

CAMBRIDGE

Erchin Serpedin and Qasim M. Chaudhari

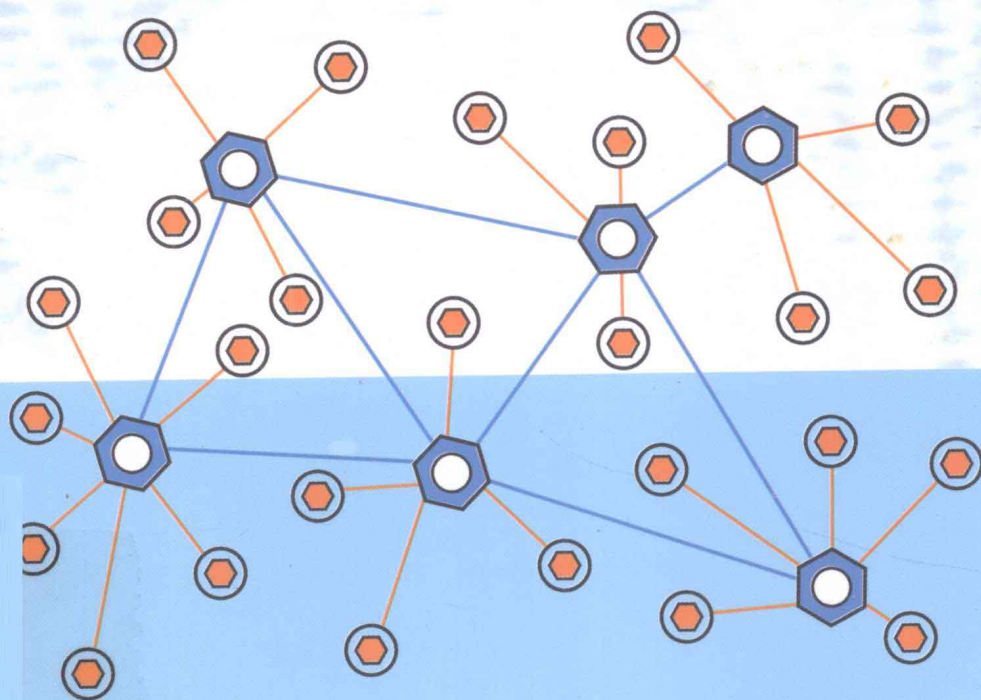
无线传感器网络中的同步技术

——参数估计、性能基准及协议

Synchronization in Wireless Sensor Networks

Parameter Estimation, Performance Benchmarks and Protocols

[美] 阿钦·瑟潘汀 著
[巴基] 卡西姆·M·乔哈里 著
唐万斌 冯娴静 等 译



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

Synchronization in Wireless Sensor Networks:
Parameter Estimation, Performance Benchmarks and Protocols

无线传感器网络中的同步技术

——参数估计、性能基准及协议

〔美〕 阿钦·瑟潘汀
Erchin Serpedin

〔巴基〕 卡西姆·M·乔哈里
Qasim M. Chaudhari

著

唐万斌 冯娴静 等 译



西安交通大学出版社
Xi'an Jiaotong University Press

译者序

无线传感器网络作为一种特殊的无线自组织(ad-hoc)网络,在没有共同基础设施的条件下,采用多跳的通信方式,自发、协同地把信息以数据包形式从上一个传感器节点传送到下一个节点,直至信宿。由于其具有部署的高度灵活性,并且功耗低、成本低廉,在军事和工业中正在或即将获得大量的应用,如监控人体、动物和植物各个部位的健康状况以及环境状况;工业机械和家庭电器的控制和测试;国土安全;检测各种化学和生物威胁与漏洞等等。正是由于其广泛的应用前景,它已经被视为未来通信的基本架构之一,也是方兴未艾的物联网中的关键组成部分。

然而无线传感器网络的应用也面临着诸多的挑战,如时间同步问题。在传感器网络中,数据融合、功率管理、传输调度、定位跟踪等功能都需要较高的时间同步精度。如何在能量有限且恶劣的无线信道条件和时变的拓扑环境中,为无线传感器网络提供满足应用需求的时间同步功能就成为极具挑战性的技术问题。

本书即瞄准这一挑战,全面地分析和总结了针对无线传感器网络的现有时钟同步协议。对这些协议由浅入深地,从模型、理论性能到方案设计等多个方面,给出了客观合理的评价,为广大工程研究人员提供了时间同步算法和方案设计的参考。

本书技术性较强,需要读者对信号参量估计和相关通信协议有一定的了解,如果读者需要补充这些方面的知识,可以参考在书中介绍的相关书籍。

参与本书翻译工作的还有冯娴静、卢小莉、张涛、梁小峰、杜贤峰、孙召、文义金等。由于译者的时间和水平有限,翻译中的疏漏和错误在所难免,请读者和同行不吝指正。

感谢西安交通大学的任品毅教授,他从本书的翻译之日起就一直关心本书的出版,不断给予指导和帮助,并在百忙之中进行了校对,使得译者在翻译工作中受益匪浅。

唐万斌

2012年4月

前言

在无线传感器网络(WSNs; Wireless Sensor Networks)中,解决时钟或时间同步问题需要设计合理有效的同步过程:为网络中的各个节点提供公共的时间基准。一般,由于无线传感器网络的无中心拓扑结构、各节点本地震荡器的非理想化以及物理层和 MAC 层的信息传输时延造成的定时不确定性,使得时钟同步通常被视为维持无线传感器网络良好功能的关键因素。除此以外,无线传感器网络的同步,也是实现一些基本功能的关键,如功率管理、传输调度、数据融合、定位和跟踪以及安全协议等。

本书的目的是从统计信号处理的角度,为读者介绍无线传感器网络中时钟同步问题的解决方案。因此本书中大部分的内容将针对通用的同步方案,包括发送端—接收端和接收端—接收端定时信息包交互机制,构建有效的时钟偏移估计算法,以及性能基准。本书总结了无线传感器网络中最具代表性的时钟同步协议的关键属性,同时给出了一些有趣的开放研究问题。

目前,无线传感器网络的同步问题得到了广泛的关注,也有了大量的成果,这些贡献来自于多个不同方面的研究者,包括计算机科学家、电子工程师、数学家和统计学家等。尽管有了一定的成果,但为大规模无线传感器网络设计有效的全局同步协议仍是一个开放的研究课题,目前的成果还缺乏综合设计和优化研究,即没有以系统的方式来评估和改善协议性能。虽然本书也没有解决这个问题,但确定了一个合理的目标:为简单的基于发送端—接收端和接收端—接收端定时信息包交互同步协议,提供有效的同步算法和性能基准。除了这个并不宏伟的目标,本书为那些研究现有同步协议的研究者,包括网络时间协议(NTP: Network Time Protocol)、传感器网络时间同步协议(TPSN: Time Protocol for Synchronization of Sensor Network)、参考广播同步协议(RBS: Refer-

ence Broadcast Synchronization)和成对广播同步协议(PBS: Pairwise Broadcast Synchronization)等,以及希望能找到现有协议改进方法和研发新方法的研究者有帮助。

本书包括 15 章,第 1 章是对时间同步问题的历史、重要性等的简短介绍。第 2 章给出了设计无线传感器网络时间同步协议时必须考虑的主要约束。第 3 章讲述了最具代表性的同步协议,给出了他们主要的特性。第 4 章讨论了无线传感器网络中三种通用的分组同步方法。第 5 章到第 14 章,详细讲述了一系列改善时钟相位偏移的统计信号处理算法,以及其性能基准。不同估计算法的结果、改进方法以及相互的关系都在此描述。首先,本书重点讲述了在网络延迟是正态或指数分布时,时钟偏移估计器的结构和性能。但是,通常情况下,网络延时的分布是无法准确预测的,而目前现有文献中的算法对于未知且时变的网络延迟分布非常敏感,因此在第 14 章,我们讨论了如何设计对网络延迟分布具有鲁棒性的时钟偏移估计。最后,在第 15 章,总结了本书的内容并给出了一些进一步的研究问题。

如果没有 Bruce Suter 博士的支持和鼓励,以及我们学生的帮助,本书无法面世。衷心感谢 Bruce、我们的家人和学生(Kyoung-Lae Noh、Jangsub Kim、Yik-Chung Wu、Ilkay Sari、Jaehan Lee 和 Sabit Ekin)。书中错误难免,如果读者发现其中的错误,请反馈给下面的电子邮箱: eserpedin@gmail.com。欢迎来信以改进本书。本书的网页地址为: <http://www.ece.tamu.edu/~serpedin>。

目 录

译者序

前言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 无线传感器网络	(1)
1.2 时间同步	(2)
1.3 时间同步的重要性	(3)
1.4 时钟同步的研究进展	(3)
1.5 本书概述	(5)
第 2 章 时间同步的信号模型	(8)
2.1 时钟定义	(8)
2.2 设计要点	(9)
2.3 定时信息传输中的延时构成	(10)
第 3 章 时间同步协议	(12)
3.1 成对同步	(13)
3.1.1 传感器网络定时同步协议(TPSN)	(13)
3.1.2 TINY-SYNC 和 MINI-SYNC	(14)
3.1.3 参考广播同步(RBS)	(15)
3.1.4 泛洪时间同步协议(FTSP)	(16)
3.2 全网同步	(17)
3.2.1 TPSN 的扩展	(17)
3.2.2 低复杂度时间同步(LTS)	(17)
3.2.3 RBS 的扩展	(18)
3.2.4 FTSP 的扩展	(18)
3.2.5 成对广播同步(PBS)	(18)
3.2.6 时间扩散协议(TDP)	(19)

3.2.7	同步和异步扩散算法	(20)
3.2.8	基于脉冲传输的协议	(21)
3.3	自适应时间同步	(22)
3.3.1	速率自适应时间同步(RATS)	(22)
3.3.2	基于RBS的自适应时钟同步	(23)
3.3.3	自适应多跳时间同步(AMTS)	(23)
第4章	时间同步的基本方法	(25)
4.1	发送端-接收端同步(SRS)	(25)
4.2	仅接收端的同步(ROS)	(28)
4.3	接收端-接收端同步(RRS)	(31)
4.4	比较	(32)
第5章	时钟偏移的最小方差无偏估计(MVUE)	(34)
5.1	系统架构	(34)
5.2	利用顺序统计的最优线性无偏估计(BLUE-OS)	(36)
5.2.1	对称链路延迟	(37)
5.2.2	非对称链路延迟	(39)
5.3	最小方差无偏估计(MVUE)	(41)
5.3.1	非对称链路延迟	(42)
5.3.2	对称链路延迟	(45)
5.4	解释性说明	(47)
第6章	时钟相偏和频偏估计	(51)
6.1	高斯延迟模型	(51)
6.1.1	时钟相偏的最大似然估计(ML)	(52)
6.1.2	时钟相偏估计的克拉美-罗下界(CRLB)	(52)
6.1.3	时钟偏移和偏斜的联合最大似然估计(JMLE)	(52)
6.1.4	时钟相偏和频偏估计的克拉美-罗下界(CRLB)	(55)
6.2	指数延迟模型	(57)
6.2.1	时钟相偏的克拉美-罗下界(CRLB)	(57)
6.2.2	时钟偏移和偏斜的联合最大似然估计(JMLE)	(59)
第7章	时钟相偏和频偏估计的简化方案	(75)
7.1	运用第一个和最后一个数据采样	(75)

7.1.1	高斯延迟模型	(76)
7.1.2	指数延迟模型	(77)
7.1.3	合并时钟相偏和频偏估计	(79)
7.1.4	仿真结果	(80)
7.2	最小距离两点的线性拟合	(82)
7.2.1	仿真结果	(84)
7.2.2	计算复杂度比较	(85)
第 8 章	成对广播同步(PBS)	(87)
8.1	单簇网络的同步	(87)
8.2	对比和分析	(88)
8.3	多簇网络的同步	(89)
8.3.1	全网成对选择算法(NPA)	(90)
8.3.2	基于组的成对选择算法(GPA)	(92)
8.4	对比和分析	(95)
第 9 章	非活动节点的高能效时钟估计	(98)
9.1	问题描述	(99)
9.2	最大似然估计(MLE)	(100)
9.3	克拉美-罗下界(CRLB)	(109)
9.3.1	不活动节点时钟偏移 $\hat{\phi}_q$ 的 CRLB	(110)
9.3.2	活动节点时钟偏移 $\hat{\phi}_p$ 的 CRLB	(113)
9.4	仿真结果	(114)
第 10 章	对非活动节点时钟同步的一些改进和广义估计方案	(116)
10.1	非对称指数链路延迟	(116)
10.1.1	利用顺序统计量的最佳线性无偏估计(BLUE-OS)	(118)
10.1.2	最小方差无偏估计(MVUE)	(121)
10.1.3	最小均方误差估计(MMSE)	(124)
10.2	对称指数链路延迟	(126)
10.2.1	利用顺序统计量的最佳线性无偏估计(BLUE-OS)	(126)
10.2.2	最小方差无偏估计(MVUE)	(128)
10.2.3	最小均方误差估计(MMSE)	(130)

第 11 章 自适应多跳时间同步 (AMTS)	(131)
11.1 主要概念	(131)
11.2 层次发现阶段	(132)
11.3 同步阶段	(133)
11.4 网络估计阶段	(133)
11.4.1 同步模式选择	(133)
11.4.2 同步周期判定	(134)
11.4.3 决定信标数	(135)
11.4.4 连续多跳同步算法 (SMA)	(137)
11.5 仿真结果	(138)
第 12 章 为实现长期同步的时钟漂移估计	(140)
12.1 问题阐述	(141)
12.2 估计过程	(141)
第 13 章 接收端-接收端协议中时钟偏移和频偏的联合同步	(146)
13.1 模型假设	(146)
13.2 偏移和频偏的联合最大似然估计 (JMLE)	(147)
13.3 吉布斯采样器的应用	(148)
13.4 性能界和仿真	(149)
第 14 章 时钟偏移的鲁棒估计	(153)
14.1 问题建模和目标	(155)
14.2 高斯混合卡尔曼粒子滤波器 (GMKPT)	(156)
14.3 测试 GMKPF 的性能	(158)
14.4 基于 bootstrap 采样的复合粒子滤波 (CPF)	(163)
14.5 测试 CPF 及联合 BS 的 CPF 的性能	(170)
第 15 章 结论及未来研究的方向	(177)
缩略词	(179)
参考文献	(182)

第 1 章

绪论

1.1 无线传感器网络

随着微机电系统(MEMS:micro-electro-mechanical systems)和无线通信的技术进步,具有低成本、低功耗和多功能的无线传感器获得了快速发展。当把这些传感器部署在一个广泛的地理区域中,它们能够采集环境信息并且形成一个分布式通信网络协作地处理这些信息,这样就组成了一个无线传感器网络(WSN:wireless sensor network),如图 1.1 所示。无线传感器网络是一种特殊的无线自组织(ad-hoc)网络,它是假定在没有共同基础设施的条件下,采用多跳的通信方式,传感器自发、协同地把信息以数据包形式从上一个传感器节点传送到下一个节点,直至信宿。无线传感器网络的实际应用保持着高速增长的势头,这些应用包括:监控人体、动物和植物各个部位的健康状况以及环境状况;工业机械和家庭电器的控制和测试;国土安全;检测各种化学和生物威胁与漏洞;等等^[2,14,75,100]。正是由于其广泛的应用前景,它已经被视为未来通信的基本架构之一。

在设计传感器网络的时候,需要考虑许多重要因素,如:可容忍的失效节点数量,可扩展性,动态网络拓扑,硬件的约束条件,生产成本和功耗,等等。因为在传感器网络部署后,通常传感器节点不易回收,所以可以认为传感器网络的寿命取决于电池寿命。而且,由于传感器节点的空间大小限制和其它约束条件,在实际无线传感器网络中,能源是一种稀缺资源。基于这些原因,能量效率是设计无线传感器网络时应该优先考虑的设计因素。在无线传感器网络中,数据通信是系统最重要的操作之一,并且占用很大一部分的能量消耗。事实上,在传感器网络中数据通信需要的能量远大于数据处理所需要的能量^[75]。

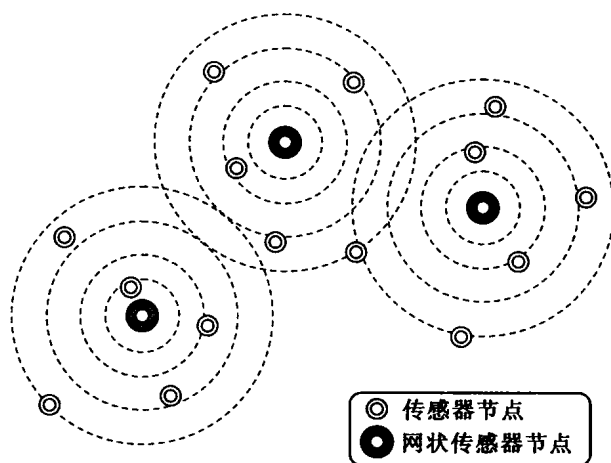


图 1.1 无线传感器网络图

1.2 时间同步

在分布式系统中,维持计算机的逻辑时钟,使得不同计算机之间的时钟不至于相差太多,是计算机工程中最复杂的问题之一。无论是让计算机的时钟同步于全球定位系统(GPS:global position system)卫星还是在互联网上的网络时间协议(NTP:network time protocol)时间服务器,都需要通过一个公共的基础通信设施,使得大量的次级时间服务器或用户设备连接并同步于某些主时间服务器的时钟。在分布式网络中,为了做到这一点,其时钟同步协议是需要完成对服务器时钟的读取,传输时钟信息和在客户端调整时钟的任务。在这种分布式同步方法中,多方设备可以与其选择的时钟参考,定期地交互时间信息并相应地调节其逻辑时钟。

一般说来,一个计算机时钟包括两个组成部分,频率源和累加定时触发(含一个时钟中断机制和一个用软件实现的计数器)。在不同的硬件平台和操作系统中,其时钟的实现和编程接口可能有所区别。但是定时误差的基本来源是无法补偿的石英晶体振荡器和它产生的时钟中断。理论上讲,只有两个时钟的偏移完全相同,并且频率源的频率相同,它们才能保持同步。然而,实际上时钟的偏移设置精度有限,并且频率源的频率也略有不同。除此以外,晶体振荡器的频率受初始制造公差、老化程度、温度、压强和其它因素的影响而变化。由于这些固有的不稳定性,分布式时钟必须定期进行同步调整。

1.3 时间同步的重要性

时间同步是为分布式系统提供一个共同的时间基准的过程。当执行许多基本操作时,时间同步对无线传感器网络是非常重要的。

1. 数据融合

在所有的分布式网络中,数据融合是一个主要操作,它处理和集成来自不同节点的数据,很明显,它需要网络中部分或所有的节点共享一个公共的时间基准。

2. 功率管理

在设计无线传感器网络时,能量效率是一个主要考虑的因素。因为当网络部署后,在传感器的使用期中没有维护和更换电池的可能,常常是处于无人看管状态。大部分节能操作主要取决于时间同步,例如节点工作和休眠时间的占空比设计,可以使其在休眠状态下消耗的功率最小,从而节约大量能源。因此,全网络同步是实现有效的工作/休眠占空比必不可少的,并且节能的效果正比于同步精度。

3. 传输调度

许多调度协议需要时间同步,例如分布式网络中一个最流行的多址方案——时分多址(TDMA;time division multiple access)方案,它仅仅适用于同步网络。

4. 其它

除上所述,许多定位、安全和跟踪协议也需要节点的在其消息或事件上打上时间戳。

因此在设计能量有效的无线传感器网络时,时间同步是一个最重要的研究挑战。

1.4 时钟同步的研究进展

在过去几十年,人们设计了许多维持计算机网络物理层时钟同步的时间同步协议。这个领域的先驱工作是由 Cristian 提出的远时钟读取方法,它用于处理进程之间的无界信息延迟^[16]。在这个算法中,主机进程发送一个时间请求给远端进程,本地进程收到答复后,计算往返时间来作为发送和接收的时间差。该算法的一主要特点是基于这样一个事实:即执行大量的请求/响应试验可以使至少有一个试验不会遇到随机时间延迟。一般而言,这个被选择的就有最小往返时延的试验。

NTP 是 Internet 网络时间同步协议标准,它是由 Mills^{[61],[62]}提出的。NTP 是同步分组交换网络和可变延时数据网络中计算机系统时钟的协议。它基于用户数据包协议(UDP),采用了分层客户-服务器结构,以分层方式同步计算机时钟。

NTP 的主要特色是在大型多跳网络中,其具有可扩展性、对同步失败的鲁棒性、自我配置能力以及灵活的部署能力。NTP 的发送端-接收端同步结构现已广泛用于设计时间同步算法中,并且本书许多地方都采用了同样的双向定时信息交互机制。

时间传输协议(TTP:time transmission protocol),它是通过一个节点传达时钟时间到目标节点,这个协议在文献[7]中有介绍。目标节点在没有任何反馈或双向同步的情况下,通过消息时间戳和消息延时统计来估计源节点的时间。最早在 CesiumSpray 系统^[97]中,提出了利用广播媒体固有的单向传输特性,在一个单广播域内,一个节点发送时间源到所有节点。随后,无线传感器网络中一个最流行的时钟同步协议,即参考广播同步(RBS:reference broadcast synchronization)^[22]协议,便是基于这个相同的思想提出的,但它可以扩展到多个域。第3章将要详细讨论参考广播同步协议。时间同步协议是自组织通信网络的一个开拓性贡献。在此协议中,生成的时间戳用来记录感兴趣的事情发生的时间。时间戳在传输过程中,每个节点会使用其本地时钟和时间转换方法来更新它,最后的时间戳用时间的上限和下限来表示。因为当上述的同步协议用于无线传感器网络时,会遇到许多新的挑战,所以在无线传感器网络中,时钟同步是一个全新的研究领域,这是由于传感器网络的独特特性决定的,如有限的能源、无线信道条件和因为节点移动和失灵产生的动态拓扑。因此,为了应对这些挑战,需要明确设计用于无线传感器网络的不同类型的同步方案。文献[23]、[24]、[81~84]、[88~89]、[91]是这个研究领域极好的参考资料。

为了应对在无线传感器网络中上述的需求,下面针对时钟同步的主要协议将进行简单描述。参考广播同步协议^[22]是基于接收机-接收机同步的协议。在该协议中,节点发送一个参考广播信息到两个或者多个相邻节点,这些相邻节点在接收广播信息的同时也记录了它们自己的本地时钟。在收集到一些广播消息后,节点间交换各自的观测值,并使用线性回归方法来估计它们的相对时钟相偏和频偏。传感器网络定时同步协议(TPSN:timing synch protocol for sensor networks)^[29]是传统的发送端-接收端协议,它假定有两个操作阶段:同步阶段及其后的水平发现阶段。在水平发现阶段,无线传感器网络以树形式展开,全局同步通过使每个节点与它的父节点(位于邻近上层的节点)同步来完成,而每个节点与它的父节点同步则是凭借双向信息交换机制来调整它本身的时钟偏移来实现的。由于传感器网络定时同步协议和网络时间同步协议采用了相同的信令交互机制,可以认为传感器网络定时同步协议是网络时间同步协议应用到无线传感器网络的扩展。

高延迟时间同步协议(TSHL:timing synchronization protocol for high latency acoustic networks)^[93]用两个阶段结合了上述两种方法,即接收端-接收端(RBS)和发送端-接收端(TPSN)。TSHL 中的第一阶段类似于 RBS,而第二阶段类似于 TPSN。TSHL 特别适合含有大信息延迟的网络,例如水下声网络。泛洪

时间同步协议(FTSP; flooding time synchronization protocol)^[58]也结合了上述两种方法:信标节点发送的参考广播信息中含有其自身的时间戳。用于无线传感器网络的延迟测量时间同步(DMTS; Delay Measurement Time Synchronization)协议^[74],是一个能量有效的协议,它避免了像 NTP 或 TPSN 一样去估计往返时间,在同一时刻同步发射机和多个接收机,并且比 RBS 需要更少的信息传输量。在其它的非概率统计同步方法中,微型迷你同步协议^[86]在使用最小计算和存储复杂度的确定性协议的同时,为无线传感器网络中提供了良好的同步精度。

在文献[90]中提出的时间扩散协议(TDP; time diffusion protocol)实现了网络范围内的时间均衡,此均衡是基于迭代加权平均法,通过同步过程中涉及所有节点的扩散信息来实现的。同时,异步扩散协议(ADP; asynchronous diffusion protocol)利用了类似于 TDP 的扩散策略,但网络节点以异步的方式执行协议,并且独立地纠正它们各自的时钟。

PalChaudhuri^[69]等人建议了一种概率方法来处理在无线传感器网络中的时钟同步问题,这种方法提供时钟同步精度的概率界,可视为 RBS 的扩充。值得一提的是采用概率方法开展研究的 Abdel-Ghaffar^[1],在假定一个对称指数网络延迟模型下,他提出了详细的估计时钟偏移的分析方法。在文献[1]中,含蓄地指出了对于已知固定延时和指数延时参数,由于其似然函数不具有唯一的最大值,所以不存在时钟偏移的最大似然估计。然而在文献[41]中 Jeske 证明了,在不考虑已知或未知的指数参数延时,对于未知固定延时,时钟偏移的最大似然估计存在,并且和先前 Paxson 在文献[71]、[72]提出的估计方法吻合。

通过采用概率方法以及运用统计信号处理和估计理论中的方法,本书中的内容代表了解决在无线传感器网络中时钟同步问题的最新研究结果。接下来的部分列出了本书的主要论题。在文献[27]中推导出了一些关于这个问题的有趣的结果,它表明了即使在无噪声的信息通信中,要估计同步问题中的所有未知参数,包括时钟的相偏和频偏,以及所有通信链路的延时等都是不可能的。

1.5 本书概述

下面给出本书的主要章节结构。

在第 2 章,首先提出和分析了时间同步的一般时钟模型。介绍了在设计无线传感器网络时间同步协议时不得不考虑的最重要的要素。此外,对时间信息传输中出现的不同时延分量进行了分类。在第 3 章,我们主要集中在信号处理方面,对无线传感器网络中已有的时间同步协议进行了分类和综述。此外,在第 3 章中描述了自适应时间同步方案的重要性和有效性,同时介绍了一些重要的自适应同步协议。在第 4 章中,介绍了基于分组数据包同步,具有普遍性、但从根本上又不同

的三种时间同步方法,即发送端-接收端,接收端-接收端和仅接收端同步。对这些基础的方法的分析和比较,说明了三种无线传感器网络时钟同步技术的异同之外。

第5章,在假定对称或不对称的指数网络延时情况下,推导出了采用发送端-接收端定时信息交换的两节点间时钟偏移的估计方法:采用排顺序统计的最优线性无偏估计(BLUE-OS:)。为了能够获得时钟偏移的最小方差无偏估计(MVUE),本书利用了 Rao-Blackwell-Lehmann-Scheffe 理论(见文献[44]、[50]),并且结果证明其与 BLUE-OS 结果相吻合。此外,在对称网络延时模型中,时钟偏移的 MVUE 也与最大似然估计(MLE)方法吻合。最后,在非对称网络时延情况下,虽然 MLE 是有偏的,但是在双向网络链路延时对称点的附近区域能够获得比 MVUE 更小的均方误差(MSE)。因此,MLE 作为最通用的估计方法是可行的。第6章,针对发送端-接收端定时信息交换方案,在假定高斯噪声和常规时钟偏移模型的前提下,集中分析和推导了 MLEs,以及相应的克拉美-罗下界(CRLBs)。接下来,在假定高斯随机延时下,用更现实的线性时钟相偏和频偏模型获得了联合 MLE 和相应的 CRLB。随后推导出仅估计时钟相偏,以及在指数延时假设下的时钟相偏和频偏的 MLE 联合估计,详细讨论了它们的估计算法。由于 MLEs 的鲁棒性不强,而且计算复杂,因此寻求一些实现简单,可能会带来一些性能损失的简化算法,使其更适合于 WSNs 的低功耗限制非常必要。因此,在第7章讨论了两种简化方案,用它们去估计时钟相偏和频偏。在第一种方案中,采用观察的第一个和最后一个样本,在高斯和指数延时模型下推导出了其估计算法。而第二种方案不考虑实际延时分布的情况下,在两点之间的最短距离作直线拟合。最后给出两种方案的仿真结果,并与 MLE 的性能进行了比较。

第8章讨论了一种新的时间同步方案,被称为成对广播同步(PBS: Pair-wise Broadcast Synchronization)^{[66],[68]},它有效的结合了发送端-接收端同步和仅发送端同步方法,在显著减少同步信息以及更少能源消耗的情况下实现了整个网络同步。在这章中,也研究了从 PBS 到一般通用多簇传感器网络的扩展。在第9章中,假设 WSN 中的非活动节点通过监听两个活动节点(主节点和从节点)之间的双向时间信息交互实现同步,我们在指数链路延迟模型基础上,推导了估计非活动节点时钟相偏的 MLE 算法,当然我们需要假设这些非活动节点位于活动节点的通信范围内,从而实现与参考节点的零代价同步。这项研究工作的重要意义是在相同的条件下,比较发送端-接收端协议和接收端-接收端协议的性能,其中相对于广播时间信息来说,发送端-接收端协议的主要缺点是需要 WSN 环境中点对点的进行时间信息交互,从而开销较大。此外,作为性能基准,推导了活动和非活动节点的 CRLBs。在第10章中,我们对第9章的两个领域进行了延伸。首先,通过对排序样本应用最小二乘法,推导了其 BLUE-OS。通过应用 Rao-Blackwell-Lehmann-Scheffe 理论,结合 BLUE-OS 推导了 MVUE。另外,由于在估计理论当中

通常选择 MSE 作为性能标准,因此我们也推导了与时钟相偏和固定延迟无关的预期损失的最小均方差(MMSE)估计,并且结果显示其性能比 MVUE 要好。其次,因为在实际应用中每个方向的信息交换时延并非对称,所以我们针对对称和非对称的对数延迟引起的问题给出了相应的结果。

在第 11 章中,介绍了一种基于能量效率自适应多跳定时同步(AMTS: Adaptive Multi-hop Timing Synchronization)策略,它的目标是以最小的能量消耗得到长期的全网络同步。由于很多应用都需要在各节点间保持长期的同步,实验显示,有时钟变化的二次方模型能很好地表示实际时钟模型的动态特性,因此在 12 章中推导了指数延迟双向定时交换模型中所有时钟参数的 MLE 算法。

对于接收端-接收端方式的协议,在 13 章中推导了在对数噪声模型中时钟相偏和频偏的联合 MLE 算法。同时,我们讨论了吉布斯采样器用来做时钟相偏和频偏联合估计,并且结果显示其比联合最大似然估计(JMLE)更优越。最后给出了 JML 估计和吉布斯采样器的 MSE 上下界。

在第 14 章中,主要讨论同步协议的时钟相偏参数的鲁棒性估计问题,其中同步协议是基于双向信息交互机制和未知的分布网络延时。在连续贝叶斯蒙特卡洛方法框架中,提出了几类时钟偏移估计器,针对网络延时的不同分布,它们显示出传统的线性回归和 MLE 方法更强的鲁棒性。

最后,在第 15 章中,对这本书中的重要结果进行总结,同时也阐明了一些将来可能的研究方向。应该强调这样一个事实,即这本书提出的结果可直接或者通过一些小的扩展便可以应用于定时同步问题的广泛领域。

第 2 章

时间同步的信号模型

2.1 时钟定义

在网络中,每个独立的传感器都有自己的时钟。通过检测本地振荡器周期输出信号的过零交叉点或边缘,传感器增加其计数器中的计数值。当计数值达到某个阈值时,便产生一个中断并传递到存储器中。振荡器的频率和阈值决定了时钟的分辨率。理想情况下,传感器节点的时钟应该定义为 $C(t) = t$, 其中 t 代表理想的或者参考时间。然而,由于时钟振荡器的缺陷,第 i 个节点的时钟函数模型为

$$C_i(t) = \phi + \omega t + \epsilon \quad (2.1)$$

其中:参数 ϕ 和 ω 分别代表时钟相偏(相位偏差)和时钟频偏(频率偏差); ϵ 代表随机噪声。

在式(2.1)中,假设随机噪声影响 ϵ 可忽略,节点 1 和节点 2 的时钟关系可以表示为

$$C_1(t) = \phi^{(12)} + \omega^{(12)} C_2(t)$$

其中: $\phi^{(12)}$ 和 $\omega^{(12)}$ 分别为节点 1 和节点 2 的相对时钟相偏和频偏。因此,当两个时钟完全同步时, $\phi^{(12)} = 0$ 和 $\omega^{(12)} = 1$ 。假设在这个网络中有 L 个节点,当满足 $C_i(t) = C_j(t)$, 对于所有 $i, j = 1, \dots, L$ 时,就达到了全网络同步。

由于如下的原因,在 WSNs 中的时间同步是一个复杂的问题。首先,不管每个振荡器的型号如何,每一个振荡器有它自己独特的时钟参数。例如,根据在传感器网络中普遍使用的典型石英晶体振荡器的参考数据,时钟频率以每百万分之 40 (40 ppm)变化,这意味着不同节点的时钟在每秒钟可能偏差达到 40 ms。换句话说,每个振荡器有从 $-20 \sim 20$ ppm 的不同偏移参数。

注意到,一般情况下,时钟频偏 ϵ 是一个时间相关的随机变量(RV),在时钟术语中,有两个概念常用于考虑时钟参数中与时间相关的随机性:短期和长期稳定性。短期不稳定性主要是由于环境因素引起,如:温度变化,震动和工作电压。然