

忆阻超混沌映射的可调控性设计及光纤保密通信系统构建

李春彪^{1,2}, 李泳新^{1,2}, 仲庆³, 杨勇⁴, AKGUL Akif⁵

(1. 南京信息工程大学人工智能学院, 江苏 南京 210044; 2. 江苏省大气环境与设备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044;
3. 东南大学信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096; 4. 南京沁恒微电子有限公司 RISC-V 研究所, 江苏 南京 210008;
5. 赫梯大学工程学院, 乔鲁姆 19030)

摘要: 通过引入平方忆阻函数非线性反馈, 构建离散超混沌映射, 并实现超混沌序列的全局调幅、局部调幅以及直接偏置调控。混沌映射的可调控性通过离散忆阻的阻值函数和内部变量积分速度来实现。简易的忆阻约束关系同时赋予了直接偏置调控的可能性, 通过额外引入常数项参数可实现一维状态变量的直接偏置调控。基于 RISC-V 单片机 CH32V307 实现了所提出的可调控超混沌映射, 并通过美国国家标准与技术研究院测试证明了超混沌序列的伪随机属性。基于以上超混沌映射构建了正交啁啾复用-非正交多址接入物理层加密方案, 实验完成了 2 km 弱耦合七芯光纤通信的误码率测试, 进一步证明了基于离散忆阻构建的超混沌加密正交啁啾复用-非正交多址接入系统可实现数据的可靠传输和解密, 有效保护数据安全。

关键词: 离散忆阻; 超混沌映射; 调幅; 偏置调控; 光纤保密通信

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024086

Controllability design of a memristive hyperchaotic map and the construction of optical fiber secure communication system

LI Chunbiao^{1,2}, LI Yongxin^{1,2}, ZHONG Qing³, YANG Yong⁴, AKGUL Akif⁵

1. School of Artificial Intelligence, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China
2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAET), Nanjing 210044, China
3. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China
4. RISC-V Research Institute, Nanjing Qinheng Microelectronics Co., Ltd., Nanjing 210008, China
5. Faculty of Engineering, Hitit University, Corum 19030, Turkey

Abstract: A discrete hyperchaotic map was constructed by introducing nonlinear feedback of the square memristor function, which has the properties of total amplitude control, partial amplitude control, and direct offset boosting of hyperchaotic sequences. The controllability of chaotic map was achieved through the resistance function of a discrete memristor and the integral velocity of the internal variable. The simple constraint relationship from the memristor also gives the possibility of direct offset boosting. By introducing an additional constant parameter, direct offset boosting of a one-dimensional state variable can be obtained. Based on the RISC-V microcontroller of CH32V307, the proposed controllable hyperchaotic map was realized, and National Institute of Standards and Technology (NIST) testing proves the pseudo-random feature of hyperchaotic sequences. Based on the above hyperchaotic map, a physical layer scheme of orthogonal chirp division multiplexing-non-orthogonal multiple access (OCDM-NOMA) with encryption was constructed. The test of error rate in the process of 2 km communication with coupled seven core optical fiber was completed, further proving that the data transmission and decryption is reliable in the OCDM-NOMA system with hyperchaotic encryption, where data security is effectively protected.

Keywords: discrete memristor, hyperchaotic map, amplitude control, offset boosting, optical fiber secure communication

收稿日期: 2023-10-09; 修回日期: 2023-12-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62371242)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.62371242)

0 引言

蔡少棠教授依据电压、电流、磁通和电荷之间的元件约束关系预测：除了电阻、电容、电感之外，理论上还应存在第4种基本电路元件忆阻器^[1]。忆阻器可直接表示磁通和电荷之间的关系，也带来了其对电流或者电压的记忆积分效应，因此在电路与信息处理领域，特别是混沌系统构建中具有广泛的应用^[2-3]。随着信号处理从模拟域转变到数字域，离散忆阻^[4-5]对这种非线性约束关系的继承也导致其在离散系统中具有重要的应用价值，特别是在构造离散可控混沌系统方面，离散忆阻具有重要的价值。

混沌系统的可调控性设计是指在混沌系统中分离出分岔参数和非分岔参数，其中，分岔参数调控系统的不同动力学属性，而非分岔参数调控系统的幅度、偏置，或者伴随着频率同步调控。独立非分岔参数的分离使混沌序列或者波形实现单个独立参数调控而不改变系统的动力学属性，也不引入其他振荡状态。恒李雅普诺夫指数（LE）混沌吸引子^[6]正是针对可调控混沌系统设计的，这种系统在某种参数调控下输出尺度不同的具有相同李雅普诺夫指数的混沌吸引子。然而，以上系统中的混沌幅度非分岔调控不是通过非分岔参数的剥离而获得的，而是基于系统参数的恒等关系锁定的。研究人员对以上恒李雅普诺夫指数混沌系统进行进一步的改造，最终剥离出具有独立全局调幅功能的常数项参数^[7]。此后，关于混沌系统的局部调幅与全局调幅以及混沌系统状态变量的偏置调控^[8-9]等都依赖于独立的非分岔参数，具有非分岔参数的混沌系统的设计成为一个重要的研究方向。

研究发现，不仅在连续混沌系统中存在非分岔调幅参数（有时伴随着幅度与频率的同调控制^[10]）和偏置调控参数，调幅和偏置调控独立非分岔参数并存的全控系统^[11]和自由控制系统^[12]，以及离散映射中也存在调幅参数^[13]和偏置调控参数^[14]。忆阻器件的引入给可调控混沌系统的设计带来了新的机遇，很多忆阻混沌系统具有独立调控参数来完成系统混沌吸引子输出的大小与位置调控，也就是几何调控，这里吸引子的大小调控就是混沌信号的幅度调控，而混沌吸引子的位置调控对应着系统中某一维变量的偏置调控。忆阻内部参数的独立性和忆阻器对外界电磁约束关系的桥梁作用增加了可调控混沌系统设计的便利性和自由度。在三维忆阻混沌

系统^[15]以及四维忆阻系统^[16]中都有可以实现系统输出几何调控的非分岔独立参数。同样地，离散混沌映射也因为离散忆阻的引入而具有更多的可能性析出独立非分岔调控参数。研究发现，甚至在三维包含正弦函数反馈项的混沌映射中也具有独立的全球幅度调控参数和局部幅度调控参数^[17]。

混沌在通信系统中具有重要的应用价值，主要技术为混沌遮掩、混沌开关、混沌调制，采用模-模通信、模-数-模通信或者数-数通信，对应的应用混沌波形为连续流混沌、数字流混沌和数字混沌。保密通信也分为线路保密技术和信息保密技术，从线路的保密性来看，光纤通信性能最好。因此，本文选用光纤通信为载体，综合混沌方法实现信息保密技术，构建更完善的保密通信体系。混沌系统的可调控设计为混沌保密通信提供了更便捷的信号调控通道。在混沌应用系统中，混沌信号的幅度、偏置以及极性极大地影响着其应用价值的发挥。在很多集成电路的专用混沌系统中混沌信号常是幅值在一定范围的正极性信号，常规的混沌系统常常输出幅度超限的双极性混沌信号，而混沌信号的宽频特性使对应的放大器或者衰减器以及偏置转移电路都难以开发或匹配，开展混沌系统甚至是超混沌系统的可调控设计^[18]具有重要的价值和意义。

本文主要的研究工作如下。

1) 基于离散忆阻独特映射关系，构建了可调控忆阻超混沌映射模型。

2) 构建的忆阻超混沌映射具有独立的非分岔全局调幅参数和局部调幅参数。其中，全局调幅参数来自非线性忆阻函数，而局部调幅参数对应着忆阻积分效应的强弱。忆阻内部变量函数关系中也蕴含着偏置独立调控的非分岔参数。

3) 基于国产 RISC-V 单片机芯片平台，实现了忆阻超混沌映射；单一参数的非分岔使超混沌映射调控容易实现，也使单片机内部资源占用较少。

4) 基于忆阻超混沌映射的伪随机数发生器的设计证明了超混沌映射的伪随机性。

5) 基于正交啁啾复用（OCDM, orthogonal chirp division multiplexing）技术，构建了基于超混沌映射的保密通信系统，证明了可调控混沌映射在保密通信中的应用价值，实验结果验证了本文方案的有效性，也显示了可调控忆阻超混沌映射的独特应用前景。

1 忆阻超混沌映射模型设计

1.1 离散忆阻模型

根据欧拉算法和离散忆阻的定义，可调控混沌系统的设计可以从连续时间系统扩展到离散迭代映射系统。假设电路中的电流*i(t)*、电压*v(t)*、内部状态*q(t)*采用离散量表达，分别用*i_n*、*v_n*、*q_n*表示，则可以构建基于平方非线性反馈约束关系的离散忆阻映射为

$$\begin{cases} v_n = M(q_n)i_n = (1 - bq_n^2)i_n \\ q_{n+1} = q_n + ci_n \end{cases} \quad (1)$$

这里，忆阻映射通过后向差分关系实现电流积分，传递忆阻电磁约束关系，平方函数表达了忆阻阻值的演变规律。同样假设理想荷控忆阻映射有正弦激励电流*i_n=Asin(ω_n)*。设置*b=1, c=1, ω=0.4*，输入电流的幅度*A=0.10, 0.15, 0.20*时，激励强度改变的滞回曲线如图1(a)所示。设置*b=1, c=1, A=0.10*，输入电流频率*ω=0.2, 0.3, 0.4*时，激励频率改变的滞回曲线如图1(b)所示。离散忆阻的电压电流约束关系反映了忆阻器的记忆与迟滞效应，幅度与频率的变化也表达了这种记忆关系的增强或者削弱。特别地，高频电压电流激励将导致忆阻效应的丧失，迟滞回线逼近一个过零点的直线。

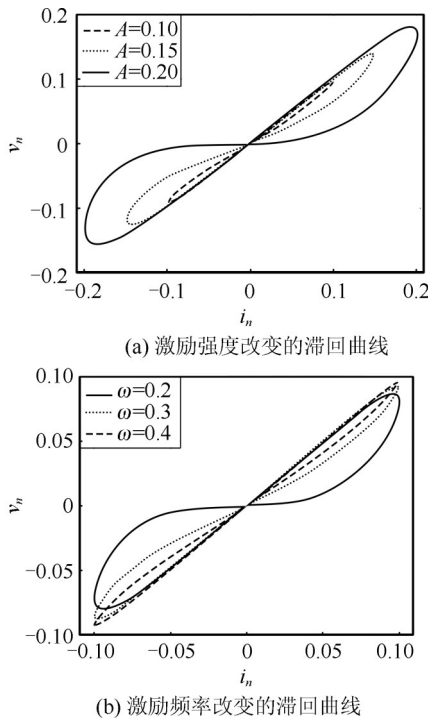


图1 离散忆阻的滞回约束关系

1.2 混沌映射模型构建及基本动力学

文献[19-20]所构建的混沌映射具有可控性特征，上述忆阻离散约束关系与忆阻外部输入形成如下迭代关系

$$\begin{cases} x_{n+1} = -ax_n(1 - by_n^2) \\ y_{n+1} = y_n + cx_n \end{cases} \quad (2)$$

其中，*x_n*和*y_n*分别代表式(2)所示系统（后文简称系统(2)）的第*n*次迭代。设参数*a*在[1.65, 1.85]范围内变化，固定参数*b=c=1*，系统输出混沌序列的演变在周期、混沌甚至超混沌之间切换^[21-23]，可见参数*a*是一种分岔参数。设初始值(*x₀, y₀*)=(0.1, 0.1)，混沌映射对应的李雅普诺夫指数谱与分岔图如图2所示。由图2可知，当参数*a*在[1.65, 1.67]范围内变化时，系统(2)输出周期解；当参数*a*在(1.67, 1.69]范围内变化时，系统处于超混沌状态；当参数*a*在[1.694, 1.697]范围内变化时，系统呈现狭窄的周期窗；当参数*a*在[1.698, 1.72]范围内变化时，系统重现超混沌状态；而当参数*a*在[1.721, 1.742]范围内变化时，系统呈现较宽的周期窗；当参数*a*在[1.745, 1.787]范围内变化时，系统再次进入超混沌状态；当参数*a*在[1.792, 1.85]范围内变化时，系统输出鲁棒的混沌序列。相应地，系统(2)在各个区间的典型相轨迹如图3所示，典型动力学参数如表1所示。

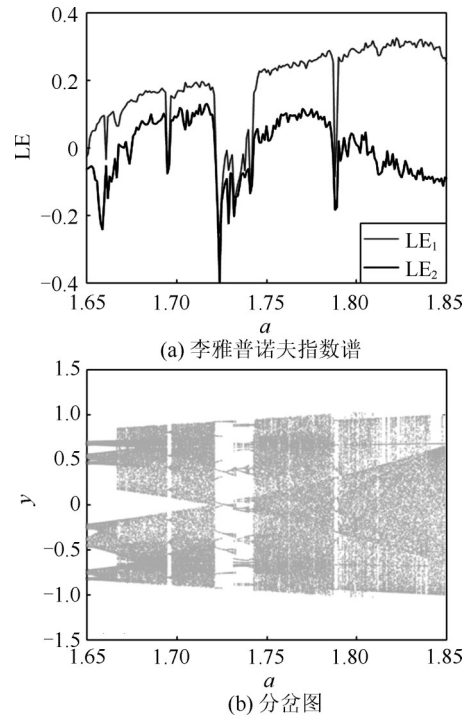


图2 混沌映射对应的李雅普诺夫指数谱与分岔图

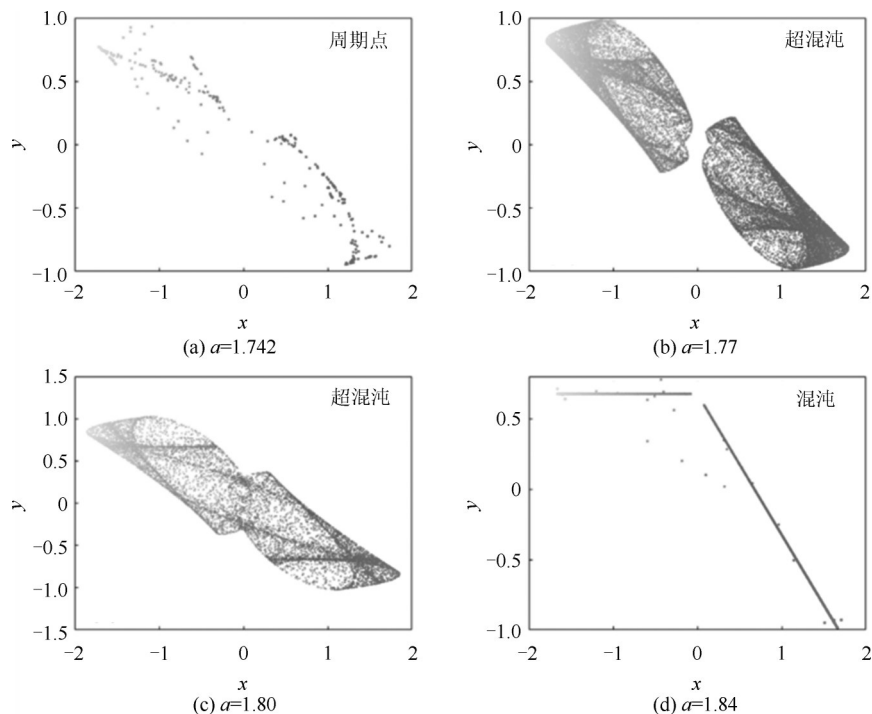


图3 系统(2)在各个区间的典型相轨迹

表 1 系统(2)的典型动力学参数

a	吸引子类型	李雅普诺夫指数谱
1.742	周期点	-0.034 2, -0.107 3
1.77	超混沌	0.253 8, 0.116 3
1.80	超混沌	0.284 6, 0.008 5
1.84	混沌	0.300 0, -0.092 0

2 忆阻超混沌映射的可调控性分析

2.1 全局调幅

定理 1 系统(2)的参数 b 是一个非分岔全局调幅参数。

证明 通过变量代换 $u_{n+1} = \sqrt{b}x_{n+1}$, $v_{n+1} = \sqrt{b}y_{n+1}$, 相应的映射可以转变为

$$\begin{cases} u_{n+1} = -au_n(1 - v_n^2) \\ v_{n+1} = v_n + u_n \end{cases} \quad (3)$$

可见, b 是一个全局调幅参数, 使混沌映射的输出按照 $\frac{1}{\sqrt{b}}$ 递减。证毕。

在参数 $a=1.77$ 、初始值 $(x_0, y_0)=(0.1, 0.1)$ 的情况下, 系统(2)的全局调幅属性如图 4 所示。从图 4 可以看出, 序列 x 和 y 的幅度均随着参数 b 的增加而递减, 而相应的李雅普诺夫指数谱保持恒定。

2.2 局部调幅

定理 2 系统(2)的参数 c 是一个非分岔局部调幅参数。

幅参数。

证明 进行变量代换 $u_{n+1} = \frac{1}{c}x_{n+1}$, $v_{n+1} = y_{n+1}$, 修改后的映射为

$$\begin{cases} u_{n+1} = -au_n(1 - bv_n^2) \\ v_{n+1} = v_n + u_n \end{cases} \quad (4)$$

可见, c 是一个局部调幅参数, 使混沌映射的输出 x_n 按照 $\frac{1}{c}$ 递减, 而对应的序列 y_n 的幅度保持不变。证毕。

在参数 $a=1.77$ 、 $b=1$ 、初始值 $(x_0, y_0)=(0.1, 0.1)$ 的情况下, x_n 的均值按照 $\frac{1}{c}$ 变化, 系统(2)的局部调幅属性如图 5 所示。由于 c 参数的极性改变不影响变量代换的结果, 因此, 局部调幅可以在正负区间上展开, 非分岔局部调幅参数几乎占据整个实数空间 (要求 c 不等于 0)。与上述非分岔调幅参数 b 一样, 参数 c 对映射 x_n 的调控没有改变系统的李雅普诺夫指数谱。仿真显示, 参数 c 在正负区间实现了跨零点调幅。

独立的 2 个非分岔调幅参数 b 和 c 演变下的系统动力学特性可以进一步通过系统在相应参数演变下的二维李雅普诺夫特征谱来印证。当参数 $a=1.77$, 初始值 $(x_0, y_0)=(0.1, 0.1)$, 参数 b, c 在 $[1, 10]$ 范围内变化时, 系统(2)所对应的李雅普诺夫指数

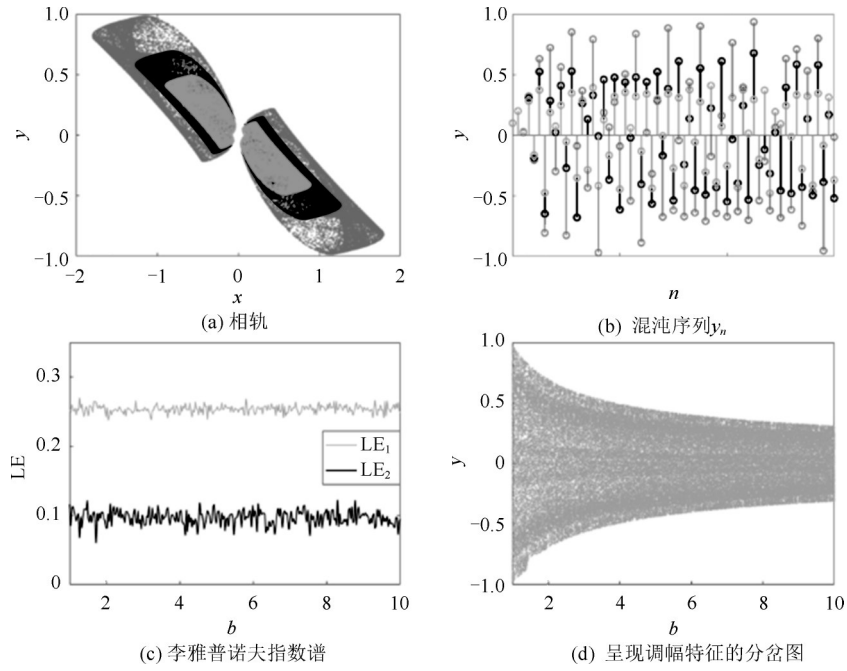


图4 系统(2)的全局调幅属性

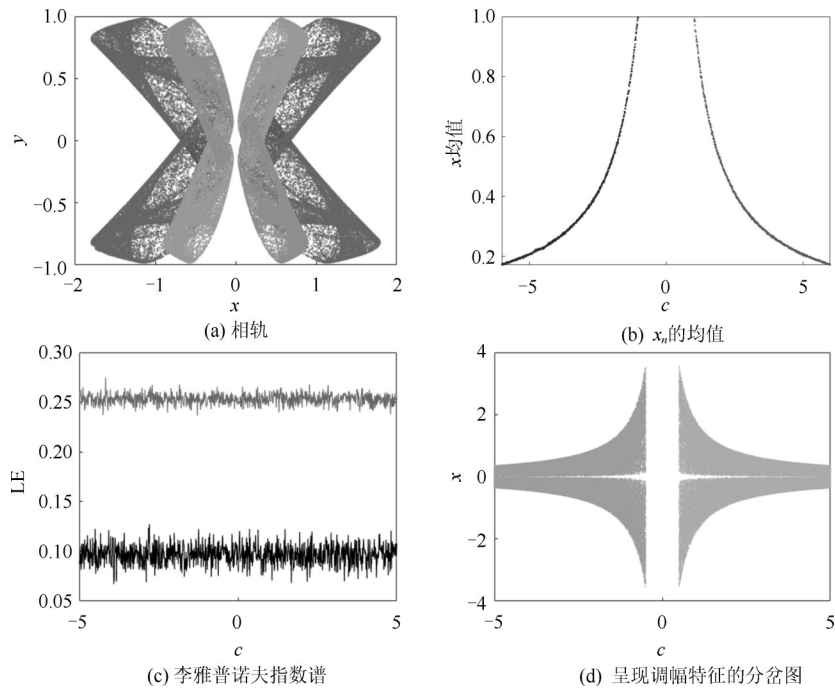


图5 系统(2)的局部调幅属性

谱如图6所示。恒大于0的李雅普诺夫指数平面揭示了系统(2)在相应参数下所对应的超混沌属性, 分层式的平面特征证明了几乎不变的李雅普诺夫指数, 不同的演变关系也反映出调幅过程中的李雅普诺夫指数运算精度的变化。可见, 系统(2)具有4个反馈项, 其中, 2个系数是非分岔幅度调控参数,

另2个系数是分岔参数, 非分岔参数的配比达到50%。

3 偏置调控

假设存在离散映射 $Y_{n+1}=Y_n+F(Y_n)$, $F=(f_1, f_2, \dots, f_p, \dots, f_q)$, $Y=(y_1, y_2, \dots, y_p, \dots, y_q)$ 。令 y_m 和 y_{m+1} 分别变

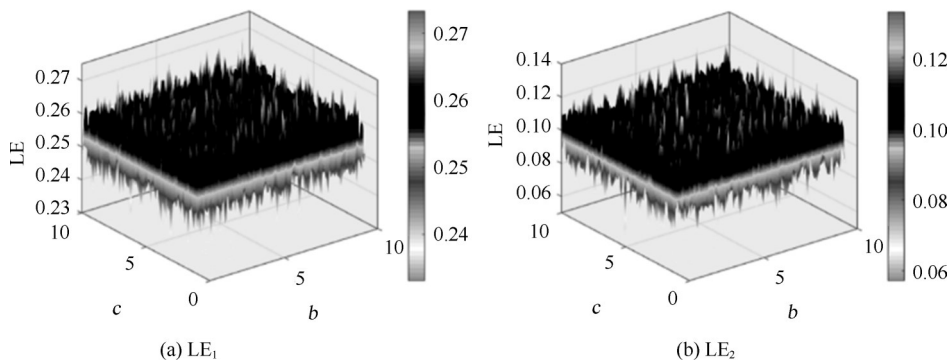


图6 系统(2)所对应的李雅普诺夫指数谱

为 y_m+d 和 $y_{m+1}+d$ (d 是任意常数), 则系统方程仅某个维度的一个反馈项析出对应的常数 d , 而其他维度和其他反馈项不出现对应的参数, 则 d 是独立的非分岔偏置调控参数, 能实现状态变量 y_m 的偏置调控。具体来说, 在系统(2)中令 y_n 和 y_{n+1} 分别变为 y_n+d 和 $y_{n+1}+d$, 可得

$$\begin{cases} x_{n+1} = -ax_n(1 - b(y_n + d)^2) \\ y_{n+1} = y_n + cx_n \end{cases} \quad (5)$$

上述系统中仅在系统的一个反馈项位置出现常数 d , 因此, 常数 d 实现状态变量 y_n 的偏置调控。

当参数 $b=c=1$, 初始值 $(x_0, y_0)=(0.1, 0.1-d)$ 时, 式(5)所示系统(后文简称系统(5))的偏置调控如图7所示。如图7所示, 偏置调控参数 d 可有效调控系统(5)的相轨迹, 不管是周期振荡, 还是混沌

或者超混沌振荡都可以通过偏置调控参数 d 实现吸引子的几何位置调控。这里系统(5)的不同动力学特征受到分岔参数 a 的控制, 而非分岔偏置调控参数 d 实现系统相轨在 y 方向的位置锁定。

当参数 $a=1.77$, $b=c=1$, 初始值 $(x_0, y_0)=(0.1, 0.1-d)$ 时, 参数 d 的偏置调控作用如图8所示。图8进一步揭示了偏置调控参数 d 控制下的序列及其均值演变特征和李雅普诺夫指数守恒特征。从图8可以看出, 偏置调控参数 d 能够实现系统(5)的序列 y_n 均值调控, 且保持李雅普诺夫指数不变。

值得注意的是, 这里的偏置调控实际上对应于忆阻值函数的运算, 因为阻值函数是二次项, 因此, 即使直接引入常数 d , 也会导致2个乘积项的误差引发振荡畸变。然而, 忆阻作为一个独立的计算

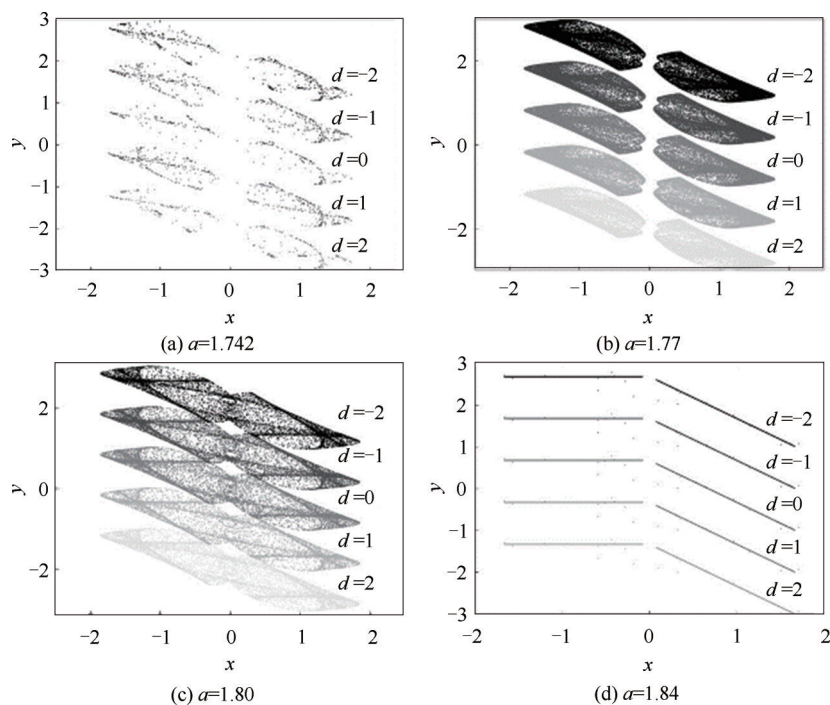


图7 系统(5)的偏置调控

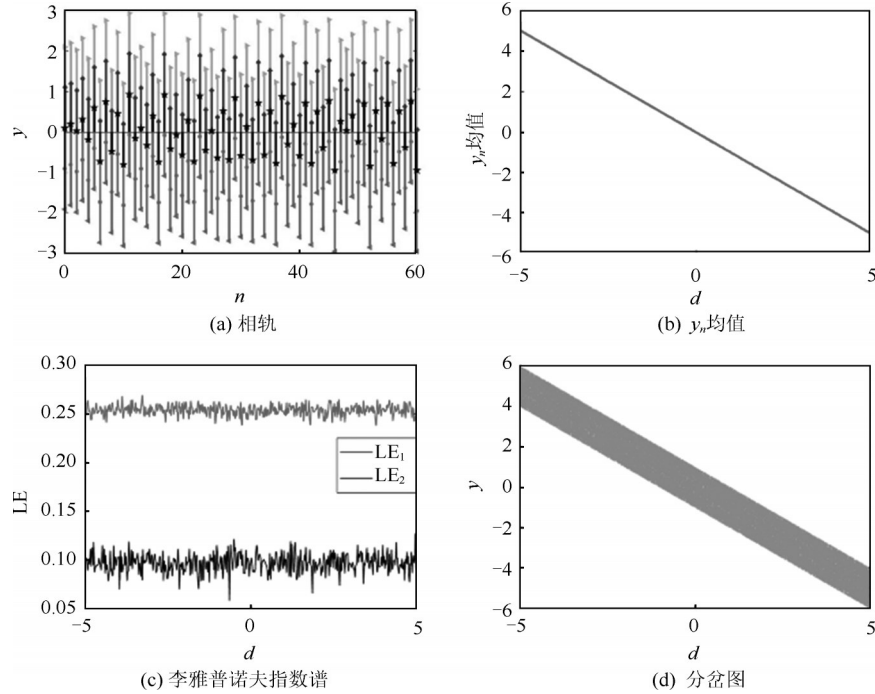


图8 d 的偏置调控作用

单元,其自身固定的约束关系能保持偏置调控参数引入的唯一性,从而大大减少了偏置调控的风险。

4 基于国产RISC-V单片机的电路实现

基于CH32V307微控制器,可以方便地实现所构建的混沌映射并验证对应的非分岔调控属性。本文选择32位RISC-V指令集和架构的CH32V307芯片,其主频可达144 MHz,内置256 KB存储Flash和64 KB的SRAM。该处理器还支持硬件浮点运算,可显著提高浮点运算速度,满足可调控混沌映射的运算需求。CH32V307内置了两组12位数模转换(DAC)模块,能将混沌序列转化为模拟电压输出,在示波器SDS1102X上可再现系统的各种相轨迹图^[24-26]。

基于国产单片机的混沌映射包含以下过程。首先,将混沌映射关系转换为主程序迭代循环。给定初始值并确定迭代次数后,开始迭代计算。每次迭代计算后的混沌数据将被归一化到0~4 095,并将结果写入DAC_DORx寄存器。接着,DAC模块完成转换,将混沌序列转化为模拟输出。再次,以上数据作为新的初值用于完成下一次迭代,不断循环,直到设定的迭代次数,最终将两维变量取值所对应的模拟电压信号传递给示波器,通过其x轴和y轴输入,从而在示波器SDS1102X上显示对应的

混沌相轨迹图。CH32V307微控制器数字实现平台如图9所示。当系统(2)设置 $b=c=1$,初始值 $(x_0, y_0)=(0.1, 0.1)$ 时,系统(5)的典型相轨示波器显示如图10所示。设置参数 $a=1.77$,初始值 $(x_0, y_0)=(0.1, 0.1)$,系统的幅度调控与偏置调控效果(示波器显示)如图11所示。

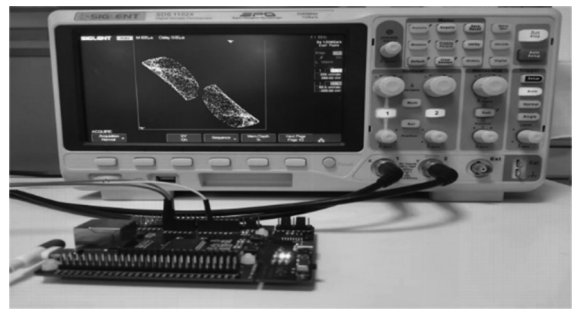


图9 CH32V307微控制器数字实现平台

5 保密通信

5.1 伪随机特性测试

假设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 和 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 是上述忆阻超混沌映射所产生的序列。设量化函数 P_i 为^[27]

$$P_i = [(X_i + |X_{\min}|K)] \bmod N \quad (6)$$

其中, $K=10^7$, $N=256$,测试数组 $m=128$ 。当参数 $a=1.77$, $b=c=1$,初始值 $(x_0, y_0)=(0.1, 0.1)$ 时,混沌系统

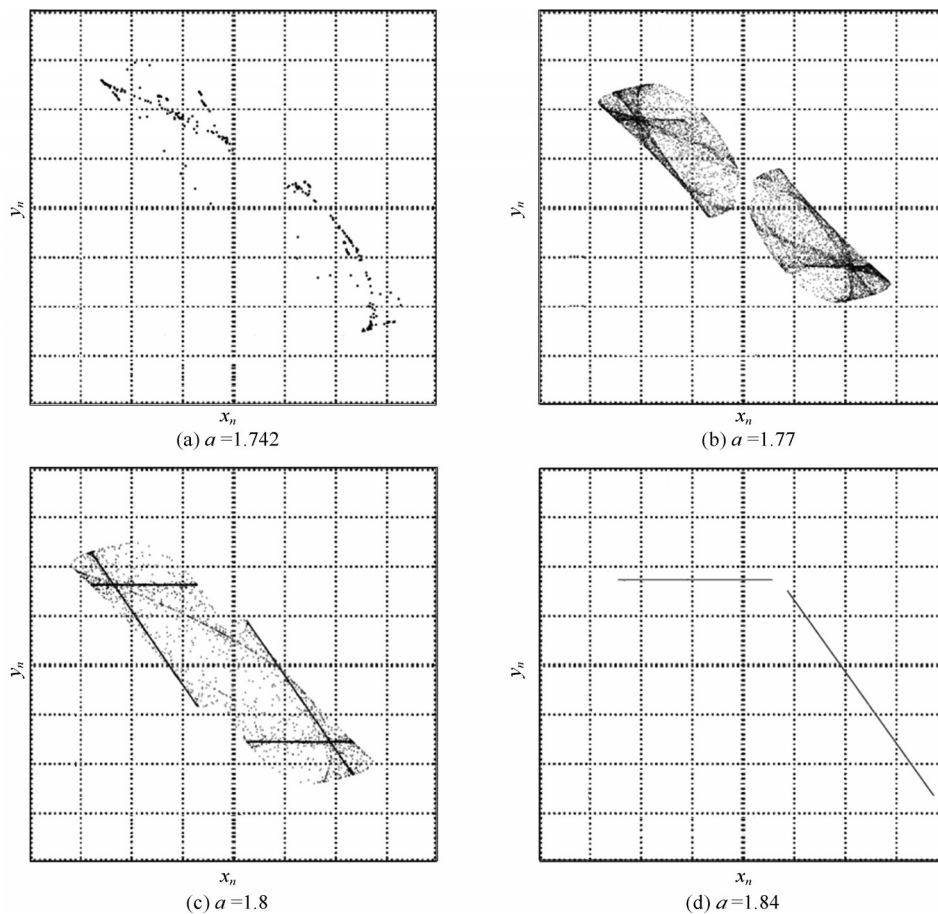


图 10 系统(5)的典型相轨示波器显示

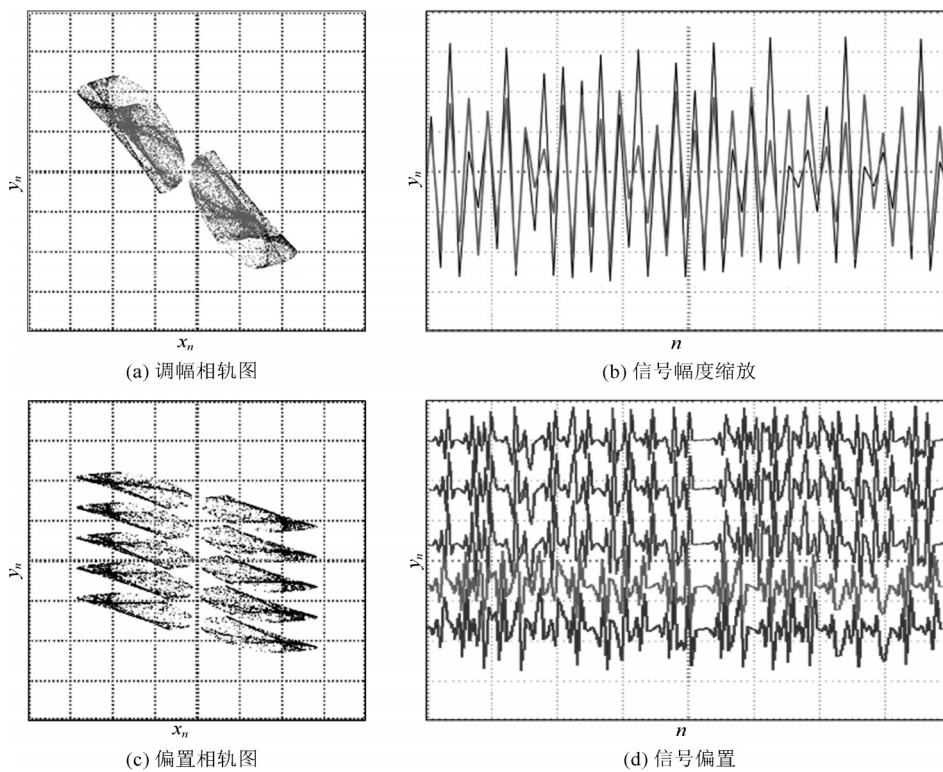


图 11 系统(5)的幅度调控与偏置调控效果(示波器显示)

的美国国家标准与技术研究院 (NIST) 测试结果如表2所示。对比NIST标准, 序列 x_n 和 y_n 的 P -value远远超过伪随机性要求, 所有指标的通过率都大于97%, 证明所提出的超混沌映射满足伪随机特性。

5.2 光纤保密通信系统构建

5.2.1 基本原理

利用所设计的忆阻超混沌序列可以对通信系统中发送的原始数据实施特定操作, 以增强数据传输的安全性。混沌序列具有高度的随机性, 其特征满足现代密码学需求。本文采用的混沌系统的序列可以通过偏置调控灵活切换极性, 降低了数字信号处理 (DSP, digital signal processing) 算法极性变化的复杂性, 简化了数据处理过程。构建的保密通信系统可以在不同维度上引入扰动, 包括星座点、比特和子载波信号, 从而在多维度上层层保护数据。在数据发送端, 可采用非正交多址接入 (NOMA, non-orthogonal multiple access) 技术, 生成2个支路信号分别为 S_1 和 S_2 。这2个支路信号具有不同的功率水平, 它们在线性叠加后可通过信道传输, 整个过程通过DSP模块实现。

在光纤通信中, OCDM技术是一种改进的啁啾扩频 (CSS, chirp spread spectrum) 技术, 相对于传统的正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 信号, OCDM信号具有显著优势, 因此, 这里基于所构建的超混沌映射设计OCDM-NOMA物理层加密方案。具体来说,

保密通信过程通过如下步骤来实现发射和接收。在数据发射端, 首先, 对原始数据进行串并转换, 继而实施正交相移键控 (QPSK, quadrature phase shift keying) 调制 (即星座映射)。然后, 通过离散菲涅耳逆变换 (IDFnT, inverse discrete Fresnel transform), 将频域OCDM信号转换为时域信号。为减少串扰, 在时域信号中添加循环前缀, 并实施功率分配 (PS)。最后, 通过数字上变频 (DUC, digital up-conversion) 技术, 对复用后的数据进一步处理, 将其传输到信道。

在数据接收端, 使用串行干扰消除 (SIC, successive interference cancellation) 技术在两路信号中提取信息。首先, 进行信道估计和信道均衡。然后对加密后的数据进行解调和重调。通过从信号中减去重调后的加密数据, 获得原始数据。最后, 进行信道估计、信道均衡和解调, 从而成功还原正确的数据。基于OCDM-NOMA的物理层加密方案原理如图12所示。

5.2.2 OCDM技术

OCDM技术作为一种改进的啁啾扩频技术, 能有效均衡系统在频谱上的损伤, 从而提供性能的优化。不同于OFDM中的窄带子载波, OCDM将信号加载到一组 N 个正交啁啾子载波上进行调制, 借助正交啁啾信号之间的正交性来进行解调^[28-30]。通过应用离散菲涅耳逆变换可将正交啁啾信号合成为基带OCDM信号, 如式(7)所示。

表2 混沌系统的NIST测试结果

序号	统计检验	序列 x_n		序列 y_n	
		通过率	P -value	通过率	P -value
1	Frequency	0.976	0.337 162	0.992	0.324 180
2	Block frequency	0.984	0.957 319	0.976	0.922 036
3	Cumulative sums	0.992	0.602 458	0.984	0.253 551
4	Runs	0.992	0.222 869	1	0.155 209
5	Longest run	1	0.437 274	1	0.046 169
6	Rank	0.984	0.155 209	0.984	0.551 026
7	FFT	0.984	0.585 209	0.992	0.804 337
8	Non-overlapping template	1	0.392 456	1	0.195 163
9	Overlapping template	1	0.468 595	0.992	0.437 274
10	Universal	0.984	0.170 294	1	0.122 325
11	Approximate entropy	0.984	0.204 076	0.992	0.888 137
12	Random excursions	0.976	0.122 325	0.992	0.602 458
13	Random excursions variant	1	0.350 485	0.992	0.311 542
14	Serial	0.992	0.500 934	0.992	0.195 163
15	Linear complexity	0.992	0.619 772	0.976	0.392 456

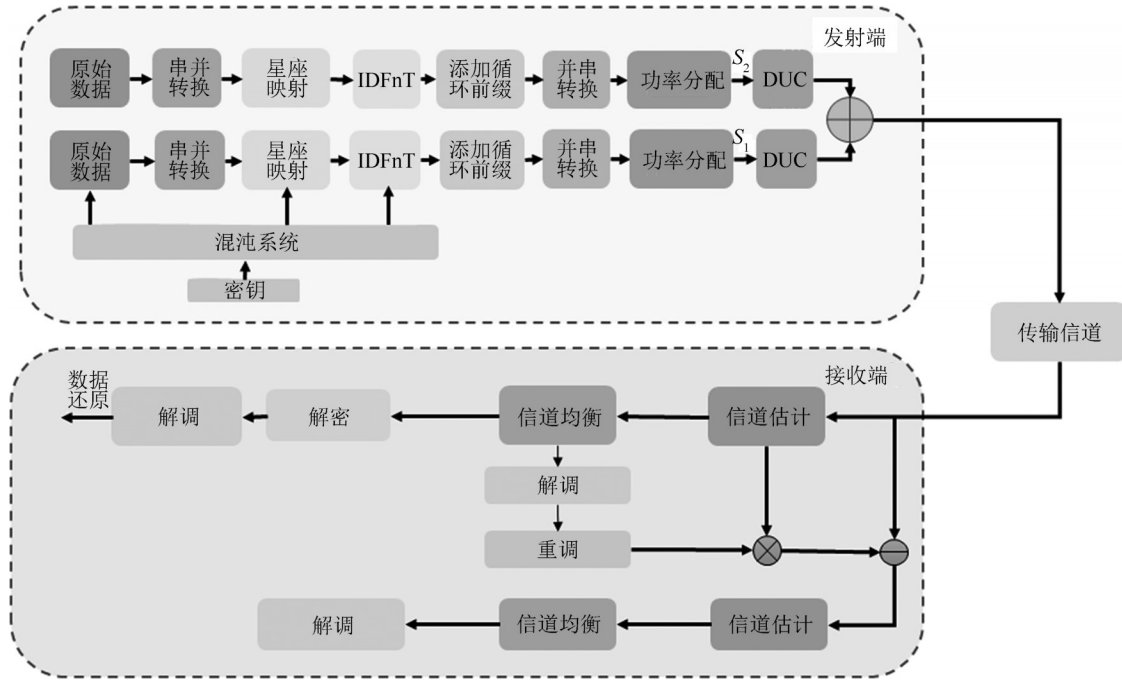


图 12 基于 OCDM-NOMA 的物理层加密方案原理

$$s(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{j\frac{\pi}{4}} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot \begin{cases} e^{-j\frac{\pi}{N}(n-k)^2}, & N \equiv 0(\text{mod } 2) \\ e^{-j\frac{\pi}{N}(n-k+\frac{1}{2})^2}, & N \equiv 1(\text{mod } 2) \end{cases} \quad (7)$$

其中，符号序列 $x(k)$ 用于调制第 k 个啁啾脉冲， N 为啁啾子载波的数量。式(7)生成的 OCDM 信号是复数，可直接用于相干系统。然而，在强度检测直接调制 (IM/DD) 系统中，需要在发射端执行 DUC 操作。DUC 操作通过数字载波将基带 OCDM 信号转换为通带信号。假设连续时间 OCDM 信号为 $s(t)$ ，则通带 OCDM 信号生成过程可表示为

$$s_p(t) = e^{j2\pi f_p t} s(t) \quad (8)$$

其中， f_p 代表上变频载波的频率。

接着，舍弃以上信号的虚部，得到实数形式的双边带 OCDM 信号，以便进行信号传输。在接收端，数字下变频 (DDC, digital down-conversion) 的操作用于将信号变换回基带，并通过执行 DFNT 和解调操作，来恢复原始信息，从而在接收端还原原始数据。

需要强调的是，OCDM 系统与 OFDM 系统具有高度兼容性。与 OFDM 系统中的离散傅里叶变换 (DFT, discrete Fourier transform) 类似，OCDM 系统的核心是离散菲涅尔变换，它用于实现 OCDM 数字调制和解调。这一兼容性使 OCDM 技

术超越传统 OFDM 从而使扩展更加便捷和高效。DFNT 矩阵可表示为

$$\phi(m,n) = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{-j\frac{\pi}{4}} \begin{cases} e^{j\frac{\pi}{N}(m-n)^2}, & N \equiv 0(\text{mod } 2) \\ e^{j\frac{\pi}{N}(m-n+\frac{1}{2})^2}, & N \equiv 1(\text{mod } 2) \end{cases} \quad (9)$$

其中， (m,n) 表示 $N \times N$ 维 DFNT 矩阵的第 m 行和第 n 列。DFNT 矩阵可以分解为 $\phi = \Theta_1 F \Theta_2$ ，其中， F 为 DFT 矩阵； Θ_1 和 Θ_2 为对角矩阵，其对角项分别是 $\Theta_1(m)$ 和 $\Theta_2(n)$ ，计算式分别为

$$\Theta_1(m) = e^{-j\frac{\pi}{4}} \begin{cases} e^{j\frac{\pi}{N}m^2}, & N \equiv 0(\text{mod } 2) \\ e^{j\frac{\pi}{4N}} e^{j\frac{\pi}{N}(m^2+m)}, & N \equiv 1(\text{mod } 2) \end{cases} \quad (10)$$

$$\Theta_2(n) = \begin{cases} e^{j\frac{\pi}{N}n^2}, & N \equiv 0(\text{mod } 2) \\ e^{j\frac{\pi}{N}(n^2-n)}, & N \equiv 1(\text{mod } 2) \end{cases} \quad (11)$$

与 OFDM 调制解调相比，OCDM 调制解调的附加复杂度由 Θ_1 和 Θ_2 的运算产生。因为附加相位矩阵 Θ_1 和 Θ_2 的主对角线为非零元素，其余均为 0 元素，附加相位矩阵为稀疏矩阵，添加附加矩阵后的啁啾载波的复杂度增加较小。

5.2.3 非正交多址接入基本过程

非正交多址接入是一种多用户通信方案，它采用非正交方法，通过分配不同的功率来实现多路复用。NOMA 架构采用功分复用 (PDM) 和串行干

扰消除技术, 这使密钥协同传输成为可能。首先, 在发送端, 在数字域为密钥信号和加密数据分配不同的功率, 并将这两路信号叠加后传输。在接收端, 使用 SIC 技术对接收到的两路复合信号进行逐步连续解调, 解调的顺序是按照分配的功率从高到低逐步进行。首先解调高功率信号, 然后利用解调后的信号从复合信号中减去高功率信号, 从而分离出低功率信号, 实现加密数据和密钥信号的分离。通过 SIC 技术能有效地在接收端还原不同功率的叠加信号, 从而实现多路复用。这一过程有助于提高信号的可靠性和数据传输的效率。

利用 NOMA 技术, 在光线路终端 (OLT, optical line terminal) 到光网络单元 (ONU, optical network unit) 的下行链路传输过程, 利用同一中心频率的波长来分配不同功率的信号, 使不同用户的数据在同一波长上传输。将 2 个不同功率的分支信号 S_1 和 S_2 线性叠加, 整个操作在 DSP 模块执行。各分支信号的线性叠加如下

$$S = \sqrt{P_1} S_1 + \sqrt{P_2} S_2 \quad (12)$$

这个方案中有 2 个分支信号, 分别是 S_1 和 S_2 , 它们的平均功率分别表示为 P_1 和 P_2 , 其中 $P_1 > P_2$ 。定义功率比为 $\frac{P_1}{P_2}$ 。本文方案设置 $P_1=0.6$, $P_2=0.4$ 。

S_1 和 S_2 需要满足一定数学关系, 其中, 大功率信号 S_1 用于传输加密数据, 小功率信号 S_2 用于传输动态密钥。这种配置能高效支配两路信号, 一路传输加密数据, 一路传输动态密钥, 以实现更安全和高效的保密通信。具体关系如下

$$S_1 + S_2 = 1 \quad (13)$$

在接收端, 考虑到信道状况以及用户所受到的噪声干扰, 本文使用 SIC 技术来解调接收到的信号。在这个过程中, SIC 技术可逐步解调信号, 从而有效还原原始数据。这有助于在受到各种干扰的情况下, 成功地恢复出传输的信息。接收到的信号可以表示为

$$S' = kS + q \quad (14)$$

其中, k 为信道参数, q 为用户所受噪声的干扰参数。SIC 技术的关键优势在于它可以消除不同信号之间的相互干扰, 依据不同传输信号之间分配的功率逐步解调这些信号。同时, SIC 还利用每个传输信号之间的干扰信息, 按照功率从高到低的顺序依次解调这些信号。这种逐步解调的方法能有效分离和还原不同功率的信号, 实现 NOMA 技术中有限频谱资源的复用, 从而提高信号的可靠性和数据传输

的效率, 特别是在复杂的信道条件和噪声干扰下。

本文实验使用由混沌模型生成的 3 个混沌序列, 分别为 x 、 y 和 z , 其中 z 是 x 和 y 的合成。令 $z = k_1 x + k_2 y$, 其中, k_1 和 k_2 为控制参量, 本文采用的 $k_1 = k_2 = 1$, 在实际过程中 k_1 与 k_2 可以为其他参数值。这在一定程度上满足幅度调控的原理。这些混沌序列将用于生成掩蔽因子, 以对星座点、比特和子载波进行扰动。首先, 对混沌序列 x 进行处理, 生成数据 D 。然后, 将数据 D 与原始数据信号 A 执行 XOR 操作, 得到加密数据 A' , 可表示为

$$\begin{cases} D = \text{floor}(\text{mod}(10^9 x, 2)) \\ A' = A \oplus D \end{cases} \quad (15)$$

其中, floor 是到向下取整函数, mod 是余数运算函数, 10^9 的引入是为了提高随机性。

通过上述过程, 混沌序列 x 的特性被用作对原始数据进行加密, 是一种关键掩蔽因子。XOR 加密方法有助于增强数据的安全性, 使只有具备正确掩蔽因子的解密方才能还原出原始数据。这是一种常见的加密技术, 混沌序列生成的掩蔽因子提供较强的安全性。使用混沌序列 y 来进行星座点的掩蔽加密。首先, 对混沌序列 y 进行处理, 生成数据 E 。接着, 将数据 E 应用到数据信号 A' 上, 并进行 QPSK 映射, 得到星座点坐标 B 。然后, 可以通过旋转星座点的角度来对坐标 B 进行操作, 旋转角度包括 0° 、 90° 、 180° 或 270° 。通过设置这些角度, 能够实现星座点象限互换, 而整体星座点的位置保持不变。这个过程可用来增强数据的安全性, 使星座点在传输过程中更难以被解析。

$$\begin{cases} E = \text{floor}(\text{mod}(10^9 x, 4)) 90 \\ B' = B(\cos E + j \sin E) \end{cases} \quad (16)$$

利用混沌序列 z 来完成子载波的置换加密。首先, 由混沌序列 z 映射的随机无序数据 m 得到置乱向量 f , 其中 m 的数值小于子载波的数量。通过扰动向量打乱和重排原始子载波 C 的顺序, 生成加密后的子载波 C' , 实现子载波的置换扰动, 改变子载波的顺序, 从而增强数据安全性, 如式(17)所示。这种置换加密方法可以用于保护子载波的信息, 使其在传输过程中更难被解析。

$$\begin{cases} C'(1) = C[f(1)] \\ C'(2) = C[f(2)] \\ \vdots \\ C'(m) = C[f(m)] \end{cases} \quad (17)$$

上述步骤成功实现了对原始数据的三维加密。将加密后的数据进行传输，在接收端，接收方首先提取混沌密钥，然后执行与发送端相反的运算操作，以实现信息的解密。整个加密和解密过程都在 DSP 中完成，确保数据的安全性和保密性，有效保护数据在传输过程中的隐私和完整性。

5.2.4 实验及结果分析

本节通过实验验证混沌加密 OCDM-NOMA 系统的误码率 (BER, bit error rate) 和安全性能，实验系统如图 13 所示。在光纤终端使用 DSP 生成初始加密信号。这一信号是 QPSK-OCDM 信号，使用 512 个子载波，通过采样率为 10 GSa/s 的任意波形发生器 (AWG)，将子载波转换为模拟信号。加密后的 QPSK-OCDM 信号经过电放大器 (EA, electric

cal amplifier) 放大，并注入马赫-曾德尔调制器 (MZM)。光信号由连续波激光器产生，波长为 1 550 nm，功率为 10 dBm，并注入马赫-曾德尔调制器。随后，信号通过掺铒放大器 (EDFA, erbium-doped fiber amplifier) 传输到 2 km 的弱耦合七芯光纤 (MCF)。在接收端，可变光衰减器 (VOA, variable optical attenuator) 用于控制 ONU 的光功率。光信号被注入光电二极管 (PD, photodiode) 以完成光电转换，产生 OCDM-NOMA 电信号，然后通过采样率为 50 GSa/s 的混合信号示波器 (MSO) 采集。最后，在接收端，使用离线数字信号处理技术还原密钥并进行信号解密，以恢复原始数据。该实验系统的目的是评估混沌加密 OCDM-NOMA 系统的性能，以确保数据的安全传输和解密。

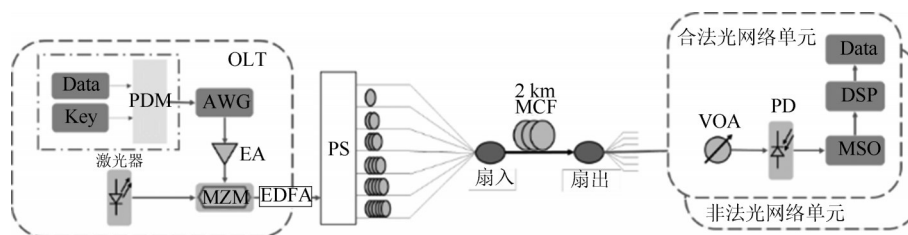


图 13 实验系统

本文进行了 2 km 弱耦合七芯光纤通信性能的误码率测试，在 12 GSa/s 采样率下的误码率变化特性如图 14 所示，反映了原始数据的解密和恢复性能。随着接收光功率的持续增加，每个芯的 BER 呈现明显的下降趋势。当接收光功率达到 -11 dBm 时，信号能够被正常恢复，且误码率维持在阈值以下。然而，随着接收光功率的不断降低，接收端的信号恢复变得越来越困难。当接收光功率降至 -20 dBm 时，误码率已经小于 10^{-1} 量级，此时信息恢复变得相当困难。需要注意的是，一旦接收光功率达到一定要求，加密数据将能够在解密算法下正常恢复。这表明在一定的光功率范围内，混沌加密 OCDM-NOMA 系统能够确保数据的可靠传输和解密，从而有效地保护数据安全。

超混沌序列的可调控性为以上保密通信体系的构建和优化提供了很好的适应性。如上述混沌数据的导入，极性调控是通过偏置调控实现的，而序列的输出多样性也是通过幅度调控以及与归一化的伴随作用而实现的。此外，值得说明的是，本文采用的加密混沌系统具有全局调控、局部调控、偏置调

控的特点。全局调控有利于增大密钥空间，通过调控全局调幅参数从而能够获得混沌序列 x 、 y 、 z 的变化，提高系统加密的灵敏性。局部调控有利于增大密钥空间，调控局部调幅参数获得部分混沌映射数值变化，增强数据加密的隐蔽性，提高系统加密的灵敏性。偏置调控可控制混沌系统映射数值极性变化，减少 DSP 算法处理复杂度。系统可调控性对保密性能的影响如表 3 所示。

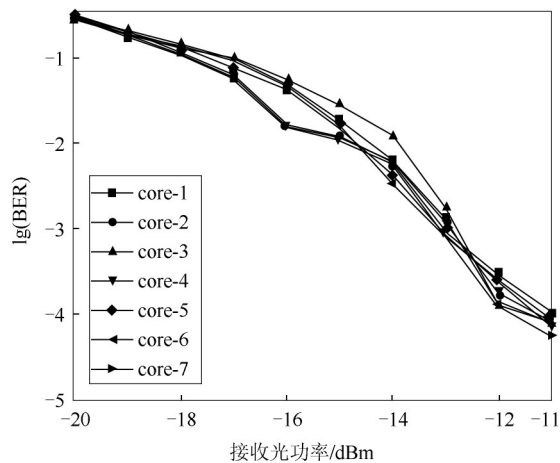


图 14 在 12 GSa/s 采样率下的误码率变化特性

表3 系统可调控性对保密性能的影响

系统可调控性	对保密性能的影响
全局调幅	利于增大密钥空间,通过调控全局调幅参数从而简单高效地获得混沌序列 x 、 y 、 z 的变化,提高系统加密的灵敏性
局部调幅	利于增大密钥空间,调节局部调幅参数,获得部分混沌信号缩放,增强数据加密的隐蔽性,提高系统加密的灵敏性
偏置调控	可控制混沌系统映射数值极性变化,减少DSP算法处理复杂度

根据本文所提出的几何调控理论,对偏置调控、全局调幅与局部调幅3个指标进行对比分析,与相关离散混沌映射的工作对比如表4所示。

表4 偏置调控、全局调幅与局部调幅对比

文献	偏置调控	全局调幅	局部调幅
文献[4]	无	无	无
文献[5]	无	无	无
文献[13]	无	无	无
文献[17]	无	有	有
本文	有	有	有

6 结束语

离散忆阻的设计为离散混沌系统的可控性设计提供了新的可能性。忆阻超混沌映射在某种特殊反馈关系时可以获得独立的全局调幅参数、局部调幅参数以及直接偏置调控参数。这些调控参数来源于离散忆阻的阻值函数,或者来自忆阻内部变量的积分速度。离散忆阻简明的内外变量约束关系可以集成以上调控参数。可以预见,忆阻器的设计和器件发展将为动力学系统的可控性研究带来新的机遇。

基于可控超混沌映射构建的OCDM-NOMA物理层加密实验说明了离散忆阻超混沌加密系统能够保证数据的可靠传输和解密,可调控的混沌映射也增加了其工程应用的适应性和便捷性。本文提供的超混沌可调控性设计存在三次项的反馈关系,三次项的实现将占用更多的器件乘法资源。因此,有必要进一步简化忆阻约束函数关系,以增加混沌系统中的非分岔调控参数的占比。此外,也需深入研究保密通信系统包括光纤保密通信体系的制式,深入探索混沌序列注入通信通道的方式与阶段,混沌序列的可控性设计能够助力新通信方案的设计与优化^[31-32]。

参考文献:

- [1] CHUA L. If it's pinched it's a memristor[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2014, 29(10): 104001.
 [2] 闫文浩,姜子敬,黄欣,等.广义二维多项式混沌映射及其在信息传输中的应用[J]. *通信学报*, 2022, 43(9): 80-89.

- YAN W H, JIANG Z J, HUANG X, et al. Generalized 2D polynomial chaotic map and its application in information transmission[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(9): 80-89.
 [3] 义理林,柯俊翔.混沌保密光通信研究进展[J]. *通信学报*, 2020, 41(3): 168-181.
 YI L L, KE J X. Research progress of chaotic secure optical communication[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(3): 168-181.
 [4] PENG Y, SUN K, HE S. A discrete memristor model and its application in Henon map[J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2020, 137: 137.
 [5] BAO H, LI H Z, HUA Z Y, et al. Sine-transform-based memristive hyperchaotic model with hardware implementation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 19(3): 2792-2801.
 [6] 李春彪,王德纯.一种恒Lyapunov指数谱混沌吸引子及其Jerk电路实现[J]. *物理学报*, 2009, 58(2): 764-770.
 LI C B, WANG D C. An attractor with invariable Lyapunov exponent spectrum and its Jerk circuit implementation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(2): 764-770.
 [7] 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.
 [8] DENG Y, LI Y X. A 2D hyperchaotic discrete memristive map and application in reservoir computing[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, 69(3): 1817-1821.
 [9] LIN H R, WANG C H, CUI L, et al. Brain-like initial-boosted hyperchaos and application in biomedical image encryption[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(12): 8839-8850.
 [10] ZHANG S, ZHENG J H, WANG X P, et al. Multi-scroll hidden attractor in memristive HR neuron model under electromagnetic radiation and its applications[J]. *Chaos*, 2021, 31(1): 011101.
 [11] LI C, ZHANG R, LU T. Linear synchronization and circuit implementation of chaotic system with complete amplitude control[J]. *Chinese Physics B: English Version*, 2017, 26 (12): 124-133.
 [12] XU Y, LI C B, WU J Y, et al. A compact multiplier-oriented chaotic oscillator for free control[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2023, 70(6): 2276-2280.
 [13] YUAN F, ZHANG S T, XING G B, et al. Parameter control methods for discrete memristive maps with network structure[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2024, PP(99): 1-11.
 [14] LIANG Z W, SUN K H, HE S B. Design and dynamics of the multicavity hyperchaotic map based on offset boosting[J]. *The European Physical Journal Plus*, 2021, 137(1): 51.
 [15] 闫登卫,王丽丹,段书凯.基于忆阻器的多涡卷混沌系统及其脉冲同步控制[J]. *物理学报*, 2018, 67(11): 50-63.
 YAN D W, WANG L D, DUAN S K. Memristor-based multi-scroll

- chaotic system and its pulse synchronization control[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(11): 50-63.
- [16] 秦铭宏, 赖强, 吴永红. 具有无穷共存吸引子的简单忆阻混沌系统的分析与实现[J]. *物理学报*, 2022, 71(16): 146-156.
QIN M H, LAI Q, WU Y H. Analysis and implementation of simple four-dimensional memristive chaotic system with infinite coexisting attractors[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(16): 146-156.
- [17] ZHOU X J, LI C B, LI Y X, et al. An amplitude-controllable 3-D hyperchaotic map with homogenous multistability[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2021, 105(2): 1843-1857.
- [18] LI C, THIO W J C, IU H H C, et al. A memristive chaotic oscillator with increasing amplitude and frequency[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 12945-12950.
- [19] 刘公致, 吴琼, 王光义, 等. 改进型 Logistic 混沌映射及其在图像加密与隐藏中的应用[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(10): 3602-3609.
LIU G Z, WU Q, WANG G Y, et al. A improved logistic chaotic map and its application to image encryption and hiding[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(10): 3602-3609.
- [20] 黄丽莲, 姚文举, 项建弘, 等. 一种具有多对称同质吸引子的四维混沌系统的超级多稳定性研究[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(1): 390-399.
HUANG L L, YAO W J, XIANG J H, et al. Extreme multi-stability of a four-dimensional chaotic system with infinitely many symmetric homogeneous attractors[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(1): 390-399.
- [21] 张翌维, 王育民, 沈绪榜. 基于混沌映射的一种交替结构图像加密算法[J]. *中国科学(E辑: 信息科学)*, 2007, 37(2): 183-190.
ZHANG Y W, WANG Y M, SHEN X B. An alternate structure image encryption algorithm based on chaotic mapping[J]. *Science in China (Series E (Information Sciences))*, 2007, 37(2): 183-190.
- [22] 摆玉龙, 杨阳, 唐丽红. 一个新多涡卷混沌系统的设计及在图像加密中的应用[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(2): 436-444.
BAI Y L, YANG Y, TANG L H. Design of a multi-scroll chaotic system and its application to image encryption[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(2): 436-444.
- [23] 扶龙香, 贺少波, 王会海, 等. 离散忆阻混沌系统的 Simulink 建模及其动力学特性分析[J]. *物理学报*, 2022, 71(3): 42-51.
FU L X, HE S B, WANG H H, et al. Simulink modeling and dynamic characteristics of discrete memristor chaotic system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(3): 42-51.
- [24] 徐强, 包伯成, 杨晓云, 等. 蔡氏电路方程的离散化与数字电路实现[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(6): 2158-2160.
XU Q, BAO B C, YANG X Y, et al. Discretization and digital circuit realization of Chua's circuit equation[J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(6): 2158-2160.
- [25] 马铭磷, 刘颖, 李志军. 忆阻开关混沌电路及其吸引子共存现象研究[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(12): 3758-3765.
MA M L, LIU Y, LI Z J. Study on coexistence of multiple attractors in memristor-based switching chaotic circuits[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(12): 3758-3765.
- [26] 洪庆辉, 曾以成, 李志军. 含磁控和荷控两种忆阻器的混沌电路设计与仿真[J]. *物理学报*, 2013, 62(23): 49-55.
HONG Q H, ZENG Y C, LI Z J. Design and simulation of chaotic circuit for flux-controlled memristor and charge-controlled memristor[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(23): 49-55.
- [27] 王云峰, 沈海斌, 严晓浪. 混沌随机数发生器的设计[J]. *半导体学报*, 2005, 26(12): 2433-2439.
WANG Y F, SHEN H B, YAN X L. Design of a chaotic random number generator[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(12): 2433-2439.
- [28] 吴琼琼, 马子洋, 李启华, 等. 高速混沌光通信研究进展[J]. *光通信技术*, 2021, 45(1): 22-27.
WU Q Q, MA Z Y, LI Q H, et al. Research progress of high speed chaotic optical communication[J]. *Optical Communication Technology*, 2021, 45(1): 22-27.
- [29] 张建忠, 王安帮, 王云才. 混沌光通信与 OC-48 光纤通信的波分复用[J]. *物理学报*, 2009, 58(6): 3793-3798.
ZHANG J Z, WANG A B, WANG Y C. Wavelength division multiplexing of chaotic optical communication and OC-48 fiber communication[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(6): 3793-3798.
- [30] 王超, 董怡洋, 王卉婷, 等. 混沌空间光通信研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(1): 3788/IRLA20220296.
WANG C, DONG Y Z, WANG H T, et al. Research progress of chaotic free-space optical communication[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(1): 3788/IRLA20220296.
- [31] 黄春光, 程海, 丁群. 基于 PUF 的 Logistic 混沌序列发生器[J]. *通信学报*, 2019, 40(3): 182-189.
HUANG C G, CHENG H, DING Q. Logistic chaotic sequence generator based on physical unclonable function[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(3): 182-189.
- [32] 龚利爽, 侯二林, 刘海芳, 等. 布尔混沌系统的物理随机性分析[J]. *通信学报*, 2019, 40(3): 190-195.
GONG L S, HOU E L, LIU H F, et al. Physical random analysis of Boolean chaos[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(3): 190-195.

[作者简介]



李春彪 (1971-), 男, 江苏扬州人, 博士, 南京信息工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为忆阻混沌电路、忆阻类脑计算及其应用等。

李泳新 (1997-), 男, 山东枣庄人, 南京信息工程大学博士生, 主要研究方向为离散混沌系统、离散忆阻器、神经电路与网络、非线性电路及其应用等。

仲庆 (1997-), 男, 江苏扬州人, 东南大学博士生, 主要研究方向为光纤保密通信、OFDM 调制等。

杨勇 (1991-), 男, 江苏南京人, 南京沁恒微电子有限公司工程师, 主要研究方向为 RISC-V 芯片、射频电路、天线设计等。

AKGUL Akif (1986-), 男, 博士, 赫梯大学教授, 主要研究方向为忆阻混沌电路、忆阻神经元电路及其应用等。