文章编号：1672-2892(2011)06-0689-06

基于时滞不确定 Lorenz 混沌同步的保密通信

陈水忠

(中航工业洛阳电光设备研究所，河南 洛阳 471009)

摘 要：针对一类含保密信息的时延不确定 Lorenz 混沌系统，提出了基于径向基神经网络的同结构同步控制方案，在混沌系统同步的基础上，有效地恢复出隐藏的多路明文信号。利用神经网络的良好逼近能力对时延 Lorenz 混沌系统设计鲁棒同步控制器，实现了同步误差的收敛。当同步误差收敛时，混沌系统所传输的隐藏信号则可以正确恢复。仿真结果表明，文章所给出的同步控制器可以在 5 s 内实现时延不确定 Lorenz 混沌系统同步，并能恢复出多路明文信号。

关键词：保密通信；Lorenz 混沌系统；混沌同步；神经网络

中图分类号：TN918；TP273 **文献标识码：**A

Secure communication based on synchronization of time delay uncertain Lorenz chaotic systems

CHEN Shui-zhong

(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment，AVIC，Luoyang Henan 471009，China)

Abstract: The robust synchronization control scheme is proposed based on Radial Basis Function(RBF) neural network for time delayed uncertain Lorenz chaotic systems with secure information. After the synchronization of time delayed uncertain Lorenz chaotic systems is obtained，the secure information will be efficiently recovered.Using the approximation ability of RBF neural network，the robust synchronization controller is proposed and the convergence of the synchronization error is achieved. When the synchronization is obtained，the hidden information can be recovered according to the states of the slave Lorenz chaotic system. The simulation results demonstrate that the proposed robust synchronization scheme can efficiently guarantee the chaotic system synchronization between two time delayed Lorenz chaotic systems and multi-channel signals can be recovered in 5 s.

Key words: secure communication；Lorenz chaotic system；chaotic synchronization；neural network

由于混沌系统具有内随机性、遍历性、有界性及对初值的敏感性等特点，混沌系统非常适合应用于信息的保密传输，因而基于混沌系统的保密通信得到了较为广泛的研究。混沌加密作为运动加密方法，保密性更高，有着传统加密方法不可比拟的优势。因而，混沌同步保密通信技术已成为当前国内外研究的热点课题之一[1-5]。在实际工程系统中，系统受到环境影响、自身元器件间的相互干涉等，都有可能产生参数摄动，因此研究参数摄动的混沌系统同步较有意义。本文结合混沌调制和混沌掩盖的方法实现多路信号的传输，其中同步控制是正确恢复传输信号的前提。因而研究一类含保密信息的时延不确定 Lorenz 混沌系统基于径向基神经网络的同结构同步控制方案，在实现同步后恢复出隐藏的多路明文信号。

关于混沌同步控制及在保密通信中的应用研究，国内外已有较多的研究成果[6-12]。文献[6]采用滑模控制实现了时滞混沌系统的映射同步，并成功运用于保密通信。文献[7]基于神经网络研究了鲁棒自适应同步控制，实现了一类不确定时滞混沌系统的鲁棒同步。而文献[8]主要研究一类混沌电路的同步控制及在保密通信中的应用。在文献[9]中，根据参数调制原理，设计了观测器来识别未知的 Liu 混沌系统参数，并实现同步再恢复出传输信号。但总的说来，混沌系统同步控制性能和鲁棒性能还需进一步提高，时延和系统不确定在同步控制器设计时加以明确考虑，以便更好地实现混沌保密通信。

收稿日期：2011-06-28；**修回日期：**2011-07-30
基金项目：航空科学基金资助项目(20105152029)

利用混沌调制技术实现混沌同步保密通信也是一种常见的混沌保密通信方法，已得到了广泛研究。在文献[11]中，将明文信号调制在混沌系统中，再设计主动控制器实现混沌系统的同步并解调出明文信号，但该文并没有考虑明文信号是时变信号。文献[12]也是利用混沌调制技术实现混沌同步保密通信，它的缺点也是没有考虑明文信号是时变信号，并没有给出它的导数，而将明文信号考虑为一个常数，这些限制了保密通信的应用。同时文献[11]和文献[12]均研究的是在理想状态下的信号秘密传输，这些不符合实际需求。因此，本文研究的是干扰存在情况下，利用混沌调制技术实现混沌同步保密通信，并考虑到明文信号是时变信号，解决了明文信号必须频率很低才能被正确恢复的问题。

1 问题的提出

考虑如下式所示带有明文信号的不确定时滞 Lorenz 混沌系统：

$$\dot{x}(t) = \boldsymbol{A}x(t) + \boldsymbol{B}x(t-\tau) + \boldsymbol{C}m(t) + d_1(x) \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{x} = [x_1, x_2, \cdots, x_n]^{\mathrm{T}} \in R^n$ 为Lorenz混沌系统的状态向量；τ 为混沌系统已知时延；$m(t) \in R^n$ 为未知的多路明文信号；$d_1(x)$ 为具有未知上界的系统不确定；$\boldsymbol{A}$,$\boldsymbol{B}$和$\boldsymbol{C}$为已知适当维矩阵。为了方便研究，从传输信号的实际情况出发，假设明文信号 $\| m(t) \| \leqslant \lambda$，$\lambda > 0$。

考虑等式(1)为主系统，为研究基于混沌同步的保密通信，选择具有与主系统相同结构的从系统，但如果初始条件不同，则带有控制输入的从系统为：

$$\dot{y}(t) = (\boldsymbol{A} + \Delta\boldsymbol{A})y(t) + (\boldsymbol{B} + \Delta\boldsymbol{B})y(t-\tau) + \boldsymbol{C}\hat{m}(t) + d_2(y) + u(t) \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{y} = [y_1, y_2, \cdots, y_n]^{\mathrm{T}} \in R^n$ 为 Lorenz 混沌系统的状态向量；$\Delta\boldsymbol{A}$ 和 $\Delta\boldsymbol{B}$ 为从系统的未知有界参数干扰；$d_2(y)$ 为具有未知上界的从系统不确定；$u(t) \in R^n$ 是同步控制输入，在它的控制下可实现混沌系统式(1)与混沌系统式(2)状态同步；$\hat{m}(t)$ 为明文信号 $m(t)$ 的估计值。

定义同步误差 $e(t) = y(t) - x(t)$，如果在同步控制器 $u(t)$ 作用下能够满足：

$$\lim_{t\to\infty} e(t) = 0 \tag{3}$$

那么混沌系统式(1)与式(2)实现同步。本文所给出混沌保密通信原理，如框图 1 所示。

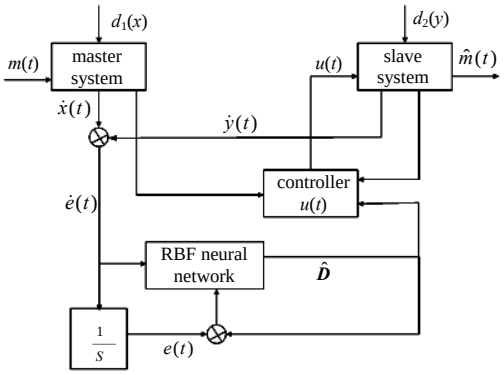

Fig.1 Diagram of chaotic secure communication
图 1 混沌保密通信结构图

为了研究基于神经网络的混沌同步保密通信，需要运用到如下引理：

引理1[16]：假设 $\boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y}$ 是适当维的实矩阵或者向量，则存在一个常数 $\alpha > 0$，使得式(4)成立：

$$\boldsymbol{X}\boldsymbol{Y} + \boldsymbol{Y}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}} \leqslant \alpha\boldsymbol{X}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}} + \alpha^{-1}\boldsymbol{Y}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y} \tag{4}$$

本文的目的是设计基于神经网络的鲁棒同步控制器 $u(t)$，使得混沌系统式(1)与混沌系统式(2)状态同步，并在同步的情况下实现传输的保密信号的恢复。

2 基于神经网络的混沌同步保密通信

根据 $e(t) = y(t) - x(t)$，由式(1)和式(2)可得主从系统的同步误差为：

$$\dot{e} = \dot{y} - \dot{x} = \boldsymbol{A}e + \boldsymbol{B}e(t-\tau) + \Delta\boldsymbol{A}y + \Delta\boldsymbol{B}y(t-\tau) + \boldsymbol{C}\hat{m}(t) - \boldsymbol{C}m(t) + d_2 - d_1 + u(t) = \boldsymbol{A}e + \boldsymbol{B}e(t-\tau) + D + \boldsymbol{C}\tilde{m} + u(t) \tag{5}$$

式中 $\tilde{m} = \hat{m}(t) - m(t)$，复合不确定 D 的具体表达式如下：

$$D = \Delta\boldsymbol{A}y + \Delta\boldsymbol{B}y(t-\tau) + d_2(y) - d_1(x) \tag{6}$$

显然复合不确定 D 未知，为了进行混沌同步控制器的设计，可以用 RBF 神经网络来逼近复合不确定 D。RBF 神经网络是一种具有单隐层的 3 层前馈神经网络，它具有很好的非线性逼近能力，因此可以用来逼近同步误差系统式(5)中的状态不确定项。假设 $\boldsymbol{X} = [x_1, x_2, \cdots, x_n, y_1, y_2, \cdots, y_n]^{\mathrm{T}}$ 为 RBF 神经网络的输入向量，$\boldsymbol{\Phi} = [\phi_1, \phi_2, \cdots, \phi_m]^{\mathrm{T}}$ 为 RBF 神经网络的径向基向量，其中 $\phi_i (i = 1, 2, \cdots, m)$ 为式(7)的高斯基函数：

$$\phi_i = \exp\left(-\left\|\boldsymbol{X} - c_i\right\|^2 / \delta_i^2\right) \tag{7}$$

式中 c_i, δ_i 分别为隐含层中第 i 个神经元的中心值和基宽。

RBF 神经网络的权向量为:

$$\hat{\boldsymbol{W}} = [w_1, w_2, \cdots, w_m]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

式中 $w_i (i = 1, 2, \cdots, m)$ 为 RBF 神经网络权向量的分量。

RBF 神经网络的输出可以表示为:

$$\hat{\boldsymbol{D}} = \hat{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{X}) \tag{9}$$

定义 RBF 神经网络的最优权值为:

$$W^* = \arg \min_{\hat{\boldsymbol{W}} \in \Omega_{\mathrm{F}}} \left[\sup_{e \in S_e} \left| \hat{\boldsymbol{D}}(\boldsymbol{X}, \hat{\boldsymbol{W}}) - D(\boldsymbol{X}) \right| \right] \tag{10}$$

式中: $\Omega_{\mathrm{F}} = \left\{ \hat{\boldsymbol{W}} : \left\| \hat{\boldsymbol{W}} \right\| \leqslant M \right\}$; $S_e \in R^n$ 是误差状态向量空间; $\hat{\boldsymbol{W}} \in R^{m \times 1}$ 是RBF神经网络权值; $\|\cdot\|$ 表示Frobenius范数; $\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{X})$ 为 RBF 神经网络基函数, 并且 $\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{X}) \in R^m$, $\Phi_i(\boldsymbol{X}) = \exp\left(-\left\|\boldsymbol{X} - c_i\right\|^2 / \delta_i^2\right)$。神经网络的输出为 $y_m = \hat{\boldsymbol{D}}(\boldsymbol{X}, \hat{\boldsymbol{W}}) = \hat{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{X})$。

在RBF神经网络的最优权值下, $D(\boldsymbol{X})$ 的最优逼近可写为:

$$D(\boldsymbol{X}) = W^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{X}) + \varepsilon \tag{11}$$

式中 ε 为神经网络逼近误差, 且有 $\| \varepsilon \| \leqslant \varepsilon^*$, ε^* 为最小逼近误差。

由于复合不确定 D 与混沌系统的不确定 $d_1(x)$ 和 $d_2(y)$ 以及主从系统状态有关, 利用 RBF 神经网络对其进行逼近, 考虑到式(11), 则同步误差系统可变为:

$$\dot{e} = \boldsymbol{A}e + \boldsymbol{B}e(t - \tau) + W^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{X}) + \varepsilon + \boldsymbol{C}\tilde{m} + u(t) \tag{12}$$

基于以上分析, 对基于神经网络的混沌同步和混沌保密通信可归纳如下:

定理 1: 如果混沌保密通信传输信号的恢复信号 $\hat{m}(t)$ 的自适应变化律设计为:

$$\dot{\hat{m}}(t) = -\boldsymbol{\Lambda}(\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}} e + \sigma \hat{m}) \tag{13}$$

RBF神经网络的权值自适应律选为:

$$\dot{\hat{W}}(t) = -\boldsymbol{\Gamma}(\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{X}) e + \beta \hat{\boldsymbol{W}}) \tag{14}$$

混沌同步控制输入 $u(t)$ 设计为:

$$u(t) = -\boldsymbol{A}e - \boldsymbol{K}e - \boldsymbol{B}e(t - \tau) - \hat{\boldsymbol{D}} \tag{15}$$

式中 $\boldsymbol{K}$ 为适当维的反馈正定增益矩阵, 则在所设计的混沌同步控制器式(15)作用下, 混沌系统式(1)可以完全同步系统式(2), 其传输的明文信号 $m(t)$ 可以被正确恢复。$\boldsymbol{\Lambda}$ 和 $\boldsymbol{\Gamma}$ 为适当维正定矩阵, $\sigma > 0$ 和 $\beta > 0$ 为设计参数。

证明: 对同步误差系统式(12)选择如下的 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} e^{\mathrm{T}} e + \frac{1}{2} \tilde{m}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Lambda}^{-1} \tilde{m} + \frac{1}{2} \tilde{W}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \tilde{W} \tag{16}$$

对式(16)两边求导可得:

$$\dot{V} = e^{\mathrm{T}} \dot{e} + \tilde{m}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Lambda}^{-1} \dot{\tilde{m}} + \tilde{W}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \dot{\tilde{W}} \tag{17}$$

将式(12)代入式(17)有:

$$\dot{V} = e^{\mathrm{T}} [\boldsymbol{A}e + \boldsymbol{B}e(t - \tau) + W^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{X}) + \varepsilon + \boldsymbol{C}\tilde{m} + u(t)] + \tilde{m}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Lambda}^{-1} \dot{\tilde{m}} + \tilde{W}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \dot{\tilde{W}} \tag{18}$$

将同步控制式(15)代入到上式可得:

$$\dot{V} = e^{\mathrm{T}} [-\boldsymbol{K}e + \boldsymbol{C}\tilde{m} + W^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{X}) - \hat{W}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{X}) + \varepsilon] + \tilde{m}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Lambda}^{-1} \dot{\tilde{m}} + \tilde{W}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \dot{\tilde{W}} \tag{19}$$

定义 $\tilde{W} = \hat{\boldsymbol{W}} - W$, 上式则可变为:

$$\dot{V} = e^{\mathrm{T}} [-\boldsymbol{K}e + \boldsymbol{C}\tilde{m} - \tilde{W}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{X}) + \varepsilon] + \tilde{m}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Lambda}^{-1} \dot{\tilde{m}} + \tilde{W}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \dot{\tilde{W}} \tag{20}$$

考虑到 $\tilde{m} = \hat{m}(t) - m(t)$, 将式(13)代入上式有:

$$\dot{V} = e^{\mathrm{T}} [-\boldsymbol{K}e - \tilde{W}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{X}) + \varepsilon] + \tilde{W}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \dot{\tilde{W}} - \sigma \tilde{m}^{\mathrm{T}} \hat{m} \tag{21}$$

由 $\tilde{W}$ 的表达式且考虑到式(14)，则式(21)可变为：

$$\dot{V} = e^{\mathrm{T}}(-\boldsymbol{K}e + \varepsilon) - \sigma\tilde{m}^{\mathrm{T}}\hat{m} - \beta\tilde{W}^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{W}} \tag{22}$$

考虑到 $\| m(t) \| \leqslant \lambda$ 和如下事实：

$$2\tilde{m}^{\mathrm{T}}\hat{m} = \| \tilde{m} \|^2 + \| \hat{m} \|^2 - \| m \|^2 \geqslant \| \tilde{m} \|^2 - \| m \|^2 \tag{23}$$

$$2\tilde{W}^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{W}} = \| \tilde{W} \|^2 + \| \hat{\boldsymbol{W}} \|^2 - \| W^* \|^2 \geqslant \| \tilde{W} \|^2 - \| W^* \|^2 \tag{24}$$

$$2e^{\mathrm{T}}\varepsilon \leqslant \| e \|^2 + \| \varepsilon \|^2 \leqslant \| e \|^2 + \varepsilon^{*2} \tag{25}$$

考虑到式(23)、式(25)，则式(22)可变为：

$$\dot{V} \leqslant -e^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{K} - 0.5I_{n\times n})e - 0.5\sigma \| \tilde{m} \|^2 - 0.5\beta \| \tilde{W} \|^2 + 0.5\sigma\lambda^2 + 0.5\beta \| W^* \|^2 + 0.5\varepsilon^{*2} \tag{26}$$

显然只要选取设计参数 $\boldsymbol{K}, \sigma, \beta$，使得 $\boldsymbol{K} > 0.5I_{n\times n}$，则可以使同步误差 e 和神经网络逼近误差 $\tilde{D}$ 是渐近收敛的。即混沌系统式(1)与式(2)可以实现同步，且 $m(t)$ 能被恢复。在同步控制器的设计当中，设计参数 $\boldsymbol{K}$，β 和 σ 的取值将会影响到同步效果以及保密信号的恢复效果。

3 数值仿真

为了验证本文所研究的基于径向基神经网络同结构同步控制方案及在保密通信中应用的有效性，考虑带有明文信号的不确定时滞 Lorenz 混沌系统为：

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \left(\begin{bmatrix} -10 & 10 & 0 \\ 28 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -8/3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.05 & 0.05 & 0 \\ 0.05 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.02 \end{bmatrix} \right) x(t) + \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x(t-1) + \begin{bmatrix} 0 \\ -x_1x_3 \\ x_1x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.1 \\ 0.3 \end{bmatrix} m(t) + \begin{bmatrix} 0.8\sin(x_2x_3) \\ 0.7\sin(x_1x_3) \\ 0.6\sin(x_1x_2) \end{bmatrix} \tag{27}$$

从系统表示为：

$$\dot{\boldsymbol{y}}(t) = \left(\begin{bmatrix} -10 & 10 & 0 \\ 28 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -8/3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.02 & 0.04 & 0 \\ 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.05 \end{bmatrix} \right) y(t) + \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} y(t-1) + \begin{bmatrix} 0 \\ -y_1y_3 \\ y_1y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.1 \\ 0.3 \end{bmatrix} \hat{m}(t) + \begin{bmatrix} 0.3\sin(y_1) \\ 0.4\cos(y_1y_2) \\ 0.5\sin(y_2y_3) \end{bmatrix} \tag{28}$$

在 Matlab 7.0 工作环境下，使用 Simulink 模块进行数值仿真验证。在主系统的初始值为 $[2,5,10]^{\mathrm{T}}$，从系统的初始值为 $[10,2,5]^{\mathrm{T}}$ 条件下，选取矩阵 $\boldsymbol{K}=\begin{bmatrix} 50 & 0 & 0 \\ 0 & 60 & 0 \\ 0 & 0 & 50 \end{bmatrix}$，$\boldsymbol{\Gamma}=\begin{bmatrix} 6 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 6 \end{bmatrix}$，$l=1$，$\boldsymbol{\Lambda}=15$，$\sigma=2$，取 $m(t)=\sin(2\pi t)$ 作为单路明文信号。利用 RBF 神经网络逼近误差系统的复合不确定。

仿真中混沌保密通信传输信号的恢复信号 $\hat{m}(t)$ 的自适应变化律设计为式(13)的形式，RBF 神经网络的权值自适应律按式(14)设计，混沌同步控制输入 $u(t)$ 设计为式(15)、式(13)的形式。主系统的混沌吸引子和状态空间如图 2 和图 3 所示。

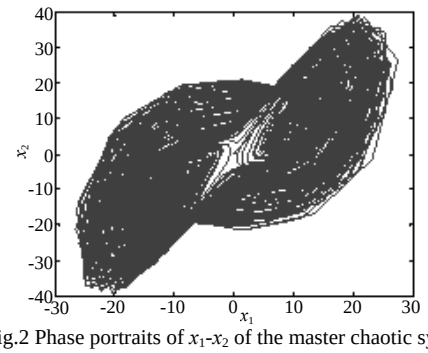

Fig.2 Phase portraits of x_1-x_2 of the master chaotic system

图 2 主系统的 x_1-x_2 相图

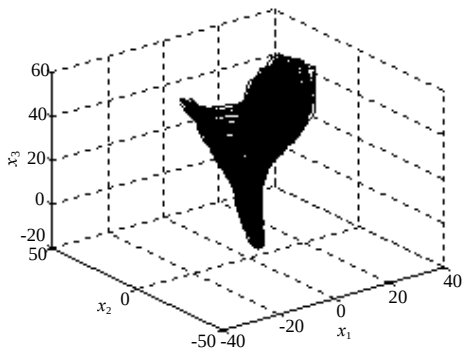

Fig.3 Attractors of the master chaotic system

图 3 主系统的状态空间图

同步控制输入如图 4 所示，在同步控制输入的作用下的混沌同步误差如图 5 所示。由图 5 可知，在同步控制输入作用下，能实现不确定混沌系统的同步，同步误差能够快速地趋于零值，这表明主从系统达到同步。在同步的情况下，可以恢复出明文信号，其恢复效果如图 6 所示。

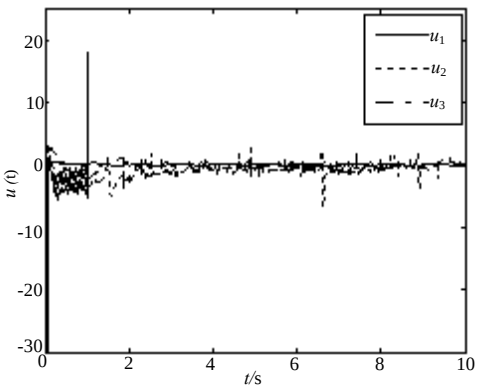

Fig.4 Synchronization control input
图 4 同步控制输入

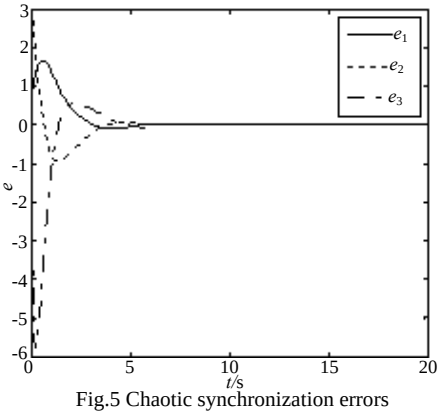

Fig.5 Chaotic synchronization errors
图 5 混沌同步误差

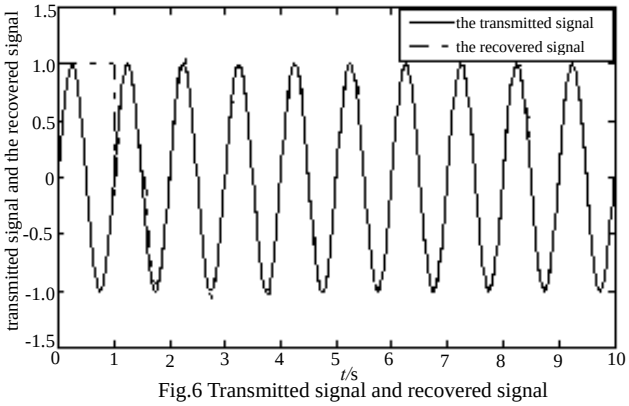

Fig.6 Transmitted signal and recovered signal
图6 明文信号和恢复的信号

由仿真结果可知，本文所研究的基于径向基神经网络的同结构同步控制方案可实现时延不确定 Lorenz 混沌系统的同步，在实现同步后能有效恢复出隐藏的明文信号。

4　结论

本文研究了带有干扰的时延不确定 Lorenz 混沌系统同步保密通信策略，根据混沌掩盖和调制思想，明文信号通过混沌系统同步实现信号恢复。利用神经网络的逼近能力对 Lorenz 混沌同步误差系统中的不确定进行逼近，并基于逼近输出设计了鲁棒同步控制器，实现了混沌同步。在混沌同步的基础上，根据被动系统状态恢复出了所传输的隐藏信号。仿真实验结果表明，本文所提出的基于神经网络的时延不确定 Lorenz 混沌系统同步保密通信策略是可行的。

参考文献：

[1] Liao T L,Huang N S. An observer-based approach for chaotic synchronization with applications to secure communications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-1:Fundamental Theory and Applications, 1999,46(9):1144–1150.

[2] 鲁池梅. 一个四维四翼混沌系统及其电路实现[J]. 信息与电子工程, 2011,9(2):229–233. (LU Chimei. A 4–D four-wing chaotic system and its circuit implementation[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(2):229–233.)

[3] 于灵慧,房建成. 混沌神经网络逆控制的同步及其在保密通信系统中的应用[J]. 物理学报, 2005,54(9):4012–4018. (YU Linghui,Fang Jiancheng. Synchronization of chaotic neural networks based on adaptive inverse control and its applications in secure communications [J]. Acta Physica Sinica, 2005,54(9):4012–4018.)

[4] 闫二艳,马弘舸,孟凡宝,等. 波混沌腔体中阻抗和散射的通用特性[J]. 信息与电子工程, 2010,8(1):41–45. (YAN Eryan, MA Hongge,MENG Fanbao,et al. Universal statistic properties in microwave chaotic systems[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(1):41–45.)

[5] Li B,Yang D,Zhang X H,et al. Chaotic lag synchronization of coupled time-delayed neural networks with two neurons using LMI approach[J]. Acta Automatica Sinica, 2007,33(11):1196–1199.

(下转第721页)