清 华 大 学

综 合 论 文 训 练

题目：超高速、高精度数控振荡器(NCO)设计

系 别：电子工程系

专 业：电子信息科学与技术

姓 名：杨一雄

指导教师：杨华中 教授

2017 年 5 月 28 日

关于学位论文使用授权的说明



中文摘要

在目前众多的基于无线传感器网络的应用中，时钟同步技术是一个非常关键的技术。时钟同步技术可以用来实现任务调度，统计数据分布，协调动作与通信等功能。由于无线传感器网络具有低功耗、分布式、节点数量大等特点，因此越来越多的传感器网络节点开始采用太阳能自供能的电源方案。

本文通过研究太阳能的时间分布信息，提出了一种基于太阳信标的时钟同步方案。这项技术依托于传感器节点对于太阳能的采集，不需要大规模的射频收发同步以及其他的额外操作，在分布式的传感器节点内部算法复杂度低，平均功耗低。由于很多无线传感器网络应用的主要任务是数据采集，因此这项时钟同步技术可以满足基于太阳能自供能的传感器节点对于采样时钟的需求。

关键词：时钟同步；太阳能；无线传感器网络

ABSTRACT

Time synchronization technology stands in a very critical position of today’s wireless sensor network applications. Time synchronization technology is used in the area of task scheduling, data synchronization, task coordination, and communication functions. Since WSN system is concerned to be distributed, lower power consumed, and of large amount, more and more WSN sensor nodes adopt to use the power management system based on solar energy harvesting.

In this article, we studies the time distribution of solar energy information, and proposes a time synchronization scheme based on the solar beacon. This technology works according to the solar information collected by WSN sensor node, without too much radio frequency transmitting and receiving, which causes a very low power consumption. The synchronization is mainly realized in the server and the algorithm in the sensor node is of less complexity. Considering that a large quantity of WSN application is used for data acquisition, this time synchronization technology is able to meet the sample clock requirement of WSN sensor nodes based on solar energy harvesting.

Keywords: Clock Synchronization; Solar; Sensor Network

目 录

[第1章 引言 5](#_Toc390423703)

[1.1 无线传感器网络 5](#_Toc390423704)

[1.2 时钟同步技术 6](#_Toc390423705)

[1.3 需求分析与主要工作 7](#_Toc390423706)

[第2章 传统的时钟同步技术 10](#_Toc390423707)

[2.1 无线传感器网络的时钟同步技术概述 10](#_Toc390423708)

[2.1.1 网络时间协议（NTP） 10](#_Toc390423709)

[2.1.2 全球定位方法（GPS） 11](#_Toc390423710)

[2.1.3 广播式时钟同步技术 11](#_Toc390423711)

[2.1.4 多跳转发式时钟同步技术 13](#_Toc390423712)

[2.2 传统无线传感网时钟同步技术评价标准 14](#_Toc390423713)

[2.3 本章小结 15](#_Toc390423714)

[第3章 基于太阳信标的时钟同步技术的建模与算法 16](#_Toc390423715)

[3.1 概述 16](#_Toc390423716)

[3.2 时钟延时校准 16](#_Toc390423717)

[3.2.1 采样时钟延时校准算法 16](#_Toc390423718)

[3.2.2 影响因素分析 18](#_Toc390423719)

[3.3 时钟频偏修正 24](#_Toc390423720)

[3.3.1 采样时钟频偏修正算法 24](#_Toc390423721)

[3.4 算法优化分析 26](#_Toc390423722)

[3.5 本章小结 26](#_Toc390423723)

[第4章 硬件平台与实验 28](#_Toc390423724)

[4.1 硬件平台 28](#_Toc390423725)

[4.1.1 硬件架构方案 28](#_Toc390423726)

[4.1.2 硬件模块选型与配置 29](#_Toc390423727)

[4.1.3 硬件平台工作流程设计 35](#_Toc390423728)

[4.2 实验设计与结果 37](#_Toc390423729)

[4.2.1 时钟延时校准实验 37](#_Toc390423730)

[4.2.2 时钟频偏修正实验设计 48](#_Toc390423731)

[4.3 本章小结 50](#_Toc390423732)

[第5章 总 结 52](#_Toc390423733)

[5.1 论文工作总结 52](#_Toc390423734)

[5.2 未来工作展望 52](#_Toc390423735)

[插图索引 54](#_Toc390423736)

[表格索引 56](#_Toc390423737)

[参考文献 57](#_Toc390423738)

[致 谢 59](#_Toc390423739)

[声 明 60](#_Toc390423740)

[附录A 外文资料的调研阅读报告或书面翻译 61](#_Toc390423741)

# 引言

## 无线传感器网络

无线传感器网络（Wireless Sensor Network），简称无线传感网（WSN）是由大量分布式的微型传感器节点通过自组织等形式组成的无线网络。近年来，随着传感器技术、片上系统SoC（System on Chip）技术、通信技术以及低功耗技术的不断发展[1][2][3]，无线传感网作为物联网（Internet of Things, IoT）的核心技术也得到了全世界的广泛关注。



图 1.1无线传感器网络结构示意图（摘自电子工程世界网站）

虽然从20世纪中期开始，各种应用分布式传感器组成的测试系统雏形已经在各种场合中开始试用，但是成体系的无线传感网的成型最早可以追溯到1996年，William J Kaiser教授（UCLA大学）向DARPA提交了一份名为“低功耗无线集成微型传感器”的报告；两年后，Gregory J Pottie教授正式给出了无线传感网的定义[1]。随后，无线传感网被认为是“继互联网之后的第二大网络”[4]，对它的研究在全球范围内掀起了一阵热潮，引起了世界各国的关注。2003年，美国自然科学基金委员会通过了无线传感网的研究计划，投资3000多万美元用于WSN的传感器技术、架构、MAC协议以及网络通讯协议的研究[4]。我国也同样开展了对于无线传感网及其应用的研究。2006年，我国发布了《国家中长期科学与技术发展规划纲要》，无线传感网作为信息技术的龙头，其中的智能感知和自组网技术占据了信息技术三大前沿方向的两项[5]。

无线传感网结合了嵌入式技术、MEMS技术、通信以及分布式信息处理技术，核心的应用是实时监测和采集环境数据，并将数据按时发送到服务器或其他接收端进行处理[2]，极大地方便了社会、科研等对于环境实时数据的需求，可以广泛的应用于科研、医疗、日常生活、工业监控、农业生产、环境监控、国防军事、交通管理等诸多领域。因此，无线传感网被美国《商业周刊》、MIT等评论认为是改变21世纪的关键技术[1]，在未来的生活中占据着重要的位置。

## 时钟同步技术

对于任何系统中，同步的时钟是系统任务调度、同步协作以及数据分析的关键。对于集总参数的系统，系统时钟通常可以有核心电路产生一个唯一的全局时钟或者全局参考时钟，作为不同模块的始终基准。由于系统中不同模块通过有线的硬件直接相连，因此不同模块中的时钟延时可以忽略不计。而对于分布参数的系统，由于系统的不同模块在硬件层面上距离远、没有硬件通过有线的方式直接相连，因此系统无法通过核心模块产生一个延时可以忽略的全局时钟或者全局参考时钟，不同的模块就必须依靠自身的硬件来维护本地时钟。不同模块的本地时钟的开启时间、时钟频率、任务的性质、运行的环境因素如温度、湿度、光照等因素均有所不同，因此必须要通过时钟同步的手段对系统不同模块的本地时钟进行频繁的校准。这种校准可以是连续的，也可以是间隔一段较长的时间的；可以是周期性的，也可以是依据不同的环境条件自适应的，最终实现不同模块的时钟在不同的时序位置都可以保证一个相对稳定的时钟精度。

无线传感器网络是典型的分布式网络，对于时钟同步的要求也有着自己的特点。因此无线传感网的时钟同步技术是无线传感器网络领域中的一项“支撑技术”[3]。

## 需求分析与主要工作

随着各项技术的逐渐成熟，无线传感器网络的技术已经不断地被应用到各行各业中，衍生出了各式各样的应用模式。根据不同的应用需求，无线传感网正在不断地向体积小、功耗低、自供能等方向发展[6]。而对于自供能的无线传感网来说，太阳能是一个理想的选择[19]。相比有机械能等其他的自供能能源而言，太阳能分布区域广，能量转化技术成熟，效率高，稳定性好，更加适用于大多数无线传感器网络的功能需求[19]。但是这种供能方式对比与传统的电池来说，其稳定性和带载能力还是有一定的差距的。因此，最大可能的降低每一部分的功耗是设计基于太阳能自供能的无线传感器网络的关键课题。

在传统的时钟同步技术中，时钟同步的主要任务是同步任务时间，使不同节点内的任务调度相互协调，完成工作，如声音测距系统的声音测距任务[6]、监控传感网的实时射频发射任务[7]。因此这种时钟同步的重点在于校对传感器节点的本地时钟，保证节点操作的同步执行。但是对于大多数以分布式数据采集为主的无线传感网而言，这种任务是不必要的[5]，例如湖水藻类测试系统[8]、农田温度光照测试系统等。这些无线传感网系统所需求的时钟同步技术主要基于节点数据同步，对同步精度需求有限。例如农田温度测试系统中，传感器节点不需要实时是用射频发射数据，也不需要精确地保证每一个节点都同步的执行操作。但是在终端进行数据分析的时候，需要了解各个节点返回数据的时序位置，需要对相同时间段的数据进行对比分析，这就需要无线传感网系统实现数据的同步[9]。

总结以上的需求内容：

（1）功耗低。符合自供能无线传感网的功耗需求。

（2）要求实现数据同步。只有同步数据才能实现对于采集数据的分析和处理。因此这种时钟同步技术实质上落实到了采样时钟的时钟同步上。

（3）结构简单。面对复杂的应用需求和应用环境，符合自供能无线传感网节点对面积体积小型化的需求。

（4）节点算法复杂度低。对于自供能无线传感器网络，节点的算法复杂度直接关系到了工作频率和能量效率。因此，传感器节点的算法复杂度低也是一项重要的指标。

针对这样的需求，本文提出了基于太阳信标的时钟同步技术。这项技术借用了传感器节点本身进行太阳能检测的功能，在节点定时返回数据之后，通过每一个节点所检测到的太阳能时间序列进行时钟同步，不需要频繁的射频收发，在保证精度的情况下，极大地降低了系统节点的功耗。具体的表现如下：

（1）时钟同步依托于被测数据，不需要额外的射频收发，因此功耗被大大的降低。

（2）基于太阳能数据的时钟同步的采样时钟频率基本等价于数据采集的采样频率，基本可以满足对于数据同步的需求。

（3）不需要额外的节点和节点模块，符合无线传感器网络对于面积的需求。

（4）针对于数据的时钟同步的算法可以在服务器终端完成，因此节点的算法复杂度足够低。

综上所述，这一项基于太阳信标的时钟同步技术有很大的可行性。在今天这样一个无线传感器网络被普遍的应用和推广的时代，这项针对于无线传感器网络的时钟同步技术是有很大的研究价值的。

本文的研究工作主要从以下几个部分展开，如图1.2：

（1）分析基于无线传感器网络的时钟同步需求和传统的时钟同步技术的优缺点，找到核心的问题和技术难点。

（2）分析时钟同步的特点，分别对时钟延时校准和时钟频偏修正这两个方面进行数学建模、理论分析、算法设计以及性能评估。

（3）根据太阳能的实际情况和算法的需求设计硬件架构，针对性能需求对硬件模块的功能进行选型、配置、调试和测试。

（4）根据理论分析的基础设计实验，分析新的时钟同步技术的影响因素、性能指标，针对实验中面临的问题，提出改进方案。根据实验数据和理论分析，对算法的实现提出有效的优化方案。

（5）总结，并对未来有研究价值的工作进行分析和规划。



图 1.2论文研究思路

# 传统的时钟同步技术

## 无线传感器网络的时钟同步技术概述

正如引言中所提及，无线传感器网络是一种特殊的分布式无线网络。由于无线传感网具有独特的组网应用环境和数据分析需求，所以也同样需要不同的时钟同步技术来与之匹配。

首先，由于无线传感网需要采集大量的环境数据作为数据积累和理论分析的基础，因此网络节点的分布通常距离远、环境因素差距大、位置条件各异，所以不同节点的本地时钟之间偏差往往很大[10]。其次，无线传感网的主要功能是数据采集，数据处理的需求相对于其他的网络而言要低；而后端处理数据的基础往往是对大量的节点采集数据进行统筹和大数据分析，因此无线传感网对于数据的时间相关性要求很高，需要高精度的采样时钟支持系统的正常工作、保证数据的有效性。再次，现代无线传感网根据不同的应用背景，往往需要工作在条件不同的环境之中，而为了满足不同的环境需求，无线传感网的网络节点往往具有体积小、功耗低、不易维修更换等特点，因此在进行时钟同步的时候，硬件的功耗和体积也是一项非常重要的指标。

目前行业中对于时钟同步的研究已经有多的突破，也提出了很多比较有效的方法来解决分布式系统的时钟同步问题。这些同步方法根据参考时钟来源的不同，可以分为网络时间协议（Network Time Protocol, NTP）和全球定位方法（Global Positioning System, GPS）；按照不同的射频通信方式，可以分为广播式的时钟同步技术和多跳转发式的时钟同步技术。

### 网络时间协议（NTP）

第一代NTP协议最早是在1988年，由Mills提出的[4](Network Time Protocol (Version 1) Specification and Implementation)，目前应用最广的是2010年提出的第四代[11]。NTP协议是依托于互联网的时钟同步协议，时钟同步的基准是世界标准时间（Coordinated Universal Time, CUT）。NTP协议采用的是树形的同步结构[11]。不同优先级的时间服务器在不同的层里。根节点时间服务器的时钟通过互联网、广播等方式与世界标准时钟同步。每一层的时间服务器通过其父时间服务器的时间进行同步。最新的NTP协议可以实现每一层的时间服务器通过多个上层时间服务器作为标准时钟源来完成时钟同步，同时还引入了同层的不同时间服务器作为时钟的校准，从而实现同层时钟同步。

因此，对于无线传感网而言，基于NTP协议的时钟同步算法的时钟同步精度比较高，但是需要大量的多层时钟同步服务器和多路时钟同步路径作为同步的硬件基础，这无形中增大了无线传感网的硬件代价和组网成本。同时，大量的射频收发也增大了无线传感网的功耗。

### 全球定位方法（GPS）

GPS全球定位系统最早源于美国军方1958年的军事项目，其主要功能是为军方提供24小时、全球性的实时数据支持和导航定位服务[12]。目前，GPS的卫星群有24颗，配有高精度的铯原子钟，保证了时钟的精度。卫星时间通过大型地面监控站完成与世界标准时钟CUI的同步与校准，精度可以达到0.1微秒以下[12]。最重要的是，经过了几十年的发展，GPS的民用设施日趋完备，其硬件组网结构简单便捷，足以满足巨大部分的分布式网络的需求。

对于无线传感网而言，GPS的精度和效果远远高于网络本身对于时钟同步的需求[13]。然而基于无线传感网对低功耗的要求和硬件成本的考虑，将每一个传感器节点都安装上GPS接收机也是不现实的。因此，直接在无线传感网系统中应用GPS方法是不可行的，需要借助其他的时钟同步方法的辅助，才能实现无线传感网所需求的时钟同步。

### 广播式时钟同步技术

广播式时钟同步技术是最早的一项时钟同步技术。其中，比较经典的一项广播式时钟同步技术是参考广播时钟同步协议（Reference Broadcast Synchronization，RBS）[14][15]。这项技术的工作模式如下图所示。



图 2.1 RBS示意图

首先在网络中存在一个与外界标准时钟相连的广播源，在时钟同步校准任务开始时，广播源向全局的分布式节点广播一个标准时间戳（Standard Timestamp）。在相同的无线传感网区域中，接收节点被认为实在同一时刻获取数据，并分别在本地时钟上记录接收时间。然后不同的接收节点之间的通过射频通信交换时间戳在本地时钟的位置数据，从而确定不同接收节点之间的延时。

这种同步的方法主要问题有以下几点：

（1）需要大量的射频通信。首先，在时钟同步的开端需要由广播源对所有的节点接收端进行射频广播。随后这种采用receiver-receiver模式的协议[15]中，接收节点之间需要进行大量的时间戳信息交换和验证来保证同步时间数据的可靠性。在一些RBS的优化算法中，还包含了一些差错重传和多发验证的通信协议，更是增加了射频通信的代价。对于目前的传感网节点而言，这种频繁的射频通信会带来很大的功耗代价。

（2）相比于其他的时钟同步协议，RBS协议默认在广播过程的关键路径时间是一致的，如图2.1所示。但是由于实际的传输路径、信道条件、发送端和接收端的数据处理过程都会产生时间误差，因此RBS协议的时钟同步算法的性能随节点数目的增加而降低，其精确度略低于其他协议。经过多种优化处理方案后，RBS目前的时钟精度可以达到[15]。

与RBS算法类似的基于广播式的时钟同步技术还包括延时测量时钟同步技术（Delay Measurement Time Synchronization，DMTS）等。

### 多跳转发式时钟同步技术

相比于经典的广播式时钟同步技术，一些新的设计，如多跳同步等，加入了时钟同步技术的流程，用来提高时钟的同步精度。这就是多跳转发式的时钟同步技术。其中，一种比较新颖的多跳转发式的技术是洪泛时钟同步技术（Flooding Time Synchronization Protocol，FTSP）。

FTSP技术结合广播式时钟同步技术、图论与生成树结构、采用层次化的结构和多跳同步方法，共同完成分布式网络的时钟同步任务[16]。其主要结构如图2.2所示。信标节点作为广播源，与外界的标准时钟相连，其他的传感器根据距离等因素分成不同的层次。图中相同颜色的节点就是同层的节点。每一层节点的时钟由上一层的节点作为标准时钟完成同步校准。每一个节点会接收到一个或多个上层节点的校准来提高精度。然后在节点本地通过线性回归的算法对多个同步数据进行分析和处理。



图 2.2 FTSP示意图

这种时钟同步算法采用层次结果，依照生成树的理论生成整个网络，极大地提高了网络时钟同步的鲁棒性。同时每一个节点接收多个上层节点的校准，并根据这些数据进行整合处理，因此时钟的精度也有所提高（）[17]。

FTSP的局限性在于：

（1）功耗大。FTSP技术与RBS类似，需要大量的射频收发来支持同步，其提高精度的同时带来了较大的硬件功耗代价。

（2）多跳式技术表征了每一次时钟同步需要多层次的射频同步，因此时间代价比较大，完成一次全局的时钟同步周期比较长。

（3）相比于其他的多跳式技术，每一个节点需要接收到多个上层节点的数据，然后对数据进行分析和线性规划处理。相比于传统的握手式同步校准方法，其节点的算法复杂度大，带来的时间代价和功耗代价也需要考虑。



图 2.3 握手式时钟同步校准方法

## 传统无线传感网时钟同步技术评价标准

对于传统的无线传感网硬件和应用而言，时钟同步技术的评价标准按照重要性的主次关系主要分为以下几点：

（1）同步精度。传统的无线传感网往往应用于国防、气象、航海等精度需求较高的领域中。因此时钟同步精度是一项最重要的指标。一般的时钟同步算法精度都要限制在毫秒级一下，性能较好的技术精度可以达到微妙级、十微妙级。

（2）功耗。功耗是各个时代、各个领域内无线传感网节点都需要重点考虑的重要因素。

（3）稳定性。传统无线传感网更多的需要工作在环境相对比较恶劣，不易更换和维修的区域，因此，网络系统和时间同步的稳定性也是一项重要的指标。

## 本章小结

本章对于传统的时钟同步技术的性能、特点、类型以及评价标准进行了调研。结合传统无线传感网的应用，分析了传统时钟同步技术所面临的需求。但是在不断更新换代的无线传感网领域中，更多的应用和需求被提出，传统的标准和评价方式都面临着新的挑战，这为面向新应用、新结构应运而生的新技术提供详尽的需求和丰富的机会。

# 基于直接数字式的振荡器设计

## Rom-Cordic 混合结构设计

### 系统架构

直接数字综合器在频率分辨率、捷变性能上取得较大成功，但较锁相环式振荡器，传统DDS仍存在时钟频率受限，输出杂散性能不佳等情况。

为了提高DDS的时钟频率和杂散性能，本文采用了基于Rom的查找表和基于Cordic的角度旋转法结合的思路，系统的面积功耗有限增长的情况下，极大减少了查找表的寻址深度，在频率分辨率不变的情况下提高了查表速率。

预留系统架构图

图x显示了DDS的系统框图。它的输入为16 bit的频率控制字(fcw)和相位控制字(pcw)，用于更改系统输出的正弦波频率和初始相位。相位累加器(PA)根据fcw 和 pcw 生成16 bit 的数字相位，表示相位在(0, 2pi) 区间内所占比例。由于三角函数的对称性，利用(0, 1/4pi) 区间正、余弦函数值，通过对称操作即可表示正弦函数的值域。相位压缩模块(PC)提取出3 bit 对称操作控制字(mcw)，13bit 伪相位phi’ 输出至PAC, 用于查找表寻址和控制旋转角度。

PAC包括384-byte的查找表和7组角度旋转电路。Phi’的1~6位用于查找表寻址，获得粗分辨率单频信号组(X\_m, Y\_m, X\_r, Y\_r)。Phi’ 的7~13位用于控制旋转角度，对粗分辨率单频信号进行修正，获得细分辨率单频信号(X\_m’, Y\_m’)。最后通过对称操作模块，将细分辨率信号从(0,1/4 pi) 映射到(0, 2 pi)区间，最后输出。

## 时钟延时校准

### 采样时钟延时校准算法

解决无线传感网的时钟同步问题，首先要解决的问题是节点时钟的校准。由于无线传感网是由大量的分布式节点自组织建立起来的网络，因此系统在开启工作或掉电重启的过程中并不能保证每一个节点都可以同步的开启。这就导致了第一个层次的时钟误差。



图 3.1 时钟延时示意图

如上图所示，其中A是信标节点，B是传感器节点。由于系统在开启的过程中不能保证同步开启，所以不同的节点采样时钟A，B之间存在一个延时。在理想情况下，两个时间波形A，B是相似的，其变化趋势是一致的（幅值可能存在一定的差异）。实际情况中，A，B分别是两个离散的时间序列，因此可以通过计算一定的方法来确定两序列之间的延时。

**方法一：计算欧几里得距离**

用两个不同序列的欧几里得距离关于序列的延时的函数模型可以表示为：

其中。为了消除延时后不同维度引起的误差，将欧氏距离取方均根值：

在给定序列A，B的条件下，计算函数的最大值就是理想的时钟同步点，此时对应的就是理想的延时。

**方法二：计算皮尔逊相关系数**

用两个离散序列的皮尔逊相关系数关于序列的延时的函数模型可以表示为：

即：

其中：

是节点B的采样时钟周期。

在给定两个序列A，B的情况下，函数取得最大值的点就是理论上的时钟同步点，对应的就是理论上可以计算得到的延时。

由于信标A的采样时钟频率为，所以，在最理想的情况下传感器节点B的时钟精度可以被限定在时间之内。由此可知这个算法的局限性在于如果节点的采样时钟频率较低，则不同的节点可能不会在同一个时刻上，而是会采样在相互的采样时钟间隔内采样。因此在序列匹配的过程中会产生误差，限制时钟同步的精度。在这个思路的基础上，如果作为信标节点的太阳能时间序列A具有更高的采样精度，则序列匹配和时钟同步的效果会更好。



图 3.2 高采样率信标示意图

如上图所示，如果信标节点A的时钟采样精度为，那么依照计算皮尔逊相关系数的方法，其函数表达式为：

除了信标时钟序列A的坐标系数外，与原始的表达式基本一致。同样计算出函数的最大值点，对应的就是理想的延时。由于信标采样时钟频率提高到了原来的倍，因此每一个匹配点的理想浮动范围即是原始方法的，精度提高了倍。

### 影响因素分析

有一些因素对于这种基于太阳能的时钟延时校准算法有比较大的影响，如太阳的变化率、较大的时钟频偏、较大传感器测试噪声等。

**（1）太阳能的变化率**

从3.2.1中所描述的算法可知，时钟延时校准的主要依据是太阳能曲线的相关性，也即是会受到太阳能的变化率的影响。算法中所描述的皮尔逊相关系数的表达式可以表示如下：

其中主要太阳能的变化率对于序列A、B的一阶、二阶中心距而言没有直接的影响。但是会影响到序列A、B的互相关项。对于连续波形而言，A、B波形的互相关项关于时钟有延迟修正量的函数可以表示为：

如果认为A，B波形变化趋势一致，即

则有：

其中是实际的时钟延迟。

由表达式可知，如果相关函数的稳定性随波形的变化率不同而改变，对于极端的情况，如果波形的变化率恒为0，则相关函数不随的改变而改变；当波形不为0，但是比较低时，计算出来的相关函数的值相对比较平稳，没有突出峰值，因此不易寻找搜索精确的时钟延时测量值。如果波形的变化率很大，则k值的改变会极大的改变相关函数的值，相关函数的波形起伏明显，峰值突出，易于确定延时的位置。所以对一个完整的波形而言，不同波段的变化率的模表征了波形不同波段在计算相关系数时的权值，影响到了时钟延时校准的效果。

相比于太阳能的变化率，影响到时钟延时校准的外界因素主要是噪声与干扰，其中噪声指的是由于环境因素和传感器精度所引发的稳定的波形抖动，而干扰则指的是对于某一个节点而言，由外界环境因素引起的非全局的突变。由前文分析可知，对于理想情况下，只要太阳能的变化率非零，就可以通过就计算波形相关度的方式来实现波形的匹配与始终延时的消除。但是由于噪声的存在，所以实际算法对于太阳能变化率的需求存在上界。假设噪声为理想的加性高斯白噪声，那么噪声越大，则噪声低频分量强度就越高，这就限制太阳能变化率的频率范围不能过大，高频分量不能过多。

另一个比较明显的外界因素是干扰。干扰的来源主要是不可预测的外界环境因素。对于受干扰的节点所测试到的波形而言，干扰的幅度较大，其变化率范围比较大，基本包含了太阳能的变化率范围。对于频率低于太阳能变化率的干扰，比如长时间的遮挡、大面积的阴影等，太阳能的变化率如果保持在一个比较高的水平，则可以通过滤波去除干扰的影响。但是对于大部分的其他干扰而言，如果仅仅依靠无后效性的数据处理算法，那么干扰对于波形匹配的影响往往是难以消除大的。所以在缺少大量数据的学习分析的前提下，最好的处理干扰的办法就是去除有干扰的波形。

因此，太阳能曲线的变化率越高，则波形的抗噪声干扰的能力越高。在实际测试时发现，太阳能的变化效果随时间而位置的不同而变化。从时间上看，清晨和黄昏时段，太阳能基本处于单调变化，变化率较高。正午的太阳能变化率处于正负浮动的截断，测试数据变化比较明显。此外，正午阳光充足，受到全局的环境干扰时变化比较明显，比如云朵的遮挡、阴天等情况，此时进行时钟延时校准的效果也比较明显。从位置上看，有阳光直射的位置，光照强度比较高，相对而言太阳能的变化比较明显。但是同时室外环境比较复杂，经常会受到比较强的反射、折射以及阴影遮挡的影响，导致波形的不匹配。与之相比室内环境没有阳光直射，阳光强度较低，变化不明显。同时，室内环境相对比较稳定，在没有人等因素的影响的情况下一般不会出现比较明显的干扰，但是由于变化率降低，室内环境中稳定的噪声是影响时钟延时校准的主要因素。

**（2）时钟频偏**

在嵌入式系统中，存在时钟漂移从而导致时钟频偏是无法避免的。一般的晶振时钟漂移约在40ppm左右，而RC振荡电路产生的时钟漂移则大得多，根据不同的电路设计而有所不同。在理想的情况下，测试时间长度为，其中是传感器节点的采样时钟频率。假设信标节点的采样频率是传感器节点采样频率的倍，则根据3.2.1中的分析可知，信标节点采样波形A和传感器节点采样波形B的皮尔逊相关系数可以表示为：

从统计学的角度讲，采样时钟频率的频偏主要影响到采样的间隔和采样点的时域位置，对于整个序列的统计规律没有明显的影响，因此当采样时间足够长，采样点数足够多时，序列A、B的统计规律不变按，、、、的值不会因为频偏而又有明显浮动。唯一影响到的是序列A、B的相关项。在没有频率偏移的理想情况下，序列A、B的相关系数最大时，两个序列的采样点所处的位置，应该是两个波形差值后变化趋势基本相同的位置。（如图）如图所示，相关系数最大时，相对采样点所处在的实际时域位置之间的时间间隔满足关系式：

由于相关系数的理论最大值应该位于两个序列的变化趋势完全匹配的时候，因此此时计算得到相关系数，距离理论最大值最近，往往也是离散相关系数序列的最大值，符合3.2.1中的理论推导。



图 3.3 序列相关最大值位置

如果考虑到序列B相对于序列A的频偏，因此两个序列的时钟周期满足关系式：

所以：

因此在进行离散序列相关系数计算时，实际的波形对应关系如图所示。由于波形B的周期长度不是精确的长度，所以B序列被扭曲了，产生了较大的形变。



图 3.4 扭曲的节点序列

由**（1）**中的分析可知，在考虑连续波形的情况下，影响到相关系数的主要项是波形A、B的互相关项：

如果再加上对于B时钟漂移的修正，即伸缩扭曲了曲线B，则有：

根据**（1）**对于太阳能变化率的影响分析可知，不同波段的太阳能变化率表征了太阳能曲线在计算相关系数时的权值。由于始终漂移的存在，波形B产生了系数为k的波形伸缩效果，实际上相当于改变了B曲线太阳能的变化率。

对于离散波形而言，由于理想的时钟延时校准精度为，所以当传感器节点采样时钟频率的频偏取值为：

采样时间长度取值：

时，时钟延时的校准精度的理论值可以达到理想值。



图 3.5 时钟校准精度与频偏的关系

根据上文的分析，不妨先假设波形变化率的绝对值恒定，因此，如果继续保持上述的频偏采样，当采样时钟的长度取值范围为：

时，原始的校准位置误差为。

根据以上关系式，反过来也可以进行推导，即如果测试结果误差为，则实际的平均频偏最小值会达到：

但是从图（b）中可以看出，匹配波形的中心点的精度可以保证在理想的。那么推广到普通的太阳能波形变化曲线，可以认为匹配精确地点位于整个采样时间序列的**重心**。

## 时钟频偏修正

### 采样时钟频偏修正算法

在理想的情况下，可以假设节点的本地时钟是精确地，不存在频偏和相位漂移。因此在这个假设下，完成3.1.1中所描述的算法，就可以实现对于无线传感网系统的时钟同步。但是在实际情况下，尤其是SoC中没有晶振的RC时钟发生器，时钟序列是不稳定的，存在比较明显的时钟漂移。因此，在消除了3.2.1中的序列延迟后，还应该补充优化算法来修正采样时钟的频偏。

首先要估算时钟频偏的粒度。正如前文所提及的，对于不同的无线传感网节点而言，时钟的偏移差距是很大的。这里主要有两种情况：

（1）由标准晶振产生的时钟。

在一个嵌入式系统中，系统时钟往往是由晶体振荡器电路产生的，因此可以保证很高的时钟精度。对于一般的晶振而言，晶振精度约为1~100ppm，典型值为40ppm，即或。因此对于数据采集的时钟来讲，其时钟精度是有保障的。此时的时钟频偏往往来自于其他的因素，如环境因素、处理器定时器误差等因素。

但是由于晶振不易被集成，因此工艺难度大、成本高，在一些需要高精度数据的领域中会被常常用到，如国防、航空[18]等。

（2）由RC振荡器产生的时钟

由于晶振不易被集成，因此目前的低成本嵌入式SoC中，使用“RC+振荡器”电路产生时钟的情况比比皆是。相比于晶振电路，RC振荡器的Q值低，幅频响应通带较宽，因此时钟漂移大，频偏高，时钟很不稳定。再加上环境因素和定时器设计等软件因素也会产生影响。因此，这种传感网电路有必要进行时钟频偏的修正。



图 3.6 置信点示意图

对于时钟延时校准而言，在采样的波形中，太阳能变化率较大的区域往往可以更好实现波形的匹配（分析见3.2.2），从而可以更加精确地实现时钟延时的校准。这些区域中的点被称为时钟延时校准的**置信点**。在一段波形中往往会有多个置信点，选择这些区域的置信点进行校准，就可以在这段波形中找到多个校准同步后的高精度时间点。如图3.6所示，信标时钟序列A的采样率是节点时钟序列B的采样率的倍。图中的点，就是经过第一步时钟延时校准后的置信点，对于有限的时钟频偏而言可以认为是精确地时钟同步点。因此，通过高采样率的信标节点时钟序列A可以计算出两个相邻置信点的时间间隔：

而这段时间间隔里，序列B中对应的周期数为。那么，可以计算出来序列B在这段时间间隔中的实际时钟周期为：

从而修正对应的序列B在点，之间的时钟频偏：

假设时钟频偏在较短的时间间隔内可以认为是线性变化。那么根据这个基本原理，信标采样时钟频率为，因此可以计算得到这个算法对频偏估计的理论精度为：

## 算法优化分析

根据以上算法设计和精度误差分析内容，可以看出，基于太阳信标的时钟同步算法的局限性主要集中在以下几点：

（1）算法依赖于太阳能曲线的变化趋势，曲线变化率的大小对于算法的性能有比较大的影响，而实际的太阳能变化曲线受天气和环境的影响很大，这一点制约了算法的精度和适用范围。

（2）时钟延时校准算法受外界的噪声影响比较大。现有的理论算法对于误差的修正能力有限。

（3）系统采样时钟的频偏对于时钟延时校准算法的影响比较大。从而也会影响到第二部分时钟频偏修正算法的精度。

（4）整个算法对于外界的异常干扰的处理缺乏手段。一旦发生这种强度比较大、持续时间比较长的干扰，服务器就需要提出整段的数据来去除干扰因素。

针对这些问题，可以提出几点改进方案如下：

（1）可以通过大量的数据分析，找到每天中太阳能变化比较明显的时间段，比如清晨、正午、黄昏等时间段进行集中的时间同步，然后通过这些区域的同步置信点来完善其他时间段的时间同步。

（2）可以在节点段针对太阳能不变化，自适应的选取一部分变化率比较大的点作为置信点。

（3）调研提出更加有效的序列匹配算法。

（4）通过机器学习等大数据分析的方法研究干扰对于时钟同步的影响并在算法中加入修正因子。

## 本章小结

这种基于太阳信标的时钟同步的方法不同于传统的时钟同步方法。传统的时钟同步实质上等价于修改了分支节点的本地时钟，使得不同的节点严格的依照经过校准的全局同步时钟执行工作。但是由于无线传感器网络独特的应用需求，传感器节点的任务主要是数据采集和部分数据计算，所以不同节点之间在任务执行方面的时钟同步需求不大。基于这种考虑，本文的时钟同步算法将同步的工作重点由任务调度同步转移到了数据同步。实际的数据同步对于传感器的测试同步需求不高，所以这种同步方式完全可以适用于新一代的无线传感网系统之中。

基于太阳信标的时钟同步算法分为两个主要部分，分别是基于采样时钟序列的时钟延时校准和基于延时校准的时钟频偏修正。本章主要描述了两种算法的主要思路、数学模型和理论推导，从理论上保证了算法的可行性。然后通过实验和假设对算法实现的精度和误差进行了详尽的分析，并最终针对这些不足提出了改进优化的方向。

基于太阳信标的时钟同步算法的同步数据可以和传感器节点采集的数据一起发回服务器终端，因此完全避免了传统时钟同步技术中对间歇性射频收发同步信号的功耗损失。而对于测试数据依赖于太阳能数据的节点，可以认为这种同步算法完全是凭借现有的全部数据实现的，消除了大部分的射频功耗。这对于对能量效率需求较高的太阳能自供能节点而言是有很大的优势的。

# 硬件平台与实验

## 硬件平台

### 硬件架构方案

为了实现基于太阳信标的时钟同步技术，需要设计一个可以测试太阳能数据的无线传感器节点测试平台。因此设计了以下硬件架构来对太阳能进行测试。



图 4.1硬件架构图

如图所示，整个架构主要由MCU、电源管理、传感器组、射频模块和本地存储模块五部分组成。整个节点系统由MCU控制，太阳能环境数据由传感器采集输入系统，经过MCU计算处理后通过本地存储模块和射频模块存储发送数据到终端，并最终在终端实现太阳能数据的时钟同步。



图 4.2 硬件工作流程图

### 硬件模块选型与配置

**（1）MCU**

MCU是控制整个无线传感网节点系统的核心。在本项目中，对MCU的需求主要集中在两方面：

（a）低功耗。为了搭建基于太阳能的自供能传感器节点的应用环境，硬件平台需要模拟出这种环境对于低功耗的需求，因此需要选择一款低功耗的MCU。

（b）非易失。在实际应用中，大部分的无线传感器网络采用的都是易失的MCU。但是对于供能环境无法得到保证的自供能无线传感网而言，非易失的MCU可以及时的保存和恢复掉电之前的工作状态，鲁棒性好，极大的提升了系统功能的稳定性。

针对于这两种需求，硬件平台的 MCU设计选择了非易失处理器THU1010N。

THU1010N是基于51单片机架构的低功耗非易失处理器芯片。由于本身具有非易失的特性，因此可以通过Power Gating的方式实现分区域功耗管理，满足平台设计对于低功耗和非易失的需求。此外，经过实验测试，THU1010N芯片可以实现平台实验所需求的基本的对于I2C和SPI总线的控制，带载能力满足平台所需的其他硬件的需求。

在连接外设的接口上，THU1010N提供了两个通用串行总线I2C接口和SPI接口。其中在硬件设计中I2C总线主要用来接入传感器组和实时时钟RTC模块；SPI总线则用来配置射频模块和本地存储模块。

**（2）电源管理模块**

根据实验的需求，电源管理模块首先应该满足模拟的自供能传感器节点的需求，也就由太阳能来提供能量。在此处，电路设计有太阳能电池板为主的自供能通路。同时，为了测试便捷，又补充了一路由“电池—DC-DC Converter—选通开关”组成的测试供能通路，组成了两路可切换的功能方案[19]。



图 4.3 电源管理模块

如图4.3所示，两路供电电路分别是由太阳能电池板供电的自供能通路和由电池供电的稳定测试通路混合组成。自供能通路由太阳能电池板、太阳能驱动的选通电路组成。当选择自供能模式时，无需DC-DC Converter的自供能跳线选通，由一块的太阳能电池板供电。当太阳能电池板产生的电压达到了最佳输出供电电压MPPT[19]时，由另一块的太阳能电池板驱动供电选通电路接通供电电路，实现对开发板的供电。

当选择使用固定电池来执行测试功能时，电源需要选择4.5V以上的供电电源（实际上，为了保证供电的稳定性和持续性，通常选择使用6V电源为DC-DC Converter供电），跳线选择需要DC-DC Converter的引脚，同时连通外接的1.5V-6V的开关电源来驱动选通电路，实现3.3V稳定的供电电压。

两个电源通路都会最终通过1.5V的DC-DC Converter实现对MCU的两路功能。

经过实验测试，在正常的环境下，两路供能电路都可以实现对MCU和其他硬件模块的稳定持续供电。

**（3）I2C接口、传感器组、实时时钟模块**

如前文所提及，传感器组和实时时钟RTC模块是有I2C总线接入的。

I2C（inter-Integrated circuit）总线是一种常见的通用两线式串行总线。两条引线接口分别为数据总线（SDA）和时钟总线（SCL），此外在个别的硬件设备中还附加一条辅助线用于控制从属设备的使能控制。

I2C接口的两路总线默认为高电平，数据在时钟的高电平采样。单次数据的发送量为8bit，其中控制指令和地址信息都是由“7bit的信息+1bit的应答（Ack）信号”完成通信。因此，I2C总线的读写操作分别需要特定的时序来完成。

实现基于太阳信标的时钟同步技术的核心就是太阳能随时间变化的数据。因此在硬件平台上需要一个较精确地光照强度传感器作为太阳能量度的测量模块。

基于时钟同步技术的需求，光照传感器的性能应满足以下条件：

（a）传感器精度足够高。太阳能在一天中的变化往往是比较稳定的。变化率较高的区段往往出现在一些关键的时间节点上，如清晨、黄昏以及正午（详见3.2.2）。在其余的时间段，太阳能的变化往往是稳定的。因此需要较高精度的传感器才能有效地测试出太阳能的变化。

（b）功耗低，工作速度快。由于时间同步的需求，传感器的工作速度必须要高于采样时钟频率才能正常的工作。在实际测试中，传感器节点的采样工作频率一般是秒级或分钟级的。为了实现时钟同步的算法，信标节点的采样频率还要更高。因此，时钟同步的高采样精度一般要高于1Hz。在实际实验中采用了10Hz的采样精度，也取得了一定的效果。因此传感器的工作时间也一般要限制在100ms以内，除去调用传感器所需要的配置时间，传感器的工作时间一般要被限制在80ms以内。

在此选用了罗姆公司（Rohm）的光照传感器BH1710。其主要性能如下：

（a）正常工作时功耗为，待机功耗不超过。

（b）测试精度最高达到1lx，中等分辨率为4lx，足以满足对太阳能的测试需求。

（c）测试工作时间为不等，时间长短随着数据分辨率的增加而增大。在中等分辨率（4lx）下，单次测试的时间为16ms。

以上特性数据表明，BH1710光照传感器的功能完全可以满足测试实验的需求。

光照传感器的数据由I2C接口完成通信。

光照传感器的使用模式主要有两种，分别是连续测量模式和单步测量模式，分别应用于不同的需求中。其中，连续模式主要应用于光照强度变化较高、对于光照强度信息需求较大或者需要通过光照强度变化设置外部中断的应用中，而单步测试的模式主要应用于低功耗的测试应用中。在本项目中，光照传感器主要采用单步测试模式。其中，单步测试模式可以由后台执行，这对于主要由单线程配置构成的51架构MCU而言是提高工作频率，降低时间损耗的重要方法。

除了光照传感器以外，硬件平台还配置了温度传感器。温度传感器可以进行环境温度变量的测试，用于实现不同的温度环境对于实验的影响。

温度传感器的需求和光照传感器不同，主要需求是低功耗。低功耗是每一个平台外设都需要考虑的关键因素。相比于光照强度数据在时钟同步技术中的需求，温度传感器仅仅是作为辅助功能存在的，因此只需要间隔一段时间完成一次温度传感器的操作即可，同时也不需要很高的测量精度作为技术实现的要点。

作为实验平台的组成部分，实时时钟RTC模块的作用是至关重要的。RTC模块的特点是时钟精度高，因此可以作为系统的标准时钟。所以RTC的设计主要目的是作为时钟同步频偏修正算法的测试模块。为了实现这个功能，RTC的主要需求如下：

（a）低功耗，并具有辅助电源。低功耗无需赘言。辅助电源的作用是保证RTC在整个系统因为各种原因，如太阳能供电时断电、电路异常断电等，掉电时能够保持正常工作。这一点保证了RTC的电路的稳定性以及时钟数据的有效性。

（b）足够的分辨率。RTC如果可以作为系统的标准时钟，就必须保证拥有足够的分辨率。实际上系统中的时钟频偏修正方法修正的时间误差往往被限制在1s以内，因此被比较理想的RTC可以保证毫秒级的分辨率，这样可以保证不会太低，起不到作用，又可以保证不会因为分辨率过高而功率过大。

在这里，满足以上两个条件的RTC 模块很少，因此选择了PCF8523模块作为硬件平台的RTC模块。PCF8523的主要特点是功耗低，低功耗模式功耗仅为。但是美中不足的是其分辨率只能保证在秒级，因此需要通过一定数据的积累才能依靠RTC模块来时钟同步效果的对照。

以上三个模块都是通过I2C总线挂载到MCU上。

**（4）SPI接口**

如前文所提及，SPI接口是由基于51架构的MCU——THU1010N提供的通用串行总线接口。其中射频和本地存储模块都是由SPI总线接入系统的。

SPI总线（Serial Peripheral Interface），即串行外设接口，是一种全双工环形串行同步总线，数据的传输方式为数据交换。一般SPI的接口主要有四条信号线，即MISO、MOSI、SCLK、CS，引脚的默认电平为高电平。

表 4.1 SPI接口说明

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 主机（Master）接口 | 从机（Slave）接口 | 功能 |
| SDI/MISO | SDO/MISO | 主机接收从机数据 |
| SDO/MOSI | SDI/MOSI | 主机发送从机数据 |
| SCLK | SCLK | 时钟 |
| CS | CS | 片选信号 |

SPI总线控制器内部包含移位寄存器和缓存寄存器，可以通过MCU内部配置选择在时钟的上升沿/下降沿完成数据发送并在随后的下降沿/上升沿完成数据的采样。主机（Master）每一次通过移位寄存器发送1bit，从机（Slave）采样接受1bit的同时也会将指定的从机寄存器中的数据由高到低位返回SPI控制器的缓存寄存器。每一个周期完成8bit的环形串行数据交换。

**（5）射频模块与本地存储模块**

在硬件平台中，射频模块的主要功能是将采集的数据集中的发送回服务器。为了符合自供能传感器节点的特性，射频模块的选择需求主要是低功耗。

此处选择了Lapis公司的ML7266芯片其主要特性是峰值功耗80mW，待机功耗5mW，待机功耗。由于硬件测试平台目前主要涉及两个对比节点，因此采用的是点对点射频模块。

本地存储模块的主要功能是将传感器的采集数据实时的保存在本地存储中，这同样是模拟了自供能传感器节点的工作模式。

根据数据的测试需求，在两个算法阶段的数据测试里，分别需要不同的数据组合。时间延时校准实验中，主要需要采集太阳能强度和每一段时间温度数据即可。而在时钟偏移校准实验中则需要采集太阳能的数据，并记录与之对应的实时时钟RTC模块返回的标准时钟数据，其中RTC数据主要由小时、分钟、秒三级组成。因此，根据不同的数据需求、不同的采样率、不同的分辨率需求，可以将总的数据量与对本地存储器的需求列表如下。

表 4.2 太阳能的数据量

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 太阳能(bit) | 温度(bit) | 实时时钟数据(bit) | 采样频率(Hz) | 总计(KB) | |
| 12h | 24h |
| 1 | 16 | 0 | 0 | 1 | 84.375 | 168.75 |
| 2 | 16 | 0 | 32 | 1 | 253.125 | 506.25 |
| 3 | 16 | 0 | 0 | 2 | 168.75 | 337.5 |
| 4 | 16 | 0 | 32 | 2 | 506.25 | 1012.5 |
| 5 | 16 | 8 | 0 | 1 | 126.5625 | 253.125 |
| 6 | 16 | 16 | 0 | 1 | 168.75 | 337.5 |
| 7 | 16 | 8 | 32 | 1 | 295.3125 | 590.625 |
| 8 | 16 | 16 | 32 | 1 | 337.5 | 675 |
| 9 | 16 | 16 | 32 | 10 | 3375 | 6750 |

此外，除了存储器的大小以外，低功耗和满足需求的写入传输速度是另外的两个需要考虑的影响因素。

基于以上的思考，硬件平台中选用大小为512M的Micron NOR Flash作为本地存储模块的元件方案。

由于NOR Flash的结构简单，成本低，读取速度比较高。同时相比较于性能更加的FeRAM和PCM，NOR Flash的存储大小足够满足实验的需求。因此选择NOR Flash作为本地存储的模块具有比较理想的效果。

**（6）硬件平台整合**

综合以上模块选型和使用需求，最终的硬件平台实现图如下。

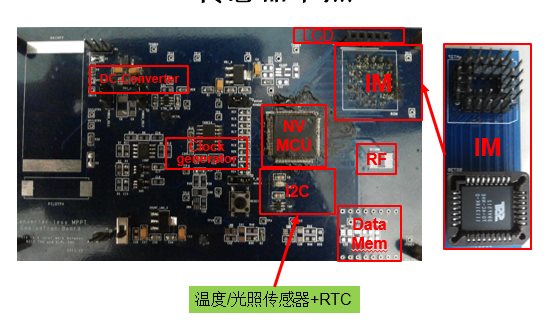


图 4.4 硬件平台实现图

### 硬件平台工作流程设计

根据硬件架构和实验目的，系统的工作流程主要分为两个部分，分别是数据采集和数据传输。这与实际的自供能传感器节点是不同的。因为，实际的传感器节点的功能具有完整性，不需要着重处理采样工作的时间。但是在实验平台上，为了灵活调整测试实验时间，所以需要将数据测试流程和数据传输流程分开执行

**（1）数据采集**

数据采集的工作流程可以表示如下图。



图 4.5 数据采集流图

如图所示，数据采集的主要对象是由传感器采集的太阳能和温度数据。每次采样有定时器中断发起，从而保证采样时钟频率相对稳定。然后开始执行传感器的数据采集任务。由于MCU是单线程工作的，因此传感器在执行数据采集操作时，MCU的主线程需要等待采集结束，并获得数据之后，才能执行下一项任务，需要付出比较大的时间代价。因此，本实验的工作流程做了新的调整。每次采样的流程中，MCU分别向光照传感器、温度传感器以及RTC发送数据读取指令来读取传感器的数据寄存器中已经保存的数据，然后再向传感器发送单步测试指令。这样，实际上就相当于不同的传感器执行数据采集的操作实际上是在MCU主线程执行其他操作时，如Flash写入，并行完成的。因此，可以明显的节省时间。

随后，系统将采集的数据写入Flash存储器。在时钟延时校准实验中，数据主要为2Bytes的太阳能数据；在时钟频偏修正实验中，数据主要包括2Bytes的太阳能数据和3Bytes的RTC数据。

**（2）数据传输**

数据传输的原始设计方案是比较直接的。当数据已经存入本地存储NOR Flash中以后，可以使用专用的Flash烧写器（Programmer）对NOR Flash进行读取操作。但是在实际的实验操作过程中发现，现有的一些Flash烧写器无法支持Micron的512M NOR Flash的读写操作。为了节约科研时间、节省成本，因此重新设计了的数据传输的方法。

新的数据传输方法通过射频模块将本地存储器中的数据发送回服务器。当数据已经完成采集后，将数据通过MCU从本地存储器中读取出来，然后每16Bytes一组，将数据通过射频模块发送回服务器进行处理。

## 实验设计与结果

根据基于太阳信标的时钟同步技术的算法设计。主要需要展开两大方面的实验工作：**时钟延时和校准**、**时钟频偏修正**。其中主要测试的内容包括不同时间段的太阳能分布曲线图以及太阳能曲线变化率、不同距离和环境下的太阳能变化规律以及有遮挡干扰情况下的太阳能变化规律。

### 时钟延时校准实验

根据3.2章中描述的算法特点，时间延时校准实验主要探讨三个不同因素的影响，即：时间、距离与位置、遮挡干扰。

**（1）测试时间的影响**

这一部分的实验主要目的在于测试太阳能在不同的时段中波形变化趋势，同时也对不同时段太阳能采集的噪声进行分析，从而找到一天中变化率比较高的时段。最后再根据这些不同时段的数据进行处理和算法验证，观察不同时段里，依照节点测得太阳能数据所能达到的时钟同步精度。

根据实验目的和设计思想，主要实验设计参数如下表所示

表 4.3 校准实验一设计方案

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 实验参量 | | 实验参数 | | | 备注 |
| 第一组 | 第二组 | 第三组 |
| 实验时间**/**min | | 5~6 | | | 便于测试 |
| 信标节点采样频率**/**Hz | | 10 | | | 约为3000个采样点 |
| 传感器节点采样频率**/**Hz | | 1 | | | 约为300个采样点 |
| 初始延时 | 时间/ms | 515 | 1885 | 545 | 由示波器读出 |
| 周期数/ | 5 | 19 | 6 |
| 节点距离/m | | 0.5 | | | 中等距离便于测试  节点之间干扰少 |
| 测试时间段 | | 清晨 | 上午 | 正午 | —— |
| 是否存在遮挡 | | 否 | | | —— |
| 是否处于阳光直射 | | 是 | | | 便于数据分析 |

在实验中，初始延时的测量是通过示波器实现的，以第一组实验为例。首先将两个测试节点布置完毕，然后打开示波器的测试功能，先后接通两个节点的供电电路，最后即可在示波器中读出两个时钟序列的初始延时（包括时间间隔与周期间隔）。

实验的数据处理流程分为如下几个步骤：

（1）在数据传输到服务器上之后，用MatLab对数据进行处理和分析。

（2）首先将射频接收的16进制TXT转换为MatLab可以识别和处理的2进制纯数据文件，然后载入数据文件(.mat)。

（3）分析原始数据的时域波形和去直流之后的频域波形图。

（4）对原始数据波形进行滤波分析

（5）使用时钟延时校准算法对两个波形进行匹配。

其中原始数据的波形图如下：



图 4.6 不同时段原始数据时域图

通过实验验证可知，太阳能在清晨和正午的变化率比较明显。清晨时段，太阳能的变化处于单调上升状态，斜率较高，曲线趋势明显；正午时段，太阳能的变化率也比较高，曲线的斜率出现了多次较明显的变化，变化趋势也比较明显。前者变化明显的主要原因可以归结为，清晨时段正好处于太阳升起的时段，太阳相比于地面的仰角变化较快，此时的太阳能处于一个比较明显的上升阶段，因此变化率较高；而正午时段里，太阳的照射强度最高，一些全局性的干扰会明显的影响到节点测试的太阳能变化波形，从而使两个节点上同时产生了比较明显的同步变化，这些全局性的干扰对基于太阳能的时钟同步算法而言显然是有利的。因此这两个时段都可以作为时钟匹配的良好素材。而上午的太阳能变化不明显，太阳能的强度也有限，因此测试数据的变化率比较低。因此可以推测出，下午时段的阳光变化率和上午时段是接近的，而黄昏时段的太阳变化率和清晨时段的太阳变化率也是类似的。

原始数据中高采样率数据的频域波形如下图所示：



图 4.7 不同时段原始数据频域图

在对每一个阶段的频域波形分析中可以得知，清晨和正午的所测试得到的噪声比较多，而上午的测试数据噪声较少，总的来说绝对强度相对于太阳能的变化而言还是比较大的，因此对于时钟延时的校准产生了较大的干扰。各时段噪声因素的不同的原因主要是测试的位置不同。由于硬件测试环境的限制，正午和清晨的数据实在室外有阳光直射的条件下测试的，因此噪声略高；而上午的数据是在室内测试出来的，经过室内的一层遮挡的墙面等对光的反射导致实际上室内的光照稳定度要远远高于室外，因此噪声比较少。具体设计实验在后文有描述。根据理论分析可以知道，理想的时钟同步精度可以达到以内，但是实际测试的结果看来，波形之间的校准精度都基本保持在的区域内。这里的误差来源可能包括三个方面：

（a）噪声。由波形和上文的分析可以看到，每一个节点的波形噪声相对值都比较大，对波形产生了较强的干扰。噪声的来源可能是环境的变化，比如玻璃、过往的行人所造成的发射光；也有可能包括传感器本身存在测量误差，这一点在两个不同的节点传感器测试得到的光照强度有一个明显的幅度比中可以看出。

（b）两个测试节点的相对频率偏移比较明显。根据3.2.2中的分析，在300s以内的测试时间中，如果频偏的大小达到了，则这段时间的匹配误差就会达到1s，而RC时钟的频偏是有可能达到这个数量级的

实验步骤中对于原始数据的处理流程如图所示。



图 4.8 数据处理流程

其中，去除毛刺的算法是依靠序列斜率后的相关性，由实测数据统计结果可知，序列中相邻点之间的的斜率之比的取值范围一般不会超过。因此去除斜率比过高的点有利于消除测量和数据传输中产生的数据坏点。去除直流分量则可以在不影响处理效果的情况下，方便后续的滤波处理。最后进过低通滤波器可以一定程度上消除噪声和干扰的影响。由MatLab产生的滤波器设计图如下:

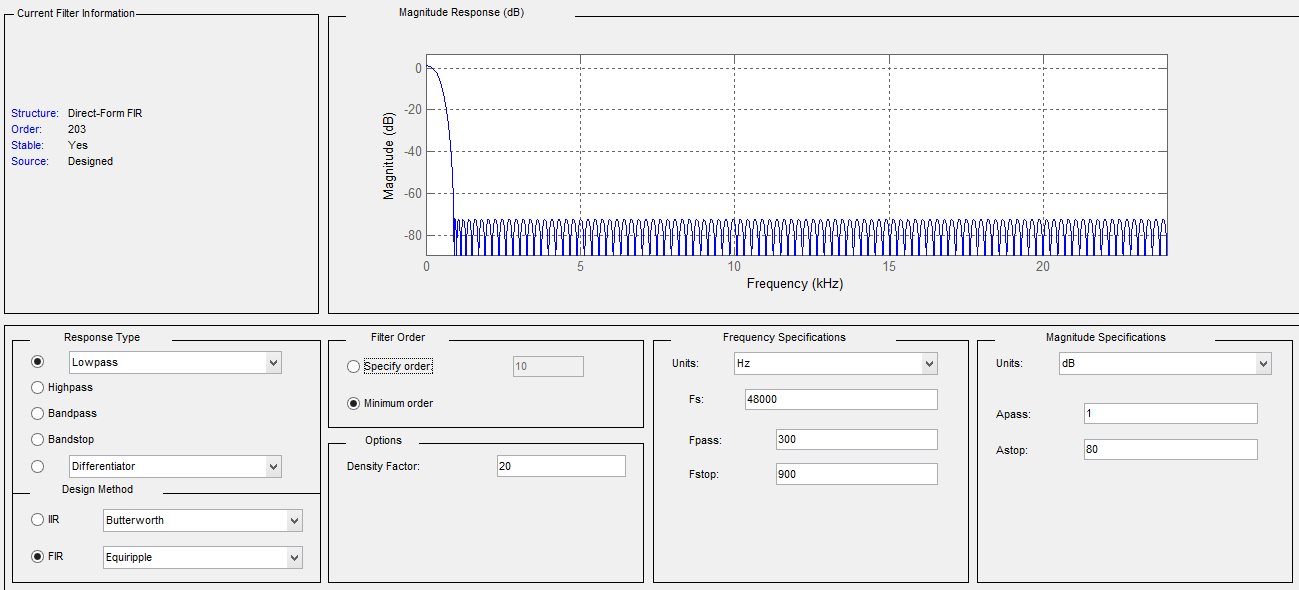


图 4.9 低通滤波器设计

经过滤波后的数据相对比较平滑，但是同时也会对原始数据信息有所损伤。因此使用滤波后的数据进行时钟同步算法计算后得到的结果如下表所示：

表 4.4 校准实验结果（采样时段）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **实验** | **第一组（清晨）** | **第二组** | **第三组** |
| **初始延时/ms** | 515 | 1885 | 545 |
| **同步计算延时/ms** | 900 | 900 | 700 |
| **绝对误差/ms** | -285 | 985 | -155 |

有表格可知，三组数据的计算结果都距离理想的0.1ms的精度有所差距，其中清晨和正午的数据匹配效果比上午的匹配数据略好。误差可能是由于采样波形本身的频率便宜比较大导致的。具体的分析见3.2.2。

**（2）节点距离的影响**

这一部分的实验主要目的在于测试太阳能在不同的位置上的波形变化趋势是否忽有所差异，这个位置的概念不包括其他环境条件如遮挡、阴影等因素的改变，主要目的在于探究太阳能的变化趋势是否在空间上是全局统一的，同时也为了去除两个节点之间影响。

由于实际条件的限制，测试的地点被限制在室内，节点的距离限度在1m之内。根据实验目的和设计思想，主要实验设计参数如下表所示。

表 4.5 校准实验二实验设计表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 实验参量 | | 实验参数 | | | 备注 |
| 第一组 | 第二组 | 第三组 |
| 实验时间/min | | 5~6 | | | 便于测试 |
| 信标节点采样频率/Hz | | 10 | | | 约为3000个采样点 |
| 传感器节点采样频率/Hz | | 1 | | | 约为300个采样点 |
| 初始延时 | 时间/ms | 365 | 545 | 245 | 由示波器读出 |
| 周期数/ | 4 | 6 | 3 |
| 节点距离/m | | 0.1（紧靠） | 0.5 | 1.0 | —— |
| 测试时间段 | | 正午 | | | 波形易于观察 |
| 是否存在遮挡 | | 否 | | | —— |
| 是否处于阳光直射 | | 否 | | | 波形的稳定时间长 |

这一部分的测试方法和（1）中的测试方法基本雷同，实验时间长度、采样率、初始延时的测量方法都是一样的。不同之处在于测试时间段被设置为正午，测试环境没有阳光直射。这是因为相比于清晨和上午，正午的波形效果更加明显，在实际实验中，为了更好地研究实验效果，这一部分实验一共完成了六组数据测量，文中的三组数据是选出来的三组典型的有效数据。

这三组数据的原始波形对比图如下图所示。



图 4.10 不同距离实验原始数据

最终计算得到的实验结果，如下表所示：

表 4.6 校准实验结果（距离）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **实验** | **第一组（清晨）** | **第二组** | **第三组** |
| **初始延时/ms** | 365 | 545 | 245 |
| **同步计算延时/ms** | 600 | 700 | 600 |
| **绝对误差/ms** | -235 | -155 | -355 |

可以看出，三组实验的波形效果基本没有明显的区别，因此，在“米”级别的分布式传感器节点所采集的太阳能分布曲线是具有全局同步特性，因此可以直接作为时钟同步的基准数据。

此外，这三组实验的波形基本变化比较剧烈，因此可以进一步的验证第一部分对于不同时段太阳能分布数据变化率的推论。

这部分实验的局限性在于收到测试条件所限，测试的距离限度比较小，测试的次数也比较少。因此只能粗略的得到定性的分析结论，而不能得到精确的推广结论。

**（3）遮挡干扰的影响**

这一部分的实验目的主要是测试两种不同的环境下波形分布的规律。

第一种情况是**遮挡**。遮挡指的是两个测试节点分别置于正午阳光直射的环境中测试数据。其中信标节点不作处理，但是传感器节点需要在布置环境的时候添加一个障碍物遮挡在节点旁边，使其影子落在光照传感器上。

这个实验中相同的环境因素是正午时段和阳光直射（室外）。之所以选择正午时段，是因为这个时段里，太阳光的强度比较大，一旦存在遮挡干扰，则数据变化明显。之所以选择阳光直射的环境，是因为正午时段室外的阳光直射环境意味着环境中存在大量的全局干扰。这种全局干扰可以增加太阳能曲线的变化幅度和变化率。对于被遮挡的节点而言，其测量的数据均值较低，变化幅度相比于未被遮挡的信标节点而言要小得多。因此增加太阳能曲线的变化幅度和变化率有利于实验结果的观测。

关于遮挡这种环境因素的测试是由两组实验对比完成的。第一组是对照组，实验环境应该是正午时段内，有阳光直射，两个节点都没有被遮挡；第二组是实验组，实验环境为正午时段内。有阳光直射，两个节点存遮挡物的差异。

第二种情况是**阳光直射**。这里的阳光直射通常指的是室外有可以直接接收到太阳光数据的地方。因此没有阳光直射的区域主要指的是阳光照度比较稳定的室内。这种情况和遮挡是不一样的。因为遮挡的环境是在室外，环境变化剧烈；其次，遮挡就是简单的阴影覆盖，实际测量得到的光照强度是比较低的，而室内环境由于光的不断反射变化，所以室内虽然没有阳光直射但是光照强度的绝对值要高一些。

关于阳光直射这种环境因素的测试是由两组实验对比完成的。第一组是对照组，实验环境应该是正午时段内，两个节点都有阳光直射，都没有被遮挡；第二组是实验组，实验环境为正午时段内，传感器节点都没有阳光直射，两个节点都没有被遮挡物遮挡。

根据实验目的和设计思想，主要实验设计参数如下表所示：

表 4.7 校准实验三实验设计表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 实验参量 | | 实验参数 | | | 备注 |
| 第一组 | 第二组 | 第三组 |
| 实验时间/min | | 5~6 | | | 便于测试 |
| 信标节点采样频率/Hz | | 10 | | | 约为3000个采样点 |
| 传感器节点采样频率/Hz | | 1 | | | 约为300个采样点 |
| 初始延时 | 时间/ms | 545 | 640 | 425 | 由示波器读出 |
| 周期数/ | 6 | 6 | 4 |
| 节点距离/m | | 0.5 | | | 中等距离便于测试  节点之间干扰少 |
| 测试时间段 | | 正午 | | | 太阳能强度大 |
| 是否存在遮挡 | | 否 | 是 | 否 | —— |
| 是否处于阳光直射 | | 是 | 是 | 部分 | —— |

最终计算得到的实验结果，如下表所示：

表 4.8 校准实验结果（遮挡）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **实验** | **第一组（清晨）** | **第二组** | **第三组** |
| **初始延时/ms** | 545 | 640 | 425 |
| **同步计算延时/ms** | 700 | 1500 | Bad Data |
| **绝对误差/ms** | -155 | -860 | — |

如图表所示，从第一组和第二组的实验结果来看，这两组实验的主要环境因素区别在于遮挡。这两组实验的对比可以相对比较明显的观测到遮挡的效果，第一组实验中两个采样波形的幅度取值范围是接近的，而第二组实验中两个采样波形的幅度差异极大。对于第一组实验数据而言，两个节点测试数据的时域波形都比较明显的表现出了类似的太阳能曲线变化趋势，说明这段波形具有良好的同步性能。但是第二组实验中，虽然两个曲线也都对太阳能的变化趋势有近似的体现，但是明显被遮挡节点的变化存在一定延迟和变形。说明在遮挡因素的作用下，虽然传感器节点测量的数据也可以在一定程度内保留当时的太阳能实际变化趋势，但是由于光照强度低，部分其他的全局环境因素的变化受到了遮挡物的掩盖，所以损失部分变化率。因此在实际的环境中使用基于太阳能的时钟同步技术时，需要对遮挡物的影响补充修正因子。



图 4.11校准实验三原始数据图A

第一组和第三组的实验环境因素主要区别在于**阳光直射**。第一组实验和遮挡部分的第一组实验相同，不再赘述。但是第三组实验由于太阳的移动，导致测试数据采集到一半的时候，传感器节点从无阳光直射的环境中暴露到了有阳光直射的环境中，因此采集的数据难以被执行常规的处理和分析，如图4.11。为了保证实验结果的可靠性，在实验设计中要求这一组实验需要与第一组实验在同一天（保证天气情况）的正午完成，遗憾的是正午时段比较短暂，没有完成进一步的补充实验。因此只能通过部分残留的数据进行合理的推测。



图 4.12 校准实验三原始数据图B

从波形上找到部分有效的数据来看（如图的后半部分区域），没有阳光直射的波形太阳能的变化率比较低。因此可以推测出，室内没有阳光直射的环境中由于大面积的遮挡和墙面等的反射，室内环境的干扰少，噪声弱稳定，波形相对比较稳定。但是在室内环境中，太阳光强度变化率比较低，这一点是影响时钟同步效果的主要因素。

### 时钟频偏修正实验设计

由于时间因素和实验平台的时钟频偏过大等问题，这一部分的实验很遗憾，没有获得足够多的有效结果，因此在文中将实验方案和实验理论分析撰写如下。

根据3.3中描述的算法特点，由于实时时钟RTC的测试精度有限，时钟频偏修正算法共设计了两种实验模式。

**（1）使用实时时钟RTC数据作为参考时钟。**

实验方法基本和4.2.1中的第一部分实验方法，唯一的不同是在采样数据中加入了包含“分钟”、“秒”信息的2Bytes大小的RTC数据。

因此，时钟频率偏移修正实验设计条件如下表所示。

表 4.9 频偏修正实验方案一

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 实验参量 | | 实验参数 | 备注 |
| 实验时间/min | | 5~6 | 便于测试 |
| 信标节点采样频率/Hz | | 10 | 约为3000个采样点 |
| 传感器节点采样频率/Hz | | 1 | 约为300个采样点 |
| 初始延时 | 时间/ms | 待测 | 由示波器读出 |
| 周期数/ | 待测 |
| 节点距离/m | | 0.5 | 中等距离便于测试  节点之间干扰少 |
| 测试时间段 | | 待测 | 选在清晨、正午或者黄昏 |
| 是否存在遮挡 | | 否 | —— |
| 是否处于阳光直射 | | 是 | 便于数据分析 |

在获取数据以后，将数据发送到服务器中，由MatLab进行处理。

**（2）使用示波器读数作为参考时钟**

由于实时时钟RTC的精度有限，因此采用RTC的数值作为参考时钟的可靠性比较低。由于示波器的测试精度远远高于采样时钟的同步精度和时钟漂移幅度，所以示波器的有效读数比RTC的数值更有说服力，为了对这一部分实验做出优化，再次提出一种使用示波器读数作为参考时钟的修改方案。

实验的主要方法和第一部分时钟延时校准中初始延时测量的方法相同。在实际匹配的时候，首先需要选定合适的置信点。然后可以通过示波器的记录值找到与信标波形上的置信点的时刻最接近的传感器波形上的点，从而获得精确的数据记录。其他的实验步骤和方法（1）相同。

这个方法的局限性在于示波器可以保存的有效时间长度是有限的，最大的时间长度为500s。但是对于本文中所描述的实验都是足够的。此外，在查找对应点的时候，需要通过人工的手段进行查找，工作代价比较大。

## 本章小结

本章的主要内容包含两个方面，一是针对基于太阳信标的时钟同步算法的硬件实验平台设计方案；二是算法验证的实验设计和实验结果。

在硬件平台方面，本文根据算法的需求，设计了由MCU、电源管理、传感器与实时时钟模块、射频模块以及本地存储模块等五个模块共同组成的硬件平台，模块之间的控制与数据流由I2C和SPI总线实现通信。经过一系列的设计、选型、配置、调试、测试、修正等过程，这个模拟太阳能自供能传感网节点的硬件模拟测试平台可以正常的工作、测试，鲁棒性良好。

硬件平台目前存在的问题主要有以下几点：

（1）时钟由RC振荡器产生，始终漂移比较大；

（2）数据的导出过程比较复杂，本地存储模块与服务器的通信方式有待优化。

（3）实时时钟RTC的精度比较低，不能够完全满足实验的需求。

在实验方面，本文根据算法的设计，基本完成第一部分时钟延时校准算法的测试和分析，对于距离、时段、遮挡因素、阳光直射因素等进行了有效的实验测试。同时在实验的过程中获得了第一手的太阳能测试数据，掌握了太阳能随时间分布的基本规律。

实验记录归纳如下：

（1）在现有的硬件条件下，算法的实际测试精度在1s以内。

（2）太阳能在一天之中的变化，在部分全局同步干扰的影响下，于清晨、正午和黄昏时段比较明显，因此这几个时段也是实现时钟同步算法的可靠时段。

（3）在米级别的距离范围内，太阳的变化规律可以认为是全局同步的。

（4）遮挡因素对于太阳能的变化有一定的影响，因此可以考虑通过补充一个补偿因子的方式来完善同步算法。

（5）没有阳光直射的室内环境下，噪声平稳，干扰较少，太阳能的变化率也比较低；在有阳光直射的室外环境下，干扰较多，太阳能的变化率较大。

第二部分的时钟频偏修正实验，依照不同的实验条件，这几了两个不同的测试方法。在有精确RTC的条件下，可以在实验数据中加入RTC的实时时间数据，通过RTC数据可以读出采样点准确的采样时刻，因此对比采样时间和时钟同步算法计算出来的校准时间，可以确定算法对于频偏修正的精度。

第二种实验方法通过工作复杂度规避掉了RTC的精度温度。同时这种方法计算出来的参考时钟精度比RTC产生的精度更好，更有参考价值。

# 总 结

## 论文工作总结

本文通过对现有的基于太阳能自供能的无线传感器网络的需求和应用进行分析，针对目前现有的传统时钟同步方法的局限性，提出了基于太阳信标的时钟同步算法。这种算法依托于传感器网络自身采集的太阳能数据，针对特殊的数据同步需求进行分析和实现，在满足实际需求的情况下，可以大幅度的降低传感器节点的功耗，提高其能量效率。

本文在工作中提出了详细的时钟同步算法，评估了算法的性能，并对算法的局限性进行分析，提出具有可行性的改进方案。在具体的实现方面，本文设计并实现了可以采集分析太阳能的硬件平台系统来模拟太阳能自供能的无线传感器网络。在实验的过程中，采集并分析了影响太阳能变化的因素，获取了太阳能随时间变化的第一手资料。同时在不同的影响因素和有限的实验条件下，验证了算法的精度在0.5s以内，并根据理论估计了优化改进后算法可以达到的理想精度。

这几部分工作获取了有效的原始数据，奠定了未来继续从事有关太阳能方面研究的基础，也为低功耗无线传感网的时钟同步技术提供新的思路。

## 未来工作展望

根据文中对于算法本身和局限性的分析描述。进一步的工作计划主要分为以下几个方面：

（1）硬件平台方面。由于目前的硬件平台存在时钟频偏高、RTC精度低以及数据导出流程复杂等问题，因此进一步的硬件方案主要从这几个方面着手处理。在新的硬件平台中，首先，补充设计由晶振组成时钟产生电路可以有效的降低时钟的频偏；其次，选择一款新的RTC芯片作为新版平台的测试参考时钟；最后，在硬件平台上补充与服务器可以通过有线的方式直接相连的UART接口等，旨在降低数据传输流程的复杂度，简化不必要的实验流程。

（2）在算法方面。针对目前算法的局限性，首先需要继续调研寻找一个更好离散时间序列匹配算法，提高匹配的精度，并在实验的过程中找到合适滤波处理方法；其次，对于遮挡因素的影响进行定性的分析，在算法中增加修正遮挡因素的补偿因子；最后，再根据进一步的实验，对其他的影响因素分别进项优化和修正。

（3）在实验方面。进一步的实验主要是完善对于不同的环境因素如遮挡、阳光直射、距离等因素的测试、研究，并实现定量化各因素的影响，为补偿算法提供实验支持。此外，修正后的算法还需要更多的太阳能数据作为实际数据支持，因此测量更多时段、条件下的太阳能数据也是需要尽快完成的。

（4）在整个系统层面上增加对于大量置信点之间关系的分析；

（5）在整个系统层面上增加组网因素对于时钟同步算法的影响的分析。

基于太阳信标的时钟同步算法在应用中具有比较高的可行性和应用价值，因此更多的环境因素和影响需要进行定量的理论实验工作来研究，从而完善整个技术的性能。

# 插图索引

[图 1.1无线传感器网络结构示意图（摘自电子工程世界网站） 5](#_Toc389007294)

[图 1.2论文研究思路 9](#_Toc389007295)

[图 2.1 RBS示意图 12](#_Toc389007296)

[图 2.2 FTSP示意图 13](#_Toc389007297)

[图 2.3 握手式时钟同步校准方法 14](#_Toc389007298)

[图 3.1 时钟延时示意图 16](#_Toc389007299)

[图 3.2 高采样率信标示意图 18](#_Toc389007300)

[图 3.3 序列相关最大值位置 21](#_Toc389007301)

[图 3.4 扭曲的节点序列 22](#_Toc389007302)

[图 3.5 时钟校准精度与频偏的关系 23](#_Toc389007303)

[图 3.6 置信点示意图 25](#_Toc389007304)

[图 4.1硬件架构图 28](#_Toc389007305)

[图 4.2 硬件工作流程图 29](#_Toc389007306)

[图 4.3 电源管理模块 30](#_Toc389007307)

[图 4.4 硬件平台实现图 35](#_Toc389007308)

[图 4.5 数据采集流图 36](#_Toc389007309)

[图 4.6 不同时段原始数据时域图 39](#_Toc389007310)

[图 4.7 不同时段原始数据频域图 40](#_Toc389007311)

[图 4.8 数据处理流程 41](#_Toc389007312)

[图 4.9 低通滤波器设计 42](#_Toc389007313)

[图 4.10 不同距离实验原始数据 44](#_Toc389007314)

[图 4.11校准实验三原始数据图A 47](#_Toc389007315)

[图 4.12 校准实验三原始数据图B 48](#_Toc389007316)

# 表格索引

[表 4.1 SPI接口说明 33](#_Toc389001767)

[表 4.2 太阳能的数据量 34](#_Toc389001768)

[表 4.3 校准实验一设计方案 37](#_Toc389001769)

[表 4.4 校准实验结果（采样时段） 42](#_Toc389001770)

[表 4.5 校准实验二实验设计表 43](#_Toc389001771)

[表 4.6 校准实验结果（距离） 44](#_Toc389001772)

[表 4.7 校准实验三实验设计表 46](#_Toc389001773)

[表 4.8 校准实验结果（遮挡） 46](#_Toc389001774)

[表 4.9 频偏修正实验方案一 49](#_Toc389001775)

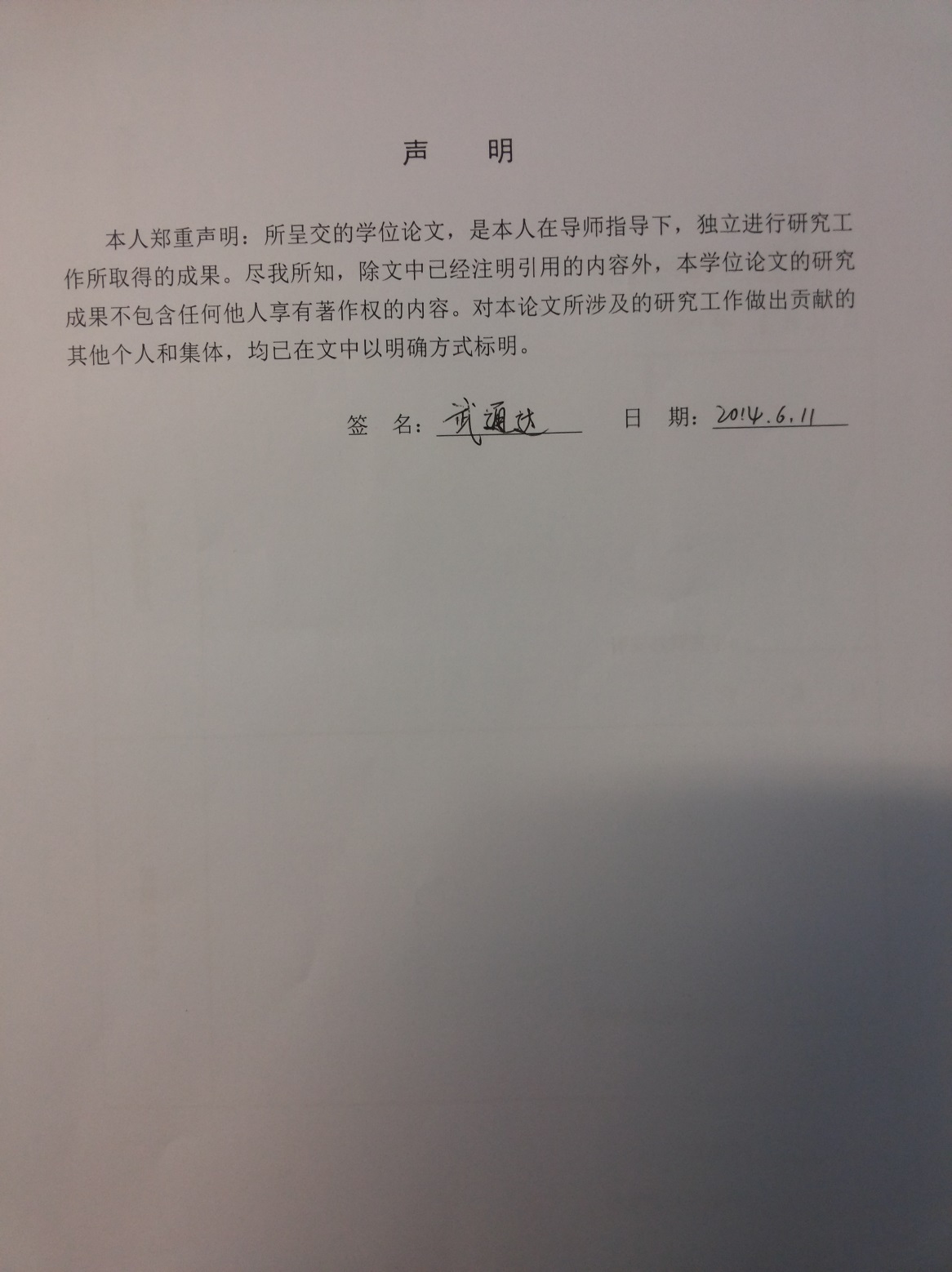
# 参考文献

1. 李建中, 高宏. 无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 1-15.
2. 安竹林，朱冠男，徐勇军，无线传感器网络时间同步概述[J], Information Technology Letter, 2008, 6(4), 12-18.
3. 朱红松, 孙利民. 无线传感器网络技术发展现状[J]. 中兴通讯技术, 2009, 15(5): 1-5.
4. Elson J E, Estrin D. Time synchronization in wireless sensor networks[D]. University of California, Los Angeles, 2003.
5. Sundararaman B, Buy U, Kshemkalyani A D. Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 281-323.
6. 周书民, 周建勇, 潘仕彬, 等. 无线传感网络中时钟同步的研究[J]. 电子技术应用, 2006, 9: 24-26.
7. 孙佳伟, 曾子维, 庄兵. 无线传感器网络 RBS 的优化算法[J]. 计算机工程与设计, 2009 (1): 66-68.
8. Wu Y C, Chaudhari Q, Serpedin E. Clock synchronization of wireless sensor networks[J]. Signal Processing Magazine, IEEE, 2011, 28(1): 124-138.
9. Kumar S, Lee Y, Lee S R. Time Synchronization in Wireless Sensor Networks: Estimating Packet Delay[J]. 2013.
10. Daniluk K. Time synchronization in Wireless Sensor Networks[J]. Position Papers of the 2013 Federated Conference on Computer Science and Information Systems pp. 83–88, 2013.
11. Bagul D, Kurumbanshi S, Verma U. Survey on Clock Synchronization in WSN[J]. International Journal of Engineering Science Invention, 2013, 2(12) PP.24-31.
12. 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: 39-49.
13. 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.
14. 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.
15. Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer networks, 2002, 38(4): 393-422.
16. Fu T. A review on time series data mining[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2011, 24(1): 164-181.
17. Rakthanmanon T, Campana B, Mueen A, et al. Searching and mining trillions of time series subsequences under dynamic time warping[C]//Proceedings of the 18th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. ACM, 2012: 262-270.
18. Rowe A, Gupta V, Rajkumar R R. Low-power clock synchronization using electromagnetic energy radiating from ac power lines[C]//Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, 2009: 211-224.
19. Cong Wang, Naehyuck Chang, Younghyun Kim, Sangyoung Park, Yongpan Liu, Hyunggyu Lee, Rong Luo and Huazhong Yang, “Storageless and Converterless Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Cells for a Nonvolatile Microprocessor,” in Proceedings of Asia South Pacific Design Automation Conference (ASPDAC), Jan., 2014.

# 致 谢

感谢刘勇攀老师、王聪学长、盛骁学长、孙忆南学长、李双辰学长、王逸群学长、李和和学长、李泽伟学长、王智博学长以及王云霏同学在项目的开发研究过程中给我以指点和启发。我很荣幸能够在这样一个优秀友爱的集体中继续我的研究生阶段学习生活。在随后几年里，我一定继续努力，勤于总结，提高自己，不辜负老师和学长们的期望！

# 声 明



# 附录A 外文资料的调研阅读报告或书面翻译

基于交流供电电缆电磁辐射的低功耗时钟同步

Anthony Rowe Vikram Gupta Ragunathan (Raj) Rajkumar

Electrical and Computer Engineering Department

Carnegie Mellon University

fagr,vikramg,rajg@ece.cmu.edu

摘要：在众多的传感器网络应用中, 时钟同步技术是一项极其重要的技术。这项技术可以用来调整任务顺序、协调动作、提供高能效的通信和任务周期。本文提供了一种基于交流供电电路电磁辐射的调谐来获取全局时钟同步的新型的低功耗硬件模式。这个信号可以被使用电池供电的传感节点用于全局时钟源，它可以在节点之间不通信的情况下消除不同节点之间的时间漂移。使用这种方案，接收端之间都处于频率锁定的状态，但是不同的接收端之间还存在一定的相移。由于这些相位偏移往往是恒定的，一种更高层次的补偿协议可以用来同步整个传感器网络。我们提出了一个LC写真接收机的设计电路，调谐到交流60Hz的信号上，我们称之为“同步器”。该同步器采用了一个低功耗微控制器。微控制器可以用来对交流供电电路感应的信号进行滤波，并产生一个每秒一次的脉冲输出信号发送给传感节点的接口。整个硬件的功耗小于58uW，这比大多数传感器网络MAC协议的空闲状态功耗低2-3倍。接下来，我们评价一个在微控制器上运行的时钟恢复技术程序，用来最大限度的减少定时抖动。最后，我们提出了一个设置全局时间相位偏移的协议。我们评估了在带内通信时的同步精度和能耗。这种使用带外的信号进行时钟同步的方法可以适用于任何其他的MAC协议。我们的实验显示，在一个11天的周期里，八个放置在卡耐基梅隆大学的CIC大楼的节点在没有射频通信的情况下始终保持同步，平均的误差在1ms之内。

关键词：同步；无线传感网

**1. 背景介绍：**

时钟同步技术对于无线传感器网络而言是一项重要的服务。多数现有的MAC协议[1,2,3]使用时钟同步通过和相邻节点协调唤醒时间来节省能量。其他应用程序[4,5,6]需要时钟同步来协调传感任务或协调执行其他任务。现有的同步机制由于要定期交换调整本地时钟消息功耗显著。在本文中，我们提出了一个新的硬件时钟同步解决方案，使网络中的节点可以通过与现有的交流电源产生的电磁辐射调谐来接收稳定的全局时钟。不同于其他基于硬件的需要发射器的时钟同步解决方案，我们的系统能够利用距离从几十到几百米远的交流电源辐射的信号。与WWVB原子钟广播​​和GPS时钟接收器等下相比，我们的系统在室内和建筑物的周围运行的非常好。从电磁干扰电源线是无处不在，大部分的电子设备，包括许多无线电设备被专门设计用来抵消50和60 Hz的噪声影响。我们提出了一种低成本且低功耗的设计：*同步器*(Syntonistor)。这件设备使用这些信号，在无线设备中提供在时钟同步。通过利用这个高度可用的公共时钟源，我们可以用显著现在提供同步功率小于现有的消息传递解决方案。这种时钟源可以在节点离线的状态下持续运行。

当一个变化的电流通过导体时会产生一个电磁场。这个场在周围的空间里向外传播。根据电磁感应定律，一个可变的电磁场将它的能量传递给与之接近的导体。如果电磁场是被一个导体产生的，如一卷电线，那么感应信号的初始频率会与源相匹配。一般的来说，交流电源线通过平行双线工作，因此大多数的电磁场会抵消掉。然而，电源线的不平和地线上的杂散电流会产生一个明显的电磁场。这个场的强度通常很低，但是如果经过充分的放大，就可以通过其他器件重建原始信号的频率。在本文中，我们使用这种物理现象来产生一个传感器节点或者其他需要时钟同步的硬件可以使用的全局时钟信号。

在[7]中，作者们在验证人体的蛋白质健康问题时，对于大量不同的电源线产生的电磁场进行测试和建模。他们的测量结果显示，在传输线附近的区域电磁场的强度可达17毫高斯，然后在60米外衰减到3-4毫高斯，这依然是可以检测到的。这表明，在大多数的室外环境里依然可以检测到这些在建筑物内或者附件产生的电磁场。在[8]中，做着测试了在电源设施附近典型的电磁场强度，是从0.001高斯到10高斯。与之相反，地球的在60Hz频率的天然磁场强度远远小于高斯。

交流电源先的频率稳定性为5\*10-5[9]。在过去，硬件设备如闹钟和家用电器等使用交流电直接供电来保证墙上时钟的时间。为了让能量可以有效的在国家内部传输，两点之间的相位差异存在一个上限值，[9]显示，具体的延时大约为10-8每24小时。因此，同一个供电区域内是相位连续的。在美国，有四个主要的供电区域。大多数的建筑物都是由多个不同相位的电源协同供电的。这就意味着我们的接收器可以在相互之间获得同步。同步是定义在两个时钟的频率是锁定的情况下的，但是他们之间可能存在相移。因为电源线可以作为一个全局广播，所以即便是存在频偏，每一个节点时钟都会接收到相同的全局时钟信号。这就意味着初始化之后，所有的时钟频率被校准被没有偏移。

通常情况下，电源线工作在50Hz或者60Hz的频率上。时钟同步的频率并没有被限制在这个范围。对于时钟同步精度的主要限制因素是不同和不确定的信号传输时间。在我们的方法猪，我们采用电源线的上升沿作为同步点。电源线信号可以通过多种方法来检测到，发射机以及其他的设备方案适用晶振产生通用的60Hz信号，这可以被手机检测到。在测试中，我们发现直接的检测电磁场是非常可行的，但是我们的协议会方便的拓展成其他的方法。

这项时钟同步技术中的司法挑战是：

1. 设计低功耗的接收器；

2. 对于噪声和信号损耗的鲁棒性；

3. 确定一个通用的时间参考点；

4. 检测精确地相位偏移。

我们的硬件接收机被设计来对60Hz的电源线信号进行放大和滤波。我们提出了一个始终恢复技术，可以使用软件锁相环字啊一个低功耗MCU上执行。即便是100%的周期运转，设备的功耗也低于58微瓦。接收机被封装在一个单独的模块中，可以通过接口连接在现有的无线传感器节点上，每秒提供一个有效脉冲。

**2. 相关工作**

在分布式系统的领域中，时钟同步技术已经研究的很成熟了。在[11]中，Lamport提出了一项工作，为系统中的全体时间调度而产生逻辑时钟。这篇文献描述了一个基于时钟计数器的变化的有效的方法来对任务顺序进行调度。其他的工作大都集中在产生一个通用的墙表时钟[12,13,14,15]。最常见的方法是NTP。NTP时钟环形信息延时的均值和启发式的通信，来设置时间服务器的时间。当时间需要被校准，NTP协议使用时钟频率的判定技术来确认时间保持连续性。例如，如果一个计算机的时钟稍微落后于标准时间，它就会判决出并让虚拟时钟提高运行速率。

已经有多种方法，以时钟同步使用消息传递的无线传感器网络。许多这些方法实现非常精确的同步，但很少有人评估所需要的能量开销他们的计划。参考广播同步[ 16 ] 计划使用时间戳之间交换多个接收器，以消除传输延迟。这种方法专门针对时序抖动相关的源与在多个无线设备和平均值传输，以达到紧成对的时钟同步。泛洪时间同步协议[ 17]、时间同步协议的传感器网络[ 18 ]使用低层硬件时间戳，以消除这些类似的定时抖动源。消息在网络上泛滥成灾形成周期性补偿生成树漂移。本地时钟速率调整，以帮助减少漂移。我们使用类似的方法在我们的相位偏移补偿协议来初始化我们的系统，但我们不要求任何时钟速率调整。在文献[ 19 ]中，作者提出了一个有趣的方法启发萤火虫等生物系统，它允许节点组实现同步通过利率调整消息的传递与他们的邻居。一旦同步实现的，更高级别的协议可以被用来设置一个共同的挂钟时间。相比之下，我们的计划并不需要定期的节点到节点的通信。

时钟同步方案最类似我们是使用外部硬件接收全球时间广播。该从NIST WWVB原子钟广播​​采用的是50千瓦的无线电塔位于科罗拉多州博尔德发送一个60kHz的时间的灯塔。该系统编码挂钟时间使用脉冲宽度调制编码方案与在上升沿每一秒的开头。该系统是理想的户外塔的广播范围内的应用程序，但无线电传输不会渗透到不远的建筑物。全球定位系统使用精确的时钟同步来自于卫星传输进行本地化。GPS授时接收机已经普遍被用作来源NTP服务器。无线电数据系统（RDS ）的用途在标准的调频无线电传输到编码的边带数据包括时间。这些接收器通常消耗过多的能量用于在传感器上的一个节点到节点的基础上使用网络和GPS和WWVB的情况下需要直接视线与天空。在RT -Link的[ 20 ]协议使用载波的AM无线电发射器发送全球时间标传感器节点。该系统采用一个建筑物的布线基础设施作为天线广播的AM收音机定时脉冲在所有节点上的外部接收器。此解决方案非常适用于工业应用，但是它需要一个集中的无线电发射机，它是昂贵的并且经常难以安装。在本文的工作提供了更为更广泛的部署而实用的解决方案同时减小了所需的能量接收机硬件。

**3. 同步器设计**

在这一部分，我们会描述我们用来精确检测电磁场能量而设计出来的硬件和软件。面临的主要挑战是该设计被放大的信号，它通常是在为了几十微伏而拒绝噪音。该电路还必须处理好能源之间的平衡消耗和性能。为了使接收器能够实用，它必须在足够低的功率运行的该模拟前端可以几乎连续地执行。该功耗应该显著降低同步使用已经在节点所需的功率现有的无线电。最后，该电路必须不受噪音并试图减少定时抖动尽可能的使以提供的同步精度在合理的水平传感器网络应用。使用其他方法检测磁场包括霍尔效应传感器，磁阻传感器和磁通门传感器。目前，这对于这些传感器现成组件来讲往往太过昂贵的，消耗过多的功率。另外，也可以向检测从电力线产生的电场，但这往往是小相比于磁场。

**4. 时钟同步协议**

即使在全球范围内利率调整的时钟，我们仍然有挑战在相关的协议层：

1. 确定时间一个共同的起点

2. 确定相位偏移邻居之间，并从错误中恢复时同步失败。

在本节中，我们将讨论在实施协议萤火虫[10]在运行了纳米RK[22]无线传感器节点操作系统，实现全局时钟同步使用Syntonistor。图6示出附着在Syntonistor到萤火虫节点还配备有一个基本传感器板。萤火虫节点有一个ATMEGA1281处理器，TI CC2420无线电和内部PCB天线。我们使用现有的LPL-CSMA[23]协议用于交换初始化消息。

该协议开始时，主节点广播在其上升的PPS边缘信息包含其挂钟时间。该消息是使用在网络上充斥CC2420无线电时间戳控制在最低水平，除去中所描述的不确定性[18]，[16]和[17]。添加时间戳消息立即传送前进行数移除潜在的无线数据包的碰撞时间不确定性。每个传感器节点维护包含一个计时器的量的，自其上次PPS上升沿已过期时间。当一个节点接收到一个时钟同步报文，它指出从主消息的时间戳，以及作为当前时间戳与前一跳计算。

图9显示消息如何传播延迟可以通过减少从数据包中除去固定头偏移和触发对帧分隔符由CC2420提供的启动硬件。图10示出的无线电脉冲时间分布记录一个发射器和两个接收器之间。我们看到了一个每跳约6μs的最坏情况的抖动。这是一致的以看出通过其它带内消息传递的值协议。

之后信号在网络上传播，每个节点应保持同步的时间点并且记录本地PPS从信号和主信号之间的相位偏移。定时现在应该基于这个出发由主机发送点，经过时间的基础上PPS脉冲和的相位差之间的偏移。此外，定期广播与邻居可用于构建含有1跳邻居之间的相对相位偏移列表，正如我们将在本节后面提到，是用于检测错误的有用工具。这些1跳广播不需要因为不断地运行，他们会很快收敛到的平均静态偏移值。网络中的每个节点有一个同步精度限制在Syntonistor本地抖动，约为2ms，以及从无线累计抖动通信是6μs的量级在最坏情况。我们执行的消息迅速扩散，确保只有接收机抖动积累，而不是在发现错误Syntonistor。

现在，我们将使用拓扑示出了协议在图7(a)所示，在节点M是主节点，其他设备分别构成多跳网络中的其它节点。主节点发送广播消息（同步灯塔）给所有邻居节点。一旦消息接收时，节点计算相对于偏移要减去无线电传播后其本地PPS信号延迟。从主节点扩散的信号很快在整个消息网络与节点在每一跳中继信标类似于如何TPSN协议操作的下一跳。这个时间信号迅速传播到网络中的所有节点，和内跨越n跳无线抖动的限制，节点能够估计相位当地的PPS偏移信号到主站。在图7(b)的拓扑计算显示在图8，相主站和i节点之间的偏移是齐给出。例如，相位偏移的主站之间的M和节点d为QD = 230毫秒，如图8 ，这同步洪水时，才需要在网络初始化时间。如果新节点加入网络，它们可以沟通与现有的基础设施节点，以获得相抵消。然而，如果新的节点尝试同步的基础这是不从主同步，则在节点上来自EM接收机（这是显著较大的抖动比无线电）将开始积累。在这种情况下，该节点必须直接从请求一个新的更新时间主人。一旦对于主相位偏移计算任意两个节点之间的相对相位可以是通过从主节点和他们的相位偏移计算导向载体，以及它们之间的相位差是这两个向量的只是一个矢量和。这是在说明图7(c)，其中每个节点具有相位偏移的列表从它的邻居。有趣的是注意到，这个总和沿着定向矢量图形的闭合回路总是为零。此属性提供鲁棒性对一个节点故障和通过允许节点交叉检查，提高可靠性它们的相位偏移。

我们现在评估的抖动，可以积累的来源跨越多跳网络。让我们给出的估计值通过在第n跳的节点中的相位偏移量计算误差从主，其中最坏的情况下错误和fn是相位偏移。还要注意的是主要的抖动来从每个节点的PPS信号，它不应该积累在每一跳。在相位估计误差是由公式（4）给出，其中无线电抖动不跳数累积超过作为在第n跳最坏的情况下抖动为n。这种积累抖动的无线电通信可以通过使用被控制更好的带内同步方法。它应该是指出，相位偏移比DEM这样的位置有显著变小，节点数百跳后只会走出去的阶段。DEM不累积，因为相位偏移在每节点计算相对于所述全局接收信号，的相位在第k跳的偏移是不传递到所述第（k+1）跳。

协议提供了以下内容：

在我们的基于硬件的方法，每个节点是横跨接收的PPS信号具有恒定频率整个网络以确保该节点保持延长持续时间相对不同步漂在其时钟频率。在实践中，有可能是相对相位的由于突然变异一些变化，如掉电或附近机械过供电现有的信号。在我们的设计中，这间隔可以是几个小时或几天的顺序如通过在第5所示的结果。提出的时钟同步方法是非常可扩展的跳数和的区域的术语网络。增加一个新的节点到网络的只涉及相位的计算就抵消到邻居，而且不需要重新计算所有的节点的相位偏移。传入节点可以计算出从相邻的偏移量，并且可以

因此，从主通过估计其相位值矢量和。必须小心，但是，不同步从具有现有的新节点的新节点没有直接与主机同步。这确保PPS抖动不累积。

这个时钟同步的一个有趣的特性方案是，在网络连接的所有周期图形具有为0的绝对相位总和。中的任何节点在网络能够确认其相位从偏移掌握从任何其他路径通过另一个邻居。 一个节点发生故障，任何相邻节点的事件这个失败的节点仍将在全球范围内同步，它将能够协助任何新的节点加入网络估计其相从主偏移。

如上文所述，Syntonistor具有检测能力当输入信号的定时意外增加超出了正常的抖动阈值。这可能发生由于各种原因，包括在一个物理变化的环境中，一个新的周围的设备得到通电，或即使停电。响应于这些类型的错误，该Syntonistor将提高这标志着主其错误行将PPS值可能不再是精确的传感器节点。如果错误行仍然很高基于一个足够长的时期（对本地时钟漂移），节点必须回落到一个现有的软件同步技术。例如，该节点可以通过定期与邻居来更新其信息时钟。一旦电源线信号再次stabalizes，误差从Syntonistor线将转换从高向低。这个高向低过渡自然发生的第一次一个节点的电源。一个可能的优化为节点只要求相位偏移基于其邻居。实际上，这不过效果很好，随着时间的推移这可能导致节点相对于所述主漂流如果节点组去同步进出步调一致。

**5. 总结**

我们所提出的方法还有两个主要局限时钟同步的因素。首先，由于磁场在各个方向上的场源，硬件接收器会不会对移动设备很好地工作。我们观察当移动物体触碰或近在咫尺得到接收器上时，自谐振感应线圈LC电路的暂时失败。这可能是由于另一场源出现现在更是占主导地位原始源被阻止。它通常需要的顺序几秒钟的共振重新稳定。这意味着该节点通常应该在被放置在基础设施至少几英尺远的人或移动设备。如如前所述， Syntonistor提供有关反馈它接收到的信号中的幅值和质量安置。第二个主要的限制是，该装置只与附近的有功功率线的地方工作。这将不适合于远程位置或停电期间。在发生电源故障的情况下，错误位将通知

每个传感器节点的同步不再可用。在这一点上，系统应进入一个故障安全备份同步通信模式，将可能消耗更多的能量。一旦电源恢复时，错误位将返回低，节点将重新初始化同步。通常情况下，位置，似乎像他们太遥控接收电力线信号结束有好接待，因为他们也往往是无效的其他噪声来源。

时钟同步是无线的一个重要服务传感器网络。在本文中，我们提出了一个硬件支持使用的诱导方法时钟同步从交流电源线作为一个全球性的时钟源信号。已有的交流电源线的无处不在的性质这使得室内时钟切实有效的解决方案同步。我们的硬件设备，称为Syntonistor ，提供了一种频率匹配但相位偏移的时钟信号向网络中的所有节点。该装置是一个独立的模块可以直接连接到现有的传感器节点提供的PPS信号，该节点可以使用它来调整其本地时钟。在内部，接收器采用了软件运行的PLL在一个微控制器来锁定和过滤原始信号。通过一个简单的初始化协议中，每个节点都能够计算其相位从主时钟的偏移，使节点共享一个共同的挂钟时间。初始化后，节点甚至保持同步不通过广播消息。这是理想的极低占空比网络，或情况下的节点是否经常断开从网络中的很长一段时间。另外，使用外部信号的解耦同步过程从任何特定的MAC协议。我们证明了我们的硬件解决方案消耗的显著较少的能量比现有运行在低功耗MAC协议之上的计划。实验表明，我们能够达到平均在多跳网络中的所有节点之间的同步小于1ms。过在地板上了11天的实验运行使用连接到电线的有源办公环境数据采集系统，我们看到的只是一个最坏情况的错误6毫秒。至于今后的工作中，我们计划来优化硬件和固件更提高准确性和减少耗电量。还有一个很好的潜力为开发新型的低功耗MAC协议的利用了带外漂移率调整。我们亦计划使用的电磁原始输出来调查场检测电路（也传递到主机节点），为监测附近的机械和独特类型的传感器电气设备。

参考文献：

1. W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin. An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. INFOCOM, June 2002.
2. V. Rajendran, K. Obraczka and J. J. Garcia-Luna-Aceves. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks. Sensys, 2003.
3. L.F.W. van Hoesel and P.J.M. Havinga. A lightweight medium access protocol for wireless sensor networks. INSS, 2004.
4. Estrin D. Girod, L. Robust range estimation using acoustic and multimodal sensing. In the proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Inteillgent Robots and Systems (IROS), march 2001.
5. Priyantha, N.B., Chakraborty, A., Balakrishnan, H. The Cricket Location-Support System. MOBICOM, 2001.
6. Simon G. Ledeczi A. Sztipanovitis J. Maroti, M.Shooter localization in urban terrain. IEEE Computer, August 2004.
7. Olsen, R. G., Deno, D., Baishiki, R. S. . Magnetic fields from electric power lines theory and comparison to measurements. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988.
8. Deno, D. . Sources and Structures of Magnetic and Electric Fields in the home. 23rd Hanford Life Science Symposium, 1984.
9. Machlan H. Allan, D. Time transfer using nearly simultaneous reception times of a common transmission. 26th Annual Symposium on Frequency Contro, pages 309–316, 1972.
10. Rowe A., Mangharam R., Rajkumar R. FireFly: A Time Synchronized Real-Time Sensor Networking Platform. Wireless Ad Hoc Networking: Personal-Area, Local-Area, and the Sensory-Area Networks, CRC Press Book Chapter, 2006.
11. L. Lamport. Time, clocks and ordering of events in distributed systems. Communications of the ACM, 1978.
12. D. Mills. Internet time synchronization: The network time protocol. IEEE Transactions on Communications, 1991.
13. Zatti S. Gusell, R. The accuracy of clock synchronization achieved by tempo. IEEE transactions on Software Engineering, 1989.
14. F. Cristian. Probabilistic clock synchronization. Distributed Computing, 1989.
15. Ochsenreiter W. Kopetz, H. Clock synchonization in distributed real-time systems. IEEE Computer, August 1987.
16. J. Elson and L. Girod and D. Estrin. Fine-grained network time synchronization using reference broadcast. USENIX OSDI, 2002.
17. M. Maroti and B. Kusy and G. Simon and A. Ledeczi. The flooding time synchronization protocol. Proc. ACM Sensys, 2004.
18. S. Ganeriwal and R. Kumar and M. B. Srivastava. Timing-sync protocol for sensor networks. Proc. ACM Sensys, 2003.
19. Geoffrey Werner-Allen, Geetika Tewari, Ankit Patel, Matt Welsh, and Radhika Nagpal. Firefly-inspired sensor network synchronicity with realistic radio effects. In SenSys ’05: Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems, pages 142–153, 2005.
20. Rowe A., Mangharam R., and Rajkumar R. RTLink: A Time-Synchronized Link Protocol for Energy-Constrained Multi-hop Wireless Networks. SECON, 2006.
21. Abrams D. Dowling J. Williams C. Jozsa, R. Quantum clock synchronization based on shared prior entanglement. Physics Review, 2000.
22. A. Eswaran, A. Rowe and R. Rajkumar. Nano-RK: an Energy-aware Resource-centric RTOS for Sensor Networks. IEEE Real-Time Systems Symposium, 2005.
23. J. Polastre, J. Hill and D. Culler. Versatile low power media access for wireless sensor networks. SenSys, November 2005.
24. <http://www.saleae.com/logic>.

