

自组织网络时钟同步研究综述

王 波¹ 叶晓慧¹ 赵玉亭² 严雪丽¹

(海军工程大学电子工程学院 武汉 430033)¹ (西北工业大学自动化学院 西安 710068)²

摘 要 时钟同步是自组织网络研究的关键技术之一,是多种网络功能实现的基础。对自组织网络时钟同步方法进行综述,依据同步原理对现有自组织网络时钟同步方法进行分类,并从可扩展性、网络开销、同步精度等方面对不同类别中具有代表性的时钟同步方法进行比较和分析。同时,根据无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)和自组织网络在时钟同步方面的相似性,列举出一些自组织网络可借鉴的 WSN 时钟同步方法。最后根据自组织网络时钟同步技术面临的新问题以及现有方法中的不足,展望自组织网络时钟同步技术的进一步研究方向。

关键词 时钟同步, 自组织网络, 综述, 主从同步, 互同步

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Research on Clock Synchronization of Ad Hoc Networks: A Survey

WANG Bo¹ YE Xiao-hui¹ ZHAO Yu-ting² YAN Xue-li¹

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)¹

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710068, China)²

Abstract Clock synchronization, one of the key technologies in ad hoc networks, is the base of the implementation of some network functions. This survey gave an overview of popular clock synchronization methods of ad hoc networks. These methods were classified by some different principles. Then the scalability of approaches above was compared and analyzed, so did the network overhead and synchronization error. Because of the similarity of clock synchronization methods between wireless sensor networks (WSN) and ad hoc networks, some clock synchronization methods of WSN were proposed to be used for ad hoc networks. At last, some developments were introduced, which offer great potential for the new coming problems of clock synchronization.

Keywords Clock synchronization, Ad hoc networks, Survey, Master-slave synchronization, Mutual synchronization

随着科技的不断发展,人们对移动通信需求不断增加。目前移动通信网络结构分为两种:有基础设施网络和无基础设施网络。有基础设施网络虽然性能稳定可靠,但需要预设网络基础设施,且通信覆盖范围受限,因此难以应用于抢险救灾、军事领域、野外作业等特殊场合。为此,需要利用无基础设施网络,一般也称为自组织网络(ad hoc 网络)。ad hoc 网络是一种不依赖预设基础设施而快速组建的临时性网络,网络节点利用自身无线收发设备,采用分布式控制方式进行信息交换,而且可借助中间节点中继实现多跳通信,因此也被称为多跳网^[1]。ad hoc 网络由于自组织、无中心、多跳等特点,使其具备了组网便捷、抗毁性强等优点,因此受到广泛关注。

作为 ad hoc 网络技术研究的关键问题之一,时钟同步是完成多址接入、功率控制、同步跳频、数据聚合等功能的核心技术^[2]。ad hoc 网络中节点时间由节点内部硬件时钟决定,由于制作工艺、外界环境等原因,每个节点的时钟单位时间内表示的时间长度不一定相同,即存在时间漂移。当网络运行一段时间后,节点间就会产生一定的时间偏差,因此需要时

钟同步问题开展研究。同时,ad hoc 网络在不同应用环境下具有不同的时钟同步要求,没有任何一种同步方法能适用于各种应用场景。即便某些方法可应用于多个场景,其同步性能也无法在多个场景下同时达到最优。

本文首先对现有的 ad hoc 网络时钟同步方法进行分类,并分析影响时钟同步精度的主要因素;其次分别对不同类别的时钟同步方法进行比较,分析其优缺点和适用场景;最后提出 ad hoc 网络时钟同步方法应具备的主要性能以及今后的研究方向。

1 ad hoc 网络时钟同步方法分类

时钟同步在 ad hoc 网络中发挥着重要作用。在采用 IEEE 802.11 标准的 ad hoc 网络中,节点通过休眠和唤醒状态的轮换达到节约能量的目的,实现这一功能需要节点在时钟同步的基础上相互协作^[3-5];对采用 TDMA 接入方式的 ad hoc 网络,时钟同步是实现节点时隙对齐和数据无冲突发送的前提^[6-8];作为 ad hoc 网络的一种特殊形式,传感器网络也

到稿日期:2009-06-15 返修日期:2009-09-15

王 波(1980—),男,博士生,主要研究方向为 ad hoc 网络,E-mail:wangair1980@yahoo.com.cn;叶晓慧(1962—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为传感器网络、移动通信、故障诊断;赵玉亭(1977—),男,博士,主要研究方向为 ad hoc 网络;严雪丽(1978—),女,博士生,主要研究方向为传感器网络。

需要进行时钟同步^[9-13]。由于时钟同步在 ad hoc 网络中的重要作用,研究人员展开了大量工作并得出多种时钟同步方法。虽然目前 ad hoc 网络时钟同步方法较多,但根据其同步原理可将同步方法主要分为两类:主从同步和互同步。

1.1 主从同步

主从同步的主要思想是网络中所有节点的时间与主控节点(时间参考节点)保持同步。首先在网络节点中选取主控节点,随后主控节点广播带有自身时间信息的分组。所有收到分组的节点在获取主控节点时间信息后与其保持同步。对于采用主从同步的不同时钟同步方法,其区别主要在于对主控节点的选取和维护方法的不同^[14-16]。此类方法存在两个缺点:一是依赖主控节点,当主控节点位置发生变化或离开网络时,对网络同步性能影响较大;二是当网络规模较大、跳数较多时,远端节点的同步精度受累积误差的影响较大。因此,主从同步更适合于静态拓扑或拓扑变化较慢的小型网络。但如果能对远端节点采取一定的时间补偿措施^[17],此类方法也可在一定条件下应用于大型网络。

1.2 互同步

互同步是一种分布式同步方法,其主要思想是网络中所有节点依据彼此的时间信息进行时钟调节,而不依赖于某个特殊节点。互同步方法无需选取主控节点,每个节点都广播带有自身时间信息的分组,当节点收到邻节点的时间信息后,根据彼此的时间偏差调节时钟,最终实现同步。采用互同步的不同时钟同步方法,其主要区别在于节点广播时间信息的方式以及对邻节点时间信息的处理方式的不同^[2,18,19]。互同步由于不受主控节点限制,因此更适合于移动多跳网络。但此类方法需要存储和处理大量邻节点时间信息,因此对节点的存储计算能力要求较高。此外,虽然互同步方法相比于主从同步具有更多优点,但对于小型静态拓扑网络,主从同步方法却比互同步方法具有更快的收敛速度和更高的同步精度。

2 影响 ad hoc 网络时钟同步精度的主要因素

从上述对 ad hoc 网络时钟同步方法的分类可以发现,任何一种同步方法都需要传递包含时间信息的分组。分组的收发和处理过程如图 1 所示。

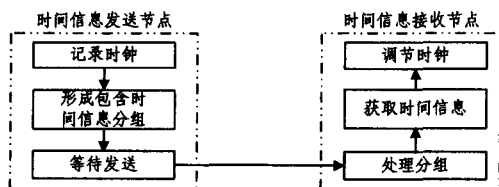


图 1 时间信息分组处理过程

发送节点在记录时间信息后,需要对时间信息进行处理后才能发送,而接收节点同样需要对收到的分组处理后才能获取发送节点的时间信息。因此,从发送节点记录时间信息到接收节点进行时间调节,整个过程必然存在一定的延时。具体来说主要包括以下 4 个方面。

1) 发送处理延时:发送节点记录时间信息后,将时间信息写入规定格式的数据分组中并将数据分组传递到链路层所需的时间;

2) 等待发送延时:时间信息分组根据当前链路闲忙,在链路层等待发送所需的时间;

3) 传输延时:分组在收发节点间传输所需的时间;

4) 接收处理延时:接收节点收到时间信息后,从分组中还原时间信息并调节时钟所需的时间。

上述 4 种延时是影响两个收发节点时钟同步精度的主要因素,而整个网络时钟同步的过程又是网络中所有节点对时间信息分组进行发送和接收的过程,因此其同步精度也必将受到这 4 种延时的影响。

3 ad hoc 网络时钟同步方法

本节首先分析传统网络时钟同步与 ad hoc 网络时钟同步方法的不同之处,其次分别对采用主从同步和互同步的时钟同步方法进行分析比较,最后,提出一些无线传感器网络时钟同步方法中可借鉴之处。

3.1 传统网络时钟同步与 ad hoc 网络时钟同步的区别

传统网络时钟同步方法主要有 NTP(network time protocol)^[20]和 GPS(global position system)^[21,22]两种。NTP 是在 Internet 上广泛使用的同步协议,其针对结构相对稳定的有线传输网络而提出,且需要在网络中配置时间服务器,因此不适用于 ad hoc 网络。GPS 系统能够以纳秒级的精度与世界标准时间保持同步,足以满足 ad hoc 网络同步精度要求。但使用 GPS 需要配置高成本接收机,同时要确保接收机处在可接收多颗卫星信号的位置,这在一定程度上提高了 ad hoc 网络使用成本和使用环境的要求。此外,军事应用中不能依赖 GPS 作为可靠的时钟同步工具,因此该方法也不适用于 ad hoc 网络。

3.2 采用主从同步的 ad hoc 网络时钟同步方法

早期解决 ad hoc 网络时钟同步的方法是主从同步。该方法主要借鉴已有的无线通信网络时钟同步方法,并在此基础上结合 ad hoc 网络的特点进行了一些改进。此外,一些互同步方法也在一定程度上借鉴了主从同步方法的思想,因此首先对主从同步方法进行分析比较。

IEEE 802.11 标准^[23]提出一种单跳 ad hoc 网络的时钟同步协议(IEEE 802.11 TSF)。协议中心思想是将网络中所有节点与时钟最快节点同步,每个节点判断接收到的邻节点时间信息。若快于本站时间,则将本站时间调整为邻节点时间,否则放弃时间信息分组。

Lai Ten H 等对 IEEE 802.11 的同步性能进行分析,发现存在扩展性差、收敛速度慢、只适用于单跳等问题。为了提高同步性能,先后提出 ATSP(Adaptive Time Synchronization Procedure),TATSP(Tiered ATSP),SATSF(Self-Adjusting TSF),MATSF(Mobile Ad Hoc TSF)等多种同步方法^[15,16,24,25]。其中 ATSP 和 TATSP 主要针对 TSF 的扩展性差和收敛速度慢的问题开展研究,通过提高网络中时钟较快节点发送时间信息分组的优先级来提高同步收敛速度和精度。而 SATSF 在进一步提高同步精度的同时,首次提出并解决了同步算法的兼容性问题。MATSF 的不同之处在于它是一种多跳 ad hoc 网络时钟同步方法,该方法结合了 TATSP,SATSF 等方法的优点,并提出了有限时间调节等时钟同步的新问题。

Shen Jang-ping 等针对 TSF,ATSP,TATSP 等存在的问题,提出一种多跳网络时钟同步方法——ASP(Automatic Self-Time-Correcting Procedure)^[26]。ASP 不但改进了时钟

较快节点分组发送优先机制,而且提出了一种时钟自动跟踪方法,利用该方法可在丢失时间同步信息后仍保持与时钟较快节点的同步。不足之处在于难以适应高速变化的网络拓扑。

另外,文献[7,27]分别采用“近似最小连通域”方法实现 ad hoc 网络时钟同步。该方法选取部分节点构建网络的“近似最小连通域”,并规定只有连通域中的节点才能广播系统同步信息,从而减小网络开销。但该方法需要对“类似最小连通域”进行维护,并且远端节点的同步精度受累积误差的影响较大。表 1 列出主从同步算法的性能比较。

表 1 主从同步算法性能比较

同步算法	同步精度	网络开销	收敛速度	可扩展性	网络规模
TSF	低	较低	慢	较差	小
ATSP	中	中	较慢	中	中
TATSP	较高	中	中	较好	较大
SATSP	高	较大	较快	好	较大
MATSF	高	大	快	较好	较大
ASP	较高	中	中	较好	中
近似最小连通域	高	中	较快	好	较大

3.3 采用互同步的 ad hoc 网络时钟同步方法

由上一节的分析可知,主从同步方法更多地适用于单跳 ad hoc 网络,有些算法虽然也适用于多跳网络,但使用时受到一些条件的限制。解决此类问题的最好方法是采用互同步的时钟同步方法。

在分析 IEEE 802.11 TSF 的性能时发现,任意节点成功发送时间信息分组的概率远远大于给定节点^[14]。如果任意节点发送的分组都能用于时钟同步,则同步性能必将大幅提升。Carlos H Rentel 等正是借鉴这一思想,提出一种全新的网络时钟同步算法 CS-MNS^[2],其原理如图 2 所示。该算法基于自动控制原理,利用任何一个成功接收的时间信息分组,在无需进行任何参数估计和直接控制时钟的情况下,实现对节点时间和频率的自动调节。

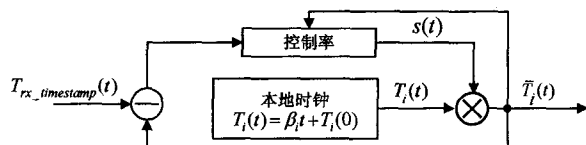


图 2 CS-MNS 算法原理图

该算法具有不依赖特殊节点、无需参数估计、网络开销小、可同时解决入网同步和周期性同步问题等诸多优点,但算法的抗干扰性没有得到验证,并且在时钟调节时没有考虑分组的传输延时和处理延时。

Ebner Andre 等提出采用自相关方法实现网络时钟同步^[28]。方法规定任何接收时间信息的节点可通过一组自相关序列与发送节点同步。但算法的主要目的是用于实现局部同步,并且算法是在时隙间存在保护间隔的情况下考虑同步问题的,因此降低了对同步精度的要求。Zhu Bin 等也提出利用自相关的方法实现时钟同步^[29],且算法适合多跳网络的全网同步,性能优于前者,但对算法的描述略显简单。

Zheng Wen 等针对采用 IEEE 802.11 接口且基于 TDMA 体制的 ad hoc 网络时钟同步问题,借鉴 RBS 互同步算法,实现了“无中心”多跳 ad hoc 网络的精确同步^[18]。算法分为节点选择和时间调整两个阶段。节点选择阶段借鉴 RBS

算法确定下一阶段发射节点,时间调整阶段利用收发节点的多个相关时间信息进行时钟调节。算法无需任何附加信息即可实现收发节点的时钟同步,且同步精度可达到 10μs 以内。但算法具有很强的针对性,因此适用范围有限;其次,文章没有分析算法对网络拓扑变化的适应性。

石江宏等提出了一种 TDMA 体制下 ad hoc 网络时隙互同步算法,对算法的抗干扰性进行了分析和验证,并在此基础上首次研究了消除干扰的时隙互同步方法^[19,30]。方法针对 3 种不同干扰情况进行逐一分析,并提出解决方案。方法中首次提出的同步算法的抗干扰性对提高和验证多跳 ad hoc 网络同步算法性能有一定借鉴作用。

文献[31]首次利用萤火虫同步发光原理研究了 UWB ad hoc 网络的时钟同步问题。由于 UWB 技术在实际应用中的一些限制,Tyrrell Alexander 等提出了用脉冲耦合振荡器模拟萤火虫的生理时钟,振荡器之间通过接收彼此脉冲来调整振荡周期,最终实现同步^[32]。表 2 列出了互同步算法的优缺点比较。

表 2 互同步算法优缺点比较

同步算法	优点	缺点
CS-MNS	无需参数估计、网络开销小、同步精度高	没有考虑传输延时和处理延时的影响
利用自相关序列的互同步算法	允许节点随机加入,在同步精度与收敛速度上达到平衡	需要额外产生自相关序列
借鉴 RBS 的互同步算法	同步精度高,支持语音等实时信息传输	算法收敛速度一般,对网络拓扑变化较敏感
抗干扰互同步算法	可有效消除网络中干扰节点对同步性能的影响,且算法简单	没有考虑网络拓扑变化对同步性能的影响
萤火虫模型互同步算法	采用脉冲耦合振荡器模拟萤火虫生理时钟实现同步	考虑传输延时和节点的半双工特性等问题,算法实用性有待改进

3.4 借鉴无线传感器网络时钟同步的方法

WSN 是 ad hoc 网络的一种特殊形式。两种网络虽然在功能、规模、节点能力等方面存在差异,但在网络时钟同步方面有很多相似之处,例如两种网络时钟同步算法都注重收敛速度、可扩展性、精确度、健壮性等指标。因此,WSN 时钟同步算法中的某些思想可用于 ad hoc 网络。

Elson 等提出了一种 WSN 时钟同步算法 RBS(Reference Broadcast Synchronization)^[33],该算法利用“第三方广播”的思想实现单跳 WSN 的时钟同步。方法消除了同步过程中的发送处理延时和等待发送延时,同时最大限度地降低了传输延时,因此同步精度较高^[34]。文献[18]提出的分布式 ad hoc 网络时钟同步算法正是借鉴了这一算法,但该算法具有较大的消息开销,且只适合单跳网络,因此在用于 ad hoc 网络时需要进行一定的改进。RBS 的实现原理如图 3 所示。

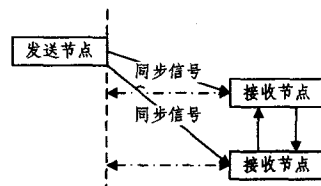


图 3 RBS 实现原理图

Saurabh 等借鉴传统 NTP 协议的成对同步工作方式提出 TPSN(Timing-Sync Protocol for Sensor Networks)协议^[35],协议分为层次发现和同步两个阶段。层次发现阶段用

于建立分级网络拓扑,同步阶段通过双向交换同步数据包实现同步。该算法可用于提高 ad hoc 网络时钟同步精度,但算法网络开销较大,应用于 ad hoc 网络时需要考虑如何减小网络开销。

针对 TPSN 算法消息开销较大的问题,肖琳等提出一种单向广播机制与双向成对机制相结合的简单低功耗时间同步算法 STSP^[36]。相比于 TPSN 中根节点与所有下层节点进行双向同步的方法而言,该算法在相同情况下的网络开销减少了 50% 以上,但同步精度有所下降。因此,在同步精度要求相对较低的情况下,该算法比 TPSN 更适合于 ad hoc 网络。

Li Li 等提出一种分簇 WSN 的时间同步协议 ATS(Average Time Synchronization)^[37],其主要思想是:簇内成员与簇首同步,簇首之间互同步。对于分簇 ad hoc 网络可借鉴此协议实现时钟同步。

结束语 从上述对 ad hoc 网络时钟同步方法的分析比较可以看出,任何场景下,时钟同步方法都对下列性能指标极为关注。

1) 健壮性:时钟同步方法应当在网络环境变化时,在一定程度上继续保持节点间的时钟同步,这也是可扩展性和抗干扰性的一种表现;

2) 同步精度:时钟同步必然要求所有节点的时间偏差控制在一定范围内;

3) 网络开销:任何一种时钟同步方法都应减少同步所需传递的时间信息分组,小的网络开销不但可以增加数据带宽,而且可以减少能量消耗,加快同步速度;

4) 收敛速度:收敛速度与网络开销相对应,小的网络开销往往对应快的收敛速度。

上述指标是确保 ad hoc 网络时钟同步性能的关键,而现有典型同步方法很少能对上述指标进行综合考虑。例如, MATSF 算法虽然提高了同步精度,但没有考虑网络开销问题;CS-MNS 算法虽然具有诸多优点,但没有考虑抗干扰性问题。因此,今后 ad hoc 网络时钟同步研究的重点之一是根据实际应用场景权衡各性能指标,在此基础上有所侧重。此外,时间信息的可靠传输是实现 ad hoc 网络时钟同步的前提,如何减少时间信息分组冲突,提高分组传输可靠性,也是同步方法设计的关键问题。部分文献提出的 TDMA 接入方法虽然在一定程度上解决了上述问题,但灵活性差,采用动态 TDMA 接入方法将有助于性能的提高。

参考文献

- [1] 于弘毅. 无线移动自组织网[M]. 北京:人民邮电出版社,2005: 11-14
- [2] Carlos H R, Thomas K. A mutual network synchronization method for wireless ad hoc and sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(5): 633-646
- [3] Thaker S S, Nandi S, Goswami D, et al. Clock synchronization in IEEE 802. 11 ad hoc networks[J]. Lecture Note in Computer Science, 2004, 3356(1): 180-189
- [4] Chen G N, Wang C Y, Hwang R H. MTSP: muti-hop time synchronization protocol for IEEE 802. 11 wireless ad hoc network[J]. Lecture Note in Computer Science, 2006, 4138(1): 664-675
- [5] Wang C Y, Wu C J, Chen G N, et al. P-MANET: efficient power saving protocol for multi-hop mobile ad hoc networks[C]// third IEEE International Conference on Information Technology and Applications. 2005: 271-276
- [6] Salonidis T, Tassiulas L. Asynchronous TDMA ad hoc networks: scheduling and performance[J]. Euro. Trans. Telecomm., 2005, 15: 391-403
- [7] Zhong X F, Wang Y Z, Mei S L, et al. Synchronization in TDMA ad hoc network[C]// Wireless Technologies for Global Security, IEEE. 2004: 5011-5014
- [8] 徐明霞. Ad hoc 网络中的时分多址接入及跨层设计研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007
- [9] Farrugia E, Simon R. An efficient and secure protocol for sensor network time synchronization[J]. Journal of Systems and Software, 2006, 79(2): 147-162
- [10] Amundson I, Kusy B, Volgyesi P, et al. Time synchronization in heterogeneous sensor networks[J]. Lecture Note in Computer Science, 2008, 5067(1): 17-31
- [11] Faizulkhakov Y R. Time synchronization methods for wireless sensor networks: a survey[J]. Programming and Computer Software, 2007, 33(4): 214-226
- [12] Akar M, Shorten R. Distributed probabilistic synchronization algorithm for communication networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(1): 389-394
- [13] Hu A S, Servetto S D. On the scalability of cooperative time synchronization in pulse-connected networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2725-2748
- [14] Zhou D, Huang L F, Lai T H. On the scalability of IEEE 802. 11 ad-hoc-mode timing synchronization function[J]. Wireless Network, 2008, 14(4): 479-499
- [15] Huang L F, Lai T H. On the scalability of IEEE 802. 11 ad hoc networks[C]//Proc. ACM Mobihoc'02. 2002: 173-182
- [16] Lai T H, Zhou D. Efficient and scalable IEEE 802. 11 ad-hoc-mode timing synchronization function[C]//Proc. of the 17th International Conference on Advanced Information Networking and Applications. 2003: 1-6
- [17] 罗义军. Ad hoc 网络中时间同步方法的研究[J]. 长江大学学报:理工卷, 2007, 4(1): 63-66
- [18] Zheng W, Ung H, Jaeho C. A novel synchronization algorithm for IEEE 802. 11 TDMA ad hoc network[C]// IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. 2007
- [19] 石江宏, 夏龙根, 陈辉煌. TDMA 体制下的移动自组织网时隙同步方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(11): 1973-1976
- [20] Mills D L. Internet time synchronization: the network time protocol[J]. IEEE Trans. on Communications, 1991, 39(10): 1482-1493
- [21] Hofmann B, Lichtenegger H, Collins J. Global position system: theory and practice[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1997: 1-20
- [22] Lombardi M A. Time and frequency measurements using the global positioning system (GPS) [C]// Proc. of Measurement Science Conference. 2001
- [23] IEEE 802. 11 standard (IEEE Computer Society LAN MAN Standard Committee). Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications[S]. USA, 1999
- [24] Zhou D, Lai T H. A compatible and scalable clock synchronization protocol in IEEE 802. 11 ad hoc networks[C]//Proc. of the 2005 International Conference on Parallel Processing. 2005: 295-302

(下转第 39 页)

- [32] Guo L, Crovella M, Matta L. How does TCP generate pseudo-self-similarity? [C]//Proc. of MASCOTS '01, 2001, 8
- [33] 傅雷扬, 王汝传, 王海艳, 等. R/S方法求解网络流量自相似参数的实现与应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(3): 358-362
- [34] Jeong H, Tomber B, Albert R, et al. The large-scale organization of metabolic networks[J]. Nature, 2000, 378: 382
- [35] Newman M. The structure of scientific collaboration networks [J]. Proc. Natl. Acad. Sci., 2001(4): 404-409
- [36] Barabasi A, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 509: 512
- [37] Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C. On power-law relationships of the Internet topology[C]//Proc. ACM SIGCOMM'99, 1999, 251-262
- [38] Bak P. How Nature Works; the Science of Self-organized Criticality[J]. Copernicus, 1996
- [39] Carlson J M, Doyle J. Highly optimized tolerance; A mechanism for power laws in designed systems[J]. Physical Review E, 1999, 60(2): 1412-1426
- [40] Willinger W, Govindan R, Jamin S, et al. Scaling phenomena in the Internet: Critically examining criticality[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002, 99(S1): 2573-2580
- [41] 徐野, 赵海, 苏威积, 等. Internet网络的访问直径分析[J]. 计算机学报, 2006, 29(5): 690-698
- [42] 吴渝, 周凯, 刘群, 等. 突现计算的研究进展[C]//中国人工智能学会年会第12届全国学术年会论文集: 中国人工智能进展. 2007, 12: 974-979
- [43] Hordijk W. Dynamics, Emergent Computation, and Evolution in Cellular Automata[D]. University of New Mexico, 1999
- [44] 曾祥平, 方勇. 基于元胞自动机的网络舆论激励模型[J]. 计算机应用, 2007, 27(11): 2686-2688
- [45] 袁坚, 任勇, 山秀明. 一种计算机网络的元胞自动机模型及分析[J]. 物理学报, 2000, 49(3): 398-402
- [46] Ohira T, Sawatari R. Phase transition in a computer network traffic model[J]. Phys. Rev. E, 1998, 58: 193-195
- [47] Sole R V, Valverde S. Information transfer and phase transitions in a model of Internet traffic[J]. Physica A, 2001, 289: 595-605
- [48] Fuks H, Lawniczak A T. Performance of data networks with random links[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1999, 51: 101-117
- [49] Newman M E J, Jensen I, Ziff R M. Percolation and epidemics in a two-dimensional small world[J]. Phys. Rev. E, 2002, 65: 3109-3113
- [50] Yuan J, Mills K. Exploring Collective Dynamics in Communication Networks[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2002, 107(2): 179-191
- [51] Rouff C, Vanderbilt A, Hinchey M, et al. Verification of emergent behaviors in swarm-based systems [C]//Proceedings of 11th IEEE International Conference and Workshop, 2004
- [52] 伊春华, 方福康. 复杂适应系统 Internet 中的网络流量仿真研究[J]. 系统工程学报, 2005, 20(2): 139-142
- [53] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442
- [54] Zou C C, Towsley D, Gong W. Email worm modeling and defense[C]//Proc. 13th Int. Conf. Computer Communications and Networks (ICCCN'04), 2004: 409-414
- [55] Lind P G, Silva L R D, Jr J e S A, et al. Spreading gossip in social networks[J]. Phys. Rev. E, 2007, 76: 036117
- [56] 陈振毅, 汪小帆. 无尺度网络中的拥塞以其控制[J]. 系统工程学报, 2005, 20(2): 132-138
- [57] 李幼平, 任勇. 双结构互联网[C]//中国复杂系统论坛. 2005
- [58] 张立, 刘云. 虚拟社区网络的演化过程研究[J]. 物理学报, 2008, 57(9): 5419-5424

(上接第 33 页)

- [25] Zhou D, Lai T H. A scalable and adaptive clock synchronization protocol for IEEE 802. 11-based multihop ad hoc networks[C]//Proc. Second IEEE Int'l Conf. Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, 2005: 551-558
- [26] Sheu J P, Chao C M, Sun C W. A clock synchronization algorithm for multihop wireless ad hoc networks[C]//Proc. 24th IEEE Int'l Conf. Distributed Computing Systems, 2004: 574-581
- [27] Cao G T, Welch J L. Accurate multihop clock synchronization in mobile ad hoc networks[C]//Proceeding of the 2004 International Conference on Parallel Processing Workshops, 2004: 13-20
- [28] Ebner A, Rohling H, Lott M, et al. Decentralized slot synchronization in highly dynamic ad hoc networks[C]//The 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, 2002: 494-498
- [29] Zhu B, Miyano T, Hidekazu M, et al. Study on correlation based timing synchronization algorithm for ad hoc networks[C]//The 5th International Conference on Communications and Signal Processing, 2005: 593-597
- [30] Qi Y, Shi J H. An interference elimination method for decentralized slot synchronization in TDMA-based wireless ad hoc networks[C]//International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, 2007: 236-239
- [31] Hong Y W, Scaglione A. Time synchronization and reach-back communications with pulse-coupled oscillators for UWB wireless ad hoc networks[C]//2003 IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, 2003: 190-194
- [32] Tyrrell A, Auer G, Bettstetter C. Fireflies as role models for synchronization in ad hoc networks[C]//Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems, 2006: 1-7
- [33] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[C]//Proc. of the 5th Symp. on Operation Systems Design and Implementation, 2002: 1-7
- [34] Sivrikaya F, Bulent Y. Time synchronization in sensor networks; a survey[J]. IEEE Network, 2004, 18(4): 45-50
- [35] Saurabh G, Ram K, Mani S. Timing synchronization protocol for sensor networks[C]//Proc. of 1st International Conference on Embedded Network Sensor Systems, 2003: 138-149
- [36] 肖琳, 程利娟, 王福豹. 一种低功耗无线传感器网络的时间同步算法[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 126-130
- [37] Li L, Liu Y P, Yang H Z, et al. A precision adaptive average time synchronization protocol in wireless sensor networks[C]//Proceeding of the 2008 IEEE International Conference on Information and Automations, 2008: 65-70