

# 无线传感器网络时间同步机制研究

胡冰 孙知信

(南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室 南京 210003)

**摘要** 时间同步是无线传感器网络中一项重要的底层支撑技术,是实现节点的协同感知、通信、能量管理等网络功能的前提条件。针对无线传感器网络不同的应用需求,相继提出了不同种类的时间同步算法。归纳了无线传感器网络时间同步机制的分类方法,分析了每类典型的时间同步机制,最后总结了无线传感器网络时间同步机制的发展方向 and 未来的研究热点。

**关键词** 无线传感器网络,时间同步,网络洪泛,可塑性干扰

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.7.001

## Overview of Time Synchronization in Wireless Sensor Networks

HU Bing SUN Zhi-xin

(Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology, Ministry of Education, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract** Time synchronization in wireless sensor network is an important underlying technology and the precondition about realizing collaborative awareness, communications, energy management of nodes and other network functions. In light of different application requirements of WSN, many time synchronization algorithms for WSN were studied. Classification methods for time synchronization mechanism in wireless sensor network were summarized, and typical time synchronization mechanism of each type was analyzed in detail. Finally, the development direction of time synchronization mechanism and the open research issues were summarized.

**Keywords** Wireless sensor network (WSN), Time synchronization, Network flooding, Constructive interference

微电子技术的极大进步带动了廉价的、具有无线通信能力和数据处理能力<sup>[1]</sup>的传感器的迅速发展。无线传感器网络 (WSN) 就是由这些传感器组成的分布式网络, 致力于更进一步地观察真实世界的现象。这些传感器有的嵌入到环境中, 有的具有可移动的能力, 它们往往以散播的方式被部署在不可接近的、危险的地方和敌方阵地。无线传感器网络的应用促进了某些领域发展, 其主要应用在军事、环境监测<sup>[2]</sup>、医疗健康<sup>[3]</sup>、科学研究<sup>[4-6]</sup>和居民生活等领域。

在无线传感器网络中, 最基本的操作是数据融合, 该过程通过将来自不同传感器节点的数据融合成一条有意义的信息<sup>[7-12]</sup>, 例如, 在森林火灾监测中, 当有火情进入到无线传感器网络内的任一传感器节点的检测范围时, 它就可以及时地监测到森林火灾的发生, 每一个传感器的信息和时间戳都会被传输到汇聚节点, 因此, 把这些来自不同传感器的信息汇聚起来就可以得到一条全局的信息, 在这种情况下, 所得的全局信息就是火灾被初次检测到的时间和地点。每个传感器读数的融合可能只是交换它们的本地时钟消息, 这就要求传感器节点间的时间要有一个统一的概念, 因此, 能够提供这个统一概念的协议就是时间同步协议<sup>[13]</sup>。

时间同步是无线传感器网络的一项重要的底层支撑技术<sup>[14]</sup>, 其目的是为网络中节点的本地时间提供共同的时间戳<sup>[15]</sup>, 无线传感器节点间的时间同步是实现节点的协同感知、通信、能量管理等网络功能的前提条件。因此, 研究无线传感器网络中的时间同步算法具有重要的理论意义和应用价值。

本文对无线传感器网络的时间同步机制进行了研究, 第1节对同步机制的设计原则及影响同步精度的不确定延迟进行了概述; 第2节将时间同步机制分为双向消息交换同步机制和单向广播同步机制, 并分别分析了两类同步机制目前的主要算法; 最后对本文内容进行了总结和展望。

## 1 无线传感器网络时间同步机制概述

### 1.1 WSN 时间同步机制设计原则

在过去的几十年里, 对有线网络时间同步协议的研究已非常成熟, 目前广泛用于时间同步的协议有 NTP 和 GPS, 但由于无线传感器网络本身的特性, 使得这些协议不适用于无线传感环境中, 无线传感器网络时间同步协议的设计主要考虑以下几个方面:

到稿日期: 2014-07-07 返修日期: 2014-10-03 本文受国家自然科学基金(60973140, 61170276, 61373135), 江苏省产学研项目(BY2013011), 江苏省科技型企业创新基金项目(BC2013027), 江苏省高校自然科学研究重大项目(12KJA520003)资助。

胡冰(1989-), 女, 博士生, 主要研究方向为无线传感器网络时间同步, E-mail: hubing\_2009@163.com; 孙知信(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算机网络与安全、多媒体通信、移动互联网, E-mail: sunzx@njupt.edu.cn.

### 1)可扩展性

由于传感器的廉价和微型化,使得无线传感器网络通常包含数千个传感器节点,并且能够被广泛地部署在检测区域内,因此要求协议在大规模网络中不仅能正常工作,而且要保持较好的性能<sup>[16]</sup>。

### 2)鲁棒性

无线传感器网络通常部署在人们无法接近、危险的环境中,外部环境的变化和传感器故障都会导致网络的高度动态性,这就要求协议能够对这些情况进行处理,保证系统的鲁棒性。

### 3)节点能量有限

因为传感器是由电池供电,能量非常有限,所以时间同步协议的设计要充分考虑节点能量的消耗。

### 4)传输延迟

无线传感器网络传输延迟的不确定性严重影响了时间同步的精度,因此时间同步协议的设计要考虑传输延迟所带来的问题。

## 1.2 影响时间同步精度的不确定延迟

无线传感器网络中,无线信息传输所带来的不确定延迟严重影响了对时间同步精度的需求,因此需要对这些延迟仔细地分析并进行补偿。对消息传输中延迟来源的分解是由Kopetz和Ochsenreiter<sup>[17]</sup>首次提出来的。

发送时间(Send time):发送端用于消息组装和向MAC层发出发送请求的时间,该时间取决于系统开销和当前处理器的负载。发送时间是不确定的,有时可以高达几百毫秒。

介质访问时间(Access time):在信息传输开始前,等待访问传输信道的的时间。介质访问时间是无线传感器网络消息传输延迟中最不确定的一部分,根据当前的网络流量,从几毫秒到几秒不等。

传输时间(Transmission time):发送端发送信息所需的时间,该时间取决于信息的长度和发送端的发送速度,一般在几十毫秒左右。

传播时间(Propagation time):从消息离开发送方开始,传播到接收方所需要的时间。传播时间在无线传感器网络消息传输延迟中最具确定性,仅仅取决于发送端和接收端的距离,该时间一般少于1微秒(300米范围内)。

接收时间(Reception time):接收端接收消息的时间与发送端的传输时间是一样的。在无线传感器网络中,传输时间与接收时间的重叠如图1所示。

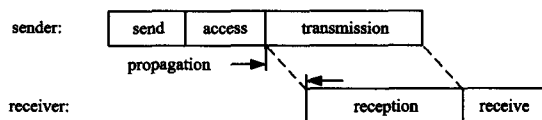


图1 无线信息传输延迟分解

接收处理时间(Receive time):接收端处理接收到的消息并通知接收方应用层的时间,该时间的特点与发送时间相似。

## 2 WSN时间同步机制分析

由于无线传感器网络通常与所监测的真实物理环境紧密相关,不同的网络具有不同的特点,这就对不同网络环境中的

时间同步机制提出了不同的需求。本节根据同步过程中信息交换方式的不同将时间同步算法分为两类:双向消息交换同步机制和单向广播同步机制。并对现有的时间同步算法和需要解决的问题进行归纳总结,针对不同的应用场景,为用户选择合适的时间同步算法提供依据。

### 2.1 双向消息交换同步机制

无线传感器网络中的双向消息交换同步机制分为基于接收者-接收者的时间同步机制和基于发送者-接收者的双向时间同步机制两种。这两种同步机制需要节点间进行两两消息交换来获得同步数据,以达到节点间的相互同步。

#### 2.1.1 基于接收者-接收者的时间同步机制

Elson等人<sup>[18]</sup>提出的RBS(Reference Broadcast Synchronization)是利用无线通信信道的广播特性实现的。根据这一特性,位于同一发送者通信范围内的两个接收者,很有可能在同一时刻接收到相同的消息。如果每个接收者在消息到达时都记录下本地时间,那么在消息到达后,它们互相交换自己的本地时间,根据时间差修正本地时间以达到时间同步。该算法去除了消息传输过程中的两大不确定的误差源:发送时间和介质访问时间,因此RBS可以为无线传感器网络提供较高的时间同步精度。RBS通过广播多个时间同步消息,计算接收节点间消息到达时间差的平均值,同时采用最小平方线性回归方法对时钟偏移进行线性拟合,进一步提高了时间同步的精度。但是,在具有 $n$ 个节点的单跳网络中,该算法需要 $O(n^2)$ 的信息交换。所以,对于大规模的传感器网络来说,大量的信息交换导致时间同步的收敛时间较长,并且带来的能量开销较大。

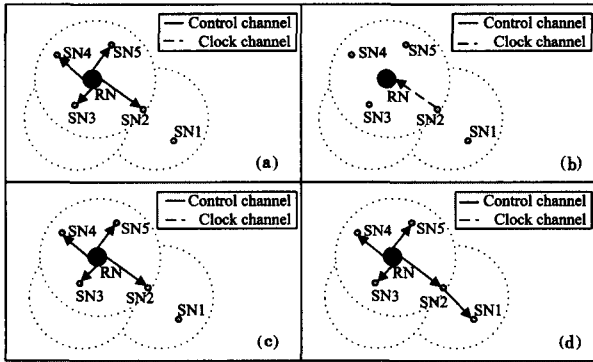
为了减少或者尽量避免RBS中冗余信息的交换,延长网络寿命,文献<sup>[19]</sup>提出了BTSA(Bio-inspired Time Synchronization Algorithm)。该算法在RBS的基础上进行了改进,首先发送节点向它的接收者广播一个参考分组;然后每个接收者记录参考分组到达时的本地时钟;最后根据最优觅食理论(Optimal Foraging Theory)选择一对节点交换记录的本地时钟。最优觅食理论选择算法不仅将参考分组交换的时间复杂度缩减到 $O(nm)$ ,而且潜在地减小了时钟偏移量的存储空间。对于存储空间有限的传感器节点来说,经典的RBS算法并未考虑空间复杂度。

#### 2.1.2 基于发送者-接收者的双向时间同步机制

S. Ganeriwal等人<sup>[20]</sup>提出的TPSN(Timing-Sync Protocol for Sensor Network)与传统的网络时间同步协议NTP类似,采用C/S同步模型,并扩展为全网范围的时间同步算法。TPSN算法的执行分为两个阶段:第一阶段是层次发现阶段(Level Discovery Phase),该阶段建立一种分层的网络拓扑结构,为每一个节点分配一个层次号,并且保证第 $i$ 层节点至少能与第 $i-1$ 层的一个节点进行通信;第二阶段是同步阶段(Synchronization Phase),该阶段实现第 $i$ 层节点向第 $i-1$ 层节点的同步,每个节点的同步都需要与参考节点之间发送两次同步消息。TPSN排除了发送时间、介质访问时间和接收时间对同步精度的影响。并且,节点的同步误差取决于其距离根节点的跳数,与网络中节点总数无关,对于大规模的无线传感器网络来说,同步精度不会随节点数目的增加而降低,与

RBS相比,TPSN能够提供优于RBS近2倍的同步精度。但是,随着网络拓扑结构的变化,需要初始化层次发现阶段,增加了额外的能量开销。

文献[21]提出了一种有效的、轻量级的、多跳的TSRT(Tree Structure Reference Time Synchronization)算法。该算法对TPSN的同步阶段进行了改进,将广播信道分为两类:控制信道和时钟信道。算法的执行过程如图2所示。其融合了RBS和TPSN的思想,在保留RBS优势的基础上,通过仅在少量节点间使用双向信息交换,节约了带宽,降低了节点能耗,而且能够提供较高的同步精度。



(a)Reference node broadcasts;(b)A neighbor replies;  
(c)All neighbors are synchronized;(d)Repeat at lower layers

图 2

为了减少时间同步过程中数据包的传输数量,节约节点能量,文献[22]提出了一种节能的时间同步算法EETS(Energy-Efficient Time Synchronization for Wireless Sensor Networks)。该算法的执行分为两个阶段:第一阶段是层次发现阶段,与TPSN的分层方法一样;第二阶段是同步阶段,该阶段采用广播和单播同时进行的方式,实现不同层次节点间的时间同步,因为广播方式的一个优点就是任何广播消息都可以被传递到多个节点,因此EETS非常有效地减少了同步过程中节点间产生的消息数量,降低了节点能耗。

Mihail L. Sichitiu等人[23]针对WSN的节点能量、存储及处理能力有限提出了轻量级时间同步算法tiny-sync/mini-sync。该算法采用树状结构实现WSN节点的时间同步,提供具有确定误差上界的频偏和相偏估计,并且根据在较长一段时间内时钟晶体振荡频率保持不变的原理,只需要经过一次同步便可保证一段时间内节点间的同步,在这段时间内不需要进行二次同步,但是不适用于需要长期监测的WSN应用。

## 2.2 单向广播同步机制

在双向消息交换同步机制中,节点间的同步至少需要2次消息交换。而单向广播同步机制是通过单向的广播消息来同步广播域内的所有节点,由此可见,单向广播同步机制的通信开销较小。根据消息洪泛机制的不同将单向广播同步机制分为基于CSMA的洪泛时间同步机制和基于可塑性干扰的洪泛时间同步机制两种。

### 2.2.1 基于CSMA的洪泛时间同步机制

Su Ping等人[24]提出的DMTS(Delay Measurement Time Synchronization Protocol)是一种灵活的、轻量级的无线传感器网络时间同步算法,在单跳网络中,只需要一次消息广播即

可实现节点间的时间同步;对于多跳网络,DMTS采用层次分级结构实现全网范围的节点同步,上一级节点在调整好本地时钟后,使用单跳网络的同步方式与下一级节点完成同步。DMTS是在监听到信道空闲后,才为同步数据包标记时间戳并将其发送出去,这样就消除了发送端的发送时间和介质访问时间,并且忽略了同步数据包的传播时间。该算法的计算复杂度小、能耗低、易于实现,但都是以牺牲同步精度为代价的。

Miklos Maroti等人[25]首次提出的FTSP(Flooding Time Synchronization Protocol)是专为精度要求高的应用和能量有限的无线平台量身设计的,其通信过程使用较低的通信带宽,并且对节点和链路故障具有较好的鲁棒性。该算法通过定期洪泛同步消息和潜在的动态拓扑更新来获得较好的健壮性,并且由MAC层的时间戳技术和包括时钟偏移估计在内的综合误差补偿得到较高的时间同步精度,其目标是实现全网范围的时间同步。但是,该算法本身依然存在洪泛时间长、误差累计等关键问题,且在同步精度与能耗问题上仍有提升空间。目前对FTSP优化方法的研究着眼于同步精度和能耗问题。文献[26]提出了RTSP(Recursive Time Synchronization Protocol)算法,该算法采用基于帧起始定界符的MAC层时间戳机制、广播延迟补偿机制和对每跳的时间戳进行调整等方法来获得较高的时间同步精度,并且采用递归消息应答机制减少节点需要广播的时间同步消息,结合良好的根节点选取方法和自适应的全网同步频率,实现低功耗的全网时间同步,但RTSP协议忽视了同步收敛速度的重要性,节点间的递归请求与应答过程耗费了大量时间,且全网同步精度受跳数影响,只适用于小规模无线传感器网络。针对节点运行环境对时钟振荡频率的影响而导致的同步数据传输间隔的调整,文献[27]提出了D-FTSP算法。该算法根据WSN应用程序对时间同步精度的需求和邻居节点时钟的稳定情况,动态地改变节点的传输间隔。D-FTSP消除了FTSP在某个特定环境下需要确定和预配置合适的节点传输时间间隔的需求,因此它需要的运行环境不需要预知,从而可快速地部署无线传感器网络,并且节能效果明显,可延长节点的使用寿命。文献[28]提出的HTSP算法在FTSP的基础上,采用高精度的时钟偏差校准方法来提高单跳同步精度,改善异常情况下的处理能力以达到稳定的时间同步,但对于能耗、同步收敛速度及可扩展性等关键问题都没有进行研究。FTSP及其优化方法由于都是基于CSMA的洪泛机制,因此收敛速度慢,资源消耗较大,虽然个别性能上有些许提升,但无法解决FTSP固有的缺陷。为了弥补这些缺陷,需要提出一种新的洪泛机制。

### 2.2.2 基于可塑性干扰的洪泛时间同步机制

可塑性干扰(Constructive Interference)是由Dutta等人[29]发现的一种新的并行传输技术,该技术可以缓解ACK风暴问题[30],减小确认数据包的传输延迟及提高数据包传输的可靠性。

Glossy是由Federico Ferrari等人[14]针对无线传感器网络而提出的一种新的洪泛结构。与FTSP并行地执行网络洪泛和时间同步的方式不同,它是基于可塑性干扰来实现网络的快速洪泛和节点间潜在的时间同步,该算法的思想源于协

作通信方案<sup>[31]</sup>。Lenzen 等人<sup>[32]</sup>表明快速的网络洪泛可以减小时钟漂移带来的问题,所以这对实现最佳的同步是必要的。Glossy 通过采用 Schmid 等人<sup>[33]</sup>提出的虚拟高分辨率时间(Virtual High-resolution Time, VHT)方法,能够在几毫秒内完成数据包的洪泛,因此可获得更高的同步精度。Glossy 通过引入基于可塑性干扰的并发网络洪泛机制,使得节点不用维护邻居状态信息,极大程度地节约了资源,同时网络节点间不用进行协商,洪泛速度快。并且,Glossy 抛弃了 FTSP 的时间戳洪泛方式,仅在洪泛数据报中插入转发次数和初始节点的参考时间,再通过估算单跳转发时延和补偿时钟漂移,使后续节点与初始节点保持时间同步,在保证同步精度的同时避免了重复洪泛带来的巨大开销。但是,Glossy 存在严重的可扩展性问题,面对高密度大范围的传感器网络丢包严重。

为了解决 Glossy 在数据洪泛过程中存在的可扩展性问题,Yin Wang 等人<sup>[34]</sup>提出了 SCIF 协议。SCIF 通过建立虚拟网络,为每一个网络选择一个骨架关键节点进行配置,从而构建出随机动态拓扑中的虚拟网络骨架。SCIF 中只有被选择出来的骨架关键节点进行洪泛数据包的转发,其余节点接收到数据包后不再进行转发,从而大大减少了网络的负载,提高了网络的可靠性和可扩展性。但是,SCIF 仅对 Glossy 中数据包的洪泛过程进行了改进,并未对时间同步过程中的精度及能耗等问题进行分析考虑。

**结束语** 近些年,研究人员针对不同的无线传感器网络应用需求提出了不同的时间同步机制。以上介绍的时间同步算法具有各自的特点,但都或多或少地存在需要改进的地方。在双向消息交换同步机制中,基于接收者-接收者的时间同步机制的误差源主要集中在接收节点间的处理时间,同步精度较高,但对于大规模的无线传感器网络来说,网络负载较大,同步收敛时间长;基于发送者-接收者的双向时间同步机制适用于不能忽略传播时间的应用环境中,但其只能实现相位偏移瞬时同步。在单向广播同步机制中,基于 CSMA 的洪泛时间同步机制的通信量较低,能量高效,可实现全网范围的时间同步。但随着网络规模的不断扩大,网络流量增大,其会造成节点无谓的能量损耗<sup>[36]</sup>;基于可塑性干扰的洪泛时间同步机制采用并行的洪泛方法,解决了报文冲突带来的问题,具有较好的可扩展性。对同步精度及节点能耗方面的分析是以后研究的重点。

本文对 WSN 的时间同步算法进行了分类,从网络洪泛与时间同步间的关系来看,时间同步协议由最初单一的时间同步到基于洪泛的时间同步,并向着洪泛与时间同步融合的方向发展。可塑性干扰这一物理现象最近几年在无线传感器网络方面得到了很好的应用<sup>[35]</sup>,并且基于可塑性干扰的洪泛时间同步机制不但解决了 WSN 动态拓扑带来的问题,而且保证了大规模网络下的可靠性和可扩展性,是无线传感器网络时间同步机制未来的一个研究方向。

## 参 考 文 献

[1] Hill J, Horton M, Kling R, et al. The platforms enabling wireless sensor networks[J]. *Communications of the ACM*, 2004, 47(6):41-46

[2] Bhattacharjee S, Roy P, Ghosh S, et al. Wireless sensor network-based fire detection, alarming, monitoring and prevention system for Bord-and-Pillar coal mines[J]. *Journal of Systems and Software*, 2012, 85(3):571-581

[3] Johnson P, Andrews D. Remote continuous physiological monitoring in the home[J]. *Journal of Telemedicine and Telecare*, 1996, 2(2):107-113

[4] Akyildiz IF, Akan ÖB, Chen C, et al. InterPlaNetary Internet: state-of-the-art and research challenges [J]. *Computer Networks*, 2003, 43(2):75-112

[5] Burleigh S, Cerf V, Durst R, et al. The InterPlaNetary Internet: a communications infrastructure for Mars exploration[C]// *The New Face of Space Selected Proceeding of the 53rd International Astronautical Federation Congress*. 2002, 53:365-373

[6] Lemmerman L, Delin K, Hadaegh F, et al. Earth science vision: platform technology challenges [C]// *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2001 (IGARSS'01). *IEEE 2001 International*. 2001, 1

[7] Dobra A, Garofalakis M, Gehrke J, et al. Processing complex aggregate queries over data streams[C]// *Proceedings of the 2002 ACM SIGMOD international conference on Management of Data*. 2002:61-72

[8] Madden S, Szewczyk R, Franklin M J, et al. Supporting aggregate queries over ad-hoc wireless sensor networks[C]// *2002 Proceedings Fourth IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*. 2002:49-58

[9] Woo A, Madden S, Govindan R. Networking support for query processing in sensor networks [J]. *Communications of the ACM*, 2004, 47(6):47-52

[10] Yao Y, Gehrke J, et al. Query Processing in Sensor Networks [C]// *Proceedings of CIDR*. 2003:233-244

[11] Yu X, Niyogi K, Mehrotra S, et al. Adaptive middleware for distributed sensor environments [J/OL]. <http://www.ics.uci.edu/~xyu/pub/cvip3.pdf>

[12] Zhao J, Govindan R, Estrin D, et al. Computing aggregates for monitoring wireless sensor networks[C]// *2003 Proceedings of the First IEEE 2003 IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications*. 2003

[13] Sundararaman B, Buy U, Kshemkalyani A D. Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey [J]. *Ad hoc Networks*, 2005, 3(3):281-323

[14] Ferrari F, Zimmerling M, Thiele L, et al. Efficient network flooding and time synchronization with Glossy[C]// *2011 10th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*. 2011

[15] Elson J, Römer K. Wireless sensor networks: A new regime for time synchronization[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2003, 33(1):149-154

[16] Sivrikaya F, Yener B. Time synchronization in sensor networks: a survey[J]. *Network, IEEE*, 2004, 18(4):45-50

[17] Kopetz H, Ochsenreiter W. Clock synchronization in distributed real-time systems[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1987, 100(8):933-940

- Copying Detection in a Dynamic World [J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2009, 2(1): 562-573
- [7] Sarma A D, Fang L, Gupta N, et al. Finding Related Tables [C]// Proc of the 2012 ACM SIGMOD Int Conf on Management of Data. New York: ACM, 2012; 817-828
- [8] Eberius J, Thiele M, Braunschweig, et al. DrillBeyond: Enabling Business Analysts to Explore the Web of Open Data [J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2012, 5(12): 1978-1981
- [9] Theodoros R, Xin L D, Divesh S. Characterizing and Selecting Fresh Data Sources[C]// Proc of the 2014 ACM SIGMOD Int Conf on Management of Data. New York: ACM, 2014; 919-930
- [10] 孟小峰, 慈祥. 大数据管理: 概念、技术与挑战[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(1): 146-169  
Meng Xiao-feng, Ci Xiang. Big Data Management: Concepts, Technology and Challenges [J]. Journal of Computer Research and Development, 2013, 50(1): 146-169
- [11] Babcock B, Chaudhuri S, Das G. Dynamic Sample Selection for Approximate Query Processing[C]// Proc of the 2003 ACM SIGMOD Int Conf on Management of Data. New York: ACM, 2003; 539-550
- [12] Cafarella M J, Halevy A, Wang D Z, et al. Uncovering the Relational Web[C]// Proc of the 11th Int Workshop on the Web and Databases( WebDB 2008). Vancouver, 2008
- [13] Bollacker K, Evans C, Paritosh P, et al. Freebase: a Collaboratively Created Graph Database for Structuring Human Knowledge[C]// Proc of the 2008 ACM SIGMOD Intl Conf on Management of data. New York: ACM, 2008; 1247-1250
- [14] Lee T, Wang Z, Wang H, et al. Attribute Extraction and Scoring: A Probabilistic Approach[C]// Proc of the 2013 IEEE Int Conf on Data Engineering (ICDE). Washington, DC: IEEE, 2013; 194-205
- [15] Dong X L, Berti-Equille L, Srivastava D. Integrating Conflicting Data: The Role of Source Dependence [J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2009, 2(1): 550-561
- 
- (上接第 4 页)
- [18] 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
- [19] Liu L, Xiao Y, Zhang J, et al. A bio-inspired time synchronization algorithm for wireless sensor networks[C]// 2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology (IC CET). 2010, 114: 306-311
- [20] Ganerwal S, Kumar R, Srivastava M B, et al. Timing-sync protocol for sensor networks[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, 2003
- [21] Rahamatkar S, Agarwal A. An Approach towards Lightweight, Reference Based, Tree Structured Time Synchronization in WSN [D]. Advances in Computer Science and Information Technology, Springer, 2011; 189-98
- [22] Kim B-K, Hong S-H, Hur K, et al. Energy-efficient and rapid time synchronization for wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010, 56(4): 2258-2266
- [23] Sichert M L, Veerarittiphan C, et al. Accurate time synchronization for wireless sensor networks[C]// Wireless Communications and Networking, 2003(WCNC 2003). IEEE, 2003; 153-163
- [24] Ping S. Delay measurement time synchronization for wireless sensor networks[J]. Intel Research Berkeley Lab, IRB-TR-03-013, 2003
- [25] Maróti M, Kusy B, Simon G, et al. The flooding time synchronization protocol[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, 2004
- [26] Akhlaq M, Sheltami T R, et al. The recursive time synchronization protocol for wireless sensor networks[C]// 2012 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). 2012
- [27] Shannon J, Melvin H, Ruzzelli A G, et al. Dynamic flooding time synchronisation protocol for WSNs [C] // 2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2012
- [28] Wang F, Zeng P, Yu H, et al. The design and realization of High-Precision Time Synchronization Protocol in Wireless Sensor Networks based on FTSP[C]// 2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). 2010
- [29] Dutta P, Musaloiu-E R, Stoica I, et al. Wireless ACK collisions not considered harmful[C]// In HotNets-VII; Proceedings of the 7th Workshop on Hot Topics in Networks. 2008; 19-24
- [30] Tseng Y-C, Ni S-Y, Chen Y-S, et al. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network[J]. Wireless networks, 2002, 8(2/3): 153-167
- [31] Sirkeci-Mergen B, Scaglione A, Mergen G. Asymptotic analysis of multistage cooperative broadcast in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2531-2550
- [32] Lenzen C, Sommer P, Wattenhofer R, et al. Optimal clock synchronization in networks [C] // Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, 2009
- [33] Schmid T, Dutta P, Srivastava M B, et al. High-resolution, low-power time synchronization an oxymoron no more[C] // Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks. ACM, 2010
- [34] Wang Y, He Y, Mao X, et al. Exploiting constructive interference for scalable flooding in wireless networks[C] // 2012 Proceedings IEEE INFOCOM. 2012
- [35] Doddavenkatappa M, Chan M C, Leong B, et al. Splash: Fast data dissemination with constructive interference in wireless sensor networks[C]// NSDI; Proc of the USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation. 2013
- [36] 王义君. 面向物联网的无线传感器网络时间同步与寻址策略研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2012  
Wang Yi-jun. Time synchronization and addressing strategy of IoT-oriented wireless sensor networks[D]. Jilin, Jilin University, 2012