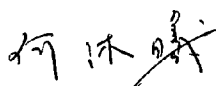


独创性声明

学位论文题目：无线传感器网络环境下基于 MATLAB 和 OMNeT++
的 IEEE1588 时间同步仿真

本人提交的学位论文是在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。论文中引用他人已经发表或出版过的研究成果，文中已加了特别标注。对本研究及学位论文撰写曾做出贡献的老师、朋友、同仁在文中作了明确说明并表示衷心感谢。

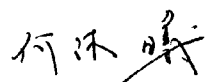
学位论文作者：

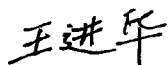
签字日期：2015 年 6 月 4 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解西南大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权西南大学研究生院（筹）可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书，本论文：☒不保密，
☐保密期限至 年 月止）。

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：2015 年 6 月 4 日

签字日期：2015 年 6 月 4 日

目 录



摘 要	I
Abstract	III
第 1 章 序言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究内容	2
1.3 文章结构	3
第 2 章 无线传感器网络	5
2.1 无线传感器网络概述	5
2.1.1 无线传感器网络的系统结构	6
2.1.2 无线传感器网络的节点结构	6
2.1.3 无线传感器网络的协议栈	7
2.1.4 无线传感器网络的特点	7
2.2 无线传感器网络时钟同步协议	8
2.2.1 无线传感器网络时间同步概述	8
2.2.2 无线传感器网络时间同步的技术挑战	9
2.2.3 典型无线传感器网络时间同步的算法	9
2.3 本章小结	12
第 3 章 IEEE1588 精密时钟同步协议	13
3.1 IEEE1588 精密时钟同步协议时间同步过程描述	13
3.2 IEEE1588 精密时钟同步协议应用到无线传感器网络的可行性分析	14
3.3 无线传感器网络中影响 IEEE1588 精密时钟同步的因素分析	14
3.4 本章小结	15
第 4 章 系统建模	17
4.1 时钟节点建模	17
4.2 IEEE1588 精密时钟同步的时间标记不确定性建模	20
4.3 伺服时钟算法	20
4.3.1 时钟偏移率估计	20
4.3.2 带时钟偏移率估计的伺服时钟算法	21
4.4 基于卡尔曼滤波器的时间同步优化建模	22
4.4.1 晶振时钟的状态转移方程模型	22

4.4.2 PTP 时间同步协议的观测方程模型 23

4.4.3 基于卡尔曼滤波器的时间同步优化建模 26

4.5 本章小结 27

第 5 章 基于卡尔曼滤波器的 MATLAB 和 OMNeT++ 平台下 IEEE1588 精密时钟同步协议的设计与实现 29

5.1 基于 MATLAB 的 IEEE1588 精密时钟同步协议的设计与实现 29

5.2 基于 OMNeT++ 的 IEEE1588 精密时钟同步协议的设计与实现 30

5.2.1 主节点的实现 30

5.2.2 从节点的实现 31

5.2.3 IEEE1588 精密时钟同步协议的实现 31

5.2.4 OMNeT++ 平台下仿真模型的优点 33

5.3 基于卡尔曼滤波器的精确时钟同步协议仿真和分析 33

5.3.1 基于 MATLAB 的仿真实验 34

5.3.2 基于 OMNeT++ 的仿真实验 36

5.3.3 MATLAB 和 OMNeT++ 的对比分析 37

5.4 本章小结 37

第 6 章 总结 39

6.1 本文的主要工作 39

6.2 下一步工作展望 39

参考文献 41

致 谢 47

攻读硕士学位期间已发表的论文 49

攻读硕士学位期间参加的科研项目 49

无线传感器网络环境下基于 MATLAB 和 OMNeT++ 的 IEEE1588 时间同步仿真

学科专业：信号与信息处理
指导教师：王进华

研究方向：无线传感器网络
作 者：何沐曦

摘 要

无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN）是一种典型的低成本、自组织的分布式网络，其优点是部署灵活，缺点是系统能源受限以及稳定性较差。作为分布式系统的关键技术，时间同步在高精度的现代工业无线局域网中扮演着十分重要的角色。无线网络的许多应用程序依赖于时间同步，如数据融合、TDMA 调度、TOA 定位等。基于时间包交换技术，IEEE1588 精密时钟同步协议（IEEE 1588 Precision Clock Synchronization Protocol），简称 PTP（Precision Timing Protocol），能在有线以太网中实现高精度和低功耗的时间同步。

跟有线以太网相比，无线传感器网络遭受更多的无线信道共享，数据退避和数据包冲突，从而导致难以修复的传输时延抖动，也无疑会影响无线传感器节点得到时间标记的精确度。从而对无线传感器网络的 PTP 性能分析造成一定挑战性和必要性，通过仿真实验来评估 PTP 的性能，对开展真实环境下的开发和应用具有极强的现实意义。

本研究，分析了无线传感器网络以及 PTP，并尝试将针对有线网的 PTP 协议应用于无线传感器网络中；基于开源的网络仿真工具 OMNeT++，开发了一个无线传感器网络的仿真器，并经过卡尔曼滤波器的优化处理，对 PTP 时间同步过程，仿真结果和影响 PTP 性能的因素进行评估，与 MATLAB 仿真平台做了协同分析。

本文致力于在以下方面做出一定贡献：

- （1）通过对 PTP 协议的研究，尝试将 PTP 同步机制移植入无线传感器网络，并对无线传感器网络中影响 PTP 的因素进行分析。
- （2）分别建立无线传感器网络的节点时钟和 PTP 的时间包信息交换过程的模型，并针对无线传感器网络的信道特征，实现 PTP 的系统建模，并采用卡尔曼滤波器对其进行优化。
- （3）基于无线传感器网络环境中时间标记不确定性的特征，在已有研究的基

基础上，重构了参数系统和调节机制，在 MATLAB 和 OMNeT++两个仿真平台中开发了面向无线传感器网络的 PTP 的仿真平台，并对仿真结果进行对比分析。

实验结果表明，在无线传感器网络环境下，时间标记不确定性较小时，时钟偏移噪声和时钟偏移率噪声对时间同步精度的影响较大，而在时间标记不确定性较大时，运用卡尔曼滤波器能够明显提升时间同步的性能；另外，在 OMNeT++平台下的仿真比在 MATLAB 平台下更能反映实际的无线传感器网络信道特征及包交换机制，更适合下一步面向真实无线传感器网络研究的拓展。

关键词：无线传感器网络；IEEE1588 精密时钟同步协议；OMNeT++；卡尔曼滤波器；MATLAB

The Simulations of MATLAB and OMNeT++ for IEEE1588 Precious Time Protocol in WSN

Major: Signal and Information Processing

Author: He Muxi

Supervisor: Wang Jinhua

Abstract

Wireless Sensor Network (WSN) is a typical low-cost and self-organization distributed network, which has advantages in deployment flexibility, while has disadvantages in energy limitation and low stability. As a key technique in distributed systems, time synchronization plays an important role in high-precision modern industrial Wireless Local Area Networks (WLAN). Many applications of wireless network depend on time synchronization, such as data fusion, time division multiple access (TDMA), times of arrival (TOA), etc. The IEEE 1588 precise time protocol (PTP) based on time packet exchange technology can achieve high precision and low power consumption time synchronization in wired Ethernet.

Compared to the wired Ethernet, WSN takes more challenges from wireless channel sharing, data fading and data packet collision, which may lead to overwhelming transmission delay jitters. Therefore, it is difficult for the wireless sensor nodes to acquire accurate time-stamps and evaluate PTP's performance. It is a meaningful research to evaluate PTP's performance by realistic simulation in WSN.

The WSN and IEEE 1588 PTP are analyzed in this thesis, as well as the application of IEEE 1588 PTP in WSN. A simulator of WSN based on OMNeT++, which is an opening source network simulation tool is developed. And a Kalman filter is used to improve the performance and the behavior of the PTP's time synchronization. The OMNeT++ simulation results and the factors that affect the PTP performance are presented and evaluated when compared to MATLAB simulation.

The main works of the thesis are shown as follows:

- 1) IEEE 1588 PTP is studied and applied into WSN, and the factors of time synchronization are analyzed.
- 2) The clock of WSN's node and the PTP synchronization packet exchange process are modeled respectively, and the system of PTP is modeled based on the channel characteristics of WSN. Then a Kalman filter is used to improve the performance and the behavior of the PTP's time synchronization.
- 3) On account of previous studies, the parameters and regulation mechanism of the system are reconstructed based on the characteristics of WSN. Simulation systems of IEEE 1588 PTP are developed on two different simulation platforms, named MATLAB and OMNeT++, and the results are comparatively analyzed.

The simulator results show that the noise of offset and skew have a great influence on protocol precision when the uncertainties of time stamping keeps in a low range. On the other hand, the proposed Kalman filter can improve the performance of PTP when the uncertainties of time stamping get higher. And the results in OMNeT++ reflect the real networks more than in MATLAB; the simulator on OMNeT++ is more suited to expand research in real WSN.

Keyword: WSN; The IEEE 1588 precise time protocol; OMNeT++; Kalman filter; MATLAB

第1章 序言

1.1 研究背景

在分布式系统中,时间同步对于节点之间的协同工作、数据的正确处理和信息的可靠传播都是非常重要的。时间同步是调节每个分布式节点时钟的过程,其目的是为了把节点的时钟偏移控制到一个足够小的范围内。时间同步是分布式系统的一项重要支撑技术,应用于大多数无线传感器网络的应用程序,如数据融合、TDMA 调度、TOA 定位等。由于无线传感器网络的节点往往要求控制成本,通常是依附于低价晶体振荡器的中断技术来实现网络节点的时钟功能。而价格低廉的晶体振荡器的频率受制造误差和温度变化的影响较大^[1]。此外,由于无线网络的节点是由自身携带的电池供电,能量受到限制,并且网络节点只含有较少的计算资源和低通信容量,因而对于如何实现无线局域网上高精度的时间同步,一直以来都是一个研究热点。

在现有的包交换网络中,时间同步算法主要采用了时间包交换技术。一个典型的例子是网络时间协议(NTP)^[2]已被广泛应用于因特网。然而,在理想情况下,NTP 在公共互联网和有线局域网(LAN)的精度也仅能够控制在毫秒级。NTP 只能用于某些对精度要求较低的无线传感器网络,远不能满足 TDMA 调度、TOA 定位技术和工业网络等对时间精度要求较高的应用。IEEE1588 精密时钟同步协议(IEEE 1588 Precision Clock Synchronization Protocol),简称 PTP(Precision Timing Protocol)在有线工业以太网中,把时间同步的目标精度提到了微秒级。近年来,基于无线网络,特别是无线传感器网络(WSN)的研究中,许多时钟同步协议已经被提出,其中的典型时钟同步协议有延迟测量时间同步(DMTS)、参考广播同步(RBS)、无线传感器网络的时钟同步协议(TPSN)、洪泛时钟同步协议(FTSP)^[3-6]等。然而,上述协议未能有效解决诸如能源效率优化、精度优化等问题^[7]。

在有线分组包交换网络中,目前已经提出了 PTP,PTP 的时间同步精度可在微秒范围内加以控制^[8],比 NTP 的时间同步精度要高得多。由于操作简单,所需的带宽相对较低,相比于传统的时钟同步协议(例如,RBS,TPSN 等)PTP 更适合用于通信带宽和能源受限的 WLAN 设备中。

跟有线以太网相比,无线传感器网络遭受更多的无线信道共享,数据退避和数据包冲突,从而导致难以修复的传输时延抖动,这就增大了无线传感器节点获取精确时间标记的难度。因此针对无线传感器网络的 PTP 性能分析具有一定挑战性和必要性,通过仿真实验来评估 PTP 的性能,对开展真实环境下的开发和应用具有极强的现实意义。

在目前对时间同步的研究中已经出现了很多针对时间同步的离散事件仿真器,

文献[9]提出了一种基于 INET 框架的时钟同步协议的仿真器, Simsync^[10]和 x-simulator^[11]是通过 MAC 层和 IP 层的模型来实现对时间同步的仿真。然而, 工业无线传感器网络设备往往是在复杂的电磁环境中工作, 需要一个更为详细的无线信道模型来实现对 MAC 延迟进行进一步的逼真模拟。WIDAGATE^[12]是基于模拟航空引擎的无线数据采集网络开发的, 针对工业无线传感器网络的仿真器; MiXiM 仿真器可实现高精度的物理层和 MAC 层的仿真。但是, 目前还没有一个仿真器能实现 PTP 时间同步的仿真与真实的无线信道以及 MAC 层仿真相结合。

1.2 研究内容

本文基于对 IEEE1588 精密时钟同步协议 (PTP), 特别是其同步机制及特点的研究, 验证了在无线传感器网络中 PTP 应用的可行性, 并分析了无线传感器网络中影响 PTP 时间同步的因素 (包括时钟偏移、时钟偏移率、传输延迟、时间标记的不确定性等)。针对无线传感器网络的信道特征, 通过探究无线传感器网络的节点构造及 PTP 的时间同步过程, 分别建立无线传感器网络的节点时钟和 PTP 的时间消息包交换过程的模型, 实现 PTP 仿真系统。由于时间同步过程中, 同步消息包的交换过程存在各种不确定因素, 因此, 在已经建立的仿真模型的基础上, 添加了一个卡尔曼滤波器, 并根据无线传感器网络的特征, 在已有研究的基础上重构了参数系统及调节机制, 通过滤波器技术对其进行优化。最后, 本文采用两种不同的平台搭建了用以评估 PTP 性能的仿真器 MATLAB 和 OMNeT++, 并对两个不同平台的仿真结果做出了对比。

其中, 考虑到 OMNeT++ 仿真平台是一款面向对象的离散事件网络仿真器, 具有通用的体系结构, 已实现的模块可以重复使用, 支持分布式并行处理, 为实现仿真提供基础的底层结构和工具等特点, 因此选择其作为本研究的仿真平台之一。而 MATLAB 平台下 PTP 的仿真则为实现 OMNeT++ 仿真平台提供了算法验证和可参考的参数配置与实验数据。

有偏差的本地时钟和带有时间标记的消息包交换协议, 是时间同步过程的两个方面。为了探究无线传感器网络中的 PTP, 需要基于一个真实有效的无线传感器网络仿真环境, 来建立出不精确的本地时钟模型, 在模拟真实的网络环境下实现带有时间标记的消息包交换协议。为了研究无线传感器网络中对 PTP 的影响因素, 如通信和中断过程中的延迟和抖动、时间标记的不确定性等, 我们在之前的研究基础上, 利用 MiXiM 模块来模拟无线传感器网络中的物理层 (无线电信道) 和 MAC 层, 而为了对 PTP 协议进行更真实的模拟, 我们在 x-simulator^[10]上开发一个新的时钟模型并修改其接口使它整合在 MiXiM 模块中。

1.3 文章结构

本文后续章节安排如下：

第 2 章：无线传感器网络。首先引入了无线传感器网络的概念，介绍了无线传感器网络的特点，并就无线传感器网络中的时间同步技术进行了深入介绍。

第 3 章：IEEE 精密时钟同步协议。介绍了工业以太网中的 IEEE1588 精密时钟同步协议标准，并从可行性和影响因素两方面概述了无线传感器网络上 IEEE1588 协议的移植。

第 4 章：系统建模。阐述了系统建模（包括时钟模型、精确时钟同步协议的时间同步模型等）的过程。

第 5 章：基于 MATLAB 和 OMNeT++ 平台，对 IEEE1588 精密时钟同步协议的设计与实现。

第 6 章：总结。总结了本文的研究工作，并对下一步的工作进行了展望。

第2章 无线传感器网络

20世纪90年代以后,计算机通信与网络技术得到了飞速的发展,尤其以因特网为代表。这些发展引起了社会、经济、工业生产以及传媒等多方面的变化,改变了人们的生活方式,因特网已成为很多人日常生活中不可缺少的一部分。

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)是一个多跳的、自组织的、通过无线通信方式将分布在一定区域的传感器节点连接起来而构成的网络系统。无线传感器网络具有信息综合和信息处理能力,并融合了计算机技术(Computer Technology)、传感器技术(Sensor Technology)、微电子技术(Microelectronic Technology)、嵌入式技术(Embedded Technology)和无线通信技术(Wireless Communication Technology)等多个技术领域。无线传感器网络也在军事、环境、医疗、工业及家庭等方面得到了广泛运用^[13-21]。

本章主要介绍无线传感器网络的基本概念及特点,并就无线传感器网络中的关键技术——时间同步技术进行了详细介绍。

2.1 无线传感器网络概述

无线传感器网络是一个新兴领域,它集成了计算机(Computer Science)、信息感知(Information Awareness)和通信(Communication Engineering)三大学科中的众多科学知识,对无线传感器网络的认识也在随着大量的相关研究不断地深入^{[22][23]}。

从计算机科学的角度来看,无线传感器网络是一个自组织网络,在无线传感器网络没有绝对的中心的节点,每一个节点都可以作为中继节点为其他节点传递信息。无线传感器网络的节点在被布设安置好之后,可以按照某种机制自动地形成一个网络来满足我们的要求。网络中的各个节点可以通过中继的方式在两个距离很远的节点之间进行信息的传递,而不需要固定的节点之间两两直接连接。

从信息感知的角度来看,获取无线传感器网络所在周围环境的信息是它布设的首要目的。不同的应用场景决定了无线传感器网络应该采用的什么样的传感器节点。如果在工业环境下,传感器节点需首要考虑的是精度和稳定性,提升整个工业系统的性能;而如果是在军事环境下,则需首要考虑节点的隐蔽性,从而降低被敌方发现的隐患。

而无线的通信方式是无线传感器网络通信方式的一个特点,其优势在于可以省去大量的数据线,避免了复杂的线路系统以及由于线路带来的各种问题。然而,随之而来的是无线连接所带来的能源问题。无线连接的方式注定了传感器节点的能源自能靠自身携带,但是大多情况下传感器节点又要求体积小成本低,所以如

何为无线传感器网络节省能量也一直是这一领域的研究热点。

2.1.1 无线传感器网络的系统结构

无线传感器网络是一种无线自组织网络系统，其基本构架如下图 2.1 所示：

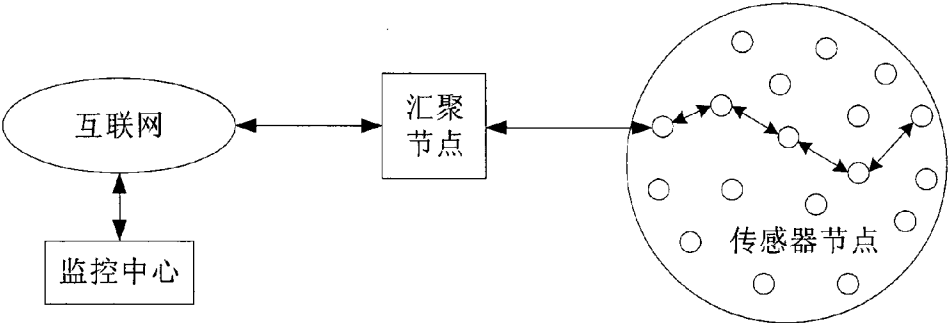


图 2.1 无线传感器网络的基本构架

从上图可以看到，无线传感器网络包括了大量随机部署的传感器节点，这些节点常位于某一个监测区域内；监测区域内或监测区域附近一般会有一个或多个数据汇聚节点。

一般情况下，每一个传感器节点都会配有传感器、嵌入式微处理器和无线收发器等用来实现功能的部件。通过这些部件的功能，实现节点对区域内的目标信息或环境数据的采集和处理，然后将采集到的信息和数据传递到汇聚节点，协作完成指定的监测任务。另外，传感器节点还可以将汇聚节点作为网关，进而将采集到的信息和数据传递到终端用户或远程监控中心。

2.1.2 无线传感器网络的节点结构

无线传感器节点是传感网的基本组成单元，一般由四个模块组成，它们分别是传感器模块、处理器模块、无线通信模块和能量供应模块^[24]，如图 2.2 所示

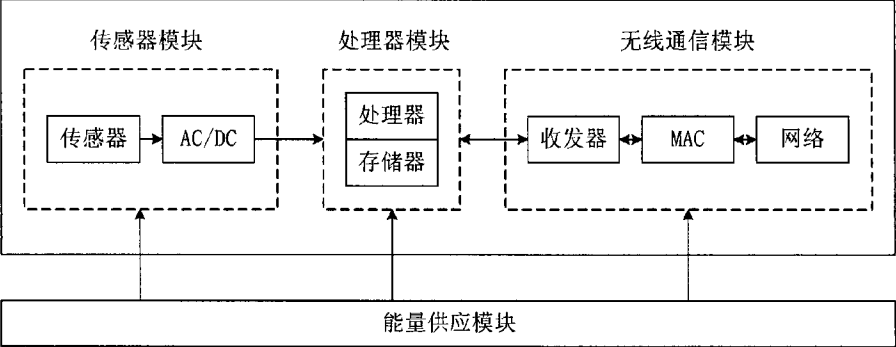


图 2.2 无线传感器网络的节点结构

如图，传感器模块主要用来采集如温度、湿度、声音等各类信息，并将信息的模拟量转换为数字量传递给其他模块；整个传感器节点数据的操作通常由使用嵌入式中央处理器（CPU）的处理器模块负责；节点之间的信息传输，例如无线通信、控制信息的交换和数据的收发等方面，都是由无线通信模块来负责处理；传感器节点运行所需的能量由能量供应模块提供。

2.1.3 无线传感器网络的协议栈

如图 2.3 所示，无线传感器网络的通信协议栈是五层的结构，包括物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层^[25]，无线传感器网络的协议栈包括三个不同的管理平台：能量管理平台、移动管理平台和任务管理平台。

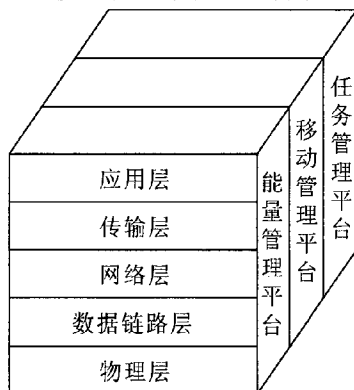


图 2.3 无线传感器网络的协议栈

对于一个信号的调制、发送与接收，在信号传输过程中频段的选择，以及对一些涉及权限的数据进行加密等的操作都是由物理层来完成的；数据链路层用于解决信道的多路传输问题，保证无线传感器网络中节点之间连接可靠性；网络层负责对传输层提供的数据进行路由；传输层主要用于维护无线传感器网络中的数据流，保证通信服务质量；应用层根据应用的具体要求不同，可以添加不同的应用程序。

2.1.4 无线传感器网络的特点

无线传感器是一种特殊的无线自组织网络，它与传统的无线自组织网络有很多类似，主要体现在自组织特性、分布式控制、拓扑动态性等方面。

（1）自组织特性：传感器网络应用中，很多传感器节点的部署都是随机的，不能够预先判断这些传感器之间的位置坐标以及他们的相邻关系。例如在采集面积广阔的原始森林的信息时，传感器节点往往是通过飞机在空中直接大量撒播。而这样的操作方式就需要我们的传感器节点有自组织能力。没有任何固定的网络

基础设施的情况下，传感器节点随机部署后需要自动地在任何时间以及任何地点构建成大规模的无线网络。在一些突发的紧急情况下，这些节点能够自发的重新构建网络。

(2) 多跳路由：在固定网络中，实现多跳路由的方法是利用网关和路由来搭建的。而在无线传感器网络中的多跳路由是由及其普通的网络节点来完成，不需要依靠特定的路由设备。

(3) 分布式控制：无线传感器网络中，所有的节点地位都平等，是一个对等式网络。这个网络中不需要控制中心严格来把控整个网络，整个网络的运行不会因为任何一个节点的突发故障而崩溃。

(4) 拓扑动态性：无线传感器网络的节点可以不受拘束的随处移动，使整个网络有着拓扑动态性。在整个网络的工作工程中，可能有一个节点发生故障退出这个网络，也有可能由于网络的需要另一个节点加入到这个网络中来。这些都意味着无线传感器网络的拓扑结构需要有很强的动态性。

(5) 节点能源受限：节点的微型化导致了节点的电源容量有限，而无线传感器网络特殊的应用领域决定了在使用过程中，不能给电池充电或更换电池，一旦电池能量用完，这个节点就失去了作用。因此无线传感器网络设计过程中，任何技术和协议的使用都要以节能为前提。

2.2 无线传感器网络时钟同步协议

无线传感器网络中网络节点各自都拥有不同的属性，所有的传感器节点都有自己应属的本地时钟。作为分布式系统的关键技术，时间同步在高精度的现代工业无线局域网中扮演着十分重要的角色。无线网络的许多应用程序依赖于时间同步，如数据融合、TDMA 调度、TOA 定位等；在数据融合应用方面，数据传输过程中一般都需要先融合传感器节点采集的目标数据以减少网络通信从而降低能耗，网络中的节点拥有相同的时间标准来保证数据的一致性在进行数据融合的首要条件；在一些介质访问层(MAC 层)协议的设计过程中，通常选用时分多址(TDMA)调度算法以减少能量消耗，时间同步也是他的首要条件，这就需要参与通信的双方首先实现时间同步；在无线传感器网络节点定位方面，通常使用声波等信号的传输时间来确定节点之间的距离，而这也依赖于节点的时间同步。时间同步的精度越高，节点的各方面能耗越低^[26]。

2.2.1 无线传感器网络时间同步概述

在无线传感器网络中，传感器节点各自之间存在区别，节点内部的晶体振荡器的频率不可能是完全一样的，而且节点收到各种外界因素（如温度、压强等）

的影响,节点之间的时钟会出现时间偏差。时间同步是无线传感器网络系统的一个关键支撑技术,无线传感器网络中很多节点之间互相配合来完成的应用都需要以时间同步作为前提,如前面提到的数据融合技术、TDMA 调度等都需要不同程度的时间同步。

在传统网络中,时间同步机制已得到较为宽泛的使用,很多不同的时钟同步协议已经被提出,比如网络时间协议(Network Time Protocol, NTP)用于因特网的时间同步^[29],除了一些专门的协议外, GPS 等技术也可以在网络中实现全局的时间同步。然而, NTP 对网络稳定性的高要求, GPS 的高成本都是无线传感器网络很难满足的,因而不能够将它们直接移植运行。

无线传感器网络中一般采用节点之间交换包含时间信息的消息包的方法来实现时间同步,影响时间同步精度的主要因素是消息包交换过程中会受到的时间延迟。

2.2.2 无线传感器网络时间同步的技术挑战

受能量等的制约,传感器节点在无线传感器网络中的时间同步设计会面临以下所述的一些问题:

(1) 节点同步时延问题

无线传感器网络通常拥有很多的节点,节点的部署密集且网络的规模一般都很很大,造成节点间的同步消息会发生时延,增加了实现时间同步的难度。

(2) 拓扑结构繁杂

由于节点移动、能量耗尽以及周围环境因素的影响,无线传感器网络的拓扑结构变化频繁,难以预先确定节点获得基准时间的路径,也增加了实现时间同步的难度。

(3) 节点休眠状态

为了降低节点的能量消耗,无线传感器网络协议常常会使节点在不需要协同工作的大部分时间处于休眠状态,节点在休眠状态时会停止运作,与整个系统的时间同步状态就不能保持下去,而当节点需要工作时,唤醒后又必须迅速与网络中的其他节点以及系统取得同步,这也增加了无线传感器网络中实现时间同步的难度。

2.2.3 典型无线传感器网络时间同步的算法

一般从发送者、接收者的角度,把时间同步算法分为三类:①基于发送者-接受者的单向同步方法。发送者向接受者单向传输消息,如 DMTS^[30]、FTSP^[6]。②基于发送者-接收者的双向同步方法。发送者和接收者双向交互消息,如 TPSN^[31]、

TS/MS (Tiny-Sync 和 Mini-Sync)^[32]、LTS^[33]等。③基于接收者-接收者的同步方法。由第三方发送消息,接收者之间根据接收到的消息进行同步,如 RBS^[3]、adaptiveRBS^[34]等

(1) DMTS (Delay Measurement Time Synchronization) 算法^[30]

DMTS(Delay Measurement Time Synchronization)算法是一种较为实用的同步算法。DMTS 算法的优点是它的算法复杂性低,同步消息仅用广播一次就可以实现单跳的无线传感器网络 N 个节点的同步,而对于多跳网络,利用 DMTS 算法也只需要 N 次消息交换就可以完成整个网络的时间同步。减小了网络流量,降低了网络的能量消耗。

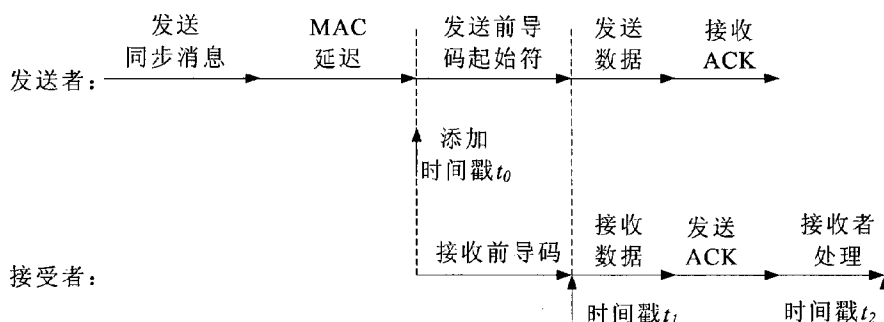


图 2.4 DMTS 算法示意图

如图 2.4 所示, DMTS 算法首先会随机选择一节点作为时间主节点,然后由这个主节点来广播一个时间同步消息包,这个包里面含有主节点的时间标记 t ,其他的节点接收到这个消息包以后,根据自己的时钟和消息包里面的时间标记来估计包出的传输延迟时间,整个的传输延迟 t_d 可以表示为 $t_e + (t_2 - t_1)$, 其中 t_1 、 t_2 是接收节点的时间标记, t_e 是传输广播消息中的前导码和起始符号所需时间,无线设备的传输速率一般是固定的,因而 t_e 是确定的 $t_e = n\tau$ 。其中, n 是所传输的比特数, τ 为传输一个比特所需要的时间。接收节点将自身的本地时间调整为 $t_r = t + n\tau + (t_2 - t_1)$ 。从而完成时间同步过程,与主节点的时钟保持同步。

(2) TPSN (Timing-Sync Protocol for Sensor Networks) 算法^[35]

TPSN 算法是一时钟同步协议,主要适用于无线传感器网络的所有网络结构。该算法采用先分级再同步的方式,完成整个网络拓扑结构的建立和时钟的同步。

不同级别之间的节点时间同步过程如图 2.5 所示,节点 A 和节点 B 之间的双向消息交换,节点 A 在 T_1 时刻发送同步消息包,节点 B 接收到消息包后记录时间 T_2 ,然后节点 B 在 T_3 时刻向节点 A 发送带有时间 T_2 及 T_3 的消息包,节点 A 收到后记录时间 T_4 ,然后通过时间 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 计算出传输时延和时钟偏移,最终实现完成其与节点时间的同步。

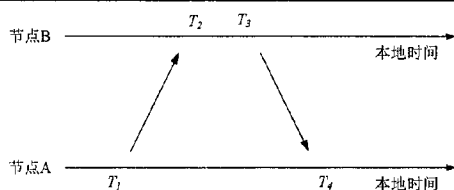


图 2.5 TPSN 算法同步过程中两个节点之间的消息交换示意图

(3) RBS (Reference Broadcast Synchronization) 算法^[3]

RBS 算法是一个利用了无线信道中广播特性的算法，RBS 算法中会有一个参考节点来广播时间同步消息包，而时间同步的过程是由接收节点接收到这个由参考节点发送的消息包后，比较相互之间接收到这个时间同步消息包的本地时间，然后实现相互之间的同步。RBS 算法的一个重要特性是它要求网络具有物理广播信道。

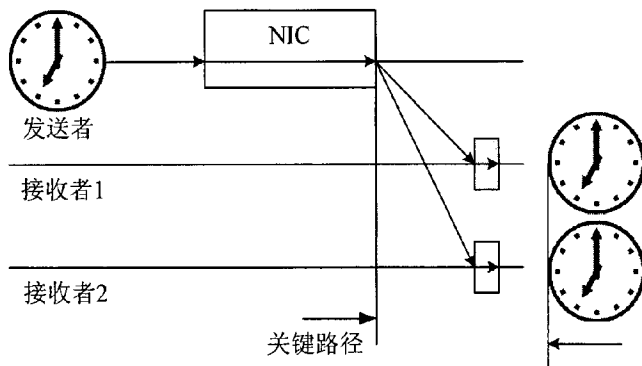


图 2.6 RBS 时间同步算法示意图

如图 2.6 所示，RBS 算法中，参考节点向周围的节点广播时间同步消息，一组节点接收到这个消息之后，各自记录下消息达到时的本地时间并缓存，当需要进行同步时，任意两个节点互相交换各自缓存的时间标记信息，该节点间的时钟偏移就相当于是这两个时间的信息差值，因此就可以计算出节点相互间的时钟偏移并完成时间同步。在 RBS 算法中，参考节点广播的消息可以不含有时间标记，而消息发出的时间及传输过程的时间也不重要，它只看重节点接受到消息的时间，RBS 算法利用这种广播特性消除了由发送节点引起的误差，从而提高时间同步精度，然而这带来的也是算法复杂性以及节点功耗的增加。

(4) LTS (Lightweight Tree-Based Synchronization) 算法^[36]

基于发送者和接收者之间双向交互消息的算法中，还有一种 LTS 算法值得指出，这个算法跟其他的算法的目的不太一样，一般算法都是为了精度的提高，而

这个算法的目的是减少同步时的复杂度，它主要应用于对时钟精度要求较低的无线传感器网络中。

LTS 算法首先会构造一个生成树，生成树的根就作为参考节点，参考节点沿着生成树的边进行成对同步，同步的算法类似于 TPSN 算法，并在有需要的时后发起“再同步”。参考节点的孩子节点又与他们的孩子节点进行同步，直到生成树所有的叶子节点都被同步。LTS 算法的特点是节点只需要直接与生成树的父节点同步，LTS 算法的同步次数是生成树高度的线性函数。降低了交换的信息量，但也在一定程度上降低了同步精度。

2.3 本章小结

本章从基本构架，节点结构，协议栈等方面对无线传感器网络进行了全方位的介绍，阐述了无线传感器网络中的时间同步技术，并分析了一些典型的时间同步算法，为后续章节做了知识储备。

第3章 IEEE1588 精密时钟同步协议

在测量仪器或工业控制等生产活动中，对时间同步精度的要求越来越高，为了满足对时间同步精度的高要求，IEEE 标准委员会制定了针对有线包交换网络的标准，即 IEEE1588 精密时钟同步协议（IEEE 1588 Precision Clock Synchronization Protocol），简称 PTP（PrecisionTimingProtocol）^[37]。PTP 主要参考以太网编制，并且应用于工业自动化系统，其同步精度最高可达纳秒级，适于应用在工业化系统，尤其是支持多播信息的分布式网络通信系统中^[38]。PTP 能实现控制网络内的所有时钟与精确时钟保持同步，它定义了一个在控制网络系统中的时间同步协议。使分布式通讯网络能够具有严格的时间同步，是通用的提升网络系统定时同步能力的规范。PTP 最初由 Agilent 公司开发以用于分布式仪器仪表和控制任务^[39]。由于操作简单，所需的带宽相对较低^[40]，相比于传统的时钟同步协议（例如，RBS，TPSN 等）PTP 更适合用于通信带宽和能源受限的 WLAN 设备中。然而，PTP 是定位于有线工业网络的，针对无线传感器网络的 PTP 性能分析具有一定挑战性和必要性，通过仿真实验来评估 PTP 的性能，对开展真实环境下的开发和应用具有极强的现实意义。

3.1 IEEE1588 精密时钟同步协议时间同步过程描述

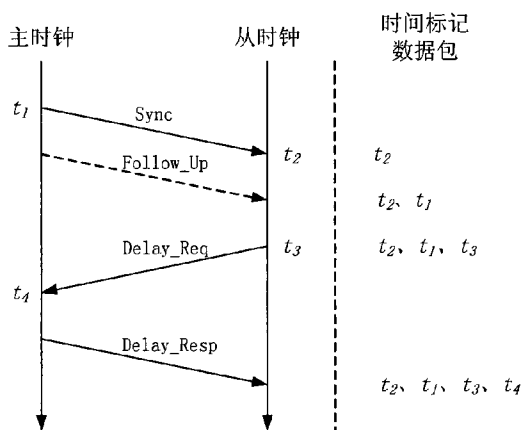


图 3.1 IEEE1588 精密时钟同步协议的时间同步机制

上图是基于延迟的请求-响应机制的一个主节点和其从节点之间的时间同步过程。在实现时间同步过程中有四种类型的消息包，分别是：Sync 消息包，Follow_Up 消息包，Delay_Req 消息包和 Delay_Resp 消息包。这些包中包含了测量时钟偏移量和时钟延时所需的数据。在我们的实验中，主节点的时钟被假定为足够精准的，因而我们不需要使用同步信息跟随包。

在测量时钟偏移量的时候，主节点在 t_1 时刻向从节点发送一个 Sync 消息包，从节点在 t_2 时刻接收到该 Sync 消息包并记录下时间。用 d_{ms} 表示一个 Sync 消息包从主节点传送到从节点的时间延迟，由于传播延迟是一个未知量，所以我们需要对传播延迟进行测量。传播延迟测量是由从节点发起，首先，从节点在 t_3 时刻向主节点发送一个延迟测量请求消息包 Delay_Req，主节点接收该包并记录其到达的时间 t_4 。主节点再将含有时间标记 t_4 的延时响应包发送给从节点。用 d_{sm} 表示在第 n 个时间同步时刻。时钟偏移 θ 是一个未知量，在实际的网络中，节点之间的传播延迟很有可能是不一样的，即 $d_{ms} \neq d_{sm}$ 。 t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4 之间的关系如下：

$$\begin{cases} t_2(n) = t_1(n) + \theta_m(n) + d_{ms}(n) \\ t_4(n) = t_3(n) - \theta_m(n) + d_{sm}(n) \end{cases} \quad (3.1)$$

由此可得，在第 n 个时刻主节点和从节点之间的时钟偏移量：

$$\theta(n) = \frac{[t_2(n) - t_1(n)] - [t_4(n) - t_3(n)]}{2} + \frac{d_{sm}(n) - d_{ms}(n)}{2} \quad (3.2)$$

3.2 IEEE1588 精密时钟同步协议应用到无线传感器网络的可行性分析

IEEE1588 精密时钟同步协议 (PTP) 与无线传感器网络中常用的时间同步方法都是采发送带有时间标记的消息包来实现时间同步。与其他时钟同步协议作对比，发现它拥有网络时间同步更高的精准度，而且 PTP 对设备的要求低，占用的带宽小，无需特殊管理，能够满足无线传感器网络对实时性高的要求。

然而受无线传感器网络节点的特殊限制，PTP 运用过程中会受到一定影响，因此，我们需要专门研究在无线传感器网络中影响 PTP 的因素并提出解决方案，详细的内容将会在后面的章节给出。

3.3 无线传感器网络中影响 IEEE1588 精密时钟同步的因素分析

IEEE1588 精密时钟同步协议实现高精度的时间同步是基于下述假设的：

- (1) 假设同步过程中，传输延迟拥有对称性、稳定性（即 $d_{ms} = d_{sm}$ ）；
- (2) 假设主从节点各自的时间标记（即 t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4 ）是精准的；
- (3) 假设主从节点的时钟偏移 θ 值在消息包交换时是不变的；
- (4) 假设主从节点拥有固定的同步周期 T 。

然而在实际的无线传感器网络中，以上几点假设往往难以完全满足，因而在同步计算的过程中，为了达到高精度的时间同步，我们需要对影响时间同步的因素进行分析。尽管，已有文献对 IEEE 1588 提出了优化方案^[41]，但并非针对无线传感器网络，因此也不能精确反映无线传感器网络的信道特征、包交换机制、时间标记不确定性的特征。

在无线传感器网络中,时间同步的过程中会产生以延迟抖动(jitter) Δd 为代表的多种误差来源。延迟抖动 Δd 是指两次信息包在信道传输中,传输延迟间的差值。我们用延迟抖动 Δd 衡量在时间同步过程中传输延迟的不对等性。无线传感器网络采用的载波侦听多路访问机制(Carrier Sense Multiple Access, CSMA)以及信道的固有随机性,使延迟抖动更显著,甚至可达几十毫秒。更重要的一点是,在整个同步网络中,远端节点的同步是依靠很多个中间节点的转发的,而这些中间节点是有很强随机性的,这就使我们网络的延迟抖动有很大的不可控性。在多跳网络的环境下,延迟抖动会因为网络层数据包队列以及 MAC 层数据包缓冲的原因而增加, Δd 甚至可高达毫秒级甚至秒级。

在无线传感器网络中,系统节点的时间标记是通过 CPU 中断处理来实现的。因此, CPU 的数据处理能力、运行速度、任务调度以及多任务的操作系统的切换速度决定了时间标记的精准度。在时间同步过程中,时间标记的测量误差有时甚至会到达次毫秒级。

而由于无线传感器网络中节点受环境中温度、压力等因素的影响,晶体振荡器工作频率会发生变化,使节点时钟产生一个时钟偏移率(skew),从而导致时钟偏移 θ 的值是无法固定不变的。

最后,我们从两个方面来考虑同步周期的问题:第一,主节点以某一个固定的周期来发送同步消息,已知两次时间同步的时间间隔而且这个间隔周期固定不变;第二,时钟信息的采样测量周期是固定的。

晶体振荡器的振荡频率会受很多常见的环境因素如压力、温度等的影响,常常导致时钟的采样周期不稳定,在一定范围里面波动。无线传感器网络中普遍采用的是载波侦听多路访问机制(CSMA),同步消息包传输过程中存在随机访问延迟,与此同时,同步消息的发送时间在周期性中又带有一定的随机性,不能够用一个准确的数值来描述他,我们可以用一个近似周期的非均匀采样过程来描述时间同步过程的。除此之外,我们可将数据包丢失转化成一种特殊的非均匀采样,也就是说采样时间数据的获取是发生在不规则的随机事件中。因此,在要求高精度的时间同步过程中,由非均匀采样所带来的影响也是不可忽视的。

3.4 本章小结

在这一章中,对 IEEE1588 精密时钟同步协议进行了详细描述,并详细介绍了它的时间同步过程,然后概括总结了将其运用在无线传感器网络的可实现性以及无线传感器网络中影响时间同步精度的因素。

第4章 系统建模

根据第3章3.2节对IEEE1588精密时钟同步协议(PTP)同步过程的分析,我们可以得到时间同步过程中的二元线性方程组式(3.1)和从节点时钟偏移的观测方程式(3.2)。

但是,在3.4节我们讨论过,PTP时间同步过程中的四个假设是不完全成立的。时间同步受通信延迟抖动和时间标记精度的影响很大。从前面的分析中我们可以看出,利用时间消息包交换来完成时间同步的算法需要从两个方面来考虑:一个是不精确的本地时钟,还有一个就是消息包交换的时间同步算法。我们有必要先了解无线传感器网络节点时钟的概念与相关特性,并对影响节点时钟稳定性的因素进行分析,分别对物理时钟和时间消息包交换过程进行建模,实现PTP仿真系统,从而进一步的分析无线传感器网络下的PTP在实现时间同步这个过程中所会遇到的其他问题。

4.1 时钟节点建模

无线传感器网络中,时间节点的计时装置结构几乎都是一致的^[42],包含一个额定频率的晶体振荡器和一个计数器。节点的时钟性能是由晶体振荡器和计数器的特性决定的。时钟的好坏取决于它自身振荡器频率的稳定性及精度、时钟自身抵抗其他外界环境变化能力、以及我们对时钟初始化的设置。在计数器被初始化之后,时钟通过计数器跟踪已发生的振荡脉冲次数以提供准确时间的估计值。

节点的晶体振荡器一般都是周期性的输出一个额定频率的振荡脉冲,通常情况下,振荡器的振荡周期是不可以被改变的,本地物理时钟就是晶体振荡器不可被改变的振荡输出。而我们一般所说的本地软件时间指的是计数寄存器中根据振荡器输出得到的时钟的值,软件时钟是可以被读取和改变的。本文后面的内容中提到的调整节点的本地时钟,都是指调整本地软件时钟。

在无线传感器网络中,每一个传感器节点的初始化都具有随机性,在不经事先校正的情况下,各个节点时钟的初始值(初始相位)是不一致的,无线传感器网络中节点时钟的初始相位之间存在着一个差值,我们把它称为时钟偏移(offset);此外,传感器节点在工作环境中会受到如压强、温度等各方面因素的干扰,这些因素通常会导致晶体振荡器的实际工作频率与生产时标注的额定频率之间存在一定的偏差,我们把它称为时钟偏移率(skew),它变化的范围是 $1\sim 100\times 10^{-6}$ (即 $1\sim 100\text{ppm}$)之间^[3]。即使网络中的各个节点在网络工作的初始时刻没有时钟偏移,但经过一段时间后,节点时钟偏移率会慢慢的增加,从而导致节点之间最终还是会产生一个较大的时钟偏移。因此,为了保证时间同步的误差是在一

个我们可以接受的范围内，周期性地对节点的时钟进行调整是非常有必要的。

无线传感器网络中，一个节点理想的正弦波振荡器的输出电压一般定义为：

$$V(t) = V \sin(2\pi f_0 t) \quad (4.1)$$

其中， f_0 (Hz) 是晶体振荡器的额定频率， t 表示全球参考时间，正弦波的周期为 $\tau_0 = 1/f_0$ 。

传统的时间单位是由计数器记录正弦波转化的脉冲个数来获得的。我们用瞬时相位 $2\pi f_0 t$ 与 2π 之比来实现这个过程的建模：

$$k = \frac{2\pi f_0 t}{2\pi} = f_0 t = t/\tau_0 \quad (4.2)$$

其中， k 表示振荡器产生的周期个数。第 k 次计数事件是指数器的计数值达到 k 的事件。 τ_0 是两个连续计数事件之间的时间间隔。

令时刻 t_k 表示在第 k 次计数事件发生时的时间，则 t_k 表示为：

$$t_k = k \cdot \tau_0 \quad (4.3)$$

通常我们认为时钟的时间 $C(t)$ 要依赖于时间变量 t 的连续，但从上式我们会发现，节点的时钟在由振荡输出实现成为时间的过程中，依赖的是一个有限的计数增量。因此，我们将连续模型离散化，用 $C(k)$ 表示在第 k 次计数事件发生时节点时钟的时间。对于一个理想的时钟，时钟的时间在第 k 次计数事件发生时可表示为：

$$C(k) = t_k = k \cdot \tau_0 \quad (4.4)$$

我们将振荡器在时间 t 时频率的变化率用 $\alpha(t)$ 来表示，则振荡器的实际频率 $f(t)$ 可以表示为：

$$f(t) = f_0 + \int_0^t \alpha(\tau) d\tau \quad (4.5)$$

在实际的无线传感器网络中，振荡器的相位会受到各方面的变化所影响。我们引入一个随机过程 $\phi(t)$ 来实现相位噪声的建模，把所有的瞬时相位偏差用 $\phi(t)$ 来表示。用 $f(t)$ 替换额定频率 f_0 ，我们可以建模实现振荡器的频率变化。因此，式(4.1)和式(4.2)分别修改为：

$$V(t) = V \sin(2\pi f(t)t + \phi(t)) \quad (4.6)$$

$$k = \frac{2\pi f(t)t + \phi(t)}{2\pi} = f(t)t + \frac{\phi(t)}{2\pi} \quad (4.7)$$

从而，将式(4.7)带入式(4.4)，得到一个不精确的时钟在第 k 次计数事件发生时的时间：

$$C(k) = \left(f(t_k)t_k + \frac{\phi(t_k)}{2\pi} \right) \cdot (1/f_0) = t_k + \frac{\int_0^{t_k} \alpha(\tau) d\tau}{f_0} t_k + \frac{\phi(t_k)}{2\pi f_0} \quad (4.8)$$

其中, t_k 表示在第 k 次计数事件发生时的精确时间。对比式 (4.4) 与式 (4.8) 可以看出, 由于存在相位噪声 $\phi(t)$ 和振荡器的频率变化, 导致 $C(k)$ 是不精确的, $C(k)$ 与参考时间 t_k 之间存在着一个差值 $\int_0^k \alpha(\tau) d\tau \cdot t_k / f_0 + \phi(t_k) / 2\pi f_0$ 。我们把这个偏差称为时钟偏移 (offset), 用 $\theta(k)$ 表示。

$$\theta(k) = \frac{\int_0^k \alpha(\tau) d\tau}{f_0} t_k + \frac{\phi(t_k)}{2\pi f_0} \quad (4.9)$$

在式 (4.9) 中, $1/(2\pi f_0)$ 是一个固定值, 随机相位噪声 $\phi(t_k)/2\pi f_0$ 可以改成一个离散形式 $\phi(k)$; 而根据式 (4.5) 中 $\alpha(t)$ 的定义, $\alpha(t)$ 表示振荡器的频率的变化率, 把频率的变化率 $\alpha(k)$ 关联到每个时间间隔 $[t_k, t_{k+1}]$, 这样 $\int_0^k \alpha(\tau) d\tau$ 可以表示为 $\sum_{i=0}^k \alpha(i) \tau_0$ 。

经过这两个处理, 可将连续的时钟偏移模型式 (4.9) 离散化得到:

$$\theta(k) = \frac{\sum_{k=0}^k \alpha(k) \tau_0}{f_0} t_k + \phi(k) \quad (4.10)$$

我们用 $\gamma(k)$ 来表示时钟偏移率 (skew), 指的是晶体振荡器工作的实际频率与它额定频率之间的偏差。他表示时钟 t_k 时的归一化频率变化, 令 $\gamma(k) = (f(t_k) - f_0)/f_0$, 则 $\gamma(k) = (\sum_{i=0}^k \alpha(i) \tau_0)/f_0$, 从而时钟偏移的递归表达式可以由式 (4.10) 得到:

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \gamma(k) \cdot \Delta t_k + \phi(k+1) - \phi(k) \quad (4.11)$$

其中, $\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$ 是时钟更新的间隔, 也就是本地时钟的采样间隔, 指的是时钟模型更新的频率。

我们把式 (4.11) 中连续两次时钟计数事件发生过程中的相位噪声的差值 $\phi(k+1) - \phi(k)$ 用 $\omega_d(k)$ 来表示, 则时钟偏移 (offset) 的转移方程可以改写为:

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \gamma(k) \cdot \Delta t_k + \omega_d(k) \quad (4.12)$$

在目前已有的研究中, 已经提出了许多有关时间同步过程中时钟偏移率的模型, 并且得到了广泛的应用。文献[10]提出的“simple skew model” (SKM) 模型就是一个典型的例子, 在该模型中, 时钟偏移率 $\gamma(k)$ 被建模成一个独立的随机过程。而文献[43]介绍了一种更好的自回归模型, 时钟偏移率 $\gamma(k)$ 被建模成自回归方式中的一个具有微小波动的时变过程, 即:

$$\gamma(k+1) = p \cdot \gamma(k) + \omega_\gamma(k) \quad (4.13)$$

其中, $\omega_\gamma(k)$ 代表白频率噪声, 是一个零均值的随机噪声, p 是一阶 AR 模型的参数, 它的值几乎趋近于 1。

$\omega_d(k)$ 代表时钟偏移的白噪声, $\omega_\gamma(k)$ 代表时钟时钟偏移率的白噪声 (白频率噪声)。由文献[44]和[45]可知, $\omega_d(k)$ 和 $\omega_\gamma(k)$ 都服从高斯分布, 他们的均值都为 0, $\omega_d(k)$ 的方差是 σ_θ , $\omega_\gamma(k)$ 的方差是 σ_γ , $\omega_d(k)$ 和 $\omega_\gamma(k)$ 相互独立不相关。

4.2 IEEE1588 精密时钟同步的时间标记不确定性建模

跟所有基于数据包交换的时钟同步协议一样，PTP 要求对 Sync、Delay_Req 和 Delay_Resp 包的采样时间尽可能的精确。尤其是时间同步消息包（Sync）需要两个时间标记：主节点的发送时间 t_1 和从节点的接收时间 t_2 。但是，在发送/接收事件发生的时候，时钟节点通常会由于 CPU 的处理延迟、传输延迟、中断请求以及硬件电路的延迟等因素的影响，不能获取到十分精准的时间标记。为了研究真实场景中 PTP 的性能，我们开发了一种机制来模拟在时间标记过程中的延迟和不精确的时间标记。

事实上，时间标记过程就是一个读取时钟值的过程，读取时钟时时钟采样的不确定性就是一个观测噪声。因此，在我们的模拟器中，运用了一个随机过程 $\omega_\eta(t)$ 来表示从时钟的时间标记不确定性，把 $\omega_\eta(t)$ 加到 $C(t)$ 上来用来表示真实状态的物理时钟。

从时钟的测量值表示为：

$$C_m(t) = C(t) + \omega_\eta(t) \quad (4.14)$$

其中， $C(t)$ 表示 Clock 模块接受到消息的时间， $\omega_\eta(t)$ 是一个均值为 0、方差为 σ_η^2 的高斯随机过程。在我们的实验中，用较小的 $\omega_\eta(t)$ 对应硬件时间标记，而较大的 $\omega_\eta(t)$ 对应软件时间标记，具体的内容我们将在后面给出。

4.3 伺服时钟算法

在 PTP 中，时间同步过程是通节点之间交换消息包来获得时间标记，从而估计主从时钟的偏差以实现时钟偏移的调整。然而它并没有详细阐述校正主从时钟的时钟偏移的方法。由我们在前面章节讨论的内容可知，引发时钟不精确的原因是时钟偏移和时钟偏移率。因此，为了维持主从时钟的同步，需要周期性地校正时钟偏移和时钟偏移率。伺服时钟算法（也叫做时钟校准算法）就是周期性地对不精确的时钟进行调节，使该时钟的时钟偏移和时钟偏移率尽可能的小，更接近于标准时钟^[46]。

在文献[36]和[47]中，运用了 PI 控制器在伺服时钟中调整时钟。但是基于 PI 控制器的伺服时钟算法不能够对时钟进行直接校正，它需要通过一个积分器来完成时钟校正，不仅如此，它还不能对时钟偏移率进行校正。在本节中，我们提出了一种能够直接校正时钟偏移和时钟偏移率的伺服时钟算法。

4.3.1 时钟偏移率估计

IEEE1588 精密时钟同步协议（PTP）中，对时钟偏移（offset）进行了估计，而为了提高时间同步的性能，我们还需要估计时钟的时钟偏移率（skew）。在 PTP

中, 假设时钟偏移 θ 的值在一次时间同步消息包交换过程中是不变的。则我们可以从两个连续的同步过程中得到时钟偏移率 γ 的估计:

$$\gamma_M(n) = \frac{\theta_M(n) - \theta_M(n-1)}{t_1(n) - t_1(n-1)} \quad (4.15)$$

其中, $\theta_M(n)$ 表示当前一次时间同步的时钟偏移估计值, $\theta_M(n-1)$ 表示上一次时间同步的时钟偏移估计值。在理想情况下, 式 (4.15) 的估计是精确的, 因为在两次连续的时间同步过程中, 时钟偏移率是保持不变的。

4.3.2 带时钟偏移率估计的伺服时钟算法

在时钟校正算法中, 我们引入参数 $\mu_\theta(n)$ 和 $\mu_\gamma(n)$ 来实现对时钟偏移和时钟偏移率的矫正。

将得到的时钟偏移的观测值 $\theta_M(n)$ 和时钟偏移率的观测值 $\gamma_M(n)$ 直接作为校正量的话:

$$\begin{cases} \mu_\theta(n) = \theta_M(n) \\ \mu_\gamma(n) = \gamma_M(n) \end{cases} \quad (4.16)$$

但是在实际的同步过程中, 在前一个同步过程的时候, 我们已经校正了 $\theta(n-1)$ 的值, 因而在进行第 n 次的同步的时候, 时钟偏移的观测值 $\theta_M(n-1)$ 已经发生了改变, 如图 4.1 所示。所以用式 (4.15) 来计算时钟偏移率的观测值 $\gamma_M(n)$ 就不够精确。

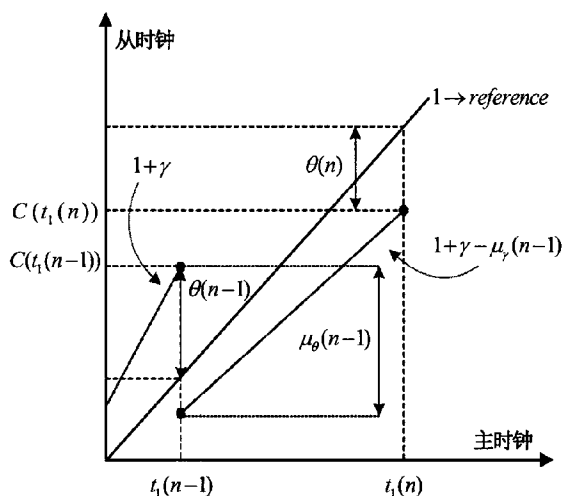


图 4.1 伺服时钟算法

因此, 式 (4.15) 中旧的观测值 $\theta_M(n-1)$ 应该改写为 $(\theta_M(n-1) - \mu_\theta(n-1))$, 即

$$\gamma_M(n) = \frac{\theta_M(n) - [\theta_M(n-1) - \mu_\theta(n-1)]}{t_1(n) - t_1(n-1)} \quad (4.17)$$

4.4 基于卡尔曼滤波器的时间同步优化建模

在前面章节所建立的递归模型和时间同步模型的基础之上，我们可以把整个 IEEE1588 精密时钟同步协议（PTP）的时间同步过程转化为一个状态空间模型。通过这个状态空间模型来描述时间同步的过程的话，我们就可以利用更多的信号处理技术来优化时间同步过程。在本文中，我们采用卡尔曼滤波器对时间同步过程进行优化，相对于已有研究^[41]，我们在优化模型中，充分考虑了无线传感器网络环境下时间同步的延迟抖动、时间标记的不确定性特征，并因此重构了参数系统。

众所周知，一个动态系统可以在状态空间进行描述，而状态空间模型包括两个模型：一是状态方程模型，反映动态系统在输入变量作用下在某时刻所转移到的状态；二是输出或测量方程模型，它将系统在某时刻的输出和系统的状态及输入变量联系起来。对应地，PTP 时间同步的状态空间建模也包括两个方面的内容，分别为传感器节点晶振时钟的状态转移方程建模和 PTP 同步协议的观测方程建模。

4.4.1 晶振时钟的状态转移方程模型

如第 1 节所讨论的那样，传感器节点的晶振时钟可以用式（4.12）和（4.13）这两个方程来描述。为了归一化表达，便于后续讨论的进行，我们用 $\tau(k)$ 代替 Δt_k ， $\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$ 可视为本地时钟的采样间隔，即时钟的更新间隔，该间隔表示时钟模型更新的频率。将二阶状态时钟模型的递归表达式改写为：

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \gamma(k)\tau(k) + \omega_\theta(k) \quad (4.18)$$

$$\gamma(k+1) = p \cdot \gamma(k) + \omega_\gamma(k) \quad (4.19)$$

其中， k 代表物理时钟（即振荡器时钟）的第 k 次更新， $\theta(k)$ 为对应的时钟偏移（offset）的更新， $\gamma(k)$ 为对应的时钟偏移率（skew）的更新。 $\tau(k)$ 为物理时钟从第 k 次更新到第 $k+1$ 次更新之间的时间间隔，即 $\tau(k) = \Delta t_k = t_{k+1} - t_k$ 。由上式可见，一个传感器网络节点的晶振时钟所处的状态（即时间值）主要由时钟偏移和时钟偏移率这两个变量来描述，也就是说，可以将时钟偏移和时钟偏移率视为该振荡器时钟的状态变量。

将振荡器时钟的方程（4.18）和（4.19）改写成向量形式，可以得到用来描述时钟变化的最基本的状态转移方程。

$$\begin{bmatrix} \theta(k+1) \\ \gamma(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tau(k) \\ 0 & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(k) \\ \gamma(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_\theta(k) \\ \omega_\gamma(k) \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

在我们的仿真器中，物理时钟的更新间隔要比时间同步间隔 ΔT 小得多。为了便于更好的利用状态空间模型对物理时钟的状态变化和时间同步协议进行统一的描述，需要对该时钟状态方程做一些改进。通常时间同步是以固定的周期重复进

行的, 即 ΔT 是一个预定已知的固定不变的时间间隔。同时考虑到时钟变化是缓慢的, 可以假定时钟偏移和频率偏移在两次时间同步间隔 ΔT 内是基本不变的, 因此上述模型可以重新写为:

$$\begin{bmatrix} \theta(n+1) \\ \gamma(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T \\ 0 & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(n) \\ \gamma(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_\theta(n) \\ \omega_\gamma(n) \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

其中, n 表示第 n 次 PTP 时间同步, 相应地, $\theta(n)$ 和 $\gamma(n)$ 分别表示第 n 次同步发生时主从时钟间的时钟偏差时钟偏移和时钟偏移率, $\omega_\theta(n)$ 和 $\omega_\gamma(n)$ 分别表示作用在 $\theta(n)$ 和 $\gamma(n)$ 上的相位噪声和频率噪声。

用向量 \mathbf{x} 来表示晶振时钟的状态变量, 则:

$$\mathbf{x}(n) = \begin{bmatrix} \theta(n) \\ \gamma(n) \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

用向量 $\boldsymbol{\omega}$ 来表示晶振时钟的相位噪声和频率噪声, 则:

$$\boldsymbol{\omega}(n) = \begin{bmatrix} \omega_\theta(n) \\ \omega_\gamma(n) \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

因此, 晶振时钟的状态转移方程可写成:

$$\mathbf{x}(n+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(n) + \boldsymbol{\omega}(n) \quad (4.24)$$

其中, \mathbf{A} 被称作时钟的状态转移矩阵:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T \\ 0 & p \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

4.4.2 PTP 时间同步协议的观测方程模型

由第 3 章我们可知, 在第 n 次时间同步时钟偏移的真实值:

$$\theta(n) = \frac{[t_2(n) - t_1(n)] - [t_4(n) - t_3(n)]}{2} + \frac{d_{sm}(n) - d_{ms}(n)}{2} \quad (4.26)$$

按照此公式, 在理论上, 需要测量出 d_{sm} 和 d_{ms} 才能计算出真实的 θ 。然而, 在许多应用中, 由于需要额外的延迟测量仪器且投资较高, 真实的传输时延的测量是不可能实现的。因此, 按照第 3 章中对 PTP 的论述, 若 PTP 所要求的传输延迟的对称性得到了满足, 即 $d_{sm} = d_{ms}$, 就不必测量。但由于在实际网络环境中, 尤其是在无线网络中, d_{sm} 和 d_{ms} 通常是不同的, 因此由 PTP 计算得到的时钟偏移与真实的时钟偏移是有误差的, 由 PTP 得到的时钟偏移其实质是对时钟偏移真实值 θ 的一个观测值。为便于将 PTP 计算得到的时钟偏移和时钟真实的时钟偏移区分开来, 我们将 PTP 计算得到的时钟偏移的观测值用 θ_M 来表示。因此, 在第 n 次时间同步过程中, PTP 计算得到的时钟偏移如下:

$$\theta_M(n) = \frac{[t_2(n) - t_1(n)] - [t_4(n) - t_3(n)]}{2} \quad (4.27)$$

比较上述两个公式, 可以看到只有当 d_{ms} 与 d_{sm} 相等时 θ_M 才等于 θ 。由于传输延迟的不对称和时间戳获取中的处理延迟等因素, 估计的时钟偏移 θ_M 可能与真实的时钟偏移 θ 不相等。它们之间存在一个差量

$$\Delta d(n) = \frac{d_{sm}(n) - d_{ms}(n)}{2} \quad (4.28)$$

因此, 从本质上来看, PTP 计算得到的时钟偏移实际上是 $\theta_M(n)$, $\theta_M(n)$ 是一个带有观测误差的对应于真实偏差 $\theta(n)$ 的观测值。

(1) 时间标记不确定性对 PTP 观测值 θ_M 的影响

进一步考虑由于 CPU 中断处理时延等因素造成的时间标记不确定性, 在主从节点的时钟观测值 t_i 中, 可能会存在一定的时钟值读取误差 Δt_i , $\{i=1,2,3,4\}$, 即在 t_1, t_2, t_3 和 t_4 时刻实际由 PTP 获得的时间戳的值分别为 $t_1 + \Delta t_1, t_2 + \Delta t_2, t_3 + \Delta t_3$ 和 $t_4 + \Delta t_4$ 。于是在第 n 次同步时, 时钟偏移 $\theta(n)$ 的真实值应该是:

$$\theta(n) = \frac{[(t_2(n) - \Delta t_2(n)) - (t_1(n) - \Delta t_1(n))] - [(t_4(n) - \Delta t_4(n)) - (t_3(n) - \Delta t_3(n))]}{2} + \frac{d_{sm}(n) - d_{ms}(n)}{2} \quad (4.29)$$

将式 (4.28) 代入上式, 并联合式 (4.27) 可以得到:

$$\theta(n) = \theta_M(n) - \frac{\Delta t_2(n) + \Delta t_3(n)}{2} + \frac{\Delta t_1(n) + \Delta t_4(n)}{2} + \Delta d(n) \quad (4.30)$$

整理上式可以得到:

$$\theta_M(n) = \theta(n) + v_{\theta_M}(n) \quad (4.31)$$

其中 v_{θ_M} 为 θ 的时间标记不确定性, v_{θ_M} 可表示为:

$$v_{\theta_M}(n) = - \left(- \frac{\Delta t_2(n) + \Delta t_3(n)}{2} + \frac{\Delta t_1(n) + \Delta t_4(n)}{2} + \Delta d(n) \right) \quad (4.32)$$

这里, 通过分析上述影响时间标记不确定性的因素, 可见观测噪音 v_{θ_M} 包括两部分: 时间标记误差 Δt_i 与传播时延不对称性 Δd 。其中, Δt_1 和 Δt_4 为主时钟的时间标记不确定性, Δt_2 和 Δt_3 为从时钟的时间标记不确定性。假设时间戳标记的不确定性为零均值的高斯随机过程, 主节点的时间标记不确定性 Δt_1 和 Δt_4 服从 $N(0, \sigma_{M(t)}^2)$, 从节点的时间标记不确定性 Δt_2 和 Δt_3 服从 $N(0, \sigma_{C(t)}^2)$, $\sigma_{M(t)}^2$ 和 $\sigma_{C(t)}^2$ 分别是主从时钟不确定性的方差。由于 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4$ 和 Δd 是独立的高斯随机过程, v_{θ_M} 是这 5 个独立随机过程的累加和, 因此 v_{θ_M} 也是一个高斯随机过程, 且其方差是各个独立随机变量的方差之和。

$$\sigma_{\theta_M}^2 = \frac{1}{2} (\sigma_{M(t)}^2 + \sigma_{C(t)}^2 + \sigma_d^2) \quad (4.33)$$

(2) 频率偏移 γ 的观测方程建模

在 4.3 节我们已经得到时钟偏移率 γ 的估计:

$$\gamma_M(n) = \frac{\theta_M(n) - [\theta_M(n-1) - \mu_\theta(n-1)]}{t_1(n) - t_1(n-1)} \quad (4.34)$$

式中, $\mu_{\theta}(n-1)$ 为在前一次时钟同步过程中对时钟偏移 $\theta_M(n-1)$ 的校正量。若校正算法为 $\mu_{\theta}(n-1)=\theta_M(n-1)$, 式 (4.34) 将成为:

$$\gamma_M(n) = \frac{\theta_M(n)}{t_1(n) - t_1(n-1)} \quad (4.35)$$

观测值 $\gamma_M(n)$ 的时间标记不确定性的方差为:

$$\sigma_{\gamma_M}^2 = 2 \cdot \frac{\sigma_{\theta_M}^2}{(t_1(n) - t_1(n-1))^2} = 2 \left(\frac{\sigma_{\theta_M}}{\Delta T} \right)^2 \quad (4.36)$$

而实际的频率偏差 $\gamma(n)$ 与时钟偏移 $\theta(n)$ 之间的关系为:

$$\gamma(n) = \frac{\theta(n)}{t_1(n) - t_1(n-1)} + \Delta\gamma \quad (4.37)$$

式中右边第一项是假定频率偏移在时间段 $[t(n), t(n-1)]$ 是固定不变的, 右边第二项 $\Delta\gamma$ 代表的是由于此假设而引入的建模误差。不失一般性地, 通常可将该建模误差 $\Delta\gamma$ 认为是一个零均值的高斯噪声。

比较上述频率偏移测量值 $\gamma_M(n)$ 和频率偏移真实值 $\gamma(n)$, 可以有如下的观测方程组:

$$\begin{cases} \theta_M(n) = \theta(n) + v_{\theta_M}(n) \\ \gamma_M(n) = \gamma(n) + v_{\gamma_M}(n) \end{cases} \quad (4.38)$$

其中, 由于 $\gamma_M(n)$ 是从时钟偏移 θ 的观测值估计得到的, 时间标记不确定性 v_{γ_M} 与 v_{θ_M} 相耦合, 它们的协方差为:

$$\text{Cov}(v_{\gamma_M}, v_{\theta_M}) = \text{Cov}(v_{\theta_M}, v_{\gamma_M}) = \frac{\sigma_{\theta_M}^2}{\Delta T} \quad (4.39)$$

v_{θ_M} 的自协方差为:

$$\text{Cov}(v_{\theta_M}, v_{\theta_M}) = \sigma_{\theta_M}^2 \quad (4.40)$$

于是, 观测方程组 (4.38) 可以写成向量形式:

$$\begin{bmatrix} \theta_M(n) \\ \gamma_M(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(n) \\ \gamma(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{\theta_M}(n) \\ v_{\gamma_M}(n) \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

用向量 \mathbf{z} 来表示 PTP 观测系统的观测变量, 则:

$$\mathbf{z}(n) = \begin{bmatrix} \theta_M(n) \\ \gamma_M(n) \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

用向量 \mathbf{v} 来表示时钟偏移的观测值 $\theta_M(n)$ 和频率偏移的观测值 $\gamma_M(n)$ 的时间标记不确定性, 则:

$$\mathbf{v}(n) = \begin{bmatrix} v_{\theta_M}(n) \\ v_{\gamma_M}(n) \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

因此, 结合晶振时钟的状态变量的向量表达式 (4.24), PTP 伺服系统的观测方程可写成矩阵形式:

$$\mathbf{z}(n) = \mathbf{H}\mathbf{x}(n) + \mathbf{v}(n) \quad (4.44)$$

式中, \mathbf{H} 为 PTP 观测系统的参数矩阵:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

若把 PTP 协议对时钟偏移的计算看作一个测量过程, 可以把由 PTP 计算得到的时钟偏移视作一个由 PTP 得到的测量值, 由式 (4.41), 把 PTP 获取时钟偏差 θ 的观测值 $\theta_M(n)$ 的过程用向量形式来描述:

$$\theta_M(n) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(n) \\ \gamma(n) \end{bmatrix} + v_{\theta_M}(n) \quad (4.46)$$

令 $y(n) = \theta_M(n)$, 由式 (4.42) 结合式 (4.22), 便可得到 PTP 的观测方程:

$$y(n) = \mathbf{C}\mathbf{x}(n) + v_{\theta_M}(n) \quad (4.47)$$

其中, \mathbf{C} 为 PTP 的观测矩阵, 它将真实的状态空间映射到了观测空间:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

4.4.3 基于卡尔曼滤波器的时间同步优化建模

结合前面所讨论的内容, 引入向量 $\boldsymbol{\mu}(n) = [\mu_\theta(n) \ \mu_\gamma(n)]^T$ 对时钟进行校正, 时钟的矫正过程可以用数学公式描述为:

$$\begin{cases} \theta(n) = \theta(n-1) - \mu_\theta(n-1) \\ \gamma(n) = \gamma(n-1) - \mu_\gamma(n-1) \end{cases} \quad (4.49)$$

因此, 时钟系统的状态转移模型式 (4.24) 需要做相应的改变。于是新的带时钟校正输入的时钟状态转移方程为:

$$\mathbf{x}(n) = \mathbf{A}\mathbf{x}(n-1) + \mathbf{B}\boldsymbol{\mu}(n-1) + \boldsymbol{\omega}(n) \quad (4.50)$$

其中, \mathbf{B} 为时钟校正输入 $\boldsymbol{\mu}(n)$ 的输入矩阵:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

因此卡尔曼滤波器迭代算法描述为:

$$\hat{\mathbf{x}}(n|n-1) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(n-1) + \mathbf{B}\boldsymbol{\mu}(n-1) \quad (4.52)$$

其中, $\hat{\mathbf{x}}(n|n-1)$ 是根据上一状态的最优结果进行状态预测的先验估计值。

先验估计误差的协方差为:

$$\mathbf{P}(n|n-1) = \mathbf{A}\mathbf{P}(n-1)\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (4.53)$$

这里, $\mathbf{P}(n|n-1)$ 为先验估计误差协方差, 且 $\mathbf{P}(n|n-1)$ 可以初始化为 \mathbf{Q} , 即 $\mathbf{P}(1|0) = \mathbf{Q}$ 。

卡尔曼增益矩阵为:

$$\mathbf{L}(n) = \mathbf{P}(n|n-1)\mathbf{C}^T(\mathbf{C}\mathbf{P}(n|n-1)\mathbf{C}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (4.54)$$

状态更新过程为:

$$\hat{\mathbf{x}}(n) = \hat{\mathbf{x}}(n|n-1) + \mathbf{L}(n)[y(n) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(n|n-1)] \quad (4.55)$$

后验估计误差的协方差为:

$$\mathbf{P}(n) = (\mathbf{I} - \mathbf{L}(n)\mathbf{C})\mathbf{P}(n|n-1) \quad (4.56)$$

基于前面的噪音分析, $\omega[n]$ 和 $\nu[n]$ 分别服从 $N(0, \mathbf{Q})$ 正态分布和 $N(0, \mathbf{R})$ 正态分布, \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 分别是状态噪声和观测噪声的协方差矩阵, 取值分别为:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \sigma_\theta^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\gamma^2 \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

$$\mathbf{R} = \sigma_{\theta_M}^2 \quad (4.58)$$

4.5 本章小结

本章分别对无线传感器网络中的节点时钟和IEEE1588精密时钟协议的同步过程进行了建模, 在此基础上, 带有时钟偏移率估计的IEEE1588精密时钟协议伺服时钟算法被提了出来, 然后将时间同步的过程用一个状态空间模型来描述并应用卡尔曼滤波器进行进一步优化。

第 5 章 基于卡尔曼滤波器的 MATLAB 和 OMNeT++ 平台下 IEEE1588 精密时钟同步协议的设计与实现

5.1 基于 MATLAB 的 IEEE1588 精密时钟同步协议的设计与实现

(1) 节点时钟的实现

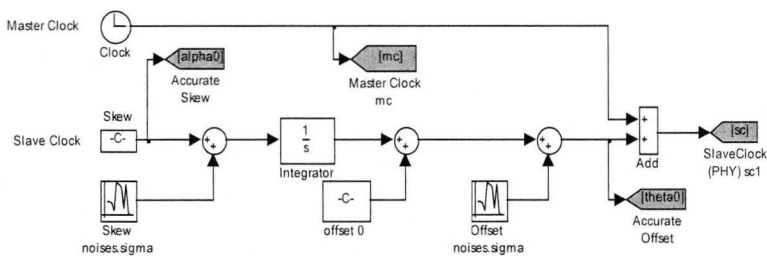


图 5.1 MATLAB 平台下从时钟的构造

如图 5.1，根据我们之前分析的模型，我们在 MATLAB 平台下，通过调用函数来完成节点时钟的构造。

(2) IEEE1588 精密时钟同步协议仿真模块的实现

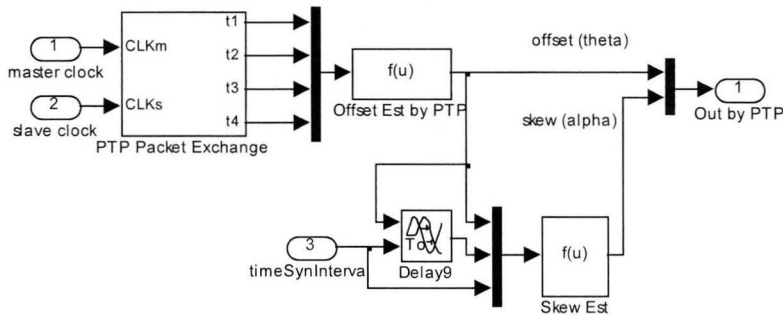


图 5.2 MATLAB 平台下的 PTP 仿真过程

如上图，在运算了主节点和从节点精密时钟同步协议后，得到了四个时钟观测值 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 ，并计算出时钟偏移 (offset) 和时钟偏移率 (skew)，IEEE1588 精密时钟同步协议的时钟偏移和时钟偏移率的同步估计误差便可以通过从节点将计算后的 offset 和 skew 与图 5.1 中的精确的 offset 和 skew 进行做差运算得到。

5.2 基于 OMNeT++ 的 IEEE1588 精密时钟同步协议的设计与实现

图 5.3 展示了 OMNeT++ 平台下的网络结构。根据 IEEE1588 精密时钟同步协议标准，PTP 协议的概念是使一个节点（从节点）的有偏时钟与主节点的精确时钟保持同步。

如图 5.3 所示，相对于已有针对有线网络的研究，为了体现无线传感器网络的信道特征，节点时钟的包交换机制和时间标记的不确定性特征，我们的模拟器不仅具有通过无线通道链接的两个无线传感器网络节点：主节点 `snode` 和从节点 `mnode`，还具有模拟无线传感器网络环境的其他模块，`ConnectionManager` 模块负责管理无线通道，`world` 模块则定义了无线节点随机分布的区域。该模拟器的一个特点是无线节点可以在指定的区域内以任意的速度和方向移动，这能够更好的模拟真实的移动无线网络。图中，白点表示 PTP 数据包的在无线频道的空中帧的传输。

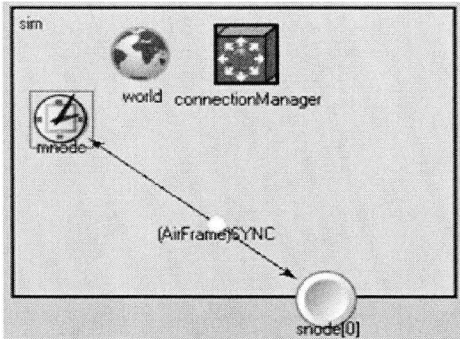


图 5.3 OMNeT++ 平台下网络仿真的总体架构

5.2.1 主节点的实现

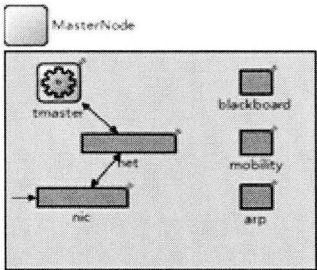


图 5.4 OMNeT++ 平台下主节点的实现

图 5.4 描述了主节点（`mnode`）的实现。主节点包含 `tmaster` 模块、`net` 模块、`nic` 模块等几个模块。其中，`tmaster` 模块用于模拟主时钟 PTP 协议，`net` 模块为 IP 网络层，`nic` 模块（Network Interface Card，网络接口卡）是物理层和 MAC 层。此外，节点中还有一些辅助子模块：ARP 模块（地址解析协议）用于网络层地址到

链路层地址的解析；mobility 模块用于管理节点的位置和运动；blackboard 模块用于模块间的信息共享。

值得指出的是，nic 模块的设计来源于 OMNeT++ 平台下的 MiXiM 框架，在 IEEE1588 精密时钟同步协议中，延迟和抖动是影响时间同步的重要因素，而 MiXiM 这一独特的功能使我们能够在模拟器上真实地模拟延迟和抖动。

tmaster 模块的主要任务是模拟主时钟和实现 IEEE1588 PTP 协议中所述的主节点的功能。tmaster 仅仅是一个简单的模块，它负责调度时间同步计时以启动 PTP 数据包交换以及发送 Dres 数据包作为接收到从节点发来的 Dreq 数据包的应答。主时钟的时间提供了 PTP 时钟同步协议的参考时间。当从时钟的时间与主时钟的时间进行同步时，我们把主时钟的时间看作是精确的时间。因此，在我们的模拟器中，主时钟的时间始终与通过调用的 OMNeT++ 中的 API 函数 simTime() 获得的仿真时间是一样的。

5.2.2 从节点的实现

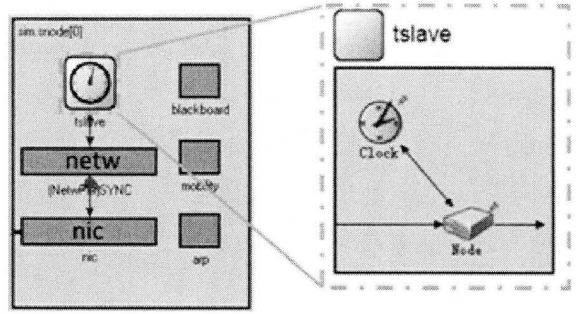


图 5.5 OMNeT++ 平台下从节点的实现

类似地，从节点（snode）与主节点具有相同的结构，但从节点的 tslave 模块替代了主节点的 tmaster 模块，用于执行由 IEEE1588 协议描述的从节点的功能。tslave 模块是一个复合模块（如图 5.5 所示），由 Node 模块和 Clock 模块复合而成。

Clock 模块负责模拟不准确的偏移从时钟，提供从时钟的本地时间，更新从时钟，实现时间标记机制；Node 模块负责 PTP 的消息包交换，记录 PTP 时间同步过程中的时间戳和时钟偏移估计。它对主从节点间的时间同步起着核心作用。

5.2.3 IEEE1588 精密时钟同步协议的实现

由 3.2 节可知，PTP 的同步过程需要四个包含时间标记的消息包，而除了这四个时间标记的消息，一些新的消息也被用于协助 PTP 同步程序的执行。PTP 协议通过交换含有主从节点时间标记的消息包来实现时间偏移和时间偏移率的估计。在我们的模拟器中，PTP 协议方案的实现如图 5.6 所示：

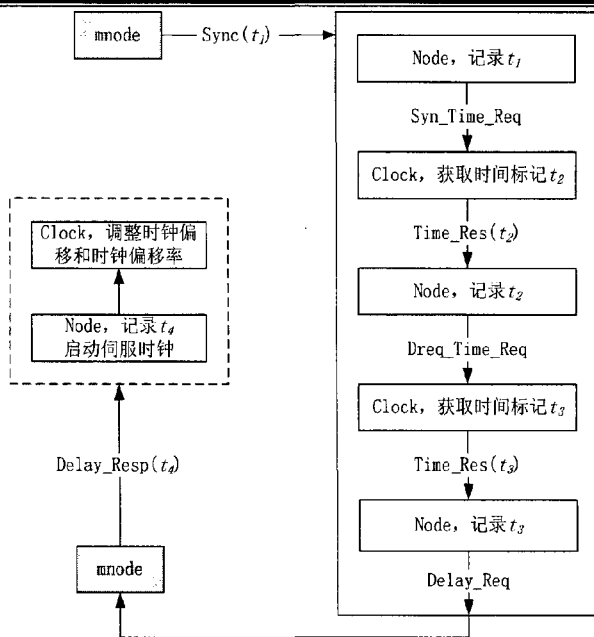


图 5.6 OMNeT++平台下的 PTP 仿真过程

在模拟过程的运行中我们可以看到数据包交换的动态过程具体步骤如下：

(1) 首先，mnode 模块在每一个时间间隔给对应的 snode 模块发送一个 Sync 消息包，该 Sync 消息包包含时间标记 t_1 ，这是由主时钟测量的时间同步消息包的发送时间。

(2) Sync 消息包首先到达 snode 的输入门，然后由 Node 模块接收。Node 模块记录 t_1 ，在同一瞬间传送 Syn_Time_Req 消息到 Clock 模块。Clock 模块接收 Syn_Time_Req，并获得其到达时间 t_2 ，然后发送包含 t_2 的 Time_Res 到 Node 模块。

(3) Node 模块接收 Time_Res，并记录该时间 t_2 。经过一段时间的延时，Node 模块发送一个 Dreq_Time_Req 消息到 Clock 模块。Clock 模块一旦接收到 Dreq_Time_Req 就获取本地时间 t_3 ，然后给 Node 模块发送一个含有时间 t_3 的 Time_Res 消息包。

(4) Node 模块接收到 Time_Res 并记录下 t_3 ，并立即发送延迟请求 Delay_Req 到 snode 的输出门。最后，该消息通过 snode 的输出门发送到了 mnode。

(5) mnode 接收 Delay_Req，并记录其到达时间 t_4 。然后 mnode 将 Delay_Resp 消息包发送到 snode。此数据包具有跟 Sync 数据包相同的传输过程，Node 模块是它的最终目的地。

(6) Node 模块接收 Delay_Resp，并记录下时间 t_4 ，然后启动伺服时钟操作来估计时钟偏移和时钟偏移率并发送给 Clock 模块。最终由 Clock 模块调整时钟偏移

5.2.4 OMNeT++ 平台下仿真模型的优点

MATLAB 是一个强大的数学软件，在算法的实现上有很大的优势，但是，对于真实网络的仿真，OMNeT++ 平台更能贴近实际。如前面的内容所述，OMNeT++ 平台不仅实现了对无线传感器网络节点时钟及 PTP 的仿真，它还对无线传感器网络的节点分布及无线信道进行了仿真，从而使我们的仿真实验更贴近真实的网络。

5.3 基于卡尔曼滤波器的精确时钟同步协议仿真和分析

在本文中，我们实现了两种不同的时钟模型：一个是 $\sigma_\theta=10^{-7}$ 和 $\sigma_\gamma=10^{-9}$ 的相对稳定的时钟（Clock A）^[48]，另一个 $\sigma_\theta=10^{-6}$ 和 $\sigma_\gamma=10^{-8}$ 的相对不稳定的时钟（Clock B）^[35]。表 5-1 描述了两个时钟的参数设置。

表 5-1 两个不同时钟的仿真参数设置

参数名	Clock A	Clock B
σ_θ	10^{-7}	10^{-6}
σ_γ	10^{-9}	10^{-8}
offset 初始值	0 μ s	0 μ s
skew 初始值	10 ppm	10 ppm
时钟更新间隔 τ_0	10^{-6} s	10^{-6} s
同步周期 ΔT	0.1 s	0.1 s

图 5.7 描述了两个不同时钟的时钟偏移（offset）随着时间变化的累积情况

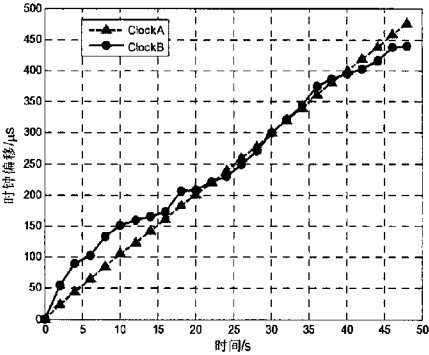


图 5.7 两个不同时钟时钟偏移随着时间变化的变化图

从图中我们可以看出，Clock B 的波动比 Clock A 显著，也就是说 Clock A 相对来说更加稳定。

为了探究不同时钟的 PTP 性能及卡尔曼滤波器的优化效果，我们设计了以下四个实验方案以验证我们提出的模型，并研究参数的变化对 IEEE1588 精密时钟同步协议时间同步性能的影响。

表 5-2 时间同步仿真方案

方案名称	时钟类型	是否采用卡尔曼滤波器
方案一	Clock A	否
方案二	Clock A	是
方案三	Clock B	否
方案四	Clock B	是

5.3.1 基于 MATLAB 的仿真实验

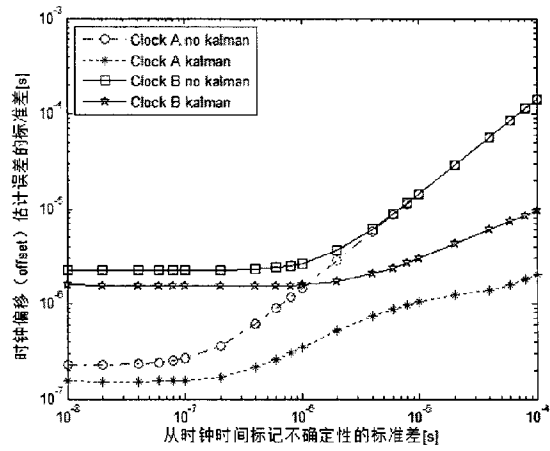


图 5.8 时钟偏移（offset）估计误差的标准差随时间标记不确定性的变化曲线

图 5.8 反映了时钟偏移（offset）估计误差的标准差与时钟时间标记不确定性的标准差的关系。从图中我们可以看出，无论采取什么样的时钟和是否使用卡尔曼滤波器进行优化处理，从时钟的时钟偏移（offset）估计误差的标准差均呈现出增加趋势。针对不同的时钟，相对稳定的时钟（Clock A）的 offset 估计误差的标准差总比相对不稳定的时钟（Clock B）要低；针对相同的时钟，采取卡尔曼滤波器优化后的时钟偏移（offset）估计误差的标准差总是低于未优化的。

当时钟时间标记不确定性的标准差较小（ $\sigma_{\eta} < 10^{-7}$ ）时，时钟时间标记不确定性对时钟偏移（offset）估计误差的标准差影响不大，时钟自身的稳定性决定了时钟的时间同步性能；当时钟时间标记不确定性的标准差逐渐增大（ $\sigma_{\eta} > 10^{-7}$ ），卡尔曼滤波器的优化性能得到了体现；尤其是当时钟时间标记不确定性的标准差很

大 ($\sigma_{\eta} > 10^{-5}$) 时, 相对稳定的时钟 (Clock A) 和相对不稳定的时钟 (Clock B) 在不采用卡尔曼滤波器优化的情况下, 时钟偏移 (offset) 估计误差的标准差几乎趋于一致, 而采取了卡尔曼滤波器优化之后, 放缓了时钟偏移 (offset) 估计误差的标准差的增长趋势。

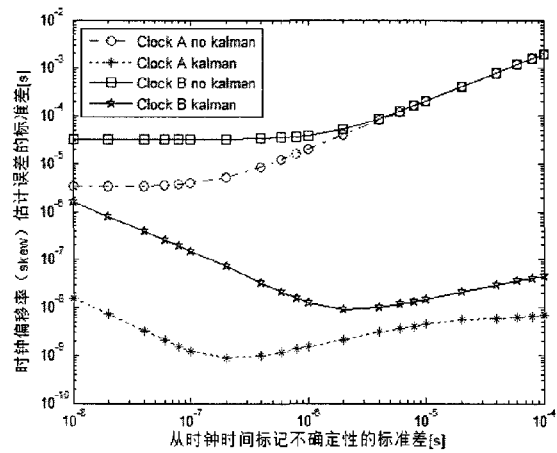


图 5.9 时钟偏移率 (skew) 估计误差的标准差随时间标记不确定性的变化曲线

从图中我们可以看出, 针对不同的时钟, 相对稳定的时钟 (Clock A) 的时钟偏移率 (skew) 估计误差的标准差总比相对不稳定的时钟 (Clock B) 要低; 而针对相同的时钟, 采取卡尔曼滤波器优化后的时钟偏移率 (skew) 估计误差的标准差总比未优化的要低。

当时钟时间标记不确定性的标准差较小 ($\sigma_{\eta} < 10^{-7}$) 时, 时钟时间标记不确定性对不经过卡尔曼滤波器优化的时间同步过程中时钟偏移率 (skew) 估计误差的标准差不会产生很大的影响; 而当时钟时间标记不确定性的标准差很大 ($\sigma_{\eta} > 10^{-5}$) 时, 相对稳定的时钟 (Clock A) 和相对不稳定的时钟 (Clock B) 在不采用卡尔曼滤波器优化的情况下, 时钟偏移率 (skew) 估计误差的标准差几乎趋于一致; 而无论采取什么样的时钟以及时钟时间标记不确定性的标准差如何变化, 采取了卡尔曼滤波器优化之后的时钟偏移率 (skew) 估计误差的标准差的变化趋势明显比不采取卡尔曼滤波器优化的变化趋势稳定。

5.3.2 基于 OMNeT++的仿真实验

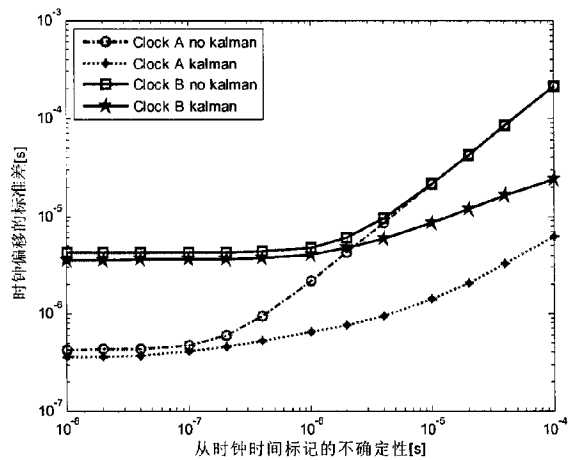


图 5.10 时钟偏移（offset）估计误差的标准差随时间标记不确定性的变化曲线

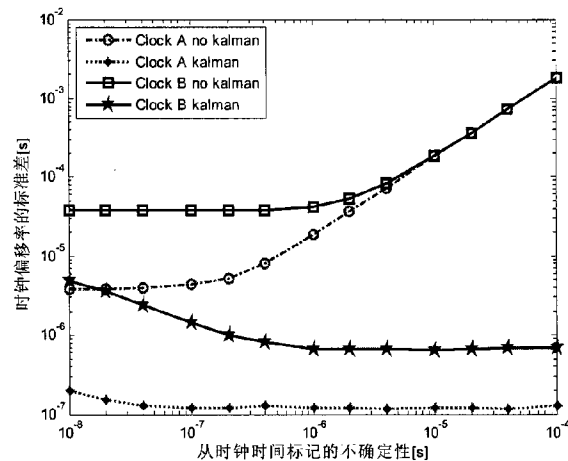


图 5.11 时钟偏移率（skew）估计误差的标准差随时间标记不确定性的变化曲线

图 5.10 反映了时钟偏移（offset）估计误差的标准差随着时钟时间标记不确定性的标准差增大的变化趋势。从图中我们可以看出，在 OMNeT++平台下的仿真跟在 MATLAB 平台下的仿真结果具有相同的趋势。从时钟的时钟偏移（offset）估计误差的标准差均呈现出增加趋势。针对不同的时钟，相对稳定的时钟（Clock A）的时钟偏移（offset）估计误差的标准差总是低于相对不稳定的时钟（Clock B）；而针对相同的时钟，采取卡尔曼滤波器优化后的时钟偏移（offset）估计误差的标准差总是低于未优化的。

图 5.11 反映了时钟偏移率 (skew) 估计误差的标准差随着时钟时间标记不确定性的标准差增大的变化趋势。从图中我们可以看出, 跟时钟偏移 (offset) 估计误差的标准差随着时钟时间标记不确定性的标准差增大的变化一样。在 OMNeT++ 平台下的仿真跟在 MATLAB 平台下的仿真结果具有相同的趋势。针对不同的时钟, 相对稳定的时钟 (Clock A) 的时钟偏移率 (skew) 估计误差的标准差总是低于相对不稳定的时钟 (Clock B); 而针对相同的时钟, 采取卡尔曼滤波器优化后的时钟偏移率 (skew) 估计误差的标准差总是低于未优化的。其余的细节在此就不再赘述, 而关于在两个平台下仿真结果细节上的不同我们将在下一节给出。

5.3.3 MATLAB 和 OMNeT++ 的对比分析

对比图 5.8 和图 5.10 可以发现, 当仿真结束时, 虽然两个平台下的走势相同, 但是从宏观上看, 在 OMNeT++ 平台下时钟偏移 (offset) 估计误差标准差的增长趋势更稳定, 而从图 5.9 和 5.11 中我们也可以发现, 在 OMNeT++ 平台下, 经过卡尔曼滤波优化后时钟偏移率 (skew) 的估计误差独立于时间标记的不确定性, 不会随着时间标记不确定性的增大而急速变化。这也说明 OMNeT++ 平台比 MATLAB 平台的仿真结果更好。

从上面两节的实验结果还可以看出, 在两个平台下时钟偏移 (offset) 和时钟偏移率 (skew) 随着时间标记不确定性增大的变化趋势是一样的, 也就是说, 在 MATLAB 上验证了我们的算法, 而转移到 OMNeT++ 平台上时, 这个算法依然能够实现。但是, 由上面的仿真结果图的细节可以看出: 在 OMNeT++ 平台下仿真时, 各时钟的误差标准差均大于在 MATLAB 平台下的仿真, 而且 OMNeT++ 平台下仿真结果的曲线没有 MATLAB 平台下平滑。这是由于 MATLAB 平台是一个纯数学的仿真, 而 OMNeT++ 平台仿真的一个网络。从第 5.2 节的内容我们也看到, 在 OMNeT++ 平台的仿真中还有无线信道以及节点位移等真实的网络因素, 尽管我们已经对无线传感器网络中影响 IEEE1588 精密时钟同步协议的因素进行了建模, 但是实际应用中还有一些我们没有考虑到的噪声, 这也说明了 OMNeT++ 平台更具有真实性, 在以后的拓展研究中, OMNeT++ 平台下的仿真器拥有更好的移植性。

5.4 本章小结

本章在两个平台实现了无线传感器网络中 IEEE1588 精密时钟同步协议的仿真, 最后结果表明, 当时间标记不确定性较小时, 节点的时间同步精度主要取决于节点本身, 而当时间标记不确定性较大时, 选择稳定度较高 (成本较大) 的节点没有多少意义, 而卡尔曼滤波器能够明显的提升时钟同步的性能。此外, 在 OMNeT++

平台下的仿真比在 MATLAB 平台下更能贴近实际的网络，更适合下一步研究的拓展。

第6章 总结

6.1 本文的主要工作

作为分布式系统的重要组成部分，时间同步是工业无线网络的关键支撑技术，对保证各节点之间的协同工作，正确的处理数据以及可靠的传输起着十分重要的作用。无线传感器网络中传感器受到无线信道的制约，再加上其自组织网络特有的属性，如何获取高精度的时间同步一直是一个难题。在现有的针对无线传感器网络的时间同步协议中，很多协议未能实现优化能源效率及精度的目标。

IEEE 1588 精密时钟同步协议（PTP）能将时间同步的精度控制在微秒级，且操作简单，能更好的平衡能源功耗和同步精度。但是 PTP 是针对有线以太网提出的，目前研究工作所面临的一个难题，就是如何将 PTP 时间同步算法应用于无线传感器网络中，而且能达到较高的时间同步精度。

本文开展了如下研究工作：

（1）通过对 PTP 的研究，尝试将 PTP 同步机制移植入无线传感器网络，并对无线传感器网络中影响 PTP 的因素进行分析。

（2）分别建立无线传感器网络的节点时钟和 PTP 的时间包信息交换过程的模型，并针对无线传感器网络的信道特征，实现 PTP 的系统建模。

（3）把整个 PTP 的时间同步过程转化为一个状态空间模型。用一个状态空间模型完整的来描述时间同步的过程，在已有研究的基础上，针对无线传感器网络的环境特征，重构了参数系统和调节机制，并利用卡尔曼滤波器对时间同步过程进行优化。

（4）基于无线传感器网络环境中时间标记不确定性的特征，在 MATLAB 和 OMNeT++两个仿真平台中开发了面向无线传感器网络的 PTP 的仿真平台，并对仿真结果进行对比分析。

本研究用一个状态空间模型描述了 PTP 的时间同步过程，将其应用于无线传感器网络，并运用卡尔曼滤波器对其进行优化，提高了时间同步的精度。本文将理论分析与软件仿真相结合，在不同的仿真平台下构建了仿真系统，并对实验结果进行了对比。

6.2 下一步工作展望

本研究将针对有线以太网的 IEEE1588 精密时钟同步协议（PTP）应用于无线传感器网络，并设计了改善时间同步性能算法。在建模以及实验仿真方面取得了一定的成果。但鉴于条件因素限制，完成的工作十分有限，但依然可进行下一步的工作：

(1) 剖析基于卡尔曼滤波器优化的 PTP 性能，揭示其随时间标记不确定性变化波动的机制及原因。

(2) 实现节点之间的多跳时间同步以及大规模无线传感器网络仿真，以进一步验证和分析 PTP 在无线传感器网络中的性能。

(3) 从软件仿真模型转移到硬件平台，以进行进一步开展应用研究。

参考文献

- [1] RHEE I K, LEE J, KIM J, et al. Clock Synchronization in Wireless Sensor Networks: An Overview [J]. Sensors, 2009, 9(1): 56-85.
- [2] SUNDARARAMAN B, BUY U, KSHEMKALYANI A D. Clock Synchronization for Wireless Sensor Networks: A Survey [J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 281-323.
- [3] ELSON J, GIROD L, ESTRIN D. Fine-Gained Network Time Synchronization Using Reference Broadcasts [J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2002, 36(SI): 147-163.
- [4] REN F, LIN C, LIU F. Self-Correcting Time Synchronization Using Reference Broadcast in Wireless Sensor Network [J]. Wireless Communications, 2008, 15(4): 79-85.
- [5] HAN T, LI B, XU L. A Universal Fault Diagnostic Expert System Based on Bayesian Network [C]//Proceedings of the 2008 International Conference on Computer Science & Software Engineering. Wuhan, Hubei: IEEE, 2008: 260-263.
- [6] MAROTI M, KUSY B, SIMON G, et al. The Flooding Time Synchronization Protocol [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2004: 39-49.
- [7] SHANG F. An Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Networks, 2011, 6(7): 999-1008.
- [8] EIDSON J, AGILENT L, LEE K. IEEE 1588-Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems [C]//Proceedings of the ISA/IEEE Sensors for Industry Conference. Houston, TX: IEEE, 2002: 98-105.
- [9] LIU Y, YANG C. OMNeT++ Based Modeling and Simulation of the IEEE 1588 PTP Clock [C]// Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical & Control Engineering (ICECE). Yichang: IEEE, 2011: 4602-4605.
- [10] XU C, ZHAO L, XU Y, LI X. Time Synchronization Simulator and Its Application [C]//Proceedings of the 2006 1ST IEEE Conference on Industrial Electronics & Applications. Singapore: IEEE, 2006: 1-6.
- [11] GIORGI G, NARDUZZI C. Modeling and Simulation Analysis of PTP Clock Servo [C]// Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Precision

- Clock Synchronization for Measurement, Control & Communication. Vienna: IEEE, 2007: 155-161.
- [12]DAI X, MITCHELL J E, YANG Y, et al. Development and Validation of a Simulator for Wireless Data Acquisition in Gas Turbine Engine Testing [J]. IET Wireless Sensor Systems, 2013, 3(3): 183-192.
- [13]HEWISH M. Little Brother is Watching You: Unattended Ground Sensors [J]. Janes International Defense Review, 2001, 34(6): 46-54.
- [14]WALROD J. Sensor Network Technology for Joint Undersea Warfare [C]//Proceedings of the NDIA Joint Undersea Warfare Technology Conference, San Diego, 2002:246-254.
- [15]ARICI T, ALTUNBASAK Y. Adaptive Sensing for Environment Monitoring Using Wireless Sensor Networks [C]//Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC),2004,5(1):2350-2355.
- [16]MAINWARING A, CULLER D, POLASTRE J, et al. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring [C]//Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. ACM, 2002: 88-97.
- [17]NOURY N, HERVE T, RIALLE V, et al. Monitoring Behavior in Home Using a Smart Fall Sensor and Position Sensors [C]//Proceedings of the IEEE-EMBS Special Topic Conference on Micro-Technologies in Medicine and Biology. Lyon: IEEE Computer Society, 2000: 607-610.
- [18]赵泽, 崔莉. 一种基于无线传感器网络的远程医疗监护系统 [J]. 信息与控制, 2006, 35(2): 265-269.
- [19]SCHWIEBERT L, GUPTA S K S, WEINMANN J. Research Challenges in Wireless Networks of Biomedical Sensors [C]//Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2001: 151-165.
- [20]COLERI S, CHEUNG S Y, VARAIYA P. Sensor Networks for Monitoring Traffic [C]// Proceedings of the Allerton Conference on Communication, Control and Computing. 2004: 32-40.
- [21]MEYER S, RAKOTONIRAINY A. A Survey of Research on Context-Aware Homes [C]//Proceedings of the Australasian Information Security Workshop Conference on ACSW Frontiers 2003-Volume 21. Australian Computer Society, Inc., 2003: 159-168.

- [22]POTTIE G J. Wireless sensor networks[C]//Information Theory Workshop, 1998. IEEE, 1998: 139-140.
- [23]BLUMENTHAL J, HANDY M, GOLATOWSKI F, et al. Wireless Sensor Networks: New Challenges in Software Engineering [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Emerging Technology and Factory Automation, 2003.
- [24]任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络 [J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [25]马祖长, 孙怡宁, 梅涛. 无线传感器网络综述 [J]. 通信学报, 2004, 25(4):114-124.
- [26]孙利民. 无线传感器网络 [M].清华大学出版社有限公司, 2005.
- [27]EDGAR H, CALLAWAY J R. 无线传感器网络: 体系结构与协议 [J]. 2007.
- [28]ELSON J E, ESTRIN D. Time Synchronization in Wireless Sensor Networks [D]. University of California, Los Angeles, 2003.
- [29]MILLS D L. Internet Time Synchronization: The Network Time Protocol [J]. Communications, IEEE Transactions on, 1991, 39(10): 1482-1493.
- [30]PING S. Delay Measurement Time Synchronization for Wireless Sensor Networks [J]. Intel Research Berkeley Lab, 2003.
- [31]ELSON J, ROMER K. Wireless Sensor Networks: A New Regime for Time Synchronization [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2003, 33(1): 149-154.
- [32]SICHITIU M L, VEERARITTIPHAN C. Simple, Accurate Time Synchronization for Wireless Sensor Networks [C]// Proceedings of the Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003. 2003 IEEE. IEEE, 2003, 2: 1266-1273.
- [33]ANCEAUME E, PUAUT I. A Taxonomy of Clock Synchronization Algorithms [M]. IRISA, 1997.
- [34]HU A, SERVETTO S D. Asymptotically Optimal Time Synchronization in Dense Sensor Networks [C]//Proceedings of the 2nd ACM international conference on Wireless sensor networks and applications. ACM, 2003: 1-10.
- [35]GANERIWAL S, KUMAR R, SRIVASTAVA M B. Timing-Sync Protocol for Sensor Networks [C]//Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, 2003: 138-149.
- [36]VAN G J, RABAEY J. Lightweight Time Synchronization for Sensor Networks [C]//Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications. ACM, 2003: 11-19.

- [37]EIDSON J C, FISCHER M, WHITE J. IEEE-1588 (Trademark) Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems[R]. NAVAL RESEARCH LAB WASHINGTON DC, 2002.
- [38]CORRELL K, BARENDT N, BRANICKY M. Design Considerations for Software Only Implementations of the IEEE 1588 Precision Time Protocol [C]//Conference on IEEE. 2005, 1588: 10-12.
- [39]ADEMAJ A, KOPETZ H. Time-Triggered Ethernet and IEEE 1588 Clock Synchronization [C]//Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, 2007. ISPCS 2007. IEEE International Symposium on. IEEE, 2007: 41-43.
- [40]DOPPLINGER A, INNIS J. Using IEEE 1588 for Synchronization of Network-Connected Devices [J]. Industrial Control Design Line, 2007
- [41]GIORGI G, NARDUZZI C. Performance Analysis of Kalman-Filter-Based Clock Synchronization in IEEE 1588 Networks [J]. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 2011, 60(8): 2902-2909.
- [42]DOLLIMORE J, KINDBERG T, COULOURIS G. Distributed Systems: Concepts and Design [J]. Massachusetts: Addison Wesley, 2005.
- [43]HAMILTON B R, MA X, ZHAO Q, et al. ACES: Adaptive Clock Estimation and Synchronization Using Kalman Filtering [C]//Proceedings of the 14th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2008: 152-162.
- [44]RUTMAN J, WALLS F L. Characterization of Frequency Stability in Precision Frequency Sources [J]. Proceedings of the IEEE, 1991, 79(7): 952-960.
- [45]YANG Z, PAN J, CAI L. Adaptive Clock Skew Estimation with Interactive Multi-Model Kalman Filters for Sensor Networks [C]//Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010: 1-5.
- [46]HUANG Y, YANG Y, LI T, et al. An Open Source Simulator for IEEE1588 Time Synchronization over 802.11 Networks[C]//Modelling Symposium (EMS), 2013 European. IEEE, 2013: 560-565.
- [47]EIDSON J C. Measurement, Control, and Communication Using IEEE 1588 [M]. Springer, 2006.
- [48]ABUBAKARI H, SASTRY S. IEEE 1588 Style Synchronization Over Wireless Link [C]// Proceedings of the 2008 IEEE International Symposium on Precision

Clock Synchronization for Measurement, Control & Communication. Ann Arbor, MI: IEEE, 2008: 127-130.

致 谢

匆匆三年，白马过隙，转瞬间我的研究生学习即将结束。回顾这三年的研究生生活，让我感慨万千，这期间的点点滴滴历历在目，其中有论文写作的艰辛，有收获成果的喜悦。在论文即将完成之际，我要对那些曾经帮助过我的人衷心地道一声感谢。

首先，由衷的感谢我的指导老师王进华和李太华副教授。论文能够顺利完成，离不开您们悉心的指导及严格的督促。从论文的选题到修改定稿，从整体框架的构思布局到文章细节的修改，您们都倾注了大量的心血，对我的论文提出了很多宝贵的意见。您们严谨的治学态度和对学生负责的敬业精神，都让我受益颇多。您们传授给我的不仅仅是学习的知识和方法，更重要的是对我学术品德、生活态度的感染，这将使我受益终生，在此表示最衷心的感谢！

感谢西南大学电子信息工程学院的老师们的和领导们，为我们创造了良好的学习环境和科研氛围。这里要特别感谢曾经在学术上和生活上给予过我帮助的所有人，是你们指引了我通往探求知识的道路。

感谢黄艺文师姐对我学习过程中给予的指导与帮助，感谢实验室的同学及师弟师妹们营造的轻松愉悦的学术氛围，感谢室友在读研期间给予的关心与帮助。

感谢我的家人，你们无私的关注、理解与支持，让我能够顺利毕业。

真诚地感谢所有给予我关心、教诲和帮助的老师、亲人、同学和朋友们！

何沐曦

2015年3月29日于西南大学

攻读硕士学位期间已发表的论文

- [1] 何沐曦, 黄艺文, 吕保强, 等. OMNeT 平台下基于 802.11 网络的 IEEE1588 协议的仿真实现[J].西南大学学报(自然科学版). (已收录)

攻读硕士学位期间参加的科研项目

- [1] 国家自然科学基金项目: 面向无线传感网时间同步的分布式非均匀采样动态观测器研究(项目号: 61101135, 2012.01-2014.12)
- [2] 西南大学基本科研业务费专项资金项目: 基于跨层优化和能量均衡的无线传感器网络路由协议设计(项目号: XDJK2012C065, 2012.1-2014.1)
- [3] 西南大学基本科研业务费专项资金项目: 无线传感器网络时间同步状态空间建模及滤波器设计(项目号: XDJK2012C063, 2012.1-2014.1)
- [4] 国家自然科学基金青年项目: 认知协作网络物理层保密通信性能分析与节能传输策略研究(项目号: 61401372, 2015.01-2017.12)
- [5] 教育部高等学校博士点新教师类基金项目: 复合衰落与非 Gauss 干扰环境下基于协作通信的认知无线网络性能评估与优化(项目号: 20130182120017, 2013.01-2016.12)