

一种混沌系统同步的优化方案¹

周小安 张基宏 丘水生*

(深圳大学信息工程学院 深圳 518060)

*(华南理工大学电子工程系 广州 510641)

摘要 该文通过将反馈控制与小波变换相结合,对混沌同步系统进行了优化设计。在发送端,将系统的部分信号进行小波变换去掉细节信息后发送,在接收端重构出低频信号,将其与接收端信号的差进行反馈。应用本优化方案可将发送信号压缩后传送,节约系统资源;可滤去发送信号中的高频成分,减小干扰和噪声对同步信号的影响。文中给出了仿真验证结果。

关键词 Colpitts 振荡器,四阶 Chua 氏电路,混沌同步,小波变换

中图分类号 TN711.4, TN918

1 引言

最近几年来,混沌同步和混沌通信的研究已成为混沌应用中非常活跃的研究领域^[1-9]。由于混沌信号的连续宽带谱,冲激式的自相关特性以及对初始条件的极端敏感性,因而特别有利于现代通信如扩频通信、保密通信等^[7]。然而在实际中要真正利用混沌进行通信,则须解决混沌系统的传输速率问题和抗干扰问题。到目前为止,人们提出了混沌系统的多种同步法,如驱动-响应同步法^[1],有源-无源同步法^[2],连续变量反馈同步法^[3]和自适应控制同步法^[4],以及驱动与反馈相结合的超混沌同步法^[8]和利用标量发射信号实现的超混沌同步法^[9],但是这些混沌同步方法和超混沌同步方法一方面都将完整的混沌信号传送到接收端,另一方面都没有考虑干扰对同步性能的影响。针对这些问题,本文将讨论一种混沌系统同步的优化方案。

根据混沌吸引子的细胞模型^[10],单向运动(direct motion)分量对同步可起重要作用,因而可对同步控制信号进行滤波,同步系统原理如图1。将系统部分信号进行小波变换,去掉细节信息后传输,在接收端对传输信号进行重构,然后进行离散反馈。应用这一方案,允许对发送端送来的同步信号压缩后传输同时进行滤波,减小信道干扰和噪声对同步信号的影响,以提高混沌同步系统的性能。

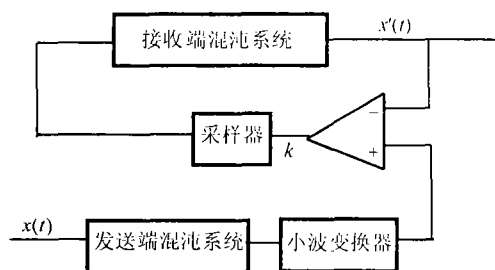


图1 同步系统原理图

2 应用小波变换进行优化的同步原理

2.1 小波变换^[11]

设 $L^2(R)$ 是实直线上的平方可积的 Hilbert 函数空间,小波函数 $\psi(t) \in L^2(R)$ 为满足

¹ 2000-11-24 收到, 2001-05-08 定稿

$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$ 的函数, 则信号 $f(t) \in L^2(R)$ 的小波变换定义如下:

$$wf(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (1)$$

其中 $\psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$, a 称为尺度因子, b 为时间参数. 当参数 a 变化时, 小波函数具有伸缩性, 而 b 变化时, 小波函数随时间轴移动. 如果 a, b 都变化则形成一簇小波函数, 信号 $f(t)$ 就可按这簇小波函数进行分解. 小波 ψ 要求满足容许性条件:

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (2)$$

此时可由信号的小波逆变换恢复出原信号, 恢复公式为

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} wf(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{da db}{a^2} \quad (3)$$

实际中使用的是离散二进小波变换. 每次小波分解总是把原信号分解为平滑信息和细节信息, 分解 N 次即可得到尺度 N 上的小波分解结果. 对某些尺度上的细节信息进行量化处理后, 再用小波逆变换重建信号, 既可实现滤波、去噪, 提高抗干扰能力; 又可进行压缩传输.

2.2 同步原理

为了进行离散反馈, 定义如下的采样脉冲函数:

定义 1 设采样脉冲函数可用下式表示

$$p(t) = \begin{cases} 1, & nT \leq t < nT + \tau \\ 0, & nT + \tau \leq t < (n+1)T \end{cases} \quad (4)$$

其中 T 为采样周期, τ 为脉冲宽度, n 是自然数.

设混沌系统可用下列微分方程来表示

$$\dot{x} = f(x) \quad (5)$$

其中 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$, 将系统 (5) 式中的 r 个状态变量进行小波分解, 对分解后的小波系数进行量化处理后滤去其高频成份, 将重建的信号进行离散反馈得

$$\dot{x}' = f(x') - k(F_{fii}(x_r) - x'_r)p(t) \quad (6)$$

其中 $x'_r = (x'_{i_1}, x'_{i_2}, \dots, x'_{i_r})$, $x_r = (x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_r})$, $i_1, i_2, \dots, i_r \in \{1, 2, \dots, n\}$, 反馈因子 k 为 r 个元的列矢量, 其余状态方程不变, F_{fii} 表示由前一节介绍的实现小波变换的变换器. 对 Colpitts 振荡器、四阶 Chua 氏电路的仿真结果表明: 将系统中 r 个状态变量进行小波分解, 对细节信号进行量化处理后, 可实现混沌信号的压缩传输, 提高混沌同步系统的抗干扰能力.

3 仿真实验研究

3.1 Colpitts 振荡器与仿真研究

Colpitts 振荡器^[12]的电路非常简单, 但却包含有十分复杂的动力学行为. 下文以 Colpitts 振荡器分别作为接收系统和发送系统来讨论它们之间的同步效果.

发送端的振荡系统方程如下:

$$\left. \begin{aligned} C_1 dv_{c_1}/dt &= i_L \\ L di_L/dt &= -ri_L - v_{c_1} - v_{c_2} \\ C_2 dv_{c_2}/dt &= i_L + f(v_{c_1}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 $f(v) = a_1v + a_3v^3$ 。对系统 (7) 式中的第一个方程中的变量 v_{c_1} 进行多尺度上的小波分解, 离散反馈后得接收端的振荡方程如下:

$$\left. \begin{aligned} C_1 dv'_{c_1}/dt &= i'_L + kF_{fii}((v'_{c_1}) - v_{c_1})p(t) \\ L di'_L/dt &= -ri'_L - v'_{c_1} - v'_{c_2} \\ C_2 dv'_{c_2}/dt &= i'_L + f(v'_{c_1}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

这里取参数 $1/C_2 = 2.2$, $1/C_1 = 2.4$, $a_1 = 1$, $a_3 = -0.2$, $r = 0.249$, $T = 0.1$, $\tau = 0.05$, $k = 0.5$ 。作者用 Matlab 对 Colpitts 振荡器进行了仿真研究, 仿真结果如图 2—图 5。图 2 分别给出了原信号 $v_{c_1}(t)$ 的波形图, 原信号 $v_{c_1}(t)$ 在不同尺度下的小波分解的细节信号, 以及对细节信号进行量化处理后经小波逆变换重建的信号 $z(t)$ 。在本文中采用的小波分解尺度为 3, 小波函数为 Daubechies, 对于小波分解尺度为 2 和 1 的情形, 由于分解尺度较小, 对细节信号进行量化处理后滤除的高频成分较少, 因而对系统的同步影响较少。图 3 分别给出了对重建信号 $z(t)$ 离散反馈后系统的 $\Delta v_{c_1} = v'_{c_1} - v_{c_1}$ 的同步波形图及变量反馈微扰同步方法直接用于 (7) 式的同步过程。由图 3 可知, 这两种方法的同步建立时间相差不多, 但本文方法具有抗干扰, 压缩传输等优点。图 4 给出原信号 $v_{c_1}(t)$ 加噪后的信号与去噪信号的波形图。图 5(a) 是在原信号 $v_{c_1}(t)$ 加噪后, 将变量反馈微扰同步方法直接用于 (7) 式的同步过程, 图 5(b) 给出经小波去噪后系统的同步过程。由图 5 可知, 本文介绍的混沌同步方法具有优良的抗噪能力。

3.2 四阶 Chua 氏电路与仿真研究

超混沌系统含有多个正的雅普诺夫指数, 具有更复杂的动力学行为和更强的不可预测性, 因而超混沌同步系统更有利于提高通信系统的保密性能。四阶 Chua 氏电路有两个正的李雅普诺夫指数, 是一个超混沌系统。下面我们介绍将本文介绍的优化方案用于四阶 Chua 氏电路

发送端的振荡系统方程如下:

$$\left. \begin{aligned} C_1 dv_{c_1}/dt &= g(v_{c_2} - v_{c_1}) - i_{L_1} \\ C_2 dv_{c_2}/dt &= -g(v_{c_2} - v_{c_1}) - i_{L_2} \\ L_1 di_{L_1}/dt &= v_{c_1} + Ri_{L_1} \\ L_2 di_{L_2}/dt &= v_{c_2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 $g(v_{c_2} - v_{c_1}) = m_0(v_{c_2} - v_{c_1}) + 0.5(m_0 - m_1)(|v_{c_2} - v_{c_1} - 1| + |v_{c_2} - v_{c_1} + 1|)$ 。对系统 (9) 式中的第 3, 第 4 个方程中的变量 i_{L_1} , i_{L_2} 进行小波分解滤波后, 得到接收端的振荡方程如下:

$$\left. \begin{aligned} C_1 dv'_{c_1}/dt &= g(v'_{c_2} - v'_{c_1}) - i'_{L_1} \\ C_2 dv'_{c_2}/dt &= -g(v'_{c_2} - v'_{c_1}) - i'_{L_2} \\ L_1 di'_{L_1}/dt &= v'_{c_1} + Ri'_{L_1} - k_1(F_{fii}(i_{L_1}) - i'_{L_1})p(t) \\ L_2 di'_{L_2}/dt &= v'_{c_2} - k_2(F_{fii}(i_{L_2}) - i'_{L_2})p(t) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

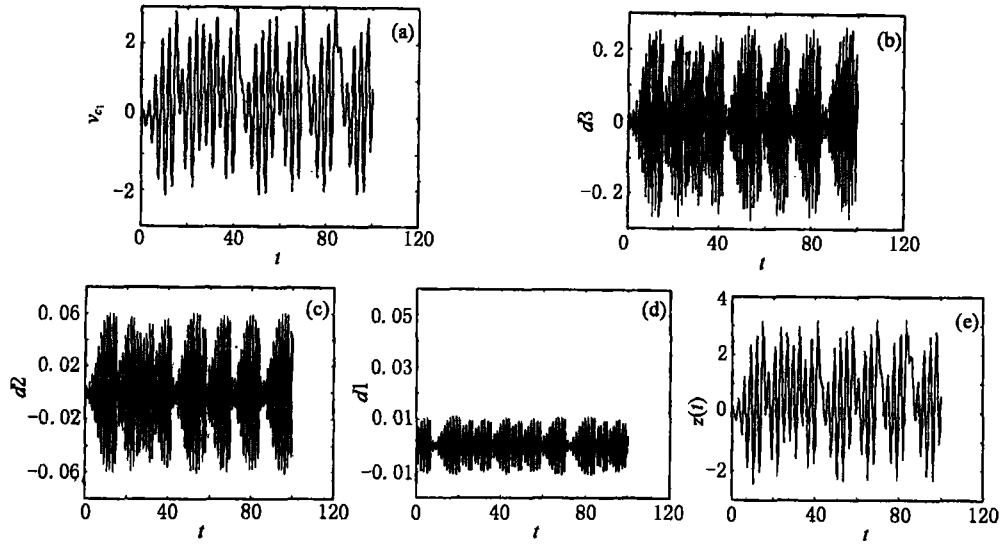


图 2 (a) 原信号 $v_{c1}(t)$ 的波形图, (b) $v_{c1}(t)$ 在尺度 3 下的细节信号 $d3$, (c) $v_{c1}(t)$ 在尺度 2 下的细节信号 $d2$, (d) $v_{c1}(t)$ 在尺度 1 上的细节信号 $d1$, (e) 去掉细节信息后重建的信号

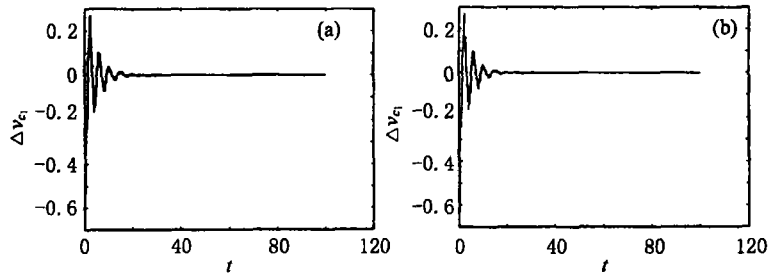


图 3 $k = 0.5$ 时, 无小波变换 (a) 和有小波变换 (b) 时, $\Delta v_{c1} = v'_{c1} - v_{c1}$ 的波形图

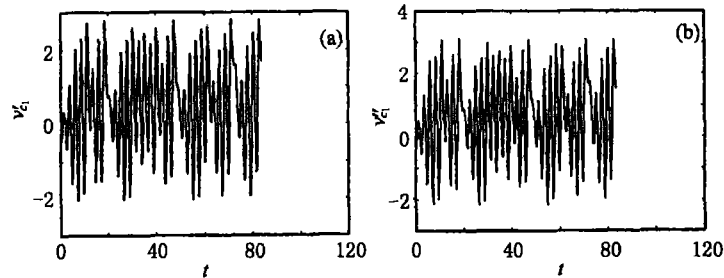


图 4 原信号 $v_{c1}(t)$ 加噪声 (a) 和小波去噪 (b) 后的波形图

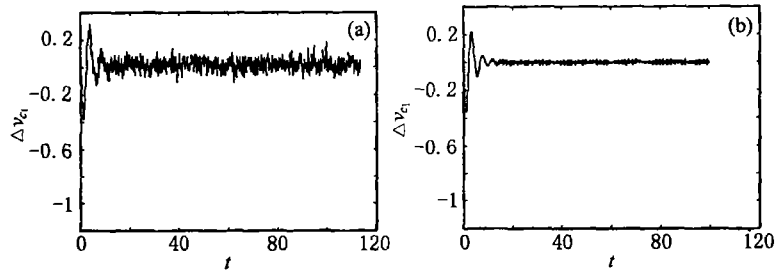


图 5 无小波去噪 (a) 和有小波去噪 (b) 时, $\Delta v_{c1} = v'_{c1} - v_{c1}$ 的波形, 这里噪声强度为 0.01dB

这里取参数: $C_1 = 0.5, C_2 = 0.05, L_1 = 1, L_2 = 2/3, R = 1, m_0 = 3, m_1 = -0.2, T = 0.1, \tau = 0.05, k_1 = k_2 = 0.5, F_0 = 1.5$. 作者用 Matlab 对四阶 Chua 氏电路进行了仿真, 仿真结果如图 6~ 图 9. 本节只给出了对电流信号 i_{L1} 的处理情形, 并省略了小波分解的细节信号. 图 6 给出了原信号 i_{L1} 及对细节信号进行量化处理后重建的信号 $z_1(t)$. 在这里采用的小波分解尺度为 2, 小波函数为 Daubechies. 图 7 给出了变量 i_{L1} 经小波分解, 对小波系数进行量化处理后系统的 $\Delta v_{c1} = v'_{c1} - v_{c1}$ 的同步波形图. 这说明了超混沌系统经小波滤波后仍能获得理想的同步行为. 图 8 给出原信号 $i_{L1}(t)$ 加噪后的信号与去噪信号的波形图. 图 9(a) 是在原信号 $v_{c1}(t)$ 加噪后, 将变量反馈微扰同步方法直接用于 (7) 式的同步过程, 图 9(b) 则给出了经小波去噪后系统的同步过程. 由图 9 可知, 本文介绍的混沌同步方法具有优良的抗噪能力.

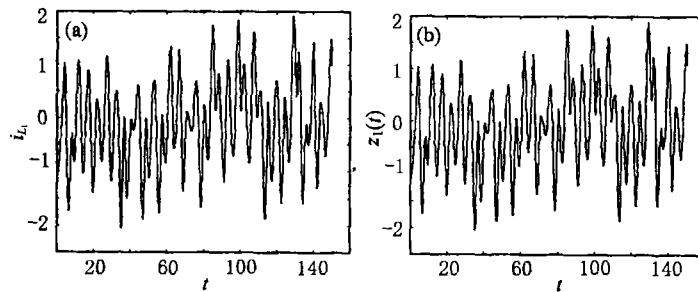


图 6 原信号 $i_{L1}(t)$ 及其经小波变换后重建的信号 $z_1(t)$ 的波形图

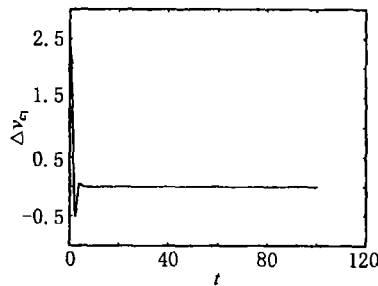


图 7 $k = 0.5$ 时, $\Delta v_{c1} = v'_{c1} - v_{c1}$ 的波形图

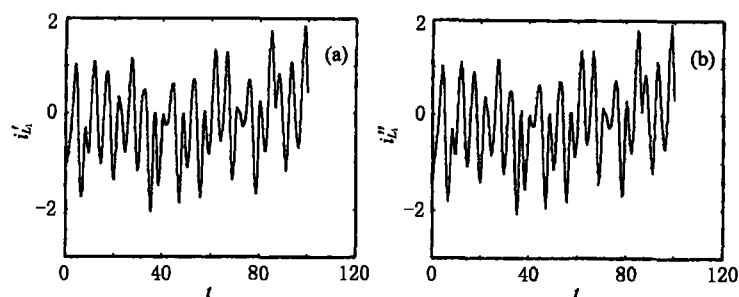


图 8 原信号 $i_{L_1}(t)$ 加噪声 (a) 和小波去噪 (b) 后的波形图

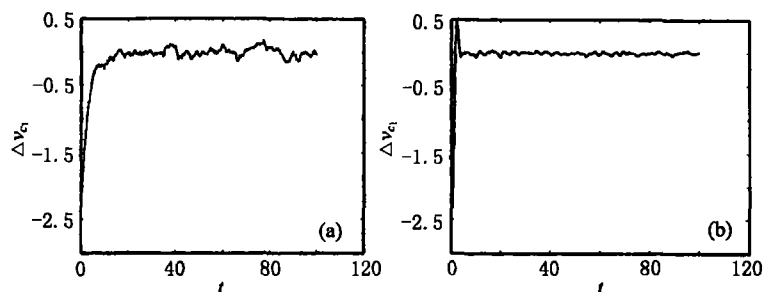


图 9 无小波去噪 (a) 和有小波去噪 (b) 时, 系统的同步行为. 其中噪声强度为 0.01dB

4 结 论

本文首先介绍了基于小波变换的混沌同步的原理与方法, 并将该混沌同步方法应用于简单低阶混沌系统如 Colpitts 振荡器和超混沌系统如四阶 Chua 氏电路. 数字实验表明, 本文提出的混沌系统的同步优化方案具有优良的抗干扰能力, 在一定强度的噪声的影响下仍可获得理想的同步行为; 能进行压缩传输, 既有利于提高系统的保密性能, 又可节约系统资源.

参 考 文 献

- [1] T. L. Carroll, L. M. Pecora, Synchronizing chaotic circuits, IEEE Trans on CAS, 1991, 38(4), 453-456.
- [2] M. Ogorzalek *et al.*, Taming chaos-part I: Synchronization, IEEE Trans. on CAS, 1993, 40(10), 693-699.
- [3] K. Pyragas, Continuous control of chaos by self-controlling feedback, Phys. Lett., 1992, A170, 421-428.
- [4] J. K. John, *et al.*, Synchronization of unstable orbits using adaptive control, Phys. Rev. E, 1994, 49(6), 4843-4848.
- [5] K. M. Short, Steps towards unmasking secure communications, Int. J. Bifurcation Chaos. in Appl. Sci. & Eng., 1994, 4(4), 959-978.
- [6] G. Perez, H. A. Cerdeira, Extracting messages masked by chaos, Phys. Rev. Lett., 1995, 74(11), 1970-1973.
- [7] K. M. Cuomo, A. V. Oppenheim, Circuit implementation of synchronized chaos with application to communications, Phys. Rev. Lett., 1993, 71(2), 65-68.

- [8] Y. C. Lai, C. Grebogi, Synchronization of spatiotemporal chaotic systems by feedback control, *Phys. Rev. E.*, 1994, 50(3), 1894-1899.
- [9] J. H. Peng, E. J. Ding, Synchronizing hyperchaos with a scalar transmitted signal, *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 76(6), 904-907.
- [10] Shui-Sheng Qiu(丘水生), A cell model of chaos, *Proc. IEEE ISCAS'97, HongKong, 1997*, 1033-1036.
- [11] 崔锦泰, 著, 程正兴, 译, 小波分析导论, 西安, 西安交通大学出版社, 1995, 第一章.
- [12] G. Sarafian, B. Z. Kaplan, Is the Colpitts oscillator a relative of Chua's circuit, *IEEE Trans. on CAS.*, 1995, CAS-42(6), 373-376.
- [13] T. Matsumoto, L. O. Chua, Hyperchaos: Laboratory experiment and numerical confirmation, *IEEE Trans. on CAS.*, 1986, CAS-33(11), 1143-1147.

THE METHOD OF OPTIMIZING DESIGN OF CHAOTIC SYNCHRONIZATION SYSTEM

Zhou Xiaolan Zhang Jihong Qiu Shuisheng*

(*Info. Eng. College of Shenzhen Univ., Shenzhen 518060, China*)

*(*Dept. of Electronic Eng., South China University of Technology, Guangzhou 510641, China*)

Abstract The optimizing design of chaotic synchronization system by combining feedback control with wavelet transformation is presented in this paper. In the transmitter, a part of signals is transformed by wavelet and the detail information is removed. In the receiver, the component with low frequency is reconstructed and discrete feedback is used. Using the optimizing design, transmitting signal is transmitted in compressible way, system resource is saved, the component with high frequency is filtered and the effects of disturbance and noise on synchronization are reduced. The optimizing design is illustrated by numerical simulation experiment.

Key words Colpitts oscillator, Four order Chua's circuit, Chaotic synchronization, Wavelet transformation

周小安: 男, 1968年生, 讲师, 博士, 研究兴趣包括非线性电路系统理论、混沌系统及保密通信等.

张基宏: 男, 1964年生, 教授, 博士, 主要从事图像处理, 神经网络等领域的研究.

丘水生: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 主要从事功率电子学、混沌系统及保密通信等非线性领域的研究.