

·测试、试验与仿真·

基于滑模控制技术Gibbs电光时空网络同步研究

高丽宇, 韩昌辉, 葛连珺, 吕翎

(辽宁师范大学 物理与电子技术学院, 辽宁 大连 116029)

摘要:利用滑模控制技术研究了离散型不确定时空网络的同步问题。首先,设计了有效的网络滑模面以及网络同步控制器,由此推出了滑模面的稳定条件。进一步利用该稳定条件确定了滑模面中所含的调节参数的取值范围,并且设计了未知参数的识别律,对滑模面中的未知参数进行了有效识别。最后,以实际电光时空混沌模型为基础构造时空网络,通过模拟仿真验证了此同步方案的可行性和控制器的有效性。所提出的同步技术允许网络的拓扑结构是任意的,并且此同步方案不需要设计Lyapunov函数,通过调节滑模面中的参数即可实现网络同步。

关键词:滑模技术;电光时空网络;参数识别;网络同步

中图分类号:O415.5

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2018)-05-0069-08

Synchronization of Gibbs Electro-optical Spatiotemporal Network Based on Sliding Mode Control Technology

GAO Li-yu, HAN Chang-hui, GE Lian-jun, LV Ling

(School of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: The problem of the synchronization for discrete uncertain spatiotemporal networks based on sliding mode control is discussed. At first, an effective network sliding mode surface and a network synchronization controller are designed. From this, the stability condition of the sliding surface is derived. Further the stability condition is used to determine the range of adjustment parameters in the sliding surface, and the recognition law of unknown parameters is designed. And then, the unknown parameters in the sliding surface are identified effectively. At last, the spatiotemporal network with the actual electro-optical spatiotemporal chaos model is constructed. And the feasibility of the synchronization scheme and the effectiveness of the controller are verified by simulation. The proposed synchronization technology allows the topology of the network to be arbitrary, and this synchronization scheme does not need to design Lyapunov functions. The network synchronization can be realized by adjusting the parameters in the sliding surface.

Key words: sliding mode technology; electro-optical spatiotemporal network; parameter identification; network synchronization

近年来,复杂网络的同步研究逐步吸引了国内众多学者的广泛关注^[1-6]。一般而言,对于相对简单且有序的系统来说,同步是比较容易实现的。但对于复杂网络而言,由于其具有不同的拓扑结构,或是节点动力学的非线性混沌性质,使得复杂网络的同步较难实现。然而,在自然界又存在着大

量的网络同步现象,并且网络同步在物理学、生物学、保密通信工程及自动化工程等领域也有着广泛的应用,所以,对复杂网络同步的研究是十分必要和重要的。

目前,网络同步的研究有多种比较成熟的方法,例如耦合同步法^[7-8]、滑模控制法^[9-13]、变量反馈

收稿日期:2018-08-01

基金项目:国家自然科学基金(11747318)资助

作者简介:高丽宇(1994-),女,硕士,从事非线性物理研究。

法^[14-15]、脉冲控制法^[16]以及自适应同步法^[17-21]等。其中应用滑模控制技术使复杂网络实现同步的方法尤为重要。滑模控制技术是根据系统所期望的动态特性来设计滑模面和滑膜控制器,使系统状态从超平面之外向切换超平面收敛。一旦到达切换超平面,控制作用将保证系统沿切换超平面到达系统原点^[22]。沿切换超平面向原点滑动的过程就是滑模控制过程,因此滑模控制技术具有很好的鲁棒性,能够克服系统误差、系统参数变化及外部干扰产生的影响,尤其是对非线性系统具有良好的控制效果。

基于滑模控制技术具有响应快、能有效克服系统的不确定性等优点,迄今国内外许多学者致力于应用该项技术实现混沌同步或网络同步的研究。其中典型的工作,如Aghababa等人研究了含有未知参数的两个不确定混沌系统的同步问题。设计了有效的滑模控制器,并选用不同的混沌系统进行数值模拟,验证了所设计的滑模控制技术具有很好的鲁棒性^[23]。Lü等人通过把针对单系统进行控制的滑模面推广到复杂网络的同步研究中,设计了有效的滑模面和控制输入,完成了网络同步控制^[24]。在此之后,Lü等人利用拓展的滑模控制技术研究了无标度网络的投影同步问题,并对网络的未知参数设计了有效的识别律^[25]。Shi等人采用积分滑模控制法研究了混合时滞神经网络的投影同步问题^[26]。Hou等人利用滑模控制技术完成了一类复杂动力学网络的同步控制^[27]。Liu等人研究了两个小世界动态网络的外同步问题。通过设计二阶滑模控制器使两个小世界网络实现了完全同步^[28]。

然而,上述研究大多数都是针对与时间有关的非线性系统或复杂网络而言的。而实际网络往往不仅仅在时间上存在混沌行为,在空间上也同样存在混沌行为。不难看出,尽管时空网络其空间结构相对复杂,时空网络同步的研究更加困难,但也更具有实用价值。目前,连续型时空网络的研究基本成熟,而离散型时空网络同步的研究报道相对较少。而且大多数滑模控制技术的研究主要集中在网络滑模面的参数是确定的情况。所以,设计参数识别律对滑模面中所含的未知参数进行有效识别也非常必要。

基于上述分析,文中进行了利用滑模控制技术对离散型不确定时空网络的同步问题的研究。首

先,设计了网络滑模面和网络滑模控制器,并由此推出了滑模面的稳定条件。其次,设计了网络滑模面中所含参数的识别律。最后,以电光混沌时空系统作为节点状态方程,构造随时空变化的不确定网络作为响应网络,同时以电光混沌时空系统本身作为目标系统,通过调节参数,使响应网络与目标系统之间能快速实现同步。

1 网络与外部输入信号之间的同步机理

构造一个由 N 个节点组成的复杂网络,其中 $X_i(m, n)$ 为第 i 个节点的状态变量,且 $X_i(m, n) \in R^w$ 。在不考虑耦合作用情况下,单个节点的状态方程可表示为如下形式

$$X_i(m, n+1) = F(X_i(m, n)) \quad (1)$$

其中, m 为空间坐标; n 为离散化的时间。

当考虑耦合作用时,网络节点的状态方程具有如下形式

$$X_i(m, n+1) = F(X_i(m, n)) + k_i \sum_{j=1}^N a_{ij} X_j(m, n) \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

这里 k_i 表示网络节点间的耦合强度; a_{ij} 表示网络拓扑结构的耦合矩阵。

对上述网络施加控制器,使其作为响应网络

$$X_i(m, n+1) = F(X_i(m, n)) + k_i \sum_{j=1}^N a_{ij} X_j(m, n) + u_i(m, n) \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

设外部信号为 $X_d(m, n+1) = F(X_d(m, n))$, 则网络第 i 个节点与此信号之间的误差为

$$e_i(m, n) = X_i(m, n) - X_d(m, n) \quad (4)$$

进一步可以得到误差的演化关系如下

$$e_i(m, n+1) = F(X_i(m, n)) + k_i \sum_{j=1}^N a_{ij} X_j(m, n) + u_i(m, n) - X_d(m, n+1) \quad (5)$$

定义离散型滑模面如下

$$S_i(m, n) = \lambda_i e_i(m, n) - \delta_i(m, n) \quad (6)$$

$$\delta_i(m, n) = \delta_i(m, n-1) + a_i e_i(m, n-1) \quad (7)$$

其中, λ_i 、 a_i 均为待定系数,且 λ_i 不为零。当 $S_i(m, n+1) = S_i(m, n) = 0$ 时,利用式(6)和式(7)可得

$$e_i(m, n+1) = (1 + a_i/\lambda_i) e_i(m, n) \quad (8)$$

由式(8)不难看出,要使得系统误差趋于稳定,即 $|e_i(m, n+1)| < |e_i(m, n)|$ 成立,只要待定系数 a_i , λ_i 满足 $|1 + a_i/\lambda_i| < 1$ 即可。

定理1:当参数识别律为如下形式

$$\begin{cases} \hat{a}_i(m, n) = \theta_i(m, n) - \varphi_i(m, n-1) \frac{\lambda_i(e_i(m, n) + S(m, n-1))}{e_i(m, n-1)} \\ \theta_i(m, n+1) = (1 + \varphi_i(m, n))\hat{a}_i(m, n) + \lambda_i\varphi_i(m, n) \end{cases} \quad (9)$$

那么未知参量就能得到有效识别。

证明:假设待定系数 a_i 是未知的,设计它的识别律为

$$\hat{a}_i(m, n+1) = \hat{a}_i(m, n) + \varphi_i(m, n)(\hat{a}_i(m, n) - a_i) \quad (10)$$

其中, $\varphi_i(m, n)$ 为调节函数。

定义未知参数其本身估计值的误差为

$$E_i(m, n) = \hat{a}_i(m, n) - a_i \quad (11)$$

若当 $n \rightarrow \infty$ 时,

$$|E_i(m, n+1)| < |E_i(m, n)| \quad (12)$$

则 $|E_i(m, n)| \rightarrow 0$, a_i 将被识别。

由式(11)可知

$$E_i(m, n+1) = \hat{a}_i(m, n+1) - a_i \quad (13)$$

将式(10)代入式(13),误差函数可进一步被定义为

$$E_i(m, n+1) = (1 + \varphi_i(m, n))E_i(m, n) \quad (14)$$

在满足式(12)的情况下, $\varphi_i(m, n)$ 需要满足如下关系

$$-2 < \varphi_i(m, n) < 0 \quad (15)$$

利用式(5)、式(6)、式(7)和式(10)使未知参数的函数形式进一步表示为

$$\begin{aligned} \hat{a}_i(m, n+1) &= (1 + \varphi_i(m, n))\hat{a}_i(m, n) - \\ &\varphi_i(m, n) \times \left(\frac{\lambda_i(e_i(m, n+1) + S(m, n))}{e_i(m, n)} - \lambda_i \right) \end{aligned} \quad (16)$$

由于上述未知参数的函数表达式中含有误差变量,不便于实际观测,则需要引入辅助变量 $\theta_i(m, n)$ 和 $Q_i(m, n)$,假设辅助变量满足如下关系

$$\theta_i(m, n) = \hat{a}_i(m, n) + Q_i(m, n) \quad (17)$$

$$\theta_i(m, n+1) = \hat{a}_i(m, n+1) + Q_i(m, n+1) \quad (18)$$

将式(16)代入式(18)可得

$$\begin{aligned} \theta_i(m, n+1) &= (1 + \varphi_i(m, n))\hat{a}_i(m, n) - \\ &\varphi_i(m, n) \left(\frac{\lambda_i(e_i(m, n+1) + S(m, n))}{e_i(m, n)} - \lambda_i \right) + \end{aligned} \quad (19)$$

$$Q_i(m, n+1)$$

假设

$$Q_i(m, n) = \varphi_i(m, n-1) \frac{\lambda_i(e_i(m, n) + S(m, n-1))}{e_i(m, n-1)} \quad (20)$$

则有

$$Q_i(m, n+1) = \varphi_i(m, n) \frac{\lambda_i(e_i(m, n+1) + S(m, n))}{e_i(m, n)} \quad (21)$$

将式(21)代入式(19),可以得到未知参数 a_i 的识别律为

$$\begin{cases} \hat{a}_i(m, n) = \theta_i(m, n) - \varphi_i(m, n-1) \times \\ \frac{\lambda_i(e_i(m, n) + S(m, n-1))}{e_i(m, n-1)} \\ \theta_i(m, n+1) = (1 + \varphi_i(m, n))\hat{a}_i(m, n) + \lambda_i\varphi_i(m, n) \end{cases} \quad (22)$$

因此,在满足 $|1 + a_i/\lambda_i| < 1$ 的情况下,式(22)可代替未知参数 a_i 。

进一步设计离散型滑模面的控制法则,使同步误差系统渐进稳定。

引理1^[24]:离散滑模控制系统确保滑动和收敛到超平面的充分必要条件为

$$\|S_i(m, n+1)\| \leq \|S_i(m, n)\| \quad (23)$$

上式可分解如下

$$S_i^T(m, n)[S_i(m, n+1) - S_i(m, n)] < 0 \quad (24)$$

$$S_i^T(m, n)[S_i(m, n+1) + S_i(m, n)] > 0 \quad (25)$$

其中,式(24)为滑动条件,式(25)为收敛条件。

定理2:当网络控制器为如下形式

$$\begin{aligned} u_i(m, n) &= -S_i(m, n) + \left(\left(\frac{a_i}{\lambda_i} \right) + 1 \right) e_i(m, n) - \\ &F(X_i(m, n)) - k_i \sum_{j=1}^N a_{ij} X_j(m, n) + \\ &X_d(m, n+1) \end{aligned} \quad (26)$$

则网络与任意给定的外部信号之间实现同步。

证明:证明条件 $\|s_i(m, n+1)\| \leq \|s_i(m, n)\|$ 是满足的。首先证明滑动条件。根据式(5)、式(6)、式(7)和式(26)

$$\begin{aligned} &S_i^T(m, n)[S_i(m, n+1) - S_i(m, n)] = \\ &S_i^T(m, n)[\lambda_i e_i(m, n+1) - \delta_i(m, n+1) - S_i(m, n)] = \\ &S_i^T(m, n) \left\{ \lambda_i \left[F(X_i(m, n)) + k_i \sum_{j=1}^N a_{ij} X_j(m, n) + \right. \right. \\ &\left. \left. u_i(m, n) - X_d(m, n+1) \right] - \right. \\ &\left. \delta_i(m, n) - a_i e_i(m, n) - S_i(m, n) \right\} = \end{aligned}$$

$$S_i^T(m, n) \left\{ \lambda_i \left[\begin{array}{l} F(X_i(m, n)) + k_i \sum_{j=1}^N a_{ij} X_j(m, n) + \\ u_i(m, n) - X_d(m, n+1) \end{array} \right] + \right. \\ \left. S_i(m, n) - \lambda_i e_i(m, n) - a_i e_i(m, n) - S_i(m, n) \right\} = \\ -\lambda_i S_i^T(m, n) S_i(m, n) \quad (27)$$

从式(27)不难看出,只要 $\lambda_i > 0$,则 $S_i^T(m, n)[S_i(m, n+1) - S_i(m, n)] < 0$ 成立,意味着滑动条件满足。

其次证明收敛条件。同样,利用式(5)、式(6)、式(7)和式(26),可得

$$S_i^T(m, n)[S_i(m, n+1) + S_i(m, n)] = \\ S_i^T(m, n) \left[\lambda_i e_i(m, n+1) - \delta_i(m, n+1) + S_i(m, n) \right] = \\ S_i^T(m, n) \left\{ \lambda_i \left[\begin{array}{l} F(X_i(m, n)) + k_i \sum_{j=1}^N a_{ij} X_j(m, n) + \\ u_i(m, n) - X_d(m, n+1) \end{array} \right] - \right. \\ \left. \delta_i(m, n) - a_i e_i(m, n) + S_i(m, n) \right\} = \\ S_i^T(m, n) \left\{ \lambda_i \left[\begin{array}{l} F(X_i(m, n)) + k_i \sum_{j=1}^N a_{ij} X_j(m, n) + \\ u_i(m, n) - X_d(m, n+1) \end{array} \right] + \right. \\ \left. S_i(m, n) - \lambda_i e_i(m, n) - a_i e_i(m, n) + S_i(m, n) \right\} = \\ (-\lambda_i + 2) S_i^T(m, n) S_i(m, n) \quad (28)$$

从式(28)不难看出,当 $\lambda_i < 2$ 时,成立,意味着收敛条件满足。 $S_i^T(m, n)[S_i(m, n+1) + S_i(m, n)] > 0$

综上所述,当 $0 < \lambda_i < 2$ 时,就可以同时满足滑动条件和收敛条件,并最终实现网络对任意给定的外部信号的完全同步。

2 仿真模拟分析

为了说明上述同步机理,选取在物理中能呈现时空混沌行为的Gibbs电光模型作为节点构成响应网络,同时,以单一Gibbs电光时空混沌模型作为外部输入信号来进行仿真模拟。

Gibbs电光时空混沌模型具有以下形式^[30]

$$x_i(m, n+1) = (1-\varepsilon)f(x_i(m, n)) + \varepsilon f(x_i(m-1, n)) = \\ (1-\varepsilon)A \sin^2(x_i(m, n) - x_b) + \varepsilon A \sin^2(x_i(m-1, n) - x_b) \quad (29)$$

其中,系统参数 $A=3$, $x_b=0.85\pi$,耦合强度因子取 $\varepsilon=0.4$ 。该系统的相图如图1所示。

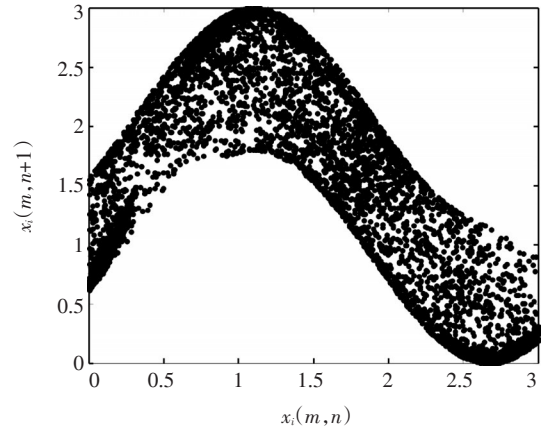


图1 Gibbs电光时空混沌模型的相图

在模拟仿真中,取10个Gibbs电光时空混沌模型作为网络节点,基于式(4)构造响应网络如下

$$y_i(m, n+1) = (1-\varepsilon)f(y_i(m, n)) + \\ \varepsilon f(y_i(m-1, n)) + \\ k_i \sum_{j=1}^N a_{ij} y_j(m, n) + u_i(m, n) = \\ (1-\varepsilon)A \sin^2(y_i(m, n) - y_b) + \\ \varepsilon A \sin^2(y_i(m-1, n) - y_b) + \\ k_i \sum_{j=1}^N a_{ij} y_j(m, n) + u_i(m, n) \quad (30)$$

其中, $y_b=0.85\pi$ 。离散型时空网络节点间的耦合强度取 $k_i(i=1, 2, \dots, 10)=1$ 。网络的拓扑结构可以是任意的,文中耦合矩阵取为如下形式

$$A = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 3 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 3 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 3 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 3 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 3 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

网络滑模面中所含参数在满足 $|1 + a_i/\lambda_i| < 1$ 的情况下,调节参数取 $\lambda_i=0.1$, $a_i=-0.09$ 。假设 a_i 在仿真模拟中是不确定的,需通过识别律式(22)进行识别。由于式(22)含有调节函数,所以要选取适当的调节函数 $\varphi_i(m, n)$ 使其满足式(15)。从Gibbs电光时空混沌模型的相图中不难看出,状态变量

$x_i(m, n)$ 的取值范围为 $(0, 3)$ 。显然， $1 - \sqrt{x_i(m, n) + 1} \in (-2, 0)$ 。因此，调解函数设计为 $\varphi_i(m, n) = 1 - \sqrt{x_i(m, n) + 1}$ 。

在仿真过程中，网络节点和外部输入信号状态变量的初始值在区间 $(1, 3)$ 之间任意选取。仿真模拟响应网络节点与外部输入信号之间的误差随时空的演化过程如图2~图11所示。

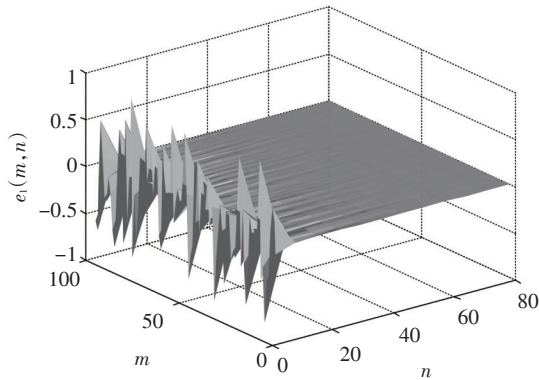


图2 $e_1(m, n)$ 随时空的演化

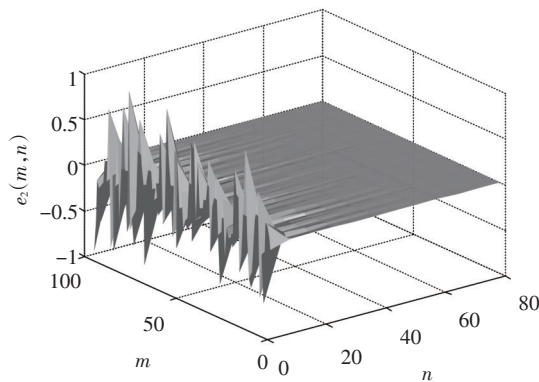


图3 $e_2(m, n)$ 随时空的演化

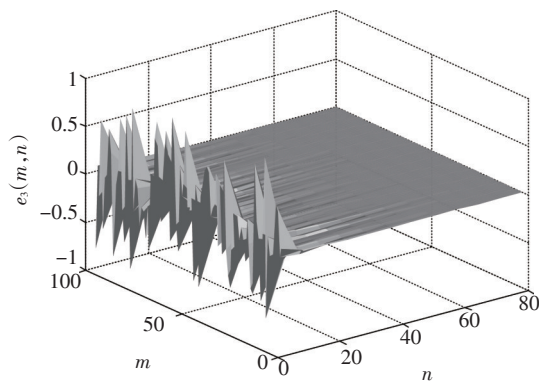


图4 $e_3(m, n)$ 随时空的演化

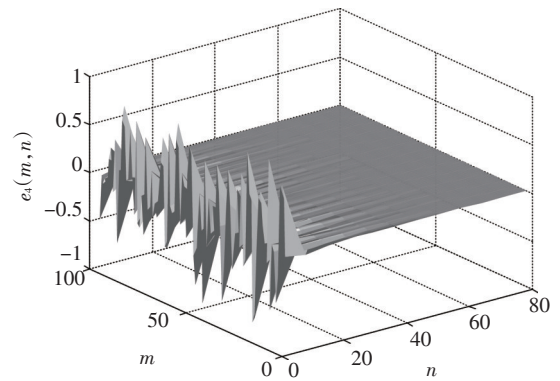


图5 $e_4(m, n)$ 随时空的演化

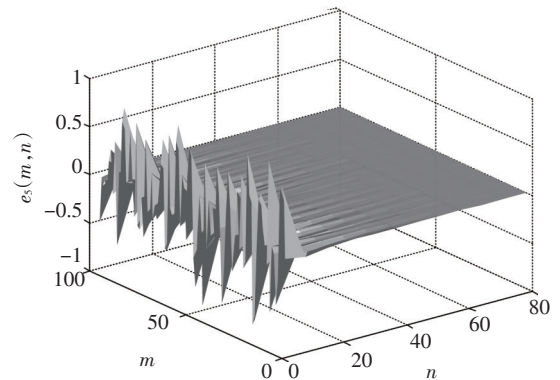


图6 $e_5(m, n)$ 随时空的演化

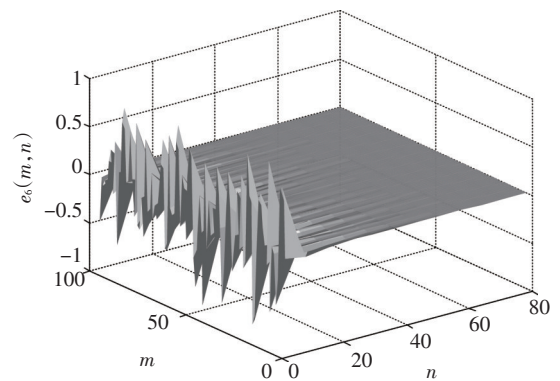


图7 $e_6(m, n)$ 随时空的演化

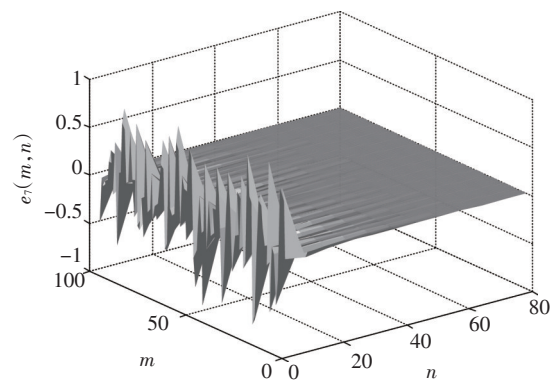
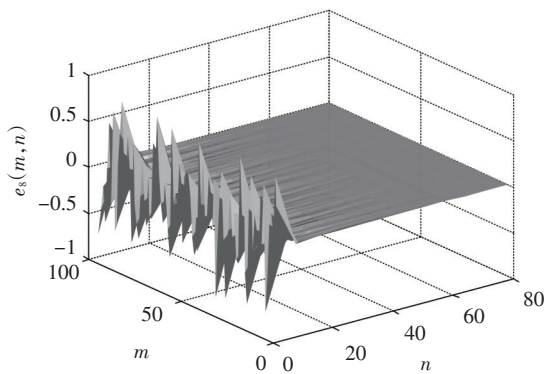
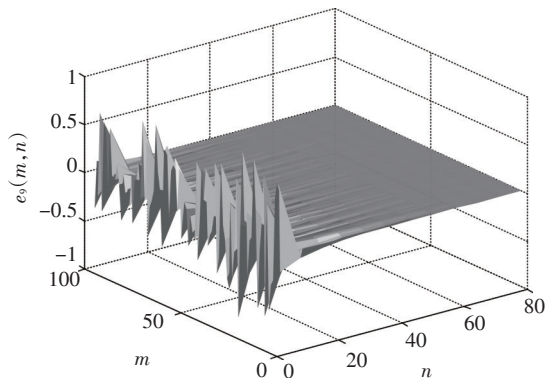
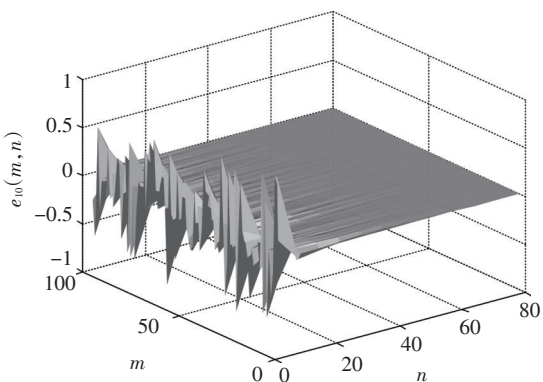


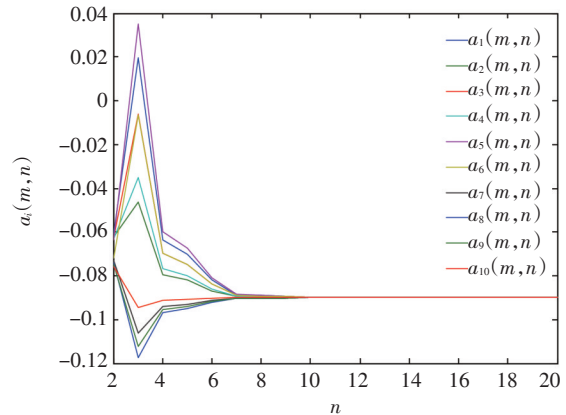
图8 $e_7(m, n)$ 随时空的演化

图9 $e_8(m, n)$ 随时空的演化图10 $e_9(m, n)$ 随时空的演化图11 $e_{10}(m, n)$ 随时空的演化

从图2~图11可以看出,由于网络节点和外部输入信号状态变量的初始值不同,其误差 $e_i(m, n)(i=1, 2, \dots, 10)$ 在初期随时空演化的差异比较明显。经过一个过渡状态之后,误差变量随时空演化逐渐趋近于零,意味着网络与外部信号之间实现了完全同步。

图12显示了以空间任意一个格点坐标 $m=25$

为例的未知参数的识别过程。

图12 $a_i(m, n)$ 的识别过程

能够看出,未知参数的识别曲线从初始的任意值趋于固定值 -0.09 。说明应用式(22)所设计的识别律,未知参数能被有效识别。

3 结论

利用滑模控制技术研究了离散型不确定时空网络的同步问题。通过设计滑模面和网络滑模控制器推出了滑模面的稳定条件,并设计了参数识别律。采用Gibbs电光时空混沌模型进行仿真模拟证明此技术的有效性。模拟结果显示,对网络施加滑模控制器之后,网络误差随时空演化趋近于零,并保持平稳状态。这意味着响应网络与外部输入信号在经过一个短暂过渡之后实现了完全同步,表明此滑模控制器具有很好的鲁棒性。与此同时,未知参数 a_i 也稳定地保持在一个固定值,证明了所设计的识别律是有效的。

参考文献

- [1] Wang L M, Shen Y, Zhang G D. General decay synchronization stability for a class of delayed chaotic neural networks with discontinuous activations[J]. Neurocomputing, 2016, 179(29): 169-175.
- [2] Jing T Y, Chen F Q, Zhang X H. Finite-time lag synchronization of time-varying delayed complex networks via periodically intermittent control and sliding mode control[J]. Neurocomputing, 2016, 199(26): 178-184.
- [3] Fan Y H, Liu H M, Zhu Y G, et al. Fast synchronization of complex dynamical networks with time-varying delay via

- periodically intermittent control[J]. *Neurocomputing*, 2016, 205(12): 182-194.
- [4] Lang J P, Zhang Y J, Zhang B Y. Event-triggered network-based synchronization of delayed neural networks[J]. *Neurocomputing*, 2016, 190(19): 155-164.
- [5] Senthilraj S, Raja R, Zhu Q X, et al. New delay-interval-dependent stability criteria for static neural networks with time-varying delays[J]. *Neurocomputing*, 2016, 186(19): 1-7.
- [6] Lia T, Wang T, Zhang G B, et al. Master-slave synchronization of heterogeneous dimensional delayed neural networks[J]. *Neurocomputing*, 2016, 205(12): 498-506.
- [7] Wang F, Yang Y Q, Hu M F, et al. Projective cluster synchronization of fractional-order coupled-delay complex network via adaptive pinning control[J]. *Physica A*, 2015, 434(15): 134-143.
- [8] Kaviarasan B, Sakthivel R, Lim Y D. Synchronization of complex dynamical networks with uncertain inner coupling and successive delays based on passivity theory[J]. *Neurocomputing*, 2016, 186(19): 127-138.
- [9] Hsu C F, Chang C W. Intelligent dynamic sliding-mode neural control using recurrent perturbation fuzzy neural networks[J]. *Neurocomputing*, 2016, 173(15): 734-743.
- [10] Wu H Q, Wang L F, Niu P F, et al. Global projective synchronization in finite time of nonidentical fractional-order neural networks based on sliding mode control strategy[J]. *Neurocomputing*, 2017, 235(26): 264-273.
- [11] Zhao L, Jia Y M. Neural network-based distributed adaptive attitude synchronization control of spacecraft formation under modified fast terminal sliding mode[J]. *Neurocomputing*, 2016, 171(1): 230-241.
- [12] Hsu C F, Chang C W. Intelligent dynamic sliding-mode neural control using recurrent perturbation fuzzy neural networks[J]. *Neurocomputing*, 2016, 173(15): 734-743.
- [13] Jing T Y, Chen F Q, Zhang X H. Finite-time lag synchronization of time-varying delayed complex networks via periodically intermittent control and sliding mode control[J]. *Neurocomputing*, 2016, 199(26): 178-184.
- [14] Mu X, Chen Y G. Synchronization of delayed discrete-time neural networks subject to saturated time-delay feedback[J]. *Neurocomputing*, 2016, 175(29): 293-299.
- [15] Zhang D Y, Shen Y J, Mei J. Finite-time synchronization of multi-layer nonlinear coupled complex networks via intermittent feedback control[J]. *Neurocomputing*, 2017, 225(15): 129-138.
- [16] Chandrasekar A, Rakkiyappan R. Impulsive controller design for exponential synchronization of delayed stochastic memristor-based recurrent neural networks[J]. *Neurocomputing*, 2016, 173(15): 1348-1355.
- [17] Wu Y, Sun Y H, Chen L F. Robust adaptive finite-time synchronization of nonlinear resource management system[J]. *Neurocomputing*, 2016, 171(1): 1131-1138.
- [18] Liu Y C, Liu S Y, Wang N. Fully-tuned fuzzy neural network based robust adaptive tracking control of unmanned underwater vehicle with thruster dynamics[J]. *Neurocomputing*, 2016, 196(5): 1-13.
- [19] Jiang S Q, Lu X B, Xie C, et al. Adaptive finite-time control for overlapping cluster synchronization in coupled complex networks[J]. *Neurocomputing*, 2017, 266(29): 188-195.
- [20] Luy N T. Adaptive dynamic programming-based design of integrated neural network structure for cooperative control of multiple MIMO nonlinear systems[J]. *Neurocomputing*, 2017, 237(10): 12-24.
- [21] Zhang J, Peng C, Du D J, et al. Adaptive event-triggered communication scheme for networked control systems with randomly occurring nonlinearities and uncertainties [J]. *Neurocomputing*, 2016, 174(22): 475-482.
- [22] Khakshour A J, Khanesar M A. Model reference fractional order control using type-2 fuzzy neural networks structure: Implementation on a 2-DOF helicopter[J]. *Neurocomputing*, 2016, 193(12): 268-279.
- [23] PAghababa M, Khanmohammadi S, Alizaden G. Finite-time synchronization of two different chaotic systems with unknown parameters via sliding mode technique[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, 35(6): 3080-3091.
- [24] Lü L, Li Y S, Wei L L, et al. Chaos synchronization of regular network based on sliding mode control[J]. *Physica A*, 2012, 61(12): 855-865.
- [25] Li C G, Lü L, Zhao G N, et al. Projective synchronization of uncertain scale-free network based on modified sliding mode control technique[J]. *Physica A*, 2017, 473(1): 511-521.
- [26] Shi Y C, Zhua P Y, Qin K. Projective synchronization of different chaotic neural networks with mixed time delays based on an integral sliding mode controller[J]. *Neurocomputing*, 2014, 123(10): 443-449.
- [27] Hou H, Zhang Q, Zheng M. Cluster synchronization in nonlinear complex networks under sliding mode control[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 83(1-2): 739-749.
- [28] Liu S, Wang Q. Outer synchronization of small-world networks by a second-order sliding mode controller[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2017, 89(3): 1817-1826.
- [29] Lü L, Liu S, Zhang X, et al. Spatiotemporal chaos anti-

synchronization of a complex network with different nodes[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(9): 1-13.

[30] Sarpturk S Z, Istefanopoulos Y, Kaynak O. On the stability

of discrete-time sliding mode control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1987, 32 (10): 930-937.

(上接第40页)

and compressive sensing[J]. Rice University, 2009, 9.

[4] 王强, 李佳. 压缩感知中确定性测量矩阵构造算法综述[J]. 电子学报, 2013, 10(10): 2041-2050.

[5] 吴赞. 压缩感知测量矩阵的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.

[6] 华翌辰. 基于压缩感知的鬼成像研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.

[7] Tropp J, Gilbert A C. Signal recovery from partial information via orthogonal matching pursuit[J]. 2005.

[8] Tropp J A, Gilbert A C. Signal recovery from random mea-

surements via orthogonal matching pursuit [J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2007, 53(12): 4655-4666.

[9] Donoho D L, Tsaig Y, Drori I, et al. Sparse solution of underdetermined systems of linear equations by stage wise orthogonal matching pursuit[J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2012, 58(2): 1094-1121.

[10] Needell D, Vershynin R. Uniform uncertainty principle and signal recovery via regularized orthogonal matching pursuit[J]. Foundations of computational mathematics, 2009, 9(3): 317-334.

(上接第48页)

由示波器波形可以看出, 自研板卡的数据信号以“7E7E7E7E”开始, 以“7E7E7E7E”结尾, 与图3所示的特殊数据帧格式一致; 地址、控制、信息和校验码字段的数据序列每隔5个“1”插入了1个“0”, 符合HDLC协议的比特填充要求; 发出的数据信号和时钟信号同步产生和结束, 符合串行同步通信的要求。

分析数据序列波形, 可得出自研板卡发出的原始数据为“FF FF FF FF”, 与远端设备发来的测试数据一致。

综上所述, 自研板卡可正确解析和生成HDLC协议数据, 本接口设计合理、正确、可行。

6 结论

采用STM32F103微处理器和差分收发芯片架构实现HDLC数据帧的解析与生成, 所需的硬件配置资源少, 利于实现研发成本控制和功能集成; 同步帧头和同步帧尾数量、数据触发模式(即时钟上升沿有效和时钟下降沿有效)和数据通信速率可通过软件进行配置, 使用灵活, 适应性强; 在此接口设计方案基础上稍加修改即可实现全双工模式的HDLC协议通信, 但由于STM32F103微处理器的处理能力有限, 通信速率不大于1 Mbit/s。

综上所述, 本方法在成本控制较高、通信速率小于1 Mbit/s的单路或双路采用HDLC协议通信的场合, 具有很高的应用价值。

参考文献

- [1] 张伟. 基于FPGA的HDLC协议控制系统实现[J]. 指挥信息系统与技术, 2011, 2(2): 48-52.
- [2] 宋飞, 李志蜀. HDLC协议在FPGA通信系统中的实现[J]. 计算机应用, 2009, 29(4): 1092-1094.
- [3] 孟静, 王冬青, 丁明伟, 等. HDLC/UART通信网关的设计[J]. 自动化技术与应用, 2013(4): 21-24, 55.
- [4] 闫肖鹏, 余义的, 张洪昶. 一种基于单片机的HDLC通信卡设计[J]. 自动化技术与应用, 2016, 35(10): 156-158.
- [5] 刘鹏, 金野. 基于S3C4510B和 μ Clinux的HDLC接口设计实现[J]. 微计算机信息, 2007, 23(2-2): 1-3.
- [6] 钱黎明, 刘富发, 魏敬和. 支持PCI总线的HDLC协议专用控制器设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(6): 648-652.
- [7] ST公司. STM32F103xCDE数据手册[M]. 2009.
- [8] TI公司. SN74LVC3G34数据手册[M]. 2013.
- [9] Fairchild公司. HCPL 06xx系列数据手册[M]. 2006.
- [10] NS公司. DS96F172/DS96F174数据手册[M]. 2000.
- [11] NS公司. DS96F172/DS96F174数据手册[M]. 2000.