

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2017.05.012

基于新四翼混沌系统的复杂网络的混沌同步及其在保密通信中的应用

付宏睿¹, 史红涛¹, 张建刚²

(1. 安阳学院建筑工程学院, 安阳 455000; 2. 兰州交通大学数理学院, 兰州 730070)

摘要: 以复杂网络为背景, 根据 Lyapunov 稳定性理论, 首先研究了以一个新四翼混沌系统为节点的全局耦合网络的渐近同步问题; 其次, 将四翼混沌系统作为网络节点, 用混沌遮掩的方法将其应用到保密通信中; 再次, 通过加入高斯白噪声对系统进行噪声干扰, 并用小波分析理论对信号进行去噪处理; 最后用 Matlab 进行数值仿真表明, 经过小波阈值去噪后, 有用信号可以很好地恢复出来。

关键词: 复杂网络; 混沌同步; 保密通信; 噪声干扰; 小波去噪

中图分类号: TN918 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2017)05-0965-06

Chaos synchronization of complex networks based on the novel four-wing chaotic system and its application in secure communication

FU Hong-Rui¹, SHI Hong-Tao¹, ZHANG Jian-Gang²

(1. College of Architectural Engineering, Anyang University, Anyang 455000, China;

2. School of Mathematics and Physics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Taking the complex network as the background, and based on the Lyapunov stability theory, this paper firstly studies the asymptotic synchronization of globally coupled network, for which a new four-wing chaotic system is a node. Secondly, as a node, the four-wing chaotic system is applied to secure communication by chaos cover. Thirdly, Gaussian noise is added to cause noise interference, and the signal will be de-noised by wavelet analysis theory. Lastly, the result of numerical calculation with Matlab demonstrates that useful signals will be restored well after the wavelet threshold de-noising.

Keywords: Complex network; Chaos synchronization; Secure communication; Noise interfering; Wavelet de-noising

1 引言

气象学家 Lorenz 在 1963 年首次发现了一个三维自治系统中的混沌吸引子, 从此混沌方面的科学得到很快发展. 近年来, 许多学者在研究混沌系统的理论与应用过程中, 将其与复杂网络结合在一

起, 把混沌系统表示为网络的节点, 则复杂网络的同步就成为各个节点间的混沌同步问题^[1-3]. 文献[4]研究了具有非线性耦合作用的复杂网络系统之间基于自适应控制的有限时间混沌同步. 文献[5]研究了系统具有时滞特性的基于离散型复杂网络的混沌同步. 文献[6]研究了复杂动力网络的各个

收稿日期: 2016-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(61364001); 甘肃省科技支撑计划(144GKCA018)

作者简介: 付宏睿(1983-), 男, 河南安阳人, 讲师, 硕士, 研究方向为非线性系统动力学与复杂网络. E-mail: fuhongrui1983@163.com

通讯作者: 史红涛. E-mail: sht5216@163.com

单变量之间替换相互耦合的同步. 文献[7]基于稳定性理论研究了以两个异结构混沌系统为复杂网络节点的混沌同步控制. 文献[8]研究了复杂网络中具有相同结构的节点之间的脉冲同步等. 值得注意的是, 已有研究大部分都是对二维或三维混沌系统的研究, 很少将四维混沌系统应用到复杂网络的同步中, 本文在文献[9]提出的一个新四翼混沌系统的基础上将其应用到了复杂网络中, 由于该系统具有丰富的动力学特性, 从而使复杂网络节点间的结构更复杂, 并且非常有利于保密通信.

因为混沌信号与噪声信号非常相似, 并且混沌信号的带宽频谱具有连续性与非周期性, 特别是对初值非常的敏感, 从而使得它有非常好的隐蔽性且很难预测, 所以它十分适合于保密通信^[10-13]. 然而许多研究都是对信号只实施一次加密, 或者发送系统与接收系统都是二维或三维系统, 随着破译技术的发展, 使得这些系统保密程度降低, 而本文提出一种新的混沌保密通信系统, 将有用信息经过多次加密, 并且把具有 6 个参数和 4 个非线性项的四翼混沌系统作为信号发射与接收器, 从而可以大大提高信息传输的保密程度.

在现实中信息传输会受到噪声的干扰, 因此本

文在保密通信的基础上加入了高斯白噪声^[14,15], 使其对信号传输造成干扰, 最后用小波变换^[16]原理对噪声进行了处理, 实验结果证明, 有用信号可以被无失真地恢复出来.

2 复杂网络模型

考虑一类节点结构相同且经过耦合构成的复杂网络, 假设节点数为 N , 其中每一个节点都是 n 维动力系统, 那么第 i 个节点的动力系统的状态方程为

$$\dot{x}_i = A(x_i) + f(x_i, t) + d \sum_{j=1}^N b_{ij} H(x_j), \quad i = 1, 2, \dots, N, t \geq 0 \tag{1}$$

若对所有的 $i, j = 1, 2, \dots, N$, 都有 $\lim_{t \rightarrow \infty} x_i(t) - x_j(t) = 0$, 则认为网络(1)达到了同步.

3 复杂网络的混沌同步方案

3.1 理论分析

考虑如式(1)所示的一类节点结构相同的全局耦合网络模型, 并假设节点数为 N . 则这 N 个相同节点组成的全局耦合网络模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = Ax_1 + f(x_1, t) + d((-N+1)x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N) \\ \dot{x}_2 = Ax_2 + f(x_2, t) + d(x_1 + (-N+1)x_2 + x_3 + \dots + x_N) \\ \dot{x}_3 = Ax_3 + f(x_3, t) + d(x_1 + x_2 + (-N+1)x_3 + \dots + x_N) \\ \dots\dots \\ \dot{x}_N = Ax_N + f(x_N, t) + d(x_1 + x_2 + x_3 + \dots + (-N+1)x_N) \end{cases} \tag{2}$$

令各个节点之间的同步误差为

$$e_1 = x_1 - x_2, e_2 = x_2 - x_3, \dots, e_{N-1} = x_{N-1} - x_N, e_N = x_N - x_1.$$

则误差系统写成向量形式为

$$\dot{e} = B_N e, \tag{3}$$

其中, $B_N = \begin{bmatrix} A + M_{1,2} - ND & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A + M_{2,3} - ND & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & A + M_{N,1} - ND \end{bmatrix}_{Nn \times Nn}$

其中, $D = \text{diag}(d, d, \dots, d)_n$, n 是节点的状态变量个数.

定理 1 若有耦合强度 $d > 0$, 使得 $B_N + B_N^T$ 对于 x_1, x_2, \dots, x_N (因为混沌系统是有界的, 所以 x_1, x_2, \dots, x_N 有界)一致负定, 则认为误差系统(3)的零解一致渐近稳定, 故全局耦合网络(2)达到全局渐近同步.

3.2 数值仿真

选取一个新的四维自治混沌系统作为网络节点, 且节点数 $N = 4$, 该系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = -ax + ez - yzu \\ \dot{y} = -by + fu - xuz \\ \dot{z} = c(u - z) - xyu \\ \dot{u} = g(u + z) + xyz \end{cases}$$

其中, $x = (x, y, z, u)^T \in \mathbf{R}^4$ 为系统的状态变量, a, b, c, g, e, f 为系统的参数. 当参数 $a = 9, b = 38, c = 50, g = 5, e = 4, f = 2$ 时, 该系统存在一个如

图 1 所示的混沌吸引子.

由新四翼混沌系统组成的 4 个节点的全局耦合网络模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_{11} = -ax_{11} + ex_{13} - x_{12}x_{13}x_{14} + d(-3x_{11} + x_{21} + x_{31} + x_{41}) \\ \dot{x}_{12} = -bx_{12} + fx_{14} - x_{11}x_{13}x_{14} + d(-3x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42}) \\ \dot{x}_{13} = c(x_{14} - x_{13}) - x_{11}x_{12}x_{14} + d(-3x_{13} + x_{23} + x_{33} + x_{43}) \\ \dot{x}_{14} = g(x_{13} + x_{14}) + x_{11}x_{12}x_{13} + d(-3x_{14} + x_{24} + x_{34} + x_{44}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_{21} = -ax_{21} + ex_{23} - x_{22}x_{23}x_{24} + d(x_{11} - 3x_{21} + x_{31} + x_{41}) \\ \dot{x}_{22} = -bx_{22} + fx_{24} - x_{21}x_{23}x_{24} + d(x_{12} - 3x_{22} + x_{32} + x_{42}) \\ \dot{x}_{23} = c(x_{24} - x_{23}) - x_{21}x_{22}x_{24} + d(x_{13} - 3x_{23} + x_{33} + x_{43}) \\ \dot{x}_{24} = g(x_{23} + x_{24}) + x_{21}x_{22}x_{23} + d(x_{14} - 3x_{24} + x_{34} + x_{44}) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_{31} = -ax_{31} + ex_{33} - x_{32}x_{33}x_{34} + d(x_{11} + x_{21} - 3x_{31} + x_{41}) \\ \dot{x}_{32} = -bx_{32} + fx_{34} - x_{31}x_{33}x_{34} + d(x_{12} + x_{22} - 3x_{32} + x_{42}) \\ \dot{x}_{33} = c(x_{34} - x_{33}) - x_{31}x_{32}x_{34} + d(x_{13} + x_{23} - 3x_{33} + x_{43}) \\ \dot{x}_{34} = g(x_{33} + x_{34}) + x_{31}x_{32}x_{33} + d(x_{14} + x_{24} - 3x_{34} + x_{44}) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_{41} = -ax_{41} + ex_{43} - x_{42}x_{43}x_{44} + d(x_{11} + x_{21} + x_{31} - 3x_{41}) \\ \dot{x}_{42} = -bx_{42} + fx_{44} - x_{41}x_{43}x_{44} + d(x_{12} + x_{22} + x_{32} - 3x_{42}) \\ \dot{x}_{43} = c(x_{44} - x_{43}) - x_{41}x_{42}x_{44} + d(x_{13} + x_{23} + x_{33} - 3x_{43}) \\ \dot{x}_{44} = g(x_{43} + x_{44}) + x_{41}x_{42}x_{43} + d(x_{14} + x_{24} + x_{34} - 3x_{44}) \end{cases} \quad (7)$$

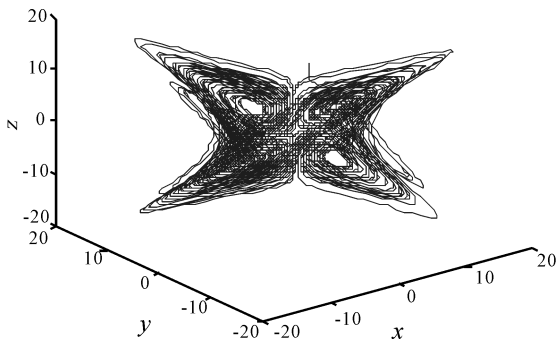


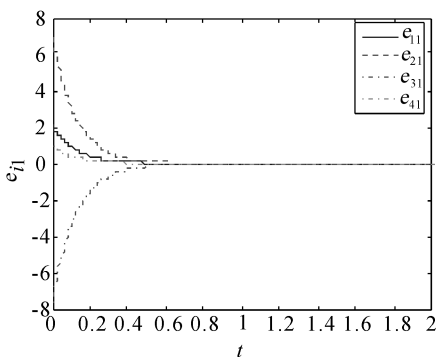
图 1 系统的混沌吸引子

Fig. 1 The chaotic attractor of systems

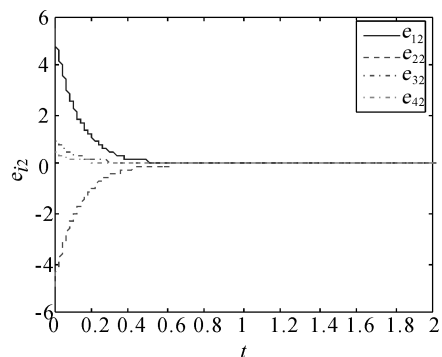
运用 Matlab 进行数值仿真, 由运行结果可以看出: 当耦合函数 $d = 2$ 时, 尽管初始状态不同, 但系统可以较快地达到同步. 图 2 为系统 (4)~(7) 的同步误差图, 其中图 2(a) 为节点 1 与节点 2 之间的误差, 图 2(b) 为节点 2 与节点 3 之间的误差, 图 2(c) 为节点 3 与节点 4 之间的误差, 图 2(d) 为节点 4 与节点 1 之间的误差.

4 基于复杂网络的混沌保密通信

为了提高复杂网络中信息传输的安全性与抗破译性, 我们提出了如图 3 所示的一种新的复杂网



(a)



(b)

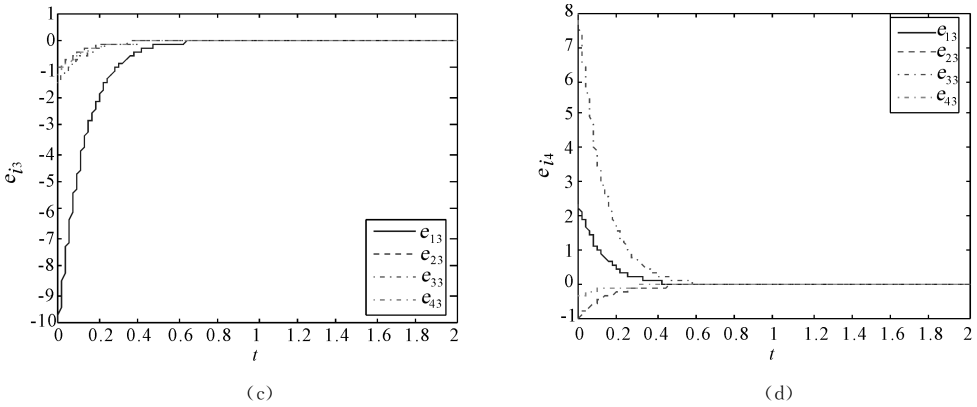


图 2 系统(4)~(7)的同步误差图

Fig. 2 Synchronization error image of system (4), system (5), system (6), and system (7)

络混沌保密通信系统. 由于该系统由结构更复杂地四维混沌系统组成, 它的每个节点都有 6 个参数和 4 个非线性项, 因此它的动力学特性非常有利于混沌保密通信的加密同时增加对信息的破译难度, 考虑到混沌信号对初值的极端敏感性并且有用信号可以直接作用于混沌系统, 并且在接收端有用信号必须经过两次解调才能被恢复出来, 所以综上可知该系统的保密程度比以往的混沌掩盖方案要高.

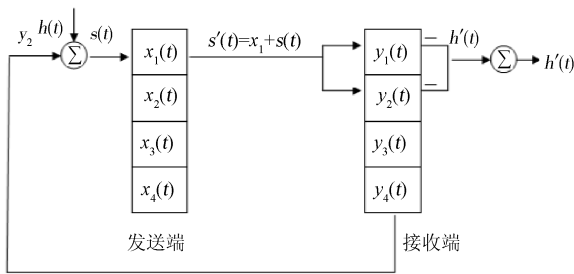


图 3 保密通信系统原理图

Fig. 3 The principle of secure communication

选取连续信号 $h(t) = \sin(t)$ 进行传输, 则混合信号为 $s(t) = h(t) + x_{22}(t)$, 由图 3 可知: $s'(t) = s(t) + x_{11}(t)$, 令 $h'(t)$ 为首次解密后的信号, $h''(t)$ 为第二次解密后的信号.

令节点 1 为发射系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_{11} = -ax_{11} + ex_{13} - x_{12}x_{13}x_{14} + d(-3x_{11} + x_{21} + x_{31} + x_{41}) + s(t) \\ \dot{x}_{12} = -bx_{12} + fx_{14} - x_{11}x_{13}x_{14} + d(-3x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42}) \\ \dot{x}_{13} = c(x_{14} - x_{13}) - x_{11}x_{12}x_{14} + d(-3x_{13} + x_{23} + x_{33} + x_{43}) \\ \dot{x}_{14} = g(x_{13} + x_{14}) + x_{11}x_{12}x_{13} + d(-3x_{14} + x_{24} + x_{34} + x_{44}) \end{cases}$$

令节点 2 为接收系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_{21} = -ax_{21} + ex_{23} - x_{22}x_{23}x_{24} + d(x_{11} - 3x_{21} + x_{31} + x_{41}) + s'(t) \\ \dot{x}_{22} = -bx_{22} + fx_{24} - x_{21}x_{23}x_{24} + d(x_{12} - 3x_{22} + x_{32} + x_{42}) \\ \dot{x}_{23} = c(x_{24} - x_{23}) - x_{21}x_{22}x_{24} + d(x_{13} - 3x_{23} + x_{33} + x_{43}) \\ \dot{x}_{24} = g(x_{23} + x_{24}) + x_{21}x_{22}x_{23} + d(x_{14} - 3x_{24} + x_{34} + x_{44}) \end{cases}$$

图 4 显示了运用 Matlab 进行数值仿真的结果, 其中 (a) 为 x_{22} 的时间序列; (b) 为有用信号 $h(t)$; (c) 为第一次传输的混合信号 $s(t)$; (d) 为第二次传输的混合信号 $s'(t)$; (e) 为第一次恢复的信号 $h'(t)$; (f) 为第二次恢复的信号 $h''(t)$. 可以看出, 有用信号很快被恢复出来. 这种基于四维混沌系统的两个节点之间经过多次加密的新混沌同步保密通信系统, 比以往基于三维混沌系统的两个节点之间一次加密的保密通信系统的安全性要高.

5 噪声干扰下信号的传输与小波去噪

为了分析信道中噪声对信息传输的干扰影响, 以及对信息加密与解密的影响问题, 本文将如图 5 所示的 5 dB 的高斯白噪声干扰信号加入了信息传输与加密、解密的整个过程中.

小波阈值去噪原理^[17]如图 6 所示. 因为有用信息被掩盖在混沌信号中, 而混沌信号在小波域中的能量谱相对集中, 但噪声在其中的能量谱比较分散, 并且前者在小波域中的分解系数绝对值相比噪声的较大, 后者较小, 所以可以选择适当的阈值去过滤掉绝对值相对小于它的小波系数, 从而达到降低噪声的效果.

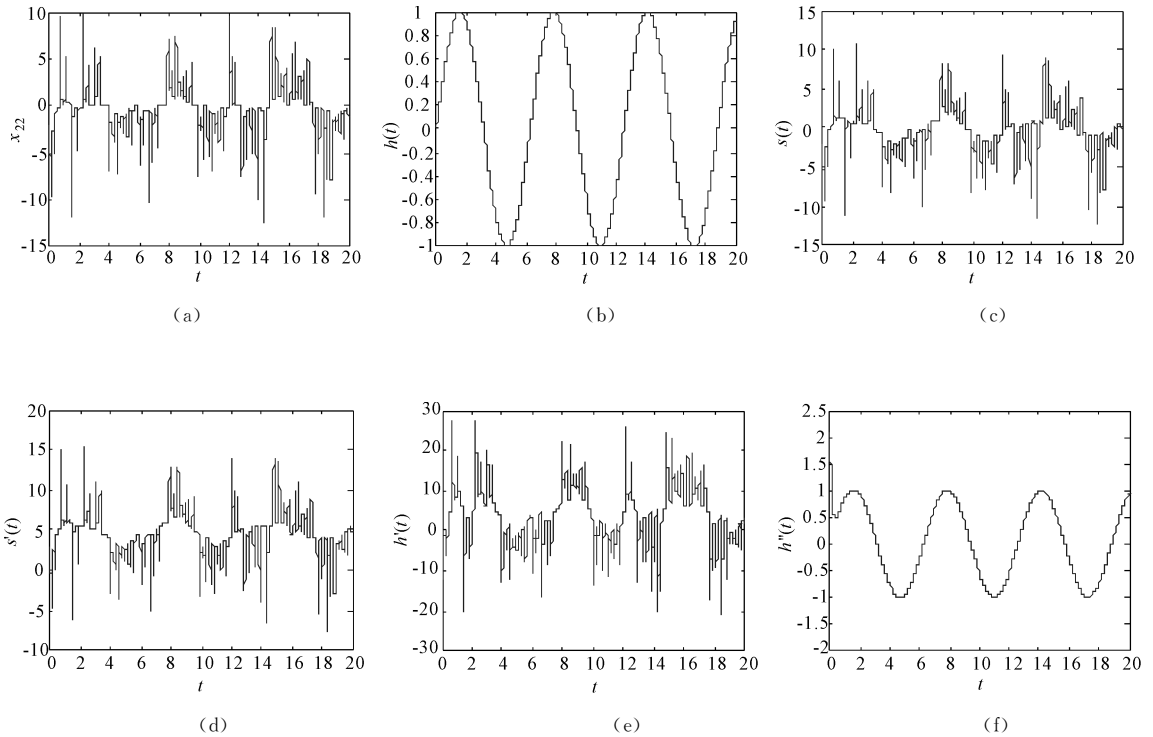


图 4 混沌保密通信系统下连续信号的传输

Fig. 4 Transmission of a signal through the chaotic system

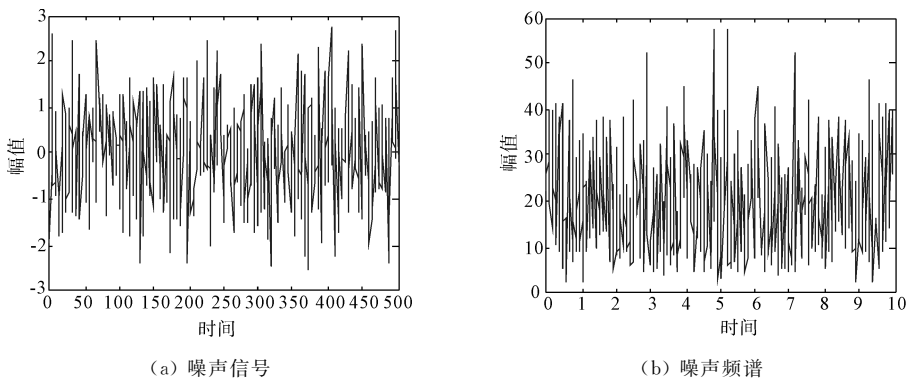


图 5 高斯白噪声及其频谱

Fig. 5 Gaussian white noise and frequency spectrum

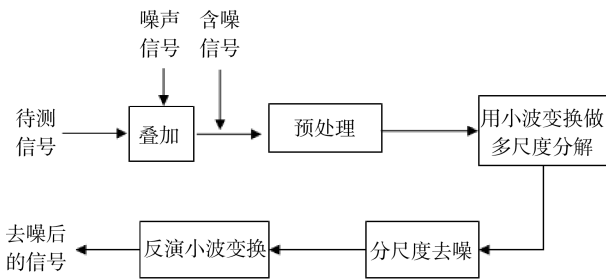


图 6 小波去噪原理图

Fig. 6 Method about wavelet de-noising

选取图 3 所示的保密通信方法, 选用离散信号 $h(t)$ 进行传输, 则传输的混合信号 $s(t) = h(t) +$

$x_{22}(t) + n(t)$, 其中 $n(t)$ 是 5 dB 的高斯白噪声信号.

图 7 为加入高斯白噪声后含噪信号的传输与小波去噪的 Matlab 数值仿真. 其中, (a) 为有用信息 $h(t)$; (b) 为信道中传输的两次加密后的含噪信号 $s(t)$; (c) 为经过两次解调后恢复的信号 $h'(t)$, (d) 为采用小波阈值去噪处理后的有用信号 $h_1(t)$.

从图 7 中 (c) 可以看出, 在信道中加入高斯白噪声的情况下, 尽管有用信息可以被大致恢复出来, 但是由于有用信息在传输中受到了噪声干扰而发生了畸变, 上下波动不够光滑. 而 (d) 是在选取合适的阈值后, 经过小波变换处理, 使有用信号得到了很好地恢复, 去噪效果比较良好.

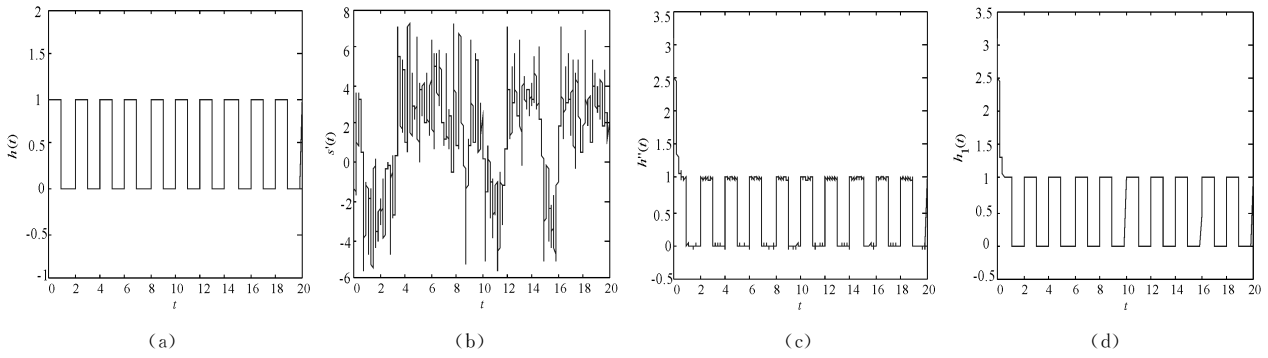


图 7 离散信号去噪示意图

Fig. 7 Discrete signal after wavelet de-noising

6 结 论

本文研究了一个基于新的四翼混沌系统的全局耦合网络的渐近同步问题,且得到其同步的条件.在此基础上把该系统的同步应用到了保密通信中,研究了两个节点之间进行多次加密的新保密通信系统,并且在发送与接收端分别用了动力学特性比较复杂的四维混沌系统,因此保密程度得到了提高,从而增加了破译难度.最后在信息传输中加入了高斯白噪声对信息传输进行干扰,经过合适的阈值选择并在小波变换的作用下对有用信息进行去噪处理,使得有用信息能够很好地无失真地恢复出来.

参考文献:

- [1] Zhang R, Hu M F, Xu Z Y. Synchronization in complex networks with adaptive coupling [J]. *Phys Lett A*, 2007, 368: 276.
- [2] Zhou J, Lu J A, Lü J H. Pinning adaptive synchronization of a general complex dynamical network [J]. *Automatica*, 2008, 44: 996.
- [3] 梁义, 王兴元. 结点含时滞的具有零和非零时滞耦合的复杂网络混沌同步 [J]. *物理学报*, 2013, 62: 1.
- [4] 毛北行, 张玉霞. 具有非线性耦合复杂网络系统的有限时间混沌同步 [J]. *吉林大学学报*, 2015, 53: 757.
- [5] 毛北行, 孟金涛. 离散复杂网络系统的混沌同步 [J]. *郑州大学学报*, 2013, 45: 9.
- [6] 张冬梅, 马丽红, 张旭, 等. 复杂动力网络的单变量替换互耦合同步 [J]. *河北工业大学学报*, 2010, 39: 65.
- [7] 郝加波, 张志远. 复杂网络的混沌控制 [J]. *四川文理学院学报*, 2010, 20: 25.
- [8] 王慧, 王红飞, 牛玉俊. 一类节点结构相同的复杂网络的脉冲同步 [J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2013, 32: 140.
- [9] 褚衍东, 湛宁, 安新磊, 等. 一个具有四翼混沌吸引子的新系统及其参数辨识 [J]. *兰州大学学报*, 2012, 48: 136.
- [10] 赵建峰, 王淑英, 李险峰, 等. 基于假分数阶激光混沌的数字图像加密研究 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2016, 53: 79.
- [11] 龚美静, 瞿少成, 王晓燕. 一种通过异结构同步实现混沌保密通信新方法 [J]. *电子与信息学报*, 2009, 31: 1442.
- [12] Kiani B A, Fallahi K, Pariz N, *et al.* A chaotic secure communication scheme using fractional chaotic systems based on an extended fractional Kalman filter [J]. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 2009, 14: 863.
- [13] An X L, Yu J N, Li Y Z, *et al.* Design of a new multistage chaos synchronized system for secure communications and study on noise perturbation [J]. *Math Comput Model*, 2011, 54: 7.
- [14] 刘倩倩, 何坤, 周激流, 等. 基于局部多项式逼近的图像去噪 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2015, 52: 1001.
- [15] 郝建红, 孙志华, 许海波. 干扰信号对两种混沌加密系统的影响及分析 [J]. *物理学报*, 2007, 56: 6858.
- [16] 吕顺, 何小海, 杨龙, 等. 基于小波变换系数去冗余的图像无损压缩方法 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2015, 52: 85.
- [17] 段清, 李凤祥, 田兆奎. 一种改进的小波阈值信号去噪方法 [J]. *计算机仿真*, 2009, 26: 348.