

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2026.02.005

引用格式:孙园,欧阳苏建,曾惠权,等. 区间二型模糊大脑情感学习超混沌同步控制在安全通信中的应用[J].

重庆大学学报, 2026,49(2): 55-68.



## 区间二型模糊大脑情感学习超混沌同步控制在安全通信中的应用

孙 园, 欧阳苏建, 曾惠权, 王绮楠, 高佳倩

(厦门理工学院 a. 电气工程与自动化学院; b. 厦门市高端电力装备及智能控制重点实验室, 福建 厦门 361024)

**摘要:**针对现有混沌系统在实际应用中性能不足的问题,提出一种结合区间二型模糊大脑情感学习控制器(interval type-2 fuzzy brain emotional learning controller, IT2FBELC)与鲁棒控制器实现超混沌系统同步控制的方法。该方法通过 IT2FBELC 逼近超混沌系统中的未知项,利用梯度下降法对 IT2FBELC 的权重及参数进行在线更新,实现超混沌主系统对从系统的同步追踪。同时,鲁棒控制器用于处理系统的残余误差,使控制器的输出值尽可能逼近理想控制值,进一步提高超混沌系统的同步精度。仿真结果表明,该方案能实现超混沌系统的高度同步,与 RBF 神经网络、BP 神经网络和 BEL 模型相比,拥有较好的跟踪性能和计算效率。此外,研究进行了语音安全传输与图像安全传输的仿真实验,结果表明该方法在保密通信领域应用的有效性与适应性,为混沌保密通信的实际应用提供进一步的理论支持。

**关键词:**混沌控制;模糊神经网络;区间二型模糊大脑情感学习;混沌保密通信

中图分类号:TP183

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)02-055-14

## Hyperchaos synchronization control of interval type-2 fuzzy brain emotional learning and its application in secure communication

SUN Yuan, OUYANG Sujian, ZENG Huiquan, WANG Qinan, GAO Jiaqian

(a. School of Electrical Engineering & Automation; b. Xiamen Key Laboratory of Frontier Electric Power Equipment and Intelligent Control, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, P. R. China)

**Abstract:** To address the limited performance of existing chaotic systems in practical applications, this paper proposes a hyperchaotic system synchronization control method combining an interval type-2 fuzzy brain emotional learning controller (IT2FBELC) with a robust controller. The IT2FBELC approximates the unknown components of the hyperchaotic system, with its weights and parameters updated online via gradient descent to achieve synchronous tracking between the master and slave systems. The robust controller compensates for

收稿日期:2023-12-11

基金项目:厦门市自然科学基金(3502Z20227215);厦门市海洋与渔业发展专项资金青年科技创新项目(23ZHZB043QCB37);  
厦门理工学院高层次人才科研启动项目(YKJ22060R)。

Supported by Xiamen Natural Science Foundation (3502Z20227215), Xiamen Ocean and Fisheries Development Special Fund Youth Science and Technology Innovation Project (23ZHZB043QCB37), and Xiamen University of Technology High-level Talents Research Initiation Project (YKJ22060R).

作者简介:孙园(1981—),女,副教授,博士,主要从事神经网络基础及应用方向研究,(E-mail)sungirl609@126.com。

通信作者:欧阳苏建,男,(E-mail)oysj1997@163.com。

residual errors, driving the control output closer to the ideal value and further improving synchronization accuracy. Simulation results demonstrate that the proposed approach achieves high synchronization of hyperchaotic systems with superior tracking performance and computational efficiency compared to RBF neural networks, BP neural networks and conventional brain emotional learning models. Additionally, simulations for secure voice and image transmission confirm the method's effectiveness and adaptability in confidential communication, providing theoretical support for practical applications of chaotic secure communication.

**Keywords:** chaos control; fuzzy neural network; interval type-2 fuzzy brain affective learning; chaotic secure communication

混沌同步现象是指混沌主系统随时间变化能完全拟合从系统的行为轨迹,经典的同步控制方法包括:驱动-响应同步法<sup>[1]</sup>、主动-被动同步法<sup>[2]</sup>、反馈同步法<sup>[3-4]</sup>、耦合同步法<sup>[5]</sup>、自适应同步法<sup>[6-7]</sup>等。近些年来随着人工神经网络的逐渐成熟和迅速发展,越来越多的学者着眼于基于人工神经网络的混沌同步控制研究。文献[8]提出一种基于模糊神经网络实现混沌系统同步控制的方案,该方法能够处理混沌系统中的未知参数,提高非线性混沌系统的同步效率。文献[9-11]使用RBF径向基函数神经网络逼近和估计系统中的非线性函数和不确定扰动,增加混沌系统的鲁棒性。文献[12]提出了一种改进的二型模糊小波神经网络,并添加鲁棒控制模块用于处理混沌系统动力学行为中的未知项和外部干扰,有效减少系统抖振,实现更高的同步精度。

以上基于混沌同步控制研究的讨论中,大部分学者采用低维混沌系统,相较于普通的混沌系统,超混沌系统具有更复杂的非线性结构和难以预测的动力学行为,对于信息的隐匿和传输能提供更高安全性。因此,笔者提出一种结合区间二型模糊大脑情感学习控制器(interval type-2 fuzzy brain emotional learning controller, IT2FBELC)与鲁棒控制器的超混沌同步控制系统,在混沌同步的基础上进行了图像加密和语音安全传输仿真实验,验证该系统应用于保密通信的有效性。仿真结果表明该方案能够增强算法的控制性能,提高超混沌系统的同步精度,实现信号的隐匿与完整提取。

## 1 系统描述

笔者提出基于区间二型模糊大脑情感学习控制器(IT2FBELC)的超混沌同步保密通信方案原理如图1所示。大脑情感学习(brain emotional learning, BEL)<sup>[13]</sup>模型是模仿哺乳动物大脑处理外界干扰的方法计算模型,具有快速学习速度和良好的逼近能力,已被用于解决控制问题、系统辨识、预测和分类等邻域。区间二型模糊集(interval type-2 fuzzy logic system, IT2FLS)由孟德尔等<sup>[14]</sup>在2000年提出,其对处理系统输入的不确定性问题有良好效果。为提高BEL模型处理系统不确定性问题的能力,文献[15]在BEL模型中引入区间二型模糊集构建了区间二型模糊大脑情感学习控制器(IT2FBELC),它结合了区间二型模糊逻辑和大脑情感学习网络的优点,实现较快收敛速度和较高计算效率,应用于混沌系统同步控制中可最大化提高主从混沌系统的同步精度。由于系统外部扰动的存在,控制器的实际输出值与理想控制值有一定差距,因此在控制模块设计中,采用IT2FBELC作为模拟理想控制器的主控制器,添加鲁棒控制模块作为处理残余误差的补偿控制器,使控制器的输出值尽可能逼近理想控制值。

图1分为2部分:超混沌主系统构成的信息加密部分和超混沌从系统构成的信息解密部分。其中,  $ss(t)$  为待加密的原始信号,  $se(t)$  为加密信号,信号长度为  $m$ ,  $t=1, 2, 3, \dots, m$ 。加密信号是信息发送方利用超混沌主系统生成混沌序列,在原始信号上进行混沌遮掩生成,由信道传输至信息接收方,具体处理过程如下:

步骤1:确定超混沌系统的数学模型,设置主系统与从系统的初始条件。

步骤2:将主系统与从系统间的跟踪误差作为控制模块的输入向量,通过IT2FBELC与鲁棒控制器的输出值之和近似实现超混沌同步的理想控制值,采用模型输出与目标值间的误差调制模型参数,经过一定次数的训练实现主、从系统间的同步控制,产生一组超混沌随机序列。

步骤3:信息发送方利用生成的超混沌主系统随机序列对原始信号进行混沌遮掩与混沌调制通信,得到加密信号  $se(t)$ ,通过信道传输至信息接收方。

步骤4:信息接收方利用与主系统同步的从系统混沌序列,通过步骤3的逆过程对加密信号  $se(t)$  进行解密得到解密后信号  $r(t)$ 。

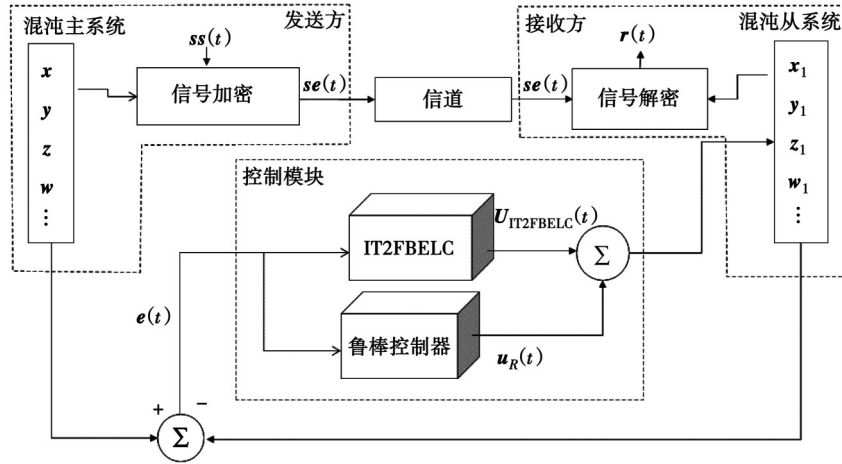


图1 基于IT2FBELC的超混沌同步加密原理图

Fig.1 Schematic diagram of hyperchaos synchronous encryption based on IT2FBELC

### 1.1 IT2FBELC模型结构

区间二型模糊大脑情感学习控制器(IT2FBELC)<sup>[15]</sup>的网络结构如图2所示,该模型包含一个杏仁核网络和眶额皮质网络。

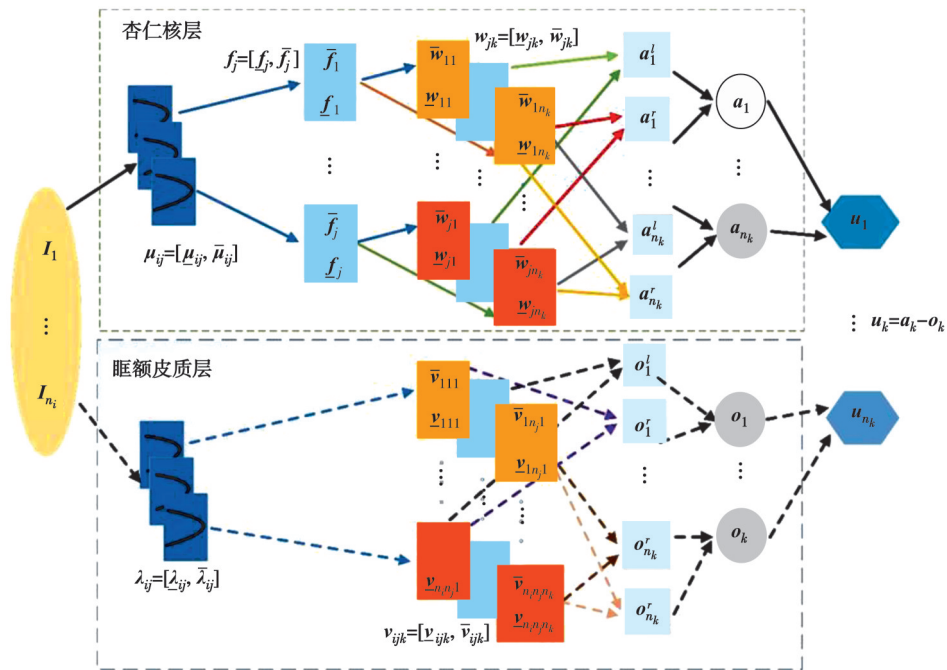


图2 IT2FBELC结构图

Fig. 2 Structure of the IT2FBELC

杏仁核网络的感知层接收来自输入层的信号,采用高斯函数定义式为

$$\bar{\mu}_{ij} = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{I_i - m_{ij}^{AM}}{\bar{\sigma}_{ij}^{AM}} \right)^2 \right\}, \quad \underline{\mu}_{ij} = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{I_i - m_{ij}^{AM}}{\underline{\sigma}_{ij}^{AM}} \right)^2 \right\}, \quad (1)$$

式中:  $I_i$  是输入信号;  $[\bar{\sigma}_{ij}^{\text{AM}}, \underline{\sigma}_{ij}^{\text{AM}}] = [\sigma_{ij}^{\text{AM}} + \Delta\sigma, \sigma_{ij}^{\text{AM}} - \Delta\sigma]$ , 其中  $\bar{\sigma}_{ij}$  与  $\underline{\sigma}_{ij}$  分别表示该位置均值区间对应的上、下方差;  $\sigma_{ij}^{\text{AM}}$  表示该位置的基准方差,  $\Delta\sigma$  为方差的微调量, 用于在基准方差的基础上对不确定性范围进行扩张或收缩;  $m_{ij}^{\text{AM}}$  为杏仁核网络中区间二型高斯隶属函数的均值。

为了提高模型的通用性, 杏仁核网络的激励层根据来自感知层的输入信号进行模糊操作, 表达式为

$$\bar{f}^j = \prod_{i=1}^{n_i} \bar{\mu}_{ij}, \quad \underline{f}^j = \prod_{i=1}^{n_i} \underline{\mu}_{ij}. \quad (2)$$

因此, 根据模糊推理规则, 杏仁核网络输出的左右点值可定义为

$$a_k^l = \frac{\sum_{j=1}^{n_j} f_j^l \underline{w}_{jk}}{\sum_{j=1}^{n_j} f_j^l}, \quad a_k^r = \frac{\sum_{j=1}^{n_j} f_j^r \bar{w}_{jk}}{\sum_{j=1}^{n_j} f_j^r}, \quad (3)$$

表达式中的  $f_j^l, f_j^r$  是根据 KM 算法计算出的最大权匹配点  $L$  和  $R^{[16]}$  确定的, 此算法能明显提高模型的计算效率, 表达式为

$$f_j^l = \begin{cases} \bar{f}^j, & j \leq L \\ \underline{f}^j, & j > L \end{cases}, \quad f_j^r = \begin{cases} \underline{f}^j, & j \leq R \\ \bar{f}^j, & j > R \end{cases}, \quad (4)$$

最后杏仁核网络将左右 2 点的平均值作为最终的输出值, 即

$$a_k = \frac{a_k^l + a_k^r}{2}. \quad (5)$$

眶额皮质网络的感知层接收与杏仁核网络相同的输入信号, 采用的高斯隶属函数如下式所示

$$\bar{\lambda}_{ij} = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{I_i - m_{ij}^{\text{OFC}}}{\bar{\sigma}_{ij}^{\text{OFC}}} \right)^2 \right\}, \quad \underline{\lambda}_{ij} = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{I_i - m_{ij}^{\text{OFC}}}{\underline{\sigma}_{ij}^{\text{OFC}}} \right)^2 \right\}, \quad (6)$$

根据眶额皮质网络输入输出之间的模糊规则, 眶额皮质网络输出的左右点值可定义为

$$o_k^l = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} \underline{\lambda}_{ij} \underline{v}_{ijk}}{\sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} \underline{\lambda}_{ij}}, \quad o_k^r = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} \bar{\lambda}_{ij} \bar{v}_{ijk}}{\sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} \bar{\lambda}_{ij}}. \quad (7)$$

最后, 眶额皮质网络将左右 2 点的平均值经由输出层输出, 即

$$o_k = \frac{o_k^l + o_k^r}{2}, \quad (8)$$

因此, IT2FBELC 最终的模型输出为

$$u_{\text{IT2FBELC}}(t) = a_k - o_k, \quad k = 1, \dots, N. \quad (9)$$

定义系统模型损失函数为

$$E(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (T_k - u_k)^2, \quad (10)$$

式中:  $T_k$  为第  $k$  次输出的目标值;  $u_k$  为模型第  $k$  次训练的实际输出值, 采用梯度下降法进行控制器的参数更新:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{ij}^{\text{AM}}(t+1) &= \bar{\sigma}_{ij}^{\text{AM}}(t) - \eta_{\sigma} \frac{\partial E}{\partial \bar{\sigma}_{ij}^{\text{AM}}}; & \underline{\sigma}_{ij}^{\text{AM}}(t+1) &= \underline{\sigma}_{ij}^{\text{AM}}(t) - \eta_{\sigma} \frac{\partial E}{\partial \underline{\sigma}_{ij}^{\text{AM}}}, \\ m_{ij}^{\text{AM}}(t+1) &= m_{ij}^{\text{AM}}(t) - \eta_m \frac{\partial E}{\partial m_{ij}^{\text{AM}}}; & m_{ij}^{\text{OFC}}(t+1) &= m_{ij}^{\text{OFC}}(t) - \eta_m \frac{\partial E}{\partial m_{ij}^{\text{OFC}}}, \\ \bar{w}_{jk}(t+1) &= \bar{w}_{jk}(t) - \eta_w \frac{\partial E}{\partial \bar{w}_{jk}}; & \underline{w}_{jk}(t+1) &= \underline{w}_{jk}(t) - \eta_w \frac{\partial E}{\partial \underline{w}_{jk}}, \\ \bar{\sigma}_{ij}^{\text{OFC}}(t+1) &= \bar{\sigma}_{ij}^{\text{OFC}}(t) - \eta_{\sigma} \frac{\partial E}{\partial \bar{\sigma}_{ij}^{\text{OFC}}}; & \underline{\sigma}_{ij}^{\text{OFC}}(t+1) &= \underline{\sigma}_{ij}^{\text{OFC}}(t) - \eta_{\sigma} \frac{\partial E}{\partial \underline{\sigma}_{ij}^{\text{OFC}}}, \end{aligned}$$

$$\bar{v}_{ijk}(t+1) = \bar{v}_{ijk}(t) - \eta_v \frac{\partial E}{\partial \bar{v}_{ijk}}; \quad \underline{v}_{ijk}(t+1) = \underline{v}_{ijk}(t) - \eta_v \frac{\partial E}{\partial \underline{v}_{ijk}}, \quad (11)$$

式中:  $\hat{\eta}_w, \hat{\eta}_m, \hat{\eta}_\sigma, \hat{\eta}_v$  为控制系统的学习率, 决定权重更新的步长, 模型依据上述更新不断调节控制器参数, 经过多次迭代逐渐减小主从系统间误差, 实现主从系统高度同步。

## 1.2 鲁棒控制器

理想控制器的输出值  $u(t)$  与 IT2FBELC 的实际输出值  $U_{IT2FBELC}(t)$  间的差异可用下式表示

$$u(t) = u_{IT2FBELC}(t) \varepsilon(t), \quad (12)$$

式中:  $\varepsilon(t)$  为理想控制值与实际控制值之间存在的近似误差。研究设计的鲁棒控制器的作用是使控制器的实际输出值尽可能逼近理想控制值, 控制模块的实际输出值可定义为 IT2FBELC 与鲁棒控制器的输出之和

$$u(t) = u_{IT2FBELC}(t) + u_R(t), \quad (13)$$

式中:  $u_R(t)$  为鲁棒控制器输出值, 其定义为

$$u_R(t) = \hat{D}(t) \operatorname{sgn}(e(t)), \quad (14)$$

式中:  $e(t)$  是主系统与从系统间的跟踪误差,  $\hat{D}(t)$  是不确定性边界值  $D$  的估计值, 假设它可以限制近似误差:  $0 \leq e(t) \leq D$ , 则更新边界的自适应定律<sup>[15]</sup>可定义为

$$\dot{\hat{D}}(t) = \eta_R |e(t)|, \quad (15)$$

式中,  $\eta_R$  是更新不确定性界的学习率, 利用这种自适应律, 鲁棒控制器可以覆盖近似误差, 提高控制系统的跟踪精度。

## 2 仿真分析

实验仿真环境如下: 处理器采用 Intel i5-6300HQ, 基准频率 2.3 GHz, 最高频率 3.2 GHz; RAM 内存 8 GB; 操作系统为 Windows10, 64 位操作系统, 基于  $\times 64$  的处理器。

### 2.1 超混沌 Lorenz-stenflo 系统同步控制仿真分析

选取超混沌 Lorenz-stenflo 系统作为被控对象, 超混沌 Lorenz-stenflo 系统<sup>[17-18]</sup>是瑞典物理学家 Stenflo 于 1996 年在研究低频短波重力波动方程时提出, 数学模型是一个四维非线性系统。主系统表达如式 (16) 所示。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = a(y(t) - x(t)) + cw(t), \\ \dot{y}(t) = x(t)d(-z(t)) - y(t), \\ \dot{z}(t) = x(t)y(t) - bz(t), \\ \dot{w}(t) = -x(t) - aw(t), \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $x, y, z, w$  为混沌主系统的状态变量,  $a, b, c, d$  为系统参数, 当  $a = 10, b = 0.7, c = 1.5, d = 26$  时, 系统呈现超混沌状态。包含外部干扰的从系统表达式如式 (17) 所示

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = a(y_1(t) - x_1(t)) + cw_1(t) + \varepsilon_1(t) + u_1(t), \\ \dot{y}_i(t) = x_1(t)d(-z_1(t)) - y_1(t) + \varepsilon_2(t) + u_2(t), \\ \dot{z}_i(t) = x_1(t)y_1(t) - bz_1(t) + \varepsilon_3(t) + u_3(t), \\ \dot{w}_i(t) = -x_1(t) - aw_1(t) + \varepsilon_4(t) + u_4(t), \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $x_i, y_i, z_i, w_i$  为混沌从系统的状态变量;  $\varepsilon(t) = [\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t), \varepsilon_3(t), \varepsilon_4(t)]$  为系统的外部干扰,  $u(t) = [u_1(t), u_2(t), u_3(t), u_4(t)]$  为控制模块的输出值, 具体定义见式 (13)。

定义主从系统间的误差为

$$\begin{cases} e_1(t) = x(t) - x_1(t), \\ e_2(t) = y(t) - y_1(t), \\ e_3(t) = z(t) - z_1(t), \\ e_4(t) = w(t) - w_1(t), \end{cases} \quad (18)$$



结合式(16)~(18),系统的动态误差特性可定义为

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = a(e_2(t) - e_1(t)) + ce_4(t) + \varepsilon_1(t) + u_1(t), \\ \dot{e}_2(t) = de_1(t) - e_2(t) - x_1(t)z_1(t) + x(t)z(t) + \varepsilon_2(t) + u_2(t), \\ \dot{e}_3(t) = -be_3(t) + x_1(t)y_1(t) + x(t)y(t) + \varepsilon_3(t) + u_3(t), \\ \dot{e}_4(t) = -e_1(t) - ae_4(t) + \varepsilon_4(t) + u_4(t), \end{cases} \quad (19)$$

$$\dot{e}(t) = Ge(t) + f(t) + \varepsilon(t) + u(t), \quad (20)$$

$$\text{式中: } e(t) = \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ e_3(t) \\ e_4(t) \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} -a & a & 0 & c \\ d & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -b & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -a \end{bmatrix}, f(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ x(t)z(t) \\ -x(t)y(t) + x_1(t)y_1(t) \\ 0 \end{bmatrix}, \text{使主、从系统实现完全同步的理想}$$

输出值  $U^*(t)$  可表示为

$$U^*(t) = -Ge(t) - f(t) - \varepsilon(t) - Ke(t), \quad (21)$$

式中,  $K = \text{diag}(k_1, k_2, k_3)$ ,  $K$  为系统的反馈增益, 结合公式(20)与公式(21)可得

$$\dot{e}(t) + Ke(t) = 0. \quad (22)$$

通过调整  $K$  值的大小, 能够得到:  $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}(t) \rightarrow 0$ 。由于系统存在外部扰动, 在实际应用中, 式(21)中的理想控制值难以实现, 因此研究通过聚合 IT2FBELC 与鲁棒控制器的输出值模拟理想控制值, 进一步提高超混沌主从系统间的同步精度。

系统的初始参数设置如表1所示。IT2FBELC 中的  $m_{ij}^{\text{AM}}$ ,  $m_{ij}^{\text{OFC}}$ ,  $w_{jk}$ , 和  $v_{ijk}$  参数的初始值设置为  $\text{rand}(0,1)$ , 表示 0~1 之间的随机值。模型通过参数自学习规则和梯度下降法进行参数更新,  $n_m, n_v, n_w, n_\delta$  为更新时对应学习率,  $L$  与  $R$  为杏仁核网络输出层中的最大权匹配点,  $\eta_R$  为鲁棒控制器的参数更新率,  $\sigma_{\text{init}}^{\text{AM}}$  和  $\Delta\sigma$  为二型高斯隶属函数的方差和微调。  $L, R, \Delta\sigma$  由试错法确定, 实现超混沌系统的最优同步性能。

表1 系统仿真初始参数

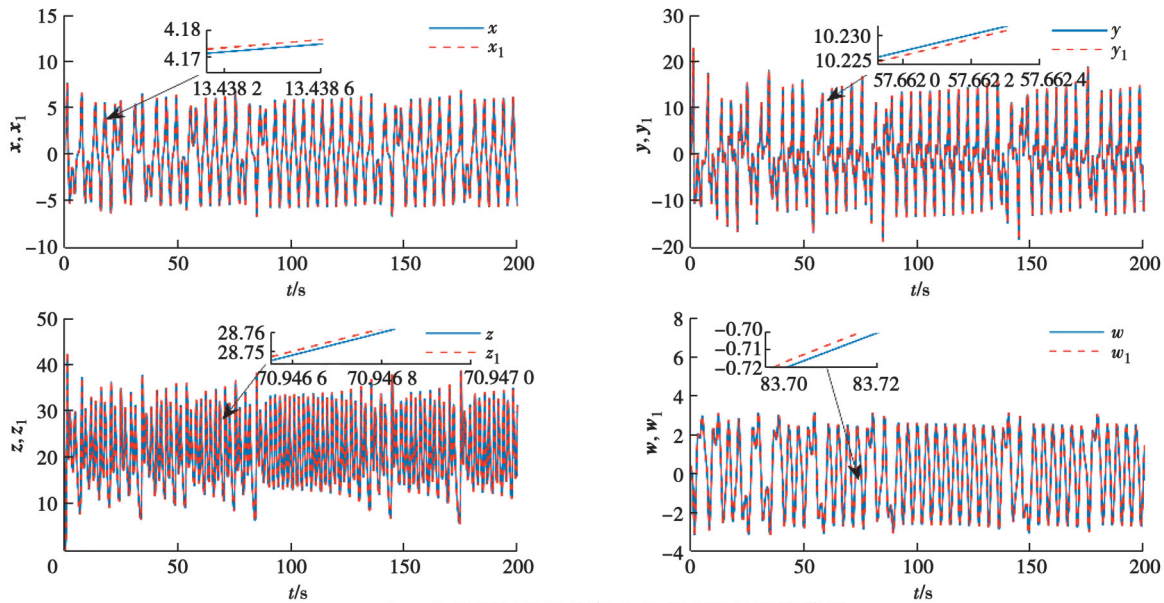
Table 1 Initial parameters of system simulation

参数	数值	参数	数值
$m_{ij}^{\text{AM}}$	$\text{rand}(0,1)$	$m_{ij}^{\text{OFC}}$	$\text{rand}(0,1)$
$w_{jk}$	$\text{rand}(0,1)$	$v_{ijk}$	$\text{rand}(0,1)$
$\sigma_{\text{init}}^{\text{AM}}$	0.4	$\Delta\sigma$	0.05
$L$	8	$R$	16
$n_m$	0.15	$n_v$	0.9
$n_w$	0.9	$n_\delta$	0.9
$\eta_R$	0.05	$[x(t), y(t), z(t), w(t)]$	$[0.1 \ 0.2 \ 0.1 \ 0.3]$
$[x_1(t), y_1(t), z_1(t), w_1(t)]$	$[0.095 \ 0.22 \ 0.1 \ 0.26]$	$[\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t), \varepsilon_3(t), \varepsilon_4(t)]$	$[0.2 \cos(\pi t), 0.1 \cos(t), 0.3 \cos(2t), 0.2 \cos(t)]$

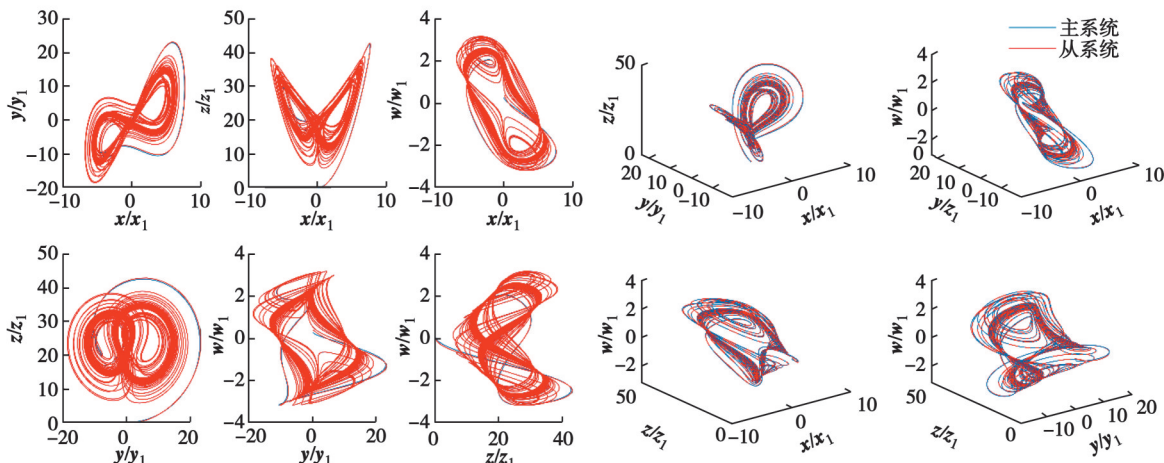
在  $[0, 200]$  s 的区间范围内, 超混沌系统以 0.02 s 的时间间隔进行采样, 共计采样点 10 000 个, 经由 IT2FBELC 实现超混沌主系统与从系统的同步控制, 仿真结果如图3所示。其中, 图3(a)为主系统与从系统各个状态变量的跟踪效果, 图3(b)与图3(c)分别展示了超混沌系统各相吸引子的二维与三维跟踪效果, 图中蓝色曲线代表主系统的输出值, 红色曲线为从系统的输出值, 从图中可以看出, 经过学习和迭代训练, 主系统与从系统的曲线逐渐趋于一致。

为了更好地展示算法实现超混沌系统的同步有效性, 图4展示了各状态变量前 20 s 内的主、从系统跟踪误

差状态曲线图看出,随着网络训练的深入,主系统与从系统间的误差逐渐趋近于0。以上仿真结果表明超混沌系统具有复杂的动力学行为特征,产生的混沌序列具有很强随机性与不可预测性,采用的控制方法能实现从系统对主系统的同步追踪,使超混沌系统各相吸引子处于混沌同步状态。



(a) 主系统与从系统各个状态变量的跟踪效果



(b) 超混沌系统各相吸引子的二维跟踪效果

(c) 超混沌系统各相吸引子的三维跟踪效果

图3 基于IT2FBELC的超混沌Lorenz-Stenflo系统的吸引子相图

Fig. 3 Attractor phase diagram of hyperchaotic Lorenz-Stenflo system based on IT2FBELC

为进一步定量描述系统的同步性能,引入均方根误差<sup>[15]</sup>(root mean square error, RMSE)作为检验标准,具体表达如式(23)所示

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n_h} \sum_{h=1}^{n_h} ((e_{1h})^2 + (e_{2h})^2 + (e_{3h})^2 + (e_{4h})^2)}, \quad (23)$$

式中: $h=1, 2, 3, \dots, n_h$ 为生成的混沌序列数量, $e_{1h}, e_{2h}, e_{3h}, e_{4h}$ 为主从系统的跟踪误差, RMSE的值越接近于0,表明系统的误差越小,适应度越好,主从系统的同步性能越优秀。

将IT2FBELC与BEL、反向传播神经网络(back propagation neural networks, BPNN)和径向基函数神经网络(radial basis function neural networks, RBFNN)3种模型进行对比,设置相同的采样时间、采样间隔等初始条件,分别实现超混沌Lorenz-stenflo系统的同步控制。每种算法进行10次仿真实验,计算RMSE平均值,结果对比如表2所示。

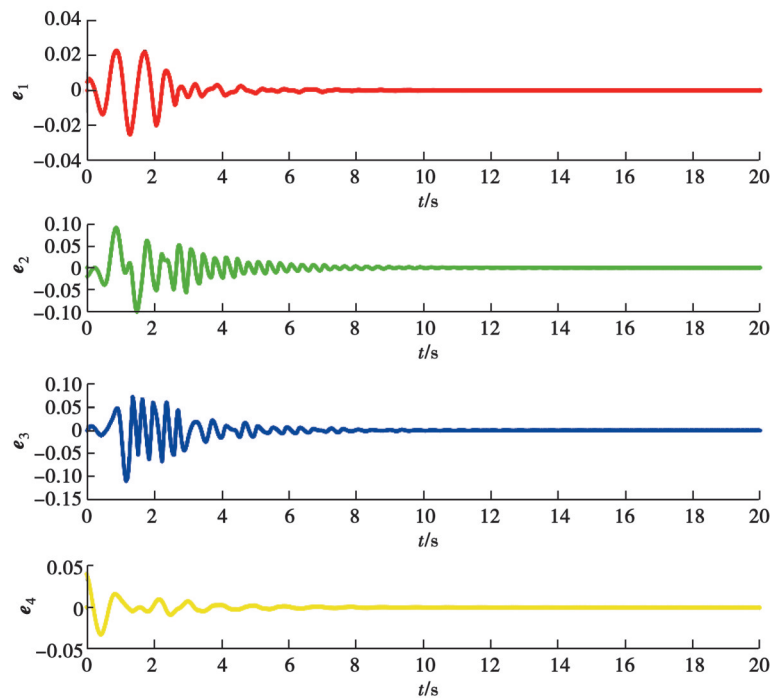


图 4 基于 IT2FBELC 的超混沌 Lorenz-Stenflo 系统同步跟踪误差曲线

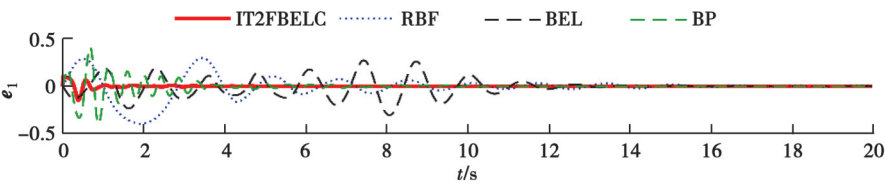
Fig. 4 Synchronous tracking error curve of hyperchaotic Lorenz-Stenflo system based on IT2FBELC

表 2 不同算法实现超混沌 Lorenz-Stenflo 系统同步的性能比较

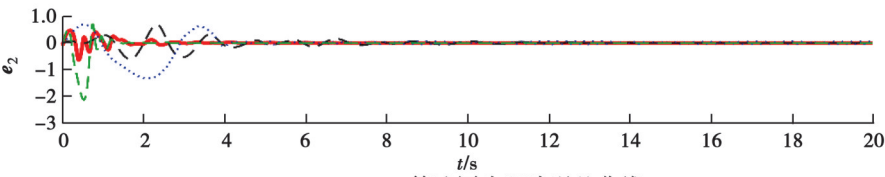
Table 2 Comparison of synchronization performance of hyperchaotic Lorenz-Stenflo systems based on different algorithms

算法	RMSE		
	最大值	最小值	平均值
BEL	0.098 3	0.040 7	0.076 5
RBF	0.331 8	0.152 6	0.235 9
BP	0.099 4	0.047 2	0.066 2
IT2FBELC	0.037 6	0.024 7	0.033 5

分析表 2 数据可知,IT2FBELC 实现了最小的 RMSE 平均值,且相比于 BEL 模型,精度高出 56.2%,相比 BP 神经网络,精度高出 49.39%,相比于 RBF 神经网络,精度提高 85.79%,说明相比其他 3 种控制器,IT2FBELC 能够实现超混沌系统较高的同步精度。图 5 为各控制器的跟踪误差曲线对比图,在外部扰动与系统不确定性影响下,IT2FBELC 的跟踪误差曲线具有较小幅度的震荡,说明相比其他算法,研究算法具有较高稳定性,在干扰下也能较好实现跟踪性能。



(a) BEL算法同步跟踪误差曲线



(b) RBF算法同步跟踪误差曲线



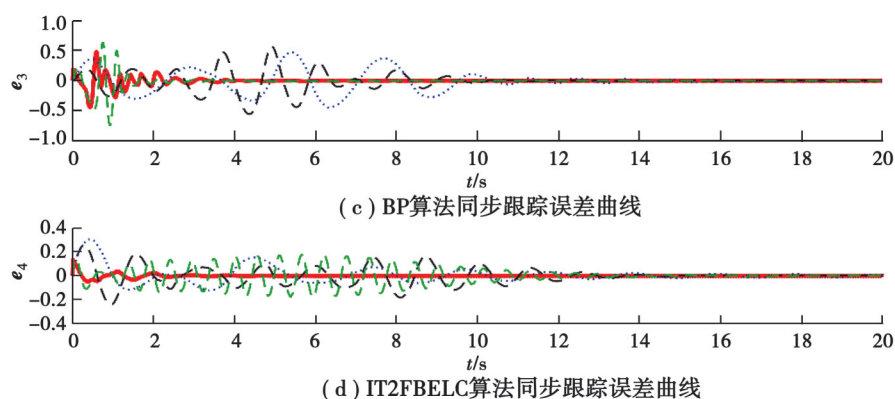


图5 超混沌 Lorenz-Stenflo 系统的同步跟踪误差曲线对比

Fig. 5 Comparison of synchronous tracking error curves of hyperchaotic Lorenz-Stenflo system

## 2.2 语音安全传输仿真实验

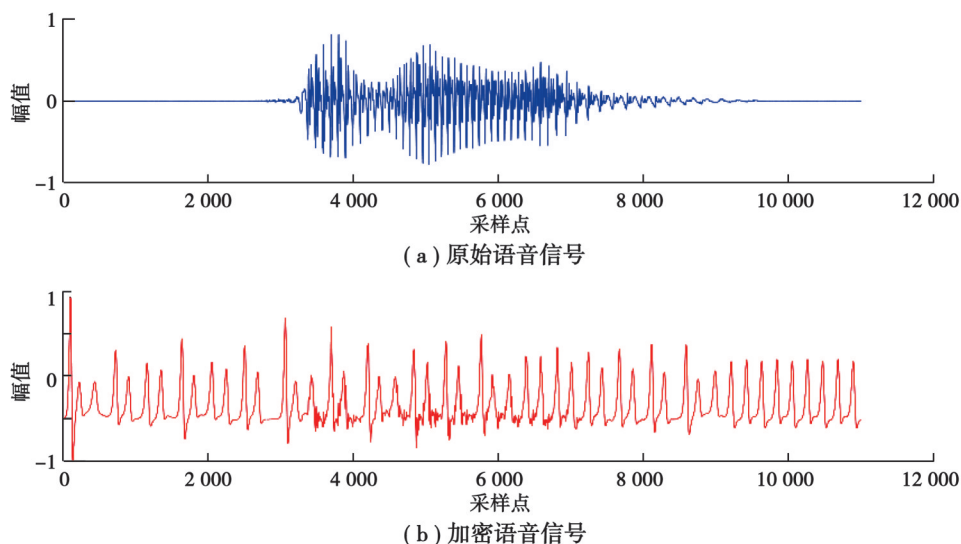
在混沌安全通信领域中,信息收发双方的混沌同步是实现混沌保密通信的关键。仿真结果证明了算法能够实现超混沌系统的同步控制,为验证其同步精度能否满足信息安全传输的性能需求,研究将进行语音信号安全传输仿真实验。

混沌遮掩通信的基本原理是信息发送方将待加密信号与混沌序列进行叠加形成加密信号,具体过程描述如下

$$se(t) = x(t) \cdot y(t) + w(t) + ss(t) \cdot z(t), \quad (24)$$

式中: $ss(t)$ 为原始信号; $x(t), y(t), w(t), z(t)$ 为与待加密语音信号长度相同的超混沌序列; $se(t)$ 为加密信号,由信道传输至接收方,接收方利用与主系统同步的从系统混沌序列通过加密步骤的逆过程消除加密信号中的混沌信号,调制恢复出原始信号。

选取2段语音信号作为待加密样本,第1段以标准男声“HELLO”为例,语音信号的抽样频率为16 000 Hz,样本总量为10 992;第2段以标准女声“你好”为例,语音信号的抽样频率为44 100 Hz,样本总量为34 850。实验结果如图6、7所示。从图中看出,2段语音信号与超混沌序列叠加后的加密信号都呈现出类似噪声的形态,说明原始语音信号得到了很好的掩盖加密,看不出原始语音信号特征,验证了算法可以实现基于语音信号的安全传输。解密后的恢复信号和原始语音信号相比,在视觉上有着几乎与原始语音信号一致的波形图,虽然个别时刻点有误差,但都处于原始信号0 dB的时刻点,对于需要传递的信息影响不大。



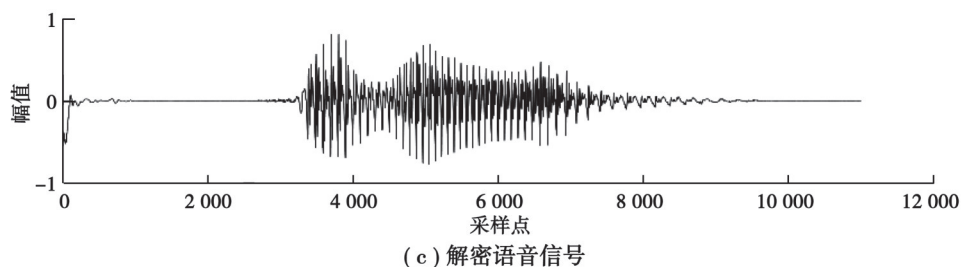


图6 第1段语音信号的加解密效果

Fig. 6 The encryption and decryption effect of the first speech signal

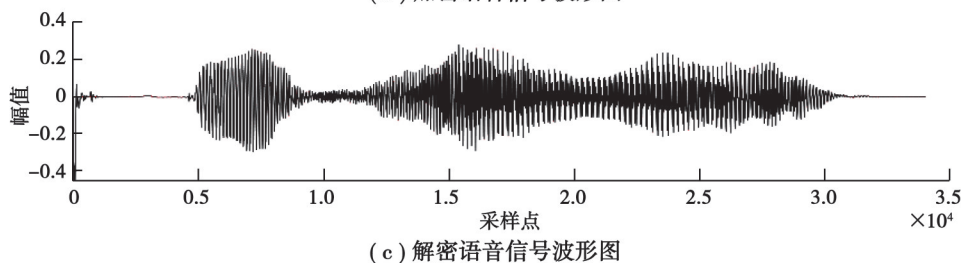
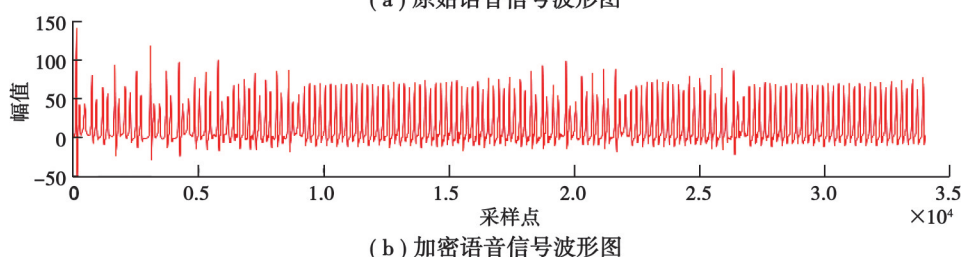
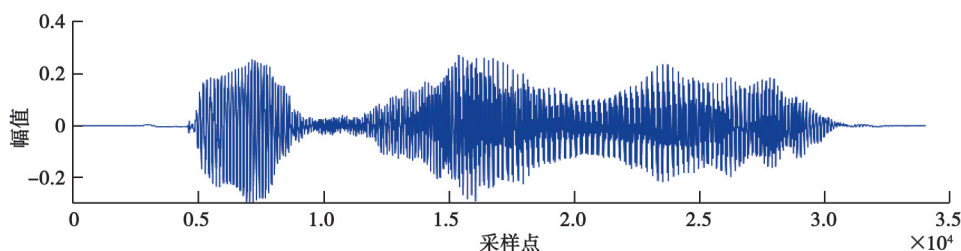


图7 第2段语音信号的加解密效果

Fig. 7 The encryption and decryption effect of the second speech signal

采用均方误差( $R_{\text{MSE}}$ )<sup>[19]</sup>和平均失真( $R_{\text{NADM}}$ )<sup>[19]</sup>2个指标来客观评价所提出的加密算法对于语音信号的加密效果,具体表达式如式(25)和式(26)所示

$$R_{\text{MSE}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y'(n) - y(n)|^2, \quad (25)$$

$$R_{\text{NADM}} = \frac{\sum_{n=1}^N |y'(n) - y(n)|}{\sum_{n=1}^N |y(n)|}, \quad (26)$$

式中: $y'(n)$ 、 $y(n)$ 分别表示解密语音信号与原始语音信号的幅度, $N$ 表示信号的长度。为验证算法应用于语音安全传输中的性能,将其与BEL模型、RBF神经网络和BP神经网络3种算法模型进行对比,结果如表3所示。

表3数据显示,基于IT2FBELC的混沌语音传输系统解密后的信号均方误差相比RBF神经网络相差了2个数量级,相比BEL模型和BP神经网络相差了一个数量级,同时在语音失真方面也拥有较优良表现。说明相比其他3种控制器,研究算法能够实现语音信息的精确传输,具有一定有效性及安全性。

表 3 解密信号均方误差和平均失真对比

Table 3 Comparison of mean square error and average distortion of decrypted signal

算法	语音信号 1		语音信号 2	
	$R_{\text{MSE}}$	$R_{\text{NADM}}$	$R_{\text{MSE}}$	$R_{\text{NADM}}$
BEL	0.109 1	0.232 9	0.035 2	0.102 4
RBF	0.621 3	1.165 1	0.200 7	0.505 2
BP	0.049 8	0.122 5	0.093 7	0.095 8
IT2FBELC	0.001 4	0.067 9	0.002 6	0.035 8

2.3 图像加密仿真实验

图像作为信息传递的主要载体,提高图像信息传输的安全尤为重要。为了验证本文算法应用于图像信息安全传输的有效性,研究将进行图像加密仿真实验。数字图像可看作 $M\times N$ 大小的数值矩阵,矩阵中的每一点为图像的像素值,大小为0~255。对信号叠加过程进行取模处理,具体过程可描述为

$$se(t)=\text{mod}\left(\text{round}\left(x(t)\cdot y(t)+w(t)+ss(t)\cdot z(t)\right)\cdot 10\,000,256\right)。(27)$$

采用256×256尺寸大小的Lena图像,Pepper图像和Baboon图像作为待加密的明文图像。为了简化加密过程,首先将彩色图像的R、G、B 3通道像素值进行转换连接为一组一维向量,利用式(27)所描述的信号叠加过程对该图像向量进行混沌遮掩生成相应的加密向量,接着将其重新转换为彩色3通道图像矩阵得到密文图像。仿真结果如图8~10所示。从图中可以看出,经过混沌掩盖后的密文图像看不出原始图像特征,解密图像在视觉上与明文图像达到一致,能够完全恢复明文图像包含的所有信息,说明研究算法能实现基于图像信息的安全传输。

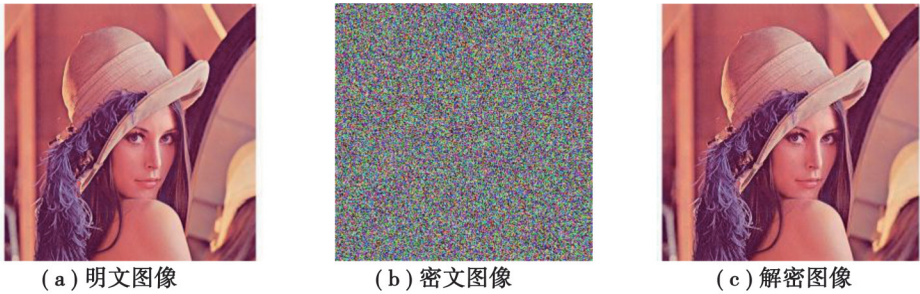


图 8 Lena 图像的加解密效果

Fig. 8 Encryption and decryption effect of Lena image

图像信息的加解密效果除了视觉上的直观评价,还可采用客观数据进行进一步衡量表达。峰值信噪比分析(peak signal-to-noise ratio, PSNR)<sup>[20]</sup>是图像处理邻域用来衡量图像信号重建质量的指标,该值是基于图像间的均方误差(MSE)<sup>[19]</sup>进行计算,定义如式(28)和式(29)所示。

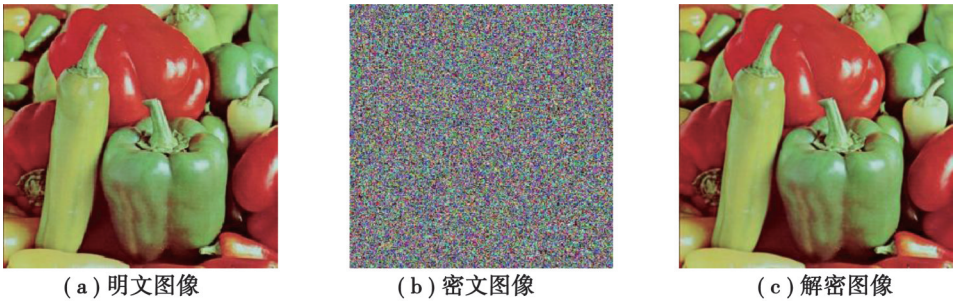


图 9 Pepper 图像的加解密效果

Fig. 9 Encryption and decryption effect of Pepper image

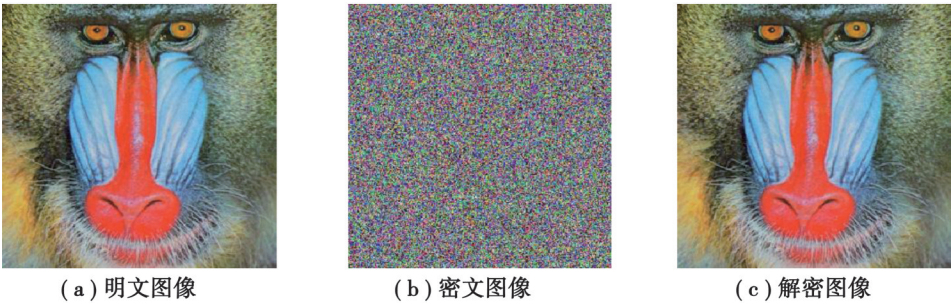


图 10 Baboon 图像的加解密效果  
Fig. 10 Encryption and decryption effect of Baboon image

$$\text{MSE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^N |I(i,j) - G(i,j)|^2, \tag{28}$$

$$\text{PSNR} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{\text{MAX}_I^2}{\text{MSE}} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{\text{MAX}_I}{\sqrt{\text{MSE}}} \right), \tag{29}$$

式中： $I$ 和 $G$ 分别为明文图像与解密图像， $\text{MAX}$ 为最大像素值，PSNR 的值越高，说明 2 幅图像间的差异越小，恢复图像的信号质量越高，反之则说明 2 幅图像间具有较大差异。因此，为了分析算法在信号传输方面的性能，本节引入峰值信噪比分析(PSNR)作为客观衡量指标，在相同初始条件下，分别利用基于 BEL 模型、RBF 神经网络与 BP 神经网络的超混沌同步系统进行图像加密仿真实验，计算分析各算法的 PSNR 值，结果如表 4 所示。可以看出，算法解密前后图像信号的均方误差与表中其他算法相比，相差了 1~2 个数量级，同时在峰值信噪比方面获得了较好结果，说明算法能实现图像密文信息的完整还原。

表 4 原始图片与恢复图片的均方误差与信噪比分析  
Table 4 Mean square error and signal-to-noise ratio analysis of original and restored images

图片	算法	MSE	PSNR (original-decryptd images)
Lena	BEL	0.048 4	61.278 2
	RBF	0.857 9	48.796 5
	BP	0.018 2	65.525 6
	IT2FBELC	0.005 2	70.942 7
Baboon	BEL	0.077 0	59.269 3
	RBF	0.189 8	55.348 8
	BP	0.045 1	61.591 5
	IT2FBELC	0.008 7	68.736 9
Peppers	BEL	0.094 2	58.392 0
	RBF	0.857 9	48.796 5
	BP	0.053 6	60.837 6
	IT2FBELC	0.006 3	70.167 8

另一方面，为了衡量加密算法的安全性能，本节计算了原始图片与加密图片之间的均方误差 MSE 和峰值信噪比 PSNR。表 5 是加密算法与 3D Genesio 混沌加密方法<sup>[21]</sup>的 MSE 对比，表 6 是加密算法与 3D Genesio 混沌加密方法<sup>[21]</sup>、多混沌系统图像加密方法<sup>[22]</sup>和 Robust and lossless 彩色图像加密算法<sup>[23]</sup>的 PSNR 对比。分析表中数据可知，与表中其他算法相比，所提出的加密方法能实现明文图像像素的完全置乱，使原始图像与加



密图像间的像素具有最小相似度,实现对传输信息的完全掩盖,说明算法在实现信息完整传输的同时还能保持较高的安全性,满足基于图像信息的保密通信需求。

表 5 原始图片与加密图片的均方误差分析  
Table 5 Comparative analysis of MSE values between the original and the encrypted image

图像	MSE	
	研究算法	3D Genesio 混沌加密系统 <sup>[21]</sup>
Lena	$3.029\ 9\times 10^4$	$1.490\ 3\times 10^4$
Baboon	$2.484\ 3\times 10^4$	$1.488\ 0\times 10^4$
Peppers	$2.700\ 5\times 10^4$	$1.491\ 0\times 10^4$

表 6 原始图片与加密图片的信噪比分析  
Table 6 Comparative analysis of PSNR values between the original and the encrypted image

图像	PSNR(original-encrypted images)			
	研究算法	3D Genesio 混沌加密方法 <sup>[21]</sup>	多混沌系统图像加密方法 <sup>[22]</sup>	Robust and lossless 彩色图像加密算法 <sup>[23]</sup>
Lena	3.816 4	6.398 0	8.704 8	8.129 3
Baboon	4.178 8	6.404 8	9.099 6	8.772 9
Peppers	3.316 5	6.395 9	8.200 3	7.639 3

3 结 语

笔者主要研究了结合区间二型模糊大脑情感学习模型与鲁棒控制器实现超混沌系统同步的控制方法。通过该方法对超混沌 Lorenz-stenflo 系统进行同步仿真实验,进行同步性能分析;同时,通过混沌掩盖技术将超混沌 Lorenz-stenflo 同步系统应用于图像加密和语音信号安全传输中进行仿真研究,并与一些传统方法进行比较分析。

仿真结果表明:1)利用高斯区间二型模糊网络,能高效处理系统的不确定性问题,鲁棒控制模块能处理系统的外部干扰,提高计算效率,实现更高的超混沌同步精度。2)通过利用超混沌系统具有复杂的非线性结构和难以预测的动力学行为,采用简单可逆的混沌遮掩方法实现较高安全性,所提出的控制方法能满足混沌保密通信的需求,具备保密通信邻域应用的有效性和适应性,为超混沌系统的实际应用提供进一步的理论支持。

参考文献

[ 1 ] 范永青,刘淳,王敏娟,等.一类不确定混沌系统的驱动响应同步控制[J].西安邮电大学学报,2019,24(1): 63-67.  
Fan Y Q, Liu C, Wang M J, et al. Adaptive control of drive response synchronization for an uncertain class of chaotic systems [J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2019, 24(1): 63-67. (in Chinese)

[ 2 ] 胡宗海,光峰,王立平.几类混沌同步问题的探究[J].河北北方学院学报(自然科学版),2017,33(7): 50-55.  
Hu Z H, Guang F, Wang L P. Several classes of chaos synchronization[J]. Journal of Hebei North University (Natural Science Edition), 2017, 33(7): 50-55. (in Chinese)

[ 3 ] 吴春梅.面向分数阶混沌系统线性反馈同步控制方法[J].控制工程,2019,26(5): 898-902.  
Wu C M. Linear feedback synchronization control method for fractional order chaotic systems[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(5): 898-902. (in Chinese)

[ 4 ] 高智中.超混沌 Tang 系统的分析及其线性反馈同步与其电路实现[J].中山大学学报(自然科学版),2020,59(1): 15-23.  
Gao Z Z. Analysis, linear feedback synchronization and circuit realization of a hyperchaotic Tang system[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2020, 59(1): 15-23. (in Chinese)



- [5] 周双, 谢绍斌. Lorenz系统单一耦合同步研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2015(5): 52-55.  
Zhou S, Xie S B. A single coupling method in Lorenz systems[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2015(5): 52-55. (in Chinese)
- [6] 于海东, 刘爽, 岳立娟. 一个新的未知参数超混沌系统的自适应同步[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2018, 50(2): 88-92.  
Yu H D, Liu S, Yue L J. Adaptive synchronization of a new hyperchaotic system with uncertain parameters[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2018, 50(2): 88-92. (in Chinese)
- [7] 许荣今, 李木子, 岳立娟. 一个参数未知的网格多涡卷超混沌系统的自适应同步[J]. 吉林大学学报(理学版), 2021, 59(4): 965-971.  
Xu R J, Li M Z, Yue L J. Adaptive synchronization of a grid multi-scroll hyperchaotic system with unknown parameters[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2021, 59(4): 965-971. (in Chinese)
- [8] Wang R M, Zhang Y N, Chen Y Q, et al. Fuzzy neural network-based chaos synchronization for a class of fractional-order chaotic systems: an adaptive sliding mode control approach[J]. Nonlinear Dynamics, 2020, 100(2): 1275-1287.
- [9] Chen T, Yang H, Yuan J. Event-triggered adaptive neural network backstepping sliding mode control for fractional order chaotic systems synchronization with input delay[J]. IEEE Access, 2021, 9: 100868-100881.
- [10] Nian F, Liu X, Zhang Y, Yu X, et al. Module-phase synchronization of fractional-order complex chaotic systems based on RBF neural network and sliding mode control[J]. International Journal of Modern Physics B, 2020, 34(7): 2050050.
- [11] Yousefpour A, Jahanshahi H, Munoz-Pacheco J M, et al. A fractional-order hyper-chaotic economic system with transient chaos[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2020, 130: 109400.
- [12] Moradi Zirkohi M, Shoja-Majidabad S. Chaos synchronization using an improved type-2 fuzzy wavelet neural network with application to secure communication[J]. Journal of Vibration and Control, 2022, 28(15-16): 2074-2090.
- [13] Moren J, Balkenius C. A computational model of emotional learning in the amygdala[C]// 6th International Conference on the Simulation of Adaptive Behaviour. Cambridge: MIT Press, 2000: 383-391.
- [14] Liang Q, Mendel J M. Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2000, 8(5): 535-550.
- [15] Le T L, Lin C M, Huynh T T. Self-evolving type-2 fuzzy brain emotional learning control design for chaotic systems using PSO[J]. Applied Soft Computing, 2018, 73: 418-433.
- [16] Lin C M, Yang M S, Chao F, et al. Adaptive filter design using type-2 fuzzy cerebellar model articulation controller[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(10): 2084-2094.
- [17] Stenflo L. Equations describing solitary atmospheric waves[J]. Physica Scripta, 1991, 43: 599-600.
- [18] Stenflo L. Generalized Lorenz equations for acoustic-gravity waves in the atmosphere[J]. Physica Scripta, 1996, 53(1): 83-84.
- [19] 徐丽云, 闫涛, 钱宇华. 基于级联混沌系统的分数域语音加密算法[J]. 计算机应用, 2021, 41(9): 2623-2630.  
Xu L Y, Yan T, Qian Y H. Audio encryption algorithm in fractional domain based on cascaded chaotic system[J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(9): 2623-2630. (in Chinese)
- [20] 韩伟娟, 董新捷, 董文龙. 神经网络模型在图像超分领域的应用研究[J]. 信息工程大学学报, 2021, 22(2): 159-163.  
Han W J, Dong X J, Dong W L. Application research of image super-resolution domain based on neural network[J]. Journal of Information Engineering University, 2021, 22(2): 159-163. (in Chinese)
- [21] Lin C M, Pham D H, Huynh T T. Synchronization of chaotic system using a brain-imitated neural network controller and its applications for secure communications[J]. IEEE Access, 2021, 9: 75923-75944.
- [22] Samiullah M, Aslam W, Nazir H, et al. An image encryption scheme based on DNA computing and multiple chaotic systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 25650-25663.
- [23] Wu X, Kurths J, Kan H. A robust and lossless DNA encryption scheme for color images[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(10): 12349-12376.

(编辑 侯 湘)