

基于 Logistic-Sine-Cosine 映射的混沌跳频序列构造方法及其性能分析

曹春杰, 王映麟, 孙旻, 陶虹妃, 杨皓凝, 师景铖, 戴俊浩, 孙敬张

(海南大学网络空间安全学院(密码学院), 海南海口 570228)

摘要: 为了解决目前混沌跳频序列的产生主要限于低维混沌映射, 且存在着混沌行为有限、混沌区间不连续等问题, 提出了一种新的混沌跳频序列构造方法。首先使用余弦变换法结合 Logistic、Sine 映射生成新的 Logistic-Sine-Cosine 混沌映射; 然后采用中间多比特抽取法将上述映射产生的序列量化为跳频序列; 最后通过实验证明, 该混沌跳频序列在保持良好的平衡性、汉明相关性的前提下, 有效提高了序列的随机性和复杂度, 可以加强通信过程中的抗预测性和抗干扰性。

关键词: 混沌; 跳频序列; 混沌映射; 汉明相关性

中图分类号: TN914

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024212

Construction method and performance analysis of chaotic frequency-hopping sequences based on Logistic-Sine-Cosine mapping

CAO Chunjie, WANG Yinglin, SUN Yang, TAO Hongfei, YANG Haoning,
SHI Jingcheng, DAI Junhao, SUN Jingzhang

School of Cyberspace Security (School of Cryptology), Hainan University, Haikou 570228, China

Abstract: In order to solve the problems of low dimensional chaotic mapping, limited chaotic behavior, and discontinuous chaotic interval, a new construction method of chaotic frequency-hopping sequence was proposed. First, a new Logistics-Sine-Cosine chaotic map was generated by Cosine transformation method combined with Logistic and Sine mapping. Then, the intermediate multi-bit extraction method was used to quantify the sequence generated by the mapping as a frequency-hopping sequence. Finally, experiments show that the chaotic frequency-hopping sequence can effectively improve the randomness and complexity of the sequence under the premise of maintaining good balance and Hamming correlation, and can strengthen the anti-prediction and anti-interference in the communication process.

Keywords: chaos, frequency-hopping sequence, chaos map, hamming correlation

0 引言

跳频通信作为扩频通信中使用最为广泛的一种技术^[1], 自20世纪70年代诞生以来就受到了广泛的关注与应用。在跳频通信系统中, 发射机根据预设的算法, 通过伪随机码序列在可用频带内控制信

号载波频率的跳变来实现频谱的扩展, 从而避免了通信信号被干扰, 实现抗拦截、抗干扰和衰落的通信效果, 被广泛地应用在无线通信领域^[2-3]。

跳频信号的抗干扰和抗截获能力主要源于跳频序列的性能。理想的跳频序列通常要求^[4]: 生成序列数目多; 线性复杂度大; 优良的汉明相关性; 随

收稿日期: 2024-09-23

通信作者: 孙敬张, jingzhangsun@hainanu.edu.cn

机性良好, 频隙分布均匀。混沌系统由于其对初始值的敏感性^[5], 并且能产生大量的、非周期的、非线性的、类随机的可再生信号^[6-7], 其生成的混沌序列被广泛地应用在跳频序列的构造中^[8-10]。

针对如何生成混沌跳频序列的问题, 文献[11]提出了一种经典的量化方法, 该方法无须门限量化即可将混沌映射轨道点的实数值转换为二进制小数, 然后通过比特抽取来生成跳频序列, 其产生的混沌跳频序列在保持性能优良的前提下, 大大减少了迭代次数。然而, 使用该方法生成周期跳频序列时, 会面临实时性差和占用大量存储空间的问题, 不利于硬件实现。针对该问题, 文献[12]采用分段迭代的周期多比特重叠抽取的算法来生成混沌跳频序列, 不仅减少了迭代次数, 而且在存储空间占用量和扩展序列周期性方面皆具备优势。这些构造方法仅使用单一的低维混沌系统来生成混沌跳频序列, 虽然使得序列易于生成, 但难以保证其具有较高的抗干扰性和抗预测性。文献[13]为了生成具有更高复杂度、更强保密性的跳频序列, 将 IST 映射和二维 Cat 映射相结合生成了一种新的混沌映射, 使其构造而成的跳频序列具有较好的均匀性和抗预测性能以及更强的安全性能。此外, 为了解决在有限的精度条件下, 低维混沌系统产生的序列极易被逆向迭代的方法攻击的问题, 文献[14]利用四维超混沌映射合成更强随机性、对初始值更敏感的跳频信号。文献[15]提出了一种新的跳频伪随机比特发生器硬件设计方法, 该方法以级联的方式组合 4 种不同的混沌映射, 并利用现场可编程门阵列 (FPGA) 技术通过该混沌映射来加速序列的生成, 最后通过美国国家标准与技术研究院 (NIST) 随机性测试证明该方法的高效性和可靠性。然而, 现有的使用混沌系统生成跳频序列的方法中, 多数是采用结构简单、控制参数少的低维混沌系统。虽然易于实现, 但是存在着混沌行为有限^[16]、混沌区间不连续^[17]、序列呈非均匀数据分布等问题, 这使得跳频系统性能严重降低^[18], 通信更容易受到噪声干扰, 信噪比下降严重, 进而影响跳频电台的个体识别过程^[19-20]。而高维混沌系统又因为结构复杂、控制参数多、计算复杂度较高不利于实时生成跳频序列。

为了解决这一问题, 本文提出一种基于余弦变换^[21]的混沌跳频序列生成方法。首先利用 2 个低维混沌映射作为种子映射进行非线性变换产生具有更

加复杂动态行为的复合型混沌映射, 并进一步将其量化, 从而生成新的混沌跳频序列。通过改变混沌映射的构造方式, 该方法不仅能够生成性能优异的跳频序列, 还能进一步提高跳频系统的抗干扰和抗预测能力。

1 混沌跳频序列的设计

利用混沌系统生成跳频序列的过程, 实际上就是将实值混沌序列量化为数字序列的过程。在该过程中, 直接由混沌映射迭代生成的实值序列不利于数字通信系统中数字的处理、传输和控制, 因此需要对生成的实值混沌序列进行进一步的量化处理, 使其转化为适用于跳频系统的数字混沌序列。具体的混沌跳频序列生成过程如图 1 所示。



图 1 混沌跳频序列生成过程

生成理想的混沌跳频序列主要由 2 个方面决定: 一是混沌映射的选取, 二是量化方法。其中混沌映射的好坏直接决定了系统能否生成大量性能优良的跳频序列, 而量化过程则是保证在进行将实值混沌序列转化为数字混沌序列过程中不破坏序列原有的混沌特性。

1.1 基于余弦变换的混沌系统

基于余弦变换的混沌系统通过使用非线性变换生成具有复杂混沌性能的新的混沌映射, 可以有效解决现有混沌映射在弱混沌和弱动力学方面的缺点行为^[22]。数学上可表示为

$$x_i + 1 = \cos\left(\pi\left(F(ax_i) + G(bx_i) + \beta\right)\right) \quad (1)$$

其中, $F(ax_i)$ 和 $G(bx_i)$ 是 2 个已知的混沌映射, 称为种子映射, a 和 b 是它们的控制参数, 变量 β 是一个位移常数。

本文的种子映射 $F(ax_i)$ 和 $G(bx_i)$ 分别采用 Logistic 映射和 Sine 映射, 由于它们具有易于理解的动力学行为, 且可以表示出复杂的动力学行为, 被广泛应用在混沌系统的研究中^[23], 数学上可定义为

$$x_i + 1 = L(rx_i) = 4rx_i(1 - x_i) \quad (2)$$

$$x_i + 1 = S(rx_i) = r \sin(\pi x_i) \quad (3)$$

其中, 变量 $r \in [0, 1]$ 是 Logistic、Sine 映射的控制参数。将参数 a 设为 r , 参数 b 设为 $1 - r$, β 取 -0.5 ,

可得到 Logistic-Sine-Cosine 映射, 即

$$x_i + 1 = \cos\left(\pi\left(4rx_i(1-x_i) + (1-r)\sin(\pi x_i) - 0.5\right)\right) \quad (4)$$

这种方法可以有效地对 2 个种子映射的混沌动力行为进行重组, 进而表现出复杂的非线性, 所以产生的新的混沌映射具有非常复杂的行为。

1.2 混沌序列量化

为产生频率数目为 $q = 2^k$ 、长度为 N 的跳频序列 $X = \{X_0, X_1, \dots, X_{N-1}\}$, 其中 $X_n \in \{0, 1, 2, \dots, q-1\}$ 。本文需要对 Logistic-Sine-Cosine 映射产生的实值序列量化为 N 个 q 元的混沌跳频序列, 具体步骤如下^[24]。

步骤 1 首先将混沌映射生成的实值 x_n 用 m bit 表示为

$$x_n = 0.b_1(x_n)b_2(x_n)\cdots b_i(x_n)\cdots b_m(x_n) \quad (5)$$

其中, $b_i(x_n) \in \{0, 1\}$ 。

步骤 2 对混沌映射生成的 N 个实值序列, 抽取每个 x_n 中的 $\text{lb}q$ 个比特, 表示为

$$X_n = b_{j+1}(x_n)b_{j+2}(x_n)\cdots b_{j+\text{lb}q}(x_n) \quad (6)$$

其中, j 表示抽取比特的起点, $0 \leq j \leq (m - \text{lb}q)$ 。

步骤 3 将步骤 2 中抽取的 N 个 $\text{lb}q$ 个元素进行堆叠, 可得到一个 $N \times \text{lb}q$ 的矩阵

$$\begin{bmatrix} b_{j+1}(x_1) & b_{j+2}(x_1) & \cdots & b_{j+\text{lb}q}(x_1) \\ b_{j+1}(x_2) & b_{j+2}(x_2) & \cdots & b_{j+\text{lb}q}(x_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{j+1}(x_N) & b_{j+2}(x_N) & \cdots & b_{j+\text{lb}q}(x_N) \end{bmatrix} \quad (7)$$

然后对该矩阵按列依次抽取 $\text{lb}q$ 个元素为一组, 直到所有矩阵元素取完, 最终可得到 N 个 q 元的混沌跳频序列。

这种中间多比特提取的量化方法的优点在于计算量小、实现简单且较好地解决了量化过程中的混沌特性损失和计算机字长限制等问题, 在迭代次数和扩展序列周期上皆有较好的性能表现。下面将重点分析本文方法生成的混沌跳频序列在混沌特性、复杂性、平衡性、汉明相关性以及抗预测性方面的表现。

2 性能分析

2.1 混沌特性

混沌指的是非线性系统在特定条件下表现出的不确定性或不可预测的随机现象。Lyapunov 指数是用来定量描述动态系统中, 初始时无限接近的 2 条

轨线随时间推移后的分离率, 常常被用来判定一个系统是否具有混沌特性, 它的表示方式为

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \ln \left| \frac{df(x_i, r)}{dx} \right| \quad (8)$$

需要注意的是, $f(x_i, r)$ 代表某一混沌映射, 只有当 $\lambda > 0$ 时, 才意味着该映射表现出混沌行为。从图 2 可以看出, Logistic、Sine 映射在随着参数 r 的变化过程中, 并没有时刻处于混沌状态, 即混沌区间不连续。反观 Logistic-Sine-Cosine 映射的 Lyapunov 指数 λ 恒大于 0, 在整个区间上都保持着较好的混沌特性, 能表现出更复杂的混沌行为。

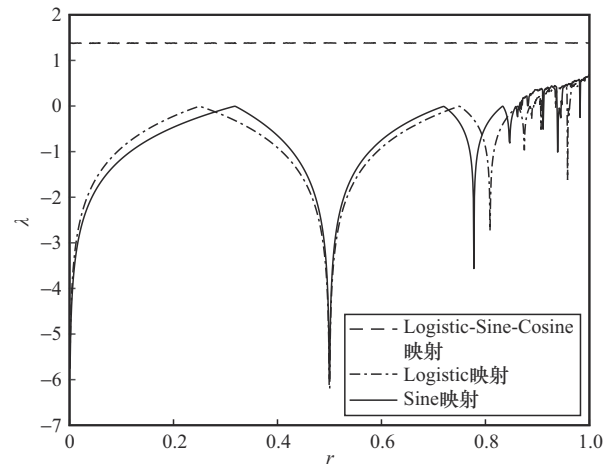


图 2 3 种混沌映射的 Lyapunov 指数对比

2.2 复杂性

样本熵常被用来衡量时间序列的复杂性, 文献[25]对动力系统产生的输出相似性进行了定量描述: 样本熵越大, 时间序列的规律性越低, 也就是说, 该系统具有更高的复杂性。对于给定维数 m 的时间序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, 其样本熵定义为

$$SE(m, r, N) = -\ln \frac{A}{B} \quad (9)$$

其中, A 和 B 分别是 $d[X_{m+1}(i), X_{m+1}(j)] < r$ 和 $d[X_m(i), X_m(j)] < r$ 的向量个数, $X_m(i) = \{x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m-1}\}$, $d[X_m(i), X_m(j)]$ 表示 $X_m(i)$ 和 $X_m(j)$ 之间的 Chebyshev 距离, r 是给定距离。

通过图 3 可以直观地看出, 在控制参数 r 的定义域内, Logistic-Sine-Cosine 映射的样本熵数值相较于它的 2 个种子映射有着显著提高, 这表明它生成的序列具有更高的复杂度。

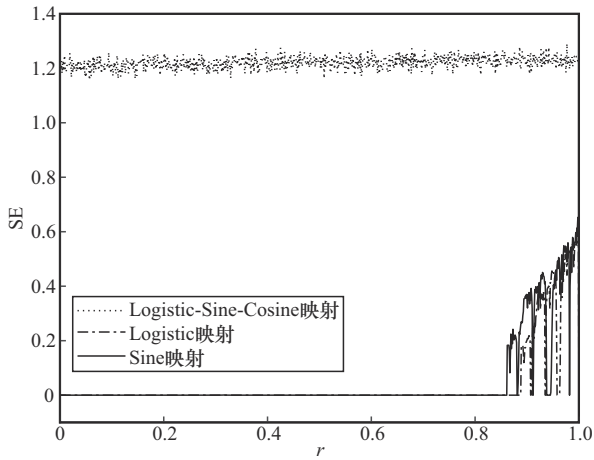


图3 3种混沌映射的样本熵对比

2.3 平衡性

理想的跳频序列应具备优良的平衡特性,即在一个序列周期内,每个频率出现的次数应尽量相等。文献[26]使用平衡特性参数来评估混沌跳频序列的平衡性,即

$$\delta = \frac{q}{N} \sqrt{\frac{1}{q} \sum_{i=0}^{q-1} \left(f_i - \frac{N}{q} \right)^2} \quad (10)$$

其中, f_i 表示在一个序列周期中第 i 个频率出现的次数,理想条件下 $f_i = \frac{N}{q}$,此时 $\delta = 0$ 。也就是说, δ 越接近 0,混沌跳频序列的平衡性越好。

实验中,设置频隙数目为 64,在不同周期长度 N 下,每个周期取 100 个初始值不同的序列,计算其平衡特性参数 δ 的平均值,如图 4 所示。仿真结果显示,本文提出的混沌跳频序列构造方法与文献[11]方法在平衡性方面的表现几乎完全相同,皆具有良好的平衡特性,并且随着序列周期的增加,跳频序列的平衡性也更好。

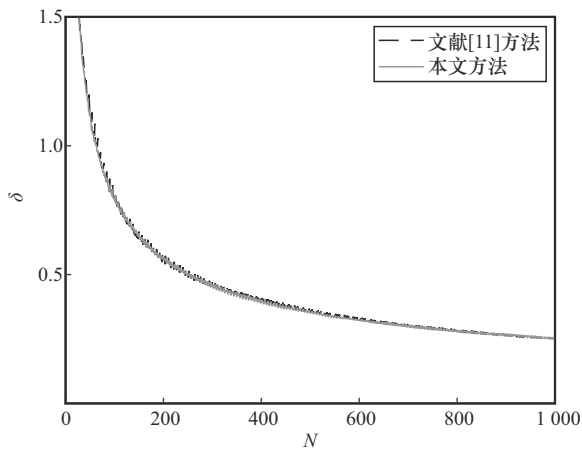


图4 本文方法和文献[11]方法平衡性能对比

2.4 汉明相关性

在跳频通信系统中,不同用户使用相同频隙时就会发生碰撞^[27],为了减少碰撞引起的干扰,应降低频率重复出现的次数。因此通常使用周期性汉明相关函数来评估跳频序列的这一性能,定义为^[28]

$$H_{XY}(\tau) = \sum_{i=0}^{N-1} h(X_i, Y_{i+\tau}), 0 \leq \tau \leq N-1 \quad (11)$$

其中, X 、 Y 代表 2 个跳频序列, $i + \tau$ 模 N 取值,且

$$h(x, y) = \begin{cases} 0, & x \neq y \\ 1, & x = y \end{cases} \quad (12)$$

文献[29]定义了混沌跳频序列的平均汉明自相关旁瓣和互相关函数,分别为

$$\langle H_{XX} \rangle = \frac{1}{N-1} \sum_{\tau=1}^{N-1} H_{XX}(\tau) \approx \frac{N}{q} \quad (13)$$

$$\langle H_{XY} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{\tau=0}^{N-1} H_{XY}(\tau) = \frac{N}{q} \quad (14)$$

其最大值分别为

$$H_{XX} = \frac{\max_{1 \leq \tau < N} \{H_{XX}(\tau)\}}{N} \quad (15)$$

$$H_{XY} = \frac{\max_{0 \leq \tau < N} \{H_{XY}(\tau)\}}{N} \quad (16)$$

文献[30]定义了 H_{XX} 、 H_{XY} 这 2 个参数的理论

值,接近 $\frac{1 + \sqrt{\frac{2q \ln(N)}{N}}}{q}$ 。

实验设置在不同的周期长度 N 、频隙数目 q 为 64 下,每个周期长度随机取 100 个初值不同但生成方式相同的序列,然后分别计算其汉明自相关最大旁瓣和互相关最大值的均值。由图 5 和图 6 可以发现,本文使用的量化方法能够有效地消除序列之间的相似性,降低用户之间的互干扰,因此生成的序列具有良好的汉明相关性,并且能够与理论值近似重合。

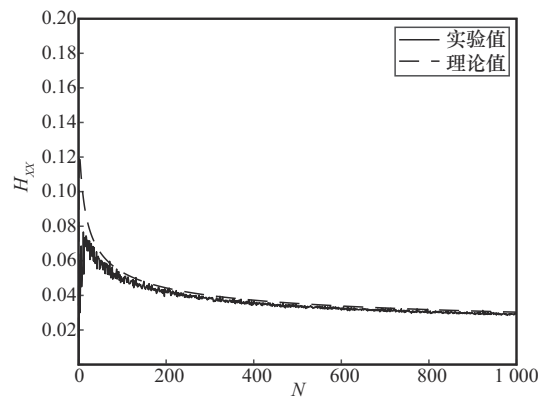


图5 汉明自相关性

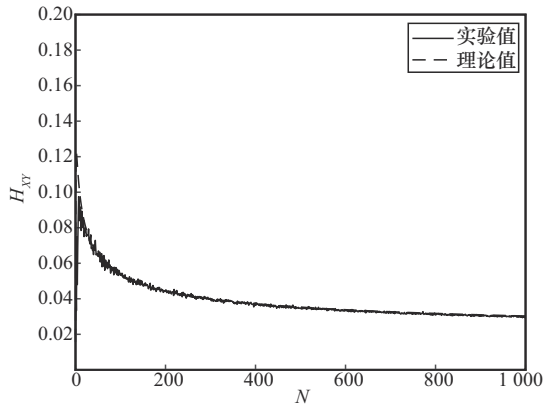


图6 汉明互相关性

2.5 抗预测性

Volterra 滤波器因其输出的是滤波系数的线性函数，易于使用现有的分析工具来分析其滤波性能，故被广泛应用在混沌时间序列的预测当中。为了评价本文提出的混沌跳频序列的抵抗预测干扰能力，采用 Volterra 自适应混沌预测方法^[31]将其与它的种子映射 Logistic、Sine 映射生成的序列进行对比衡量。

实验过程中，首先将频隙数目 q 设置为 64，然后使用 2 000 个样值对 Volterra 滤波器进行训练，再预测后 200 个值，即可得到 Logistic、Sine 映射生成的序列和本文方法生成的序列的预测曲线，分别如图 7 和图 8 所示，其中，○代表真实值，×代表预测值。由仿真结果可知，Logistic、Sine 映射由于本身混沌行为有限，其生成的序列在面对预测干扰时有较差的表现。而本文方法生成的序列（如图 9 所示）由于在构造过程中实施了非线性变换，生成了随机性更强、复杂度更高的序列，最终的预测结果误差较大，因此可以推断出其具有更高的抗预测干扰能力。

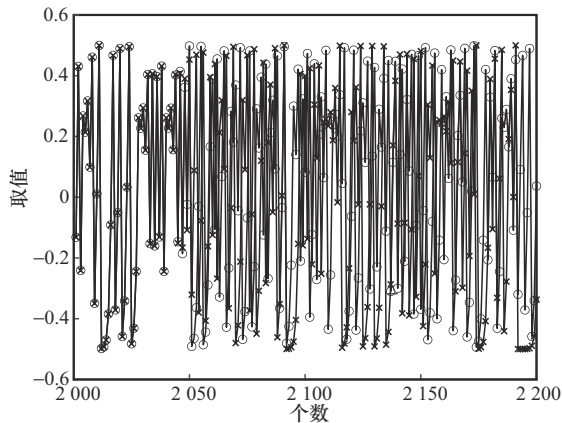


图7 Logistic 序列的预测曲线

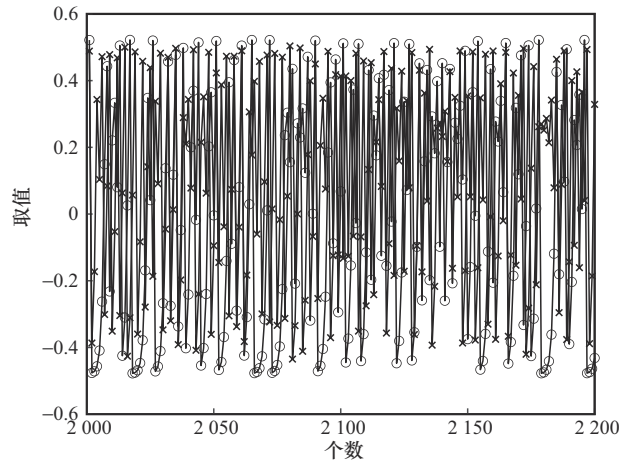


图8 Sine 序列的预测曲线

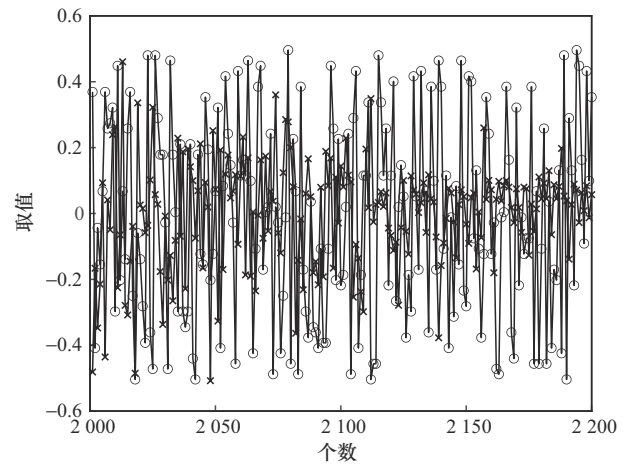


图9 本文方法生成的序列的预测曲线

3 结束语

本文基于余弦变换法，构造了一种复合型混沌映射，然后使用中间多比特抽取法对其进行量化，生成全新的混沌跳频序列。实验结果显示，该方法生成的跳频序列在频率数目和序列长度相同的情况下，在平衡性和汉明相关性方面表现出优异的性能。此外，通过使用复合型混沌映射代替传统低维混沌映射的方式有效地加强了序列的随机性和复杂度，极大地增强了跳频系统的抗干扰和抗预测能力，因此适合实际应用在跳频通信过程中。

参考文献：

[1] 梅文华. 跳频通信[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
 MEI W H. Frequency hopping communications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.

- [2] KOMULAINEN A, GRÖNKVIST J, STERNER U. Frequency-hopped SCB for tactical networks[C]//Proceedings of the MILCOM 2022 - 2022 IEEE Military Communications Conference (MILCOM). Piscataway: IEEE Press, 2022: 247-252.
- [3] WU K, ZHANG J A, HUANG X J, et al. Waveform design and accurate channel estimation for frequency-hopping MIMO radar-based communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(2): 1244-1258.
- [4] 梅文华, 杨义先, 周炯槃. 跳频序列设计理论的研究进展[J]. 通信学报, 2003, 24(2): 92-101.
MEI W H, YANG Y X, ZHOU J P. Survey of theoretical bounds and practical constructions for frequency hopping sequences[J]. Journal of China Institute of Communications, 2003, 24(2): 92-101.
- [5] HUA Z Y, JIN F, XU B X, et al. 2D Logistic-Sine-coupling map for image encryption[J]. Signal Processing, 2018, 149: 148-161.
- [6] WANG Z, AHMADI A, TIAN H G, et al. Lower-dimensional simple chaotic systems with spectacular features[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2023, 169: 113299.
- [7] STROGATZ S H. Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering[M]. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [8] CAI X M, XU W K, WANG L, et al. Towards high-data-rate noncoherent chaotic communication: a multiple-mode differential chaos shift keying system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(8): 4888-4901.
- [9] CHEN R, LI Z, SHI J, et al. High secure sequence design in frequency hopping communications[J]. China Communications, 2019, 16(4): 139-150.
- [10] LI P H, FAN C L, MESNAGER S, et al. Constructions of optimal uniform wide-gap frequency-hopping sequences[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2022, 68(1): 692-700.
- [11] 米良, 唐刚. 一种混沌跳频序列构造方法[J]. 通信学报, 2005, 26(12): 69-74, 80.
MI L, TANG G. Design of frequency-hopping sequences based on chaotic map[J]. Journal of China Institute of Communications, 2005, 26(12): 69-74, 80.
- [12] 许尧, 戴伏生, 王钢. 一种宽间隔混沌跳频序列快速生成方法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2017, 29(3): 320-326.
XU Y, DAI F S, WANG G. Method for fast generating wide-gap chaotic frequency hopping sequences[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2017, 29(3): 320-326.
- [13] HE Y T, ZHU L D, CHENG S X. ICST chaotic mapping for anti-prediction frequency hopping sequence generation[C]//Proceedings of the 2023 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-5.
- [14] HUANG Y, WANG J J, GU H, et al. False data injection attack detection for nuclear reactor based on chaotic time/frequency-hopping spread spectrum[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 176: 841-851.
- [15] AYOUB H G, ABDULRAZZAQ Z A, FATHIL A F, et al. Unveiling robust security: Chaotic maps for frequency hopping implementation in FPGA[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2024, 15(11): 103016.
- [16] CHEN Z H, YUAN X H, YUAN Y B, et al. Parameter identification of chaotic and hyper-chaotic systems using synchronization-based parameter observer[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2016, 63(9): 1464-1475.
- [17] HUA Z Y, ZHOU B H, ZHOU Y C. Sine-transform-based chaotic system with FPGA implementation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2557-2566.
- [18] ZERAOULIA E, SPROTT J C. Robust chaos and its applications[M]. Singapore: World Scientific, 2012.
- [19] WANG Y L, CAO C J, LI Y F, et al. Radiofrequency fingerprint feature extraction and recognition using a coordinate attention-guided deep residual shrinkage network[C]//Proceedings of the 2023 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA). Piscataway: IEEE Press, 2023: 551-557.
- [20] LI H R, CAO C J, SUN Y, et al. Deep wavelet residual attention network for radio frequency fingerprint recognition under low SNR[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 20th International Conference on Mobile Ad Hoc and Smart Systems (MASS). Piscataway: IEEE Press, 2023: 436-442.
- [21] HUA Z Y, ZHOU Y C, HUANG H J. Cosine-transform-based chaotic system for image encryption[J]. Information Sciences, 2019, 480: 403-419.
- [22] BAO H, DING R Y, CHEN B, et al. Two-dimensional non-autonomous neuron model with parameter-controlled multi-scroll chaotic attractors[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2023, 169: 113228.
- [23] WANG X Y, LI Y P, JIN J. A new one-dimensional chaotic system with applications in image encryption[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2020, 139: 110102.
- [24] LING C, SUN S G. Chaotic frequency hopping sequences[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(11): 1433-1437.
- [25] RICHMAN J S, MOORMAN J R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy[J]. American Journal of Physiology Heart and Circulatory Physiology, 2000, 278(6): H2039-H2049.
- [26] 李文化, 王智顺, 何振亚. 用于跳频多址通信的混沌跳频码[J]. 通信学报, 1996, 17(6): 17-21.
LI W H, WANG Z S, HE Z Y. Chaotic FH codes for FH-SSMA communications[J]. Journal on Communications, 1996, 17(6): 17-21.
- [27] NLU X, PENG D Y, ZHOU Z C. New classes of optimal frequency hopping sequences with low hit zone with new parameters[C]//Proceedings of the Fifth International Workshop on Signal Design and Its Applications in Communications. Piscataway: IEEE Press, 2011: 111-114.
- [28] 凌聪, 孙松庚. 用于跳频码分多址通信的混沌跳频序列[J]. 电子学报, 1999, 27(1): 67-69.
LING C, SUN S G. Frequency-hopping sequences by chaotic maps for FH/CDMA communications[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(1): 67-69.
- [29] 凌聪, 孙松庚. Logistic 映射跳频序列[J]. 电子学报, 1997, 25(10): 79-81.

LING C, SUN S G. Frequency-hopping sequences by the logistic map[J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(10): 79-81.

[30] 刘向东, 焉德军, 段晓东, 等. 中间多比特量化混沌跳频序列及其性能分析[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(8): 5-9.

LIU X D, YAN D J, DUAN X D, et al. A chaotic frequency hopping sequences by mid multi-bit quantified and its proper ties[J]. Microelectronics & Computer, 2004, 21(8): 5-9.

[31] 张家树, 郭双冰, 肖先赐. 混沌跳频通信的非线性自适应预测对抗[J]. 信号处理, 2001, 17(3): 205-209, 199.

ZHANG J S, GUO S B, XIAO X C. Nonlinear adaptive predictive countermeasures of chaotic FH-SS communications[J]. Signal Processing, 2001, 17(3): 205-209, 199.

[作者简介]



曹春杰 (1977-), 男, 河北衡水人, 博士, 海南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线网络安全、区块链、人工智能安全等。



王映麟 (1999-), 男, 黑龙江伊春人, 海南大学硕士生, 主要研究方向为无线网络安全。



孙阳 (1994-), 男, 山西大同人, 海南大学博士生, 主要研究方向为无线网络安全。



陶虹妃 (1993-), 女, 四川绵阳人, 海南大学博士生, 主要研究方向为卫星网络安全。



杨皓凝 (1999-), 女, 山西吕梁人, 海南大学硕士生, 主要研究方向为无线网络安全。



师景铖 (1999-), 男, 陕西西安人, 海南大学硕士生, 主要研究方向为无线通信。



戴俊浩 (2003-), 男, 浙江衢州人, 海南大学本科生, 主要研究方向为无线网络安全。



孙敬张 (1993-), 男, 海南海口人, 博士, 海南大学副研究员、博士生导师, 主要研究方向为无线安全、深度学习、图像处理。