异步网络中萤火虫同步改进算法研究*

赵 弦[1,2], 华 宇[1,2], 刘 涛[1,2,3], 曾 婷[1,2,3], 燕保荣[1,2]

(1. 中国科学院国家授时中心, 西安 710600; 2. 中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 根据对频率同步网络中的时间同步技术的研究,现提出一种基于耦合振荡器模型的选择性脉冲算法,解决了频率异步网络的时间同步。该算法中节点的相位增量摒弃传统萤火虫同步中的"遇激则增"原则,通过加窗来筛选脉冲,进而实现节点相位突变;对于已同步的节点集合,采用周期最值原则,最终实现全网节点的频率和相位全同步。应用数学几何原理对该算法的同步性能进行了理论分析,进而通过仿真实验,验证了算法的可行性。

关键词: 无线传感器网络; 耦合振荡器模型; 萤火虫同步; 加窗; 频率异步网络

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2016)12-3791-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2016.12.059

Study for improved firefly synchronization algorithm in the asynchronous network

Zhao Xian[1,2], Hua Yu[1,2], Liu Tao[1,2,3], Zeng Ting[1,2,3], Yan Baorong[1,2]

(1. *National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an* 710600, *China*; 2. *Key Laboratory of Precision Navigation and Timing Technology, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an* 710600, *China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: According to the study of time synchronization technology in wireless sensor network, this paper presented a selective pulse coupling synchronicity algorithms based on oscillator model. The algorithm solved time-sync in frequency asynchronous network. The increment of nodes' spurned the principle that if a node fired, the phase of other nodes was changed in the traditional firefly synchronization. By adopting filtrating pulse, and then it achieved the phase increased. For the set of nodes was synchronized, used the principles of best value for the cycle, and ultimately achieved full synchronization among nodes. It carried out the proof for the performance of the algorithm by using the mathematics geometric theory, and passed the experiments to verify the feasibility of the algorithm.

Key words: wireless sensor network (WSN); coupled oscillators model; firefly-inspired synchrony; windowed; frequency asy-nchronous network

无线传感器网络中存在诸多技术,即:位置与定位、拓扑结构控制和时间同步等[1],在这些技术中,时间同步是 WSN 的关键技术之一;且随着 WSN 的应用环境不断扩展,规模不断扩大,学术界和工业界对时间同步算法的同步精度要求愈来愈高。

在诸多无线传感器网络时间同步协议中,根据发送同步消息的类别不同,可分为:基于分组的时间同步协议,即参考广播时间同步协议(reference broadcast synchronization)[2],传感器网络同步协议(timing-sync protocol for sensor networks)[3]等,该类协议在单跳网络中取得了较好的同步精度,在多跳网络中,同步精度随跳数增加会产生误差累积现象;基于物理层同步脉冲的时间同步协议,即协作时间同步协议[4]和萤火虫时间同步协议[5],该类协议的可扩展性较好,适用于较大规模的传感器网络[6]。

在 Strogatz 和 Mirollo 模型(M&S 模型)的基础上,不断有学者提出相关改进算法:RFA 算法[7]和选择性脉冲耦合算法[8]等。选择性脉冲耦合的改进策略,主要研究在振荡器频率相同的情况下,提高了算法的同步速率。本文主要研究:在异步网络中,借鉴选择性脉冲耦合算法的同向收敛原则,通过加窗来对脉冲进行选择,通过仿真验证,该算法实现了频率和相位全同步,与理论相符。

1 耦合脉冲振荡器网络模型

1990 年,Strogatz 等人建立了 M&S 模型[9],该模型中,当一个振荡器激发时,与其存在耦合关系的振荡器的状态变量会相应提升一个增量,使得整个网络中的振荡器的状态变量趋于相同,实现同步激发。该模型中的单个振荡器可建模为

$$x = f(\varphi) = \varphi \tag{1}$$

其中 φ 为节点的相位,满足 $\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{T}$,$T$ 为振荡器周期。

M&S 模型中根据条件构造 fire 函数[9]:

收稿日期: 2015-11-28; **修回日期:** 2016-01-15 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(11403033)

作者简介: 赵弦(1987-),女,陕西西安人,研究实习员,硕士,主要研究方向为授时方法与技术、无线传感器网络(xianjzhao@163.com);华宇(1974-),男,研究员,博导,主要研究方向为时间与频率技术;刘涛(1984-),男,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为授时方法与技术;曾婷(1981-),女,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为时间与频率技术;燕保荣(1982-),女,助理研究员,博士,主要研究方向为卫星导航与授时技术.

$$f(\varphi)=\frac{1}{b}\ln(1+[e^{b}-1]\varphi) \tag{2}$$

$$f^{-1}=\frac{e^{bx}-1}{e^{b}-1} \tag{3}$$

2 异步网络中的脉冲选择时间同步算法

假设:如图 1 所示,两个振荡器 i 和 j,当 j 达到阈值后激发,使 i 的状态变量增加增量后,为了观察方便,借鉴选择性脉冲耦合算法[8],将其化为几何模型,即激发后 ij 距离为

$$|i'j'|=|ij|-\Delta\varphi_i$$

当 i 和 j 各激发一次后,ij 距离为

$$|i''j''|=|i'j'|+\Delta\varphi_{j'}=|ij|-\Delta\varphi_i+\Delta\varphi_{j'}$$

ij 距离变量:$|ij|-|i''j''|=\Delta\varphi_i-\Delta\varphi_{j'}$

观察上式,振荡器 i 和 j 若要同步,则 $|i''j''|$ 趋于 0 或趋于 1。

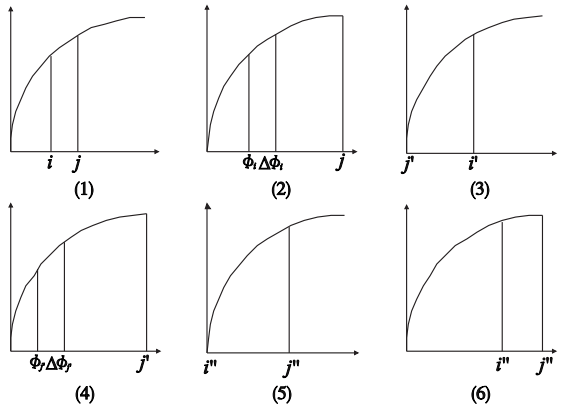


图1 两个振荡器系统

2.1 算法描述

根据分析,在频率同步网络中,上述算法实现了节点同步,且因振荡器频率相同,不会出现失步现象;在异步网络中,通过加窗实现脉冲选择,可建立数学模型:

假设异步网络中,存在振荡器 i 和 j,$f_i>f_j$,则 $T_i<T_j$,当振荡器 i 激发时,若 j 与 i 达到同步,根据振荡器系统图和式(2)知,振荡器 j 须满足:

$$\varphi_j+\varphi_{j'}\geqslant T_j \tag{4}$$

根据式(4),节点 j 的状态更新函数为

$$t''=\begin{cases}t',t'<\dfrac{T_j}{2+\xi}\\ t'+\xi t',t'\geqslant\dfrac{T_j}{2+\xi}\\ 0,t'\geqslant\dfrac{T_j}{1+\xi}\end{cases} \tag{5}$$

根据式(5)知,j 必须被激发才能与 i 瞬时同步,则 j 须满足:

$$t'_j\geqslant\frac{T_j}{1+\xi} \tag{6}$$

振荡器 i 和 j 的频率不同,其达到同步后,需保持同步。根据耦合系数 ε 知,同步保持条件为

$$\frac{f_j}{f_i}(1+\varepsilon)\geqslant 1 \tag{7}$$

2.2 多节点异步网络算法

将上述理论应用于多节点网络中,当 $|ij|$ 趋于 0 或者 1 时,i 和 j 达到同步。由式(6)和(7)知,i 和 j 同步后组成一个振荡器群,当 i 激发时,j 的状态变量增加后,同时也被激发,即可将其视为对振荡器群中的各个振荡器的频率和周期取最大和最小值,则振荡器群的频率和周期分别为

$$\begin{cases}f_{ij}=\max\{f_i,f_j\}\\ T_{ij}=\min\{T_i,T_j\}\end{cases}$$

同理,多节点同步保持条件为

$$\frac{f_i}{f_j}(1+\varepsilon)\geqslant 1,\ f_i<f_j$$

3 仿真与分析

为了验证该算法的同步性能,在 MATLAB 平台上分别列写如下仿真条件进行仿真验证。

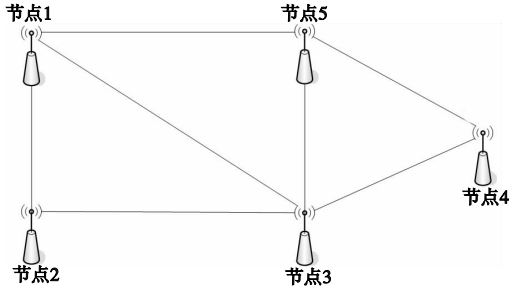


图2 网络拓扑结构

3.1 异步网络同步性能

下面在异步网络中,通过对本文算法和非选择性脉冲同步算法进行仿真:

a)假设一个具有 5 个节点的无线传感器网络($K=5$),其拓扑如图 2 所示。对应的 5 阶邻接矩阵 W 显示该网络拓扑图存在 7 条连接,满足强连接:

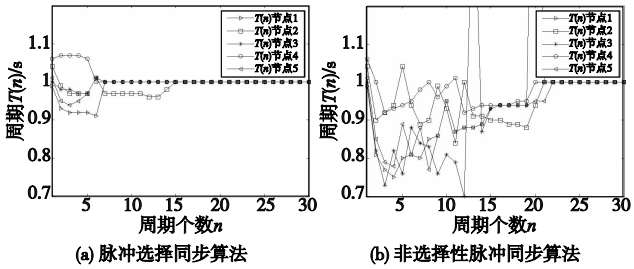
$$W=\begin{bmatrix}0&1&1&0&1\\1&0&1&0&0\\1&1&0&1&1\\0&0&1&0&1\\1&0&1&1&0\end{bmatrix}$$

b)5 个节点的初始周期向量:$T=[0.99;1.04;1.00;1.06;1.01]$,初始时间向量:$t_0=[0.44;0.62;0.87;0.29;0.75]$;

按照上述仿真参数的设定,分别仿真:

a)耦合系数 $\varepsilon=0.07$ 时,系统周期向量 $T(n)$ 与周期个数 n 的对应关系;

$$T(n)=[T_1(n);T_2(n);\cdots;T_K(n)]^{\mathrm{T}}$$



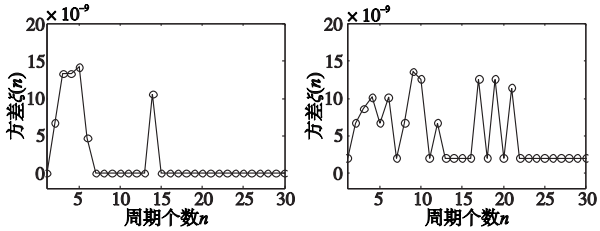
(a) 脉冲选择同步算法 (b) 非选择性脉冲同步算法

图3 系统周期向量的变化图

图 3 为图 2 网络中各个节点的周期变化图。仿真曲线表明:5 个节点的时钟在相互耦合的作用下,节点的时钟周期由波动逐渐趋于同步状态;在异步网络中,脉冲选择时间同步算法较非选择性算法具有较好的收敛速度,时钟周期可较快地趋于相同。

b)为了说明该算法在同步性能上的优势,对系统时钟向量 t 的标准差 $\xi(n)$ 与周期个数 n 的对应关系进行仿真。仿真结果如图 4 所示。

$$\xi(n)=\sqrt{\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}\left(t_i(n)-\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}t_i(n)\right)}$$



(a) 脉冲选择同步算法　　(b) 非选择性脉冲同步算法

图4　系统周期向量的标准差ξ(n)与n的对应关系图

观察图 4 仿真结果:在 5 个节点时钟间的相互耦合作用下,本文算法的时钟向量的标准差的变化趋势较小;两种算法随着 n 的增大,标准差的取值都由波动达到稳定状态;但两种算法存在最终稳定的状态不尽相同,对于本文算法,标准差趋于 0,而非选择性同步算法标准差取值并未趋于 0。

3.2　同步误差比较

图 5 是本文算法和频率同步网络脉冲选择算法的同步误差对比图,仿真条件:耦合系数 $\xi=0.03$,初始时间向量 $t_0=[0.44;0.62;0.87;0.29;0.75]$,异步网络节点的初始周期向量 $T=[0.99;1.04;1.00;1.06;1.01]$,同步网络节点周期向量 $T=1.02$。

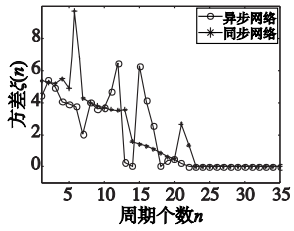


图5　系统时钟向量的标准差ξ(n)与n的对应关系

结合图 4 和 5 知,两种算法的时钟向量标准差逐渐减小直至趋于 0;异步网络算法在不明显降低同步网络算法精度的前提下,达到了频率和相位全同步。

4　结束语

通过本文的研究表明,在频率异步网络中,一个节点收到邻居节点的 Fire 事件后,并未立即作出响应,而是通过加窗来对其进行脉冲选择;振荡器同步激发脉冲后,周期和频率采用最值原则,可实现传感器网络中节点间时钟频率和相位的全同步。

参考文献:

[1] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005:20-50.

[2] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2002, 36(SI): 147-163.

[3] Ganeriwal S, Kumar R, Srivastava M. Timing-Sync protocol for sensor networks [C]//Proc of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. 2003: 139-149.

[4] Hu A-S, Servetto S D. On the scalability of cooperative time synchronization in pulse-connected networks[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(6): 2725-2748.

[5] Strogatz S H. From Kuramoto to Crawford: exploring the onset of synchronization in populations of coupled oscillators[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2000, 143(1): 1-20.

[6] Serpedin E, Chaudhari Q M. Synchronization in wireless sensor networks: parameter estimation, performance benchmarks, and protocols [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009: 56-103.

[7] Werner-Allen G, Tewari G, Patel A, *et al*. Firefly-inspired sensor network synchronicity with realistic radio effects[C]//Proc of the 3rd ACM Conference on Embedded Networked Sensor System. 2005: 142-153.

[8] Niu Yu, Auriol B J, Wu Xiaoling, *et al*. Selective pulse coupling synchronicity for sensor network [C]//Proc of the 2nd IEEE International Conference on Sensor Technologies and Applications. 2008: 123-128.

[9] Simeone O, Spagnolini U. Distributed time synchroni-zation in wireless sensor networks with coupled discrete time oscillators[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2007, 2007: 057054.

[10] An Zhulin, Zhu Hongsong, Li Xinrong, *et al*. Nonidentical linear pulse-coupled oscillators model with application to time synchronization in wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Inclustrial Electronics, 2011, 58(6): 2205-2215.

(上接第　　页)

[31] Marchang N, Datta R. Collaborative techniques for intrusion detection in mobile Ad hoc networks [J]. Ad hoc Networks, 2008, 6(4): 508-523.

[32] Manousakis K, Sterne D, Ivanic N, *et al*. McAuley. A stochastic approximation approach for improving intrusion detection data fusion structures[C]//Proc of the IEEE Military Communications Conference. 2008: 1-7.

[33] Ping Yi, Jiang Xinghao, Wu Yue, *et al*. Distributed intrusion detection for mobile Ad hoc networks[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2008, 19(4): 851-859.

[34] Yu Yao, Guo Lei, Wang Xingwei, *et al*. A real time risk evaluation security strategy in hierarchical Ad hoc networks[J]. ACT Aelectronic Asinica, 2011, 39(1): 108-113.

[35] 魏昭,夏春和,何冰,等. 一种移动 Ad hoc 网络可生存性模型建模及仿真验证方法[J]. 计算机学报,2013,36(7):1466-1474.

[36] Fiore M, Casetti C E, Chiasserini C, *et al*. Discovery and verification of neighbor positions in mobile Ad hoc networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2013, 12(2): 289-303.

[37] 王伟,管晓宏,王备战,等. 可量化的移动 Ad hoc 网络时空动特性评估方法[J]. 软件学报,2011,22(6):1333-1349.

[38] Jong moon C, Dong chul G, Stochastic vector mobility model for mobile and vehicular Ad hoc network simulation[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2012, 11(10): 1494 - 1507.

[39] Kao B R, Tu N N, Hwang I S, *et al*. Auction-based bandwidth allocation in multi-hop wireless Ad hoc networks[J]. Wireless Personal Communications, 2012, 66(2): 473-488.