G, HERCEG M. A multi-carrier deep learning CSK communication system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2025, 29(6): 1191-1195.
- [48] CHEN J D, HUANG T T, ZENG H Q, et al. A novel deep learning-based receiver for non-coherent chaotic communication systems with temporal dependencies and spectral properties of chaotic signals[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025, PP(99): 1.
- [49] OKAMOTO E. A chaos MIMO transmission scheme for secure communications on physical layer[C]//*Proceedings of the 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [50] OKAMOTO E, INABA Y. Multilevel modulated chaos MIMO transmission scheme with physical layer security[J]. *Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE*, 2014, 5(2): 140-156.
- [51] INABA Y, OKAMOTO E. Multi-user chaos MIMO-OFDM scheme for physical layer multi-access security[J]. *Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE*, 2014, 5(2): 172-183.
- [52] MASUDA Y, OKAMOTO E, YAMAMOTO T. Low complexity decoding of downlink chaos NOMA scheme with physical layer security[C]//*Proceedings of the 2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [53] KAGA T, OKUMURA M, OKAMOTO E, et al. Multi-level encrypted transmission scheme using hybrid chaos and linear modulation[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2022, E105.B(5): 638-647.
- [54] KATSUKI Y, DE ABREU G T F, ISHIBASHI K, et al. A new noncoherent Gaussian signaling scheme for low probability of detection communications[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(3): 545-549.
- [55] SOUZA C E C, CAMPELLO R, PIMENTEL C, et al. Chaos-based space-time trellis codes with deep learning decoding[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2020, 68(4): 1472-1476.
- [56] SOUZA C E C, PIMENTEL C, CHAVES D P B. A symbolic dynamics approach to trellis-coded chaotic modulation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2019, 67(10): 2189-2193.
- [57] KOZIC S, SCHIMMING T, HASLER M. Controlled one- and multidimensional modulations using chaotic maps[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2006, 53(9): 2048-2059.
- [58] LUENGO D, SANTAMARIA I. Secure communications using OFDM with chaotic modulation in the subcarriers[C]//*Proceedings of the 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2005: 1022-1026.
- [59] CHAVES D P B, SOUZA C E C, PIMENTEL C. A smooth chaotic map with parameterized shape and symmetry[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2016(1): 122.
- [60] ATWAL S, GAGNON F, THIBEAULT C. An LPI wireless communication system based on chaotic modulation[C]//*Proceedings of the 28th IEEE Conference on Military Communications*. New York: ACM Press, 2009: 811-816.
- [61] KADDOUM G, GAGNÉ S, GAGNON F. Cyclostationary signature suppression in chaos-based communication system[C]//*Proceedings of the 2010 25th Biennial Symposium on Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2010: 84-87.
- [62] KADDOUM G, GAGNON F, ATWAL S. Performance analysis of a chaotic symbolic communication system under sinusoidal jammer[C]//*Proceedings of the 2010 Military Communications Conference*. Piscat-

- away: IEEE Press, 2010: 1678-1683.
- [63] KADDOUM G, GAGNON F, COUILLARD D. An enhanced spectral efficiency chaos-based symbolic dynamics transceiver design[C]//Proceedings of the 2012 6th International Conference on Signal Processing and Communication Systems. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-6.
- [64] 岳敖, 李为, 马东堂, 等. 拉丁阵和幅相变换相结合的物理层加密传输算法[J]. 信号处理, 2016, 32(6): 660-668.
YUE A, LI W, MA D T, et al. A novel physical layer encryption algorithm combined Latin rectangle and phase-amplitude mask[J]. Journal of Signal Processing, 2016, 32(6): 660-668.
- [65] 孟庆微, 王西康, 齐子森, 等. 基于余幂-激活离散超混沌加密的多参数加权分数傅里叶变换安全通信方法[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(5): 1688-1696.
MENG Q W, WANG X K, QI Z S, et al. Multiple parameters weighted-type fractional Fourier transform secure communication method based on cosine power-activation discrete hyperchaotic encryption[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(5): 1688-1696.
- [66] 倪磊, 达新宇, 胡航, 等. 基于 MP-WFRFT 的多维联合调制卫星隐蔽通信研究[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(4): 1183-1191.
NI L, DA X Y, HU H, et al. Research on multi-dimensional joint modulation for satellite covert communication based on MP-WFRFT[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(4): 1183-1191.
- [67] 孟庆微, 贡彦直, 王晗. 三维星座缩放加密的扩展加权分数傅里叶变换安全通信方法[J]. 通信学报, 2025, 46(2): 136-146.
MENG Q W, YUN Y Z, WANG H. Extended weighted fractional Fourier transform secure communication method based on 3D constellation scaling encryption[J]. Journal on Communications, 2025, 46(2): 136-146.
- [68] 马英杰, 刘岳恒, 赵耿, 等. OTFS 通信链路构建及其三维星座加密设计[J]. 电子与信息学报, 2025, doi: 10.11999/JEIT250181.
MA Y J, LIU Y H, ZHAO G, et al. OTFS communication link construction and three-dimensional constellation encryption design[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2025, doi: 10.11999/JEIT250181.
- [69] JOVIC B. Class of novel broadband chaos-based coherent communication systems[J]. IET Communications, 2017, 11(12): 1970-1984.
- [70] LING C, SUN S G. Chaotic frequency hopping sequences[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(11): 1433-1437.
- [71] LI Z, CAI J P, CHANG Y L. Determining the complexity of FH/SS sequence by approximate entropy[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(3): 812-820.
- [72] 黄琪, 杨宇晓, 江陈卓. 组合跳变随机平移宽间隔混沌跳频序列设计[J]. 电讯技术, 2022, 62(6): 755-761.
HUANG Q, YANG Y X, JIANG C Z. Design of combined-hopping-random-shift wide-gap chaotic frequency hopping sequences[J]. Telecommunication Engineering, 2022, 62(6): 755-761.
- [73] TAYEBI A, BERBER S, SWAIN A. Security enhancement of fix chaotic-DSSS in WSNs[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(4): 816-819.
- [74] 孙岩博. 一种抗扩频参数测量的低截获波形设计[J]. 电讯技术, 2021, 61(7): 821-826.
SUN Y B. Low probability of intercept waveform with rejection capability of spread spectrum parameter measurements[J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(7): 821-826.
- [75] WANG X K, MENG Q W, YANG J G, et al. MPWFRFT secure communication scheme based on chaotic CP insertion[C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [76] GONNELLA M A. Chaotic based self-synchronization for RF steganography radar/communication waveform[D]. Dayton: Wright State University, 2018.
- [77] SUSHCHIK M, RULKOV N, LARSON L, et al. Chaotic pulse position modulation: a robust method of communicating with chaos[J]. IEEE Communications Letters, 2000, 4(4): 128-130.
- [78] LI H, LIU H Y, VAFI S. Bipolar chaotic pulse position modulation communication system based on cyclic LDPC[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014(1): 105.
- [79] FENG D Z, SHI Y, DAS S, et al. Energy-efficient and secure data networking using chaotic pulse position coded PDUs[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2020, 4(2): 375-386.
- [80] FENG D Z, SHI Y, DAS S, et al. Chaotic pulse position coded PDUs for secure and energy-efficient data networking[C]//Proceedings of the 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). New York: ACM Press, 2018: 1-7.
- [81] SEDAGHATNEJAD S, FARHANG M. Detectability of chaotic direct-sequence spread-spectrum signals[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(6): 589-592.
- [82] MICHAELS A J, CHESTER D B. Featureless chaotic spread spectrum modulation of arbitrary data constellations[C]//Proceedings of the 2011 IEEE 12th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Piscataway: IEEE Press, 2011: 36-40.
- [83] SHAHI S, FENTON F H, CHERRY E M. Prediction of chaotic time series using recurrent neural networks and reservoir computing techniques: a comparative study[J]. Machine Learning with Applications, 2022, 8: 100300.
- [84] BARRIO R, LOZANO Á, MAYORA-CEBOLLERO A, et al. Deep learning for chaos detection[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2023, 33(7): 073146.
- [85] TANG J N, ZHANG Z Z, HUANG T T. Two-dimensional cosine - sine interleaved chaotic system for secure communication[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2024, 71(4): 2479-2483.
- [86] 万求真, 周昭腾. 具有多参数恒 Lyapunov 指数谱的新型统一混沌系统[J]. 通信学报, 2020, 41(6): 202-213.
WAN Q Z, ZHOU Z T. Novel unified chaotic system with multi-parameter invariable Lyapunov exponent spectrum[J]. Journal on Communications, 2020, 41(6): 202-213.
- [87] 刘芳, 程莫文, 陈立志. 混沌直扩信号的抗盲估计传输方法[J]. 航空学报, 2022, 43(2): 325108.
LIU F, CHENG M W, CHEN L Z. Anti-blind estimation transmission method for chaotic DSSS signals[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(2): 325108.
- [88] ZHANG G, GUO Y Q, XIONG X Y. A multidimensional multilevel high data rate differential chaos shift keying system with joint demodulation technology[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, PP(99): 1-15.

- [89] CAI X M, XU W K, HONG S H, et al. Dual-mode differential chaos shift keying with index modulation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(9): 6099-6111.
- [90] LI H Z, HUA Z Y, BAO H, et al. Two-dimensional memristive hyperchaotic maps and application in secure communication[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(10): 9931-9940.
- [91] DENG Q L, WANG C H, SUN Y C, et al. Discrete memristive conservative chaotic map: dynamics, hardware implementation, and application in secure communication[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2025, 55(8): 3926-3934.
- [92] 闫文浩, 姜子敬, 黄欣, 等. 广义二维多项式混沌映射及其在保密通信中的应用[J]. *通信学报*, 2022, 43(9): 80-89.
YANG W H, JIANG Z J, HUANG X, et al. Generalized 2D polynomial chaotic map and its application in secure communication[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(9): 80-89.
- [93] HUA Z Y, WU Z H, ZHANG Y X, et al. Two-dimensional cyclic chaotic system for noise-reduced OFDM-DCSK communication[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2024, 72(1): 323-336.
- [94] HE L F, LAI R C, SHAO S, et al. Design of a chaotic communication system based on deep learning with two-dimensional reshaping[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(7): 10421-10434.
- [95] CARLINI G, SOUZA C E C, CHAVES D P B, et al. A neural-network-assisted chaos-NOMA scheme[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2025, 72(7): 3464-3473.
- [96] YIN H P, ZHAO X H, YAO J L, et al. Deep-learning-based channel estimation for chaotic wireless communication[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(1): 143-147.
- [97] CAI X M, HUANG C W, AN J C, et al. Non-coherent chaotic communications aided by RIS: a performance-enhanced approach[J]. *IEEE Communications Letters*, 2023, 27(6): 1614-1618.
- [98] CAI X M, HUANG C W, BASAR E, et al. Toward RIS-aided non-coherent communications: a joint index keying M-ary differential chaos shift keying system[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(12): 9045-9062.
- [99] YAO J L, LI C, REN H P, et al. Chaos-based wireless communication resisting multipath effects[J]. *Physical Review E*, 2017, 96: 032226.
- [100] FAN C L, DING Q. Analysis and resistance of dynamic degradation of digital chaos via functional graphs[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2021, 103(1): 1081-1097.
- [101] MICHAELS A J. A maximal entropy digital chaotic circuit[C]//*Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium of Circuits and Systems (ISCAS)*. Piscataway: IEEE Press, 2011: 717-720.
- [102] HAN M, LIU Y H, XI J H, et al. Noise smoothing for nonlinear time series using wavelet soft threshold[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2007, 14(1): 62-65.
- [103] WANG M J, WU Z T, CHEN Y, et al. Denoising of chaotic signals based on ensemble empirical mode decomposition[C]//*Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 14-17.
- [104] HUANG J W, LYU S X, CHEN Y. Chaotic signal denoising algorithm based on self-similarity[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2021, 30(3): 482-488.
- [105] DUARTE A L O, EISENCRAFT M. Denoising of discrete-time chaotic signals using echo state networks[J]. *Signal Processing*, 2024, 214: 109252.
- [106] MOBINI M, KADDOUM G. Deep chaos synchronization[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2020, 1: 1571-1582.
- [107] ANTONIK P, GULINA M, PAUWELS J, et al. Using a reservoir computer to learn chaotic attractors, with applications to chaos synchronization and cryptography[J]. *Physical Review E*, 2018, 98: 012215.
- [108] 熊有成, 赵鸿. 长短期记忆网络预测混沌时间序列[J]. *中国科学(物理学、力学、天文学)*, 2019, 49(12): 88-95.
XIONG Y C, ZHAO H. Chaotic time series prediction based on long short-term memory neural networks[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2019, 49(12): 88-95.
- [109] LIN S-Q, JIANG N, WANG C, et al. A three-dimensional encryption orthogonal frequency division multiplexing passive optical network based on dynamic chaos-iteration[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(2): 028401.
- [110] HAROUN M F, AARON GULLIVER T. Secret key generation using chaotic signals over frequency selective fading channels[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2015, 10(8): 1764-1775.
- [111] 黄英, 万泽含, 雷菁, 等. 基于 QCSK 的持续噪声式隐蔽传输方案[J]. *通信学报*, 2022, 43(4): 123-132.
HUANG Y, WAN Z H, LEI J, et al. Continuous noise covert transmission scheme based on QCSK[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(4): 123-132.
- [112] MU Y H, ZHANG L, CHEN Z W, et al. Design of a dual index PPM-DCSK transceiver for covert wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025, 73(9): 8228-8242.
- [113] AL-MUSAWI I M, AL-HUSSAIBI W A, ALI F H. Efficient secure NOMA schemes based on chaotic physical layer security for wireless networks[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2022, 3: 2425-2443.
- [114] HOU Y J, SUN H X, LI G Y, et al. Securing wireless communications via channel reciprocity and dynamic constellation obfuscation[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(18): 37035-37049.
- [115] LI H T, CHEN Y K, YANG S W. Chaotic-enabled phase modulation in time-modulated arrays for secure transmission[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(11): 10454-10464.
- [116] ZENG G H, LIAO Y, WANG J, et al. Design of a chaotic index modulation aided frequency diverse array scheme for directional modulation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(8): 10965-10970.
- [117] XU J W, WEI M L, ZHANG L, et al. Chaotic information metasurface for direct physical-layer secure communication[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 5853.
- [118] BLAKELY J N, CORRON N J. Ambiguity in range-Doppler determination using waveforms of a solvable chaotic oscillator[J]. *Signal Processing*, 2014, 104: 136-142.
- [119] PAPPU C S, CARROLL T L. Unstable basis function for joint radar-communication systems[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2021, 145: 110793.
- [120] PAPPU C S, CARROLL T L. Chaotic waveform for optimal joint radar communication systems[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2023,

169: 113261.

- [121] FANG Y, PAN Y C, MA H, et al. A novel DCSK-based linear frequency modulation waveform design for joint radar and communication systems[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2025, 9(1): 354-366.
- [122] YANG Q L, ZHANG Y H, GU X. Design of ultralow sidelobe chaotic radar signal by modulating group delay method[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(4): 3023-3035.
- [123] CHEN J, WANG M, WANG J, et al. Joint waveform design of radar detection, wireless communication and jamming based on chaotic composite modulation[J]. Electronics Letters, 2024, 60(18): e70033.
- [124] COLLADO A, GEORGIADIS A. Optimal waveforms for efficient wireless power transmission[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014, 24(5): 354-356.
- [125] MUKHERJEE P, PSOMAS C, KRIKIDIS I. Differential chaos shift keying-based wireless power transfer with nonlinearities[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2021, 15(5): 1185-1197.
- [126] KADDOUM G, TRAN H V, KONG L, et al. Design of simultaneous wireless information and power transfer scheme for short reference DCSK communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 65(1): 431-443.
- [127] CHENG G X, XU W K, CHEN C, et al. SWIPT schemes for carrier index differential chaos shift keying modulation: a new look at the inactive carriers[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3): 2557-2570.
- [128] YANG Z W, XIE K Y, CAI G F, et al. Design of a novel time index modulation DCSK wireless-powered system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(9): 14787-14792.
- [129] MUKHERJEE P, PSOMAS C, KRIKIDIS I. DCSK-based waveform design for self-sustainable RIS-aided noncoherent SWIPT[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(9): 8435-8450.

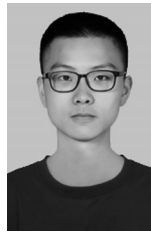
[作者简介]



周昂 (1994-), 男, 陕西汉中, 国防科技大学博士生, 主要研究方向为低截获概率通信、物理层安全。



王世练 (1976-), 男, 江苏徐州人, 博士, 国防科技大学教授, 主要研究方向为抗干扰安全通信与通信对抗、武器协同数据链。



陈炜宇 (1996-), 男, 福建龙岩人, 国防科技大学博士生, 主要研究方向为无线隐蔽通信、无源寄生通信。



夏国江 (1981-), 男, 江苏无锡人, 博士, 北京宇航系统工程研究所高级工程师, 主要研究方向为无线测控与通信技术。