

学校编码: 10384
学 号: 23320061152616

分类号__密级__
UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于 ZigBee 协议用于结构健康监测的
无线智能传感网络研究与实现

Research and Design of Wireless Network for
SHM Based on ZigBee Protocol

吴丽君

指导教师姓名: 王建新 副教授
专 业 名 称: 通信与信息系统
论文提交日期: 2009 年 5 月
论文答辩时间: 2009 年 6 月
学位授予日期: 2009 年 月

答辩委员会主席: _____
评 阅 人: _____

2009 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):
年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘 要

结构建筑物健康监测 (SHM) 是目前土木学科研究的前沿课题之一。每个建筑物都有固有的物理特性, 当内部结构发生变化时, 某些物理特性就会发生改变。结构建筑物的健康监测思路是: 对建筑物的特性参数进行采集, 经过在线处理、或发回到数据中心处理后, 与健康情况下的处理结果相比较, 即可得出当前建筑物所处状态是否健康。以往 SHM 采集数据是通过有线网络进行传输的。但随着网络规模的扩大, 有线网络中传输线的成本急剧增加, 供电电源困难、节点安装拆卸繁琐的缺点日益突出, 无线监测成为一种趋势。

无线传感器网络 (WSN) 的设计必须满足: 低功耗、低复杂度、节点数多、覆盖范围广、适当的传输速率五个要求。目前国内外基于结构健康监测应用的无线传感网络实现方法中大部分是基于单跳的, 网络只能支持少量的节点。为实现大覆盖范围, 又满足低复杂度、低功耗的要求, 本文将 IEEE802.15.4 标准和基于其上架构的 ZigBee 协议引入到健康监测的无线传感器网络中, 设计并实现了相应的无线传感器硬件和软件。实验表明, 本设计具有节点容量大、功耗低、链路传输速率适中的特点, 适合于结构健康监测的应用。

本论文的工作主要包括五部分:

- 1) 分析并总结了目前国内外健康监测应用的无线传感器网络研究进展。比较了众多无线通信标准后, 得出 802.15.4 和其上构架的 ZigBee 协议最适合于应用到基于健康监测的无线传感器网络中。
- 2) 设计并实现了无线传感节点, 包含信号调节模块、数据采集模块、数据存储处理模块和基于 ZigBee 协议的无线发射模块几部分。
- 3) 基于结构健康监测的应用, 设计了相应的网络拓扑, 对各个模块的工作进行分工, 定义了各个模块间接口、设计了网络管理的状态转移图, 并做了相应实现。
- 4) 对系统的硬件性能、软件的性能及网络性能进行测试。
- 5) 本文的工作进行总结和展望。

关键词: SHM; 无线传感网; ZigBee

Abstract

The large-scale civil structures are supposed to provide long-term service to the society, and their damage even collapse will bring great losses to the country and the people. Therefore, increasing emphasis is put on structure safety, and the Structural Health Monitoring (SHM) has also become one of the forefronts of civil engineering. The health status of civil structures can be determined by first collecting the building parameters, then processing the data online or directly sending them back to the data center for processing, after which the characteristics parameter can be extracted and compared with the normal value. The traditional wired structural monitoring systems often suffer of various problems mainly related to the cabling which limits their applicability. These issues include the cost of cables, their difficulty of installation, their invasive effect on the monitored structure, their vulnerability to mechanical damage, and the high cost of maintenance. All these disadvantages urge the need for wireless monitoring.

In the design of wireless sensor network (WSN) for the application SHM, five requirements are supposed to be met: low-power, large network nodes, multi-hop, low-complexity and the appropriate data rate. But most of the current wireless SHM systems are mainly based on single-hop, and the network can only support a small number of nodes. For the realization of multi-hop, low complexity and low power requirements, this thesis will introduce the proposed system based on ZigBee protocol built on the IEEE802.15.4, then design and implement the corresponding hardware and software of wireless sensor. The desired features are validated by experiments, including relatively high network capacity, low power consumption, and moderate data rate.

In this thesis, the work mainly consists of four parts:

- 1) Summarize and analyze the domestic and foreign state-of-the-art of WSN for SHM.
- 2) Design and realize wireless sensor nodes, including the signal conditioning module, data collection module, data storage processing module and wireless transmitter module based on the ZigBee protocol.
- 3) Based on the applications of the structural health monitoring, design the corresponding network topology, design the finite-state machine of the application program, and realize the software.
- 4) Test the performance of the system, including hardware, software and network.
- 5) Conclude the work of this thesis and envision the future work.

Key words: SHM; WSN; ZigBee

目录

第一章 绪论	1
1.1 课题背景及意义	1
1.2 无线传感网应用及其发展现状	2
1.2.1 SHM 无线传感网的应用特点.....	2
1.2.2 国外发展现状.....	4
1.2.3 国内发展现状.....	5
1.3 本论文工作	7
第二章 ZigBee 原理及其实现方法	8
2.1 ZigBee 简介	8
2.1.1 短距离无线通信标准比较.....	8
2.1.2 ZigBee 规范简介.....	9
2.2 ZigBee 实现方案介绍	12
2.3 CC2430 模块及其开发环境	13
第三章 无线传感节点的硬件设计	18
3.1 信号调节模块	18
3.1.1 滤波模块.....	18
3.1.2 信号放大模块.....	20
3.1.3 电平偏移模块.....	21
3.2 数据采集处理模块	21
3.2.1 AD 采样模块.....	23
3.2.2 数据处理存储模块.....	28
3.2.3 电源管理模块.....	29
3.3 ZigBee 通讯模块	30
3.4 本章小结	32
第四章 网络拓扑及软件设计	33
4.1 网络的拓扑结构和数据传输路径	33
4.2 软件设计思路	35

4.2.1 CENTER 端 PC 机状态转移图	37
4.2.2 Node 处 Atmega128 状态转移图	39
4.2.3 CENTER 处 CC2430 部分简要状态机图	40
4.3 属性定义与通信包格式	41
4.3.1 属性和常量	41
4.3.2 包格式定义	43
4.3.3 PC 与 Atmega128 间通信包格式	43
4.3.4 板间串口通信包格式	46
4.3.5 CC2430 间通信包格式	49
4.4 本章小结	51
第五章 实验测试	53
5.1 信号调节模块性能	53
5.1.1 Multisim 仿真	53
5.1.2 电路实验验证	55
5.2 功耗分析	57
5.3 网络性能	57
5.3.1 ZigBee 协议有效数据通信速率	58
5.3.2 系统初步验证	60
第六章 总结与展望	63
6.1 总结	63
6.2 展望	63
参考文献	65
附录 攻读硕士学位期间从事的科研项目与科研成果	68
致谢	69

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 The Background of the Research	1
1.2 The Application and Development of Wireless Sensor Networks	2
1.2.1 The Feature of WSN Used on Struct Health Monitor	2
1.2.2 International Development.....	4
1.2.3 Domestic Development.....	5
1.3 Working of Thesis	7
Chapter 2 The Principle and Achievement of ZigBee Protocol	8
2.1 Brief Introduction of ZigBee	8
2.1.1 Compare of Short-range Communication Protocol.....	8
2.1.2 ZigBee Protocol	9
2.2 Achievement of ZigBee Protocol	11
2.3 CC2430 Module and Development Tools	13
Chapter 3 Hardware of WSU.....	18
3.1 Signal Regulation Module	18
3.1.1 Filter Module	18
3.1.2 Amplifier Module	20
3.1.3 Level Shift Module	21
3.2 Data Collection and Processing Modules	20
3.2.1 Sample module.....	23
3.2.2 Date Processing and Store modules.....	28
3.2.3 Power Management Moudules	29
3.3 ZigBee Module	30
3.4 Brief Summary of This Chapter	32
Chapter 4 Network Topology and Software	33
4.1 Network Topology	33
4.2 Software Design	35
4.2.1 FSM Run on CENTER	37
4.2.2 FSM Run on Atmega128	39
4.2.3 FSM Run on CC2430.....	40

4.3 Definitions of Attributes and Frame Format	41
4.3.1 Attributes and Constant.....	41
4.3.2 Definition of Frame Format	43
4.3.3 Frames Used between PC and Atmega128.....	43
4.3.4 Frames Used in USART.....	46
4.3.5 Frames Used on Wireless Communication.....	49
4.4 Brief Summary of This Chapter	51
Chapter 5 The System Performance.....	53
5.1 The Performance of Signal Regulate modules.....	53
5.1.1 Multisim Simulation	53
5.1.2 Test by Circuit.....	55
5.2 Power Consumption	57
5.3 Network Performance	57
5.3.1 Valid Data Rate	58
5.3.2 Experiment	60
Chapter 6 Conclution and Envision	63
6.1 Conclution	63
6.2 Envision	63
Researches and Publications for My Master Degree.....	65
Bibliography.....	68
Acknowledgements	69

第一章 绪论

1.1 课题背景及意义

近几年，我国建成了许多举世瞩目的重大工程，如三峡工程、西气东输、南水北调、青藏铁路、水立方、鸟巢、杭州湾跨海大桥等。与民众生活息息相关的公共基础设施建设也正向大型化、复杂化方向发展。这些设施将在接下来的几十上百年内为人们提供服务，为人们带来了极大的便利和财富。但由于环境载荷作用、疲劳效应、腐蚀效应和材料老化以及其他使用不当的人为因素，建筑物的结构将不可避免地产生损伤积累，抗力衰减，从而导致突发事故，造成的巨大损失。例如：广东韶关公路大桥坍塌，造成 32 人死亡，59 人受伤；台湾省高屏大桥的断裂是我国发生的又一起塌桥事件，造成 16 辆汽车坠入河中，22 人受伤[1]。这些引起了人们对这些大型工程安全性的关心和重视。

目前，工程的可靠性一方面是靠合理的设计、正确的施工来保障的。另一方面，是依赖事后维修和定期的维护来实现的。第一种方式由于工程结构体系复杂，认识水平的限制，设计预期性态与实际性态不可避免地存在偏差，同时由于施工水平的限制，也会导致实际结构与设计预想偏差。第二种方式中，事后维修缺乏及时性、主动性；定时维修缺乏目的性、经济性。如高屏大桥事故，事故现场调查结果表明，该桥桥基早已裸露，台风造成河水暴涨，桥基被冲垮，导致大桥下陷断裂[1]。如果能及时地了解桥的健康状况，则完全可以避免事故。

随着技术的进步，通过恰当的监测手段可以及时了解工程结构的健康状况，特别是有可能在早期就发现危及安全的隐患。这对确保大型结构工程的安全起到至关重要的作用，同时也为大型结构工程的维修加固提供必要的依据，由此可以节约维修和重建的费用，避免影响社会的正常运转。对于新建的大型结构工程应总结以往的经验教训，在工程建设的同时增设长期安全监测系统和损伤识别控制系统，为保证大型结构工程的安全提供可靠的健康状况信息。因此，结构健康监测已成为世界范围内土木工程领域的前沿研究方向[3]。

为了能长期地监测建筑物结构健康，并将监测数据发到采集中心，研究人员提出了智能传感网的概念。所谓智能传感网，是指能实现信息的“采集”、“传输”

和“处理”的统一和协同的网络。最初，有线智能传感网因其实现简单、可靠性高，受到广大科研人员的青睐，被迅速地应用到健康监测实验中。但随着研究的深入，受监测建筑物规模逐渐增大，而繁多的电源线、数据传输线使得系统安装的时间和费用越来越大。一个中等规模的监测系统的安装时间占整个系统时间的 75%，系统的安装费用则占整个系统费用的 25%[4]。因此，寻求一种安装便捷、费用低的传感网，成为迫在眉睫的任务。而近 10 年，数字无线技术的发展解决了无线信号的高噪声问题，无线宽带技术大大提高了无线传输的传输速率[5]，同时无线通信的可靠性、稳定性也大大提高，这些使得无线满足了人们可靠、高效传输的需要。便捷、灵活、低价、低功耗的特点使得无线通信很适合应用于大规模的、长期的健康监测，因而无线智能传感网成为当前健康监测课题的研究热点。

无线智能传感网在土木工程上的应用，并不仅限于健康监测中。5.12 地震给我们留下了惨痛的记忆。地震时，建筑物坍塌的主要原因是其振动幅度超过承受能力。所以，在同等外力作用条件下，如果能减小建筑物振动幅度，则有望降低其坍塌可能性。研究人员通过无线智能传感网对建筑物在受到外力作用后的动力特性进行实时采集和在线分析，并根据计算的结果给出一个反馈的激励，作用到建筑物上，以期减弱、甚至是抵消其振动。这对减震防灾工作是极为有帮助的。

综上所述，无线传感网在土木工程中有着广泛而又意义深远的应用。目前，国内采用的无线传感网络平台大都是国外开发的产品，无线传感网的相关技术并不够成熟。且大部分的平台只支持单跳传输的小型网络，覆盖范围小，无法满足大型结构健康监测的需求。因此研究开发适用于大型结构健康监测的智能无线传感器网络具有重要的科学意义和经济价值。本文将针对使用于大型桥梁结构健康监测的无线传感网技术及其实现进行研究。

1.2 无线传感网应用及其发展现状

1.2.1 SHM 无线传感网的应用特点

无线传感网在建筑物的结构健康监测中被广泛应用。无线传感网络测试系统由三部分组成：普通传感器采集节点（Node）、具有路由功能的节点（Router）以及一个连接 PC 的数据处理中心（Sink），工作过程如图 1-1 所示。传感器节点

采集数据后，进行相应的存储处理，然后通过无线信道传输到 Sink 节点上，Sink 节点一般与 PC 机相连，则在任意位置都可以通过 Internet 获得节点采集的数据。

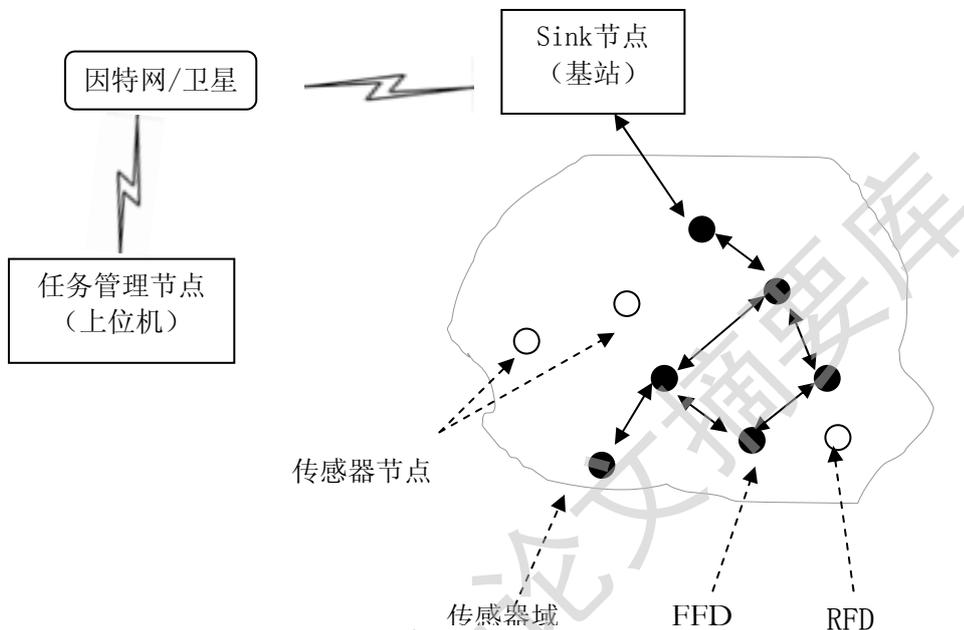


图 1-1 无线传感网络系统工作过程

根据采集节点实现的功能，可以将其硬件结构可以分为检测单元、数据处理单元、数据传输单元和能量单元四部分，如图 1-2 所示。

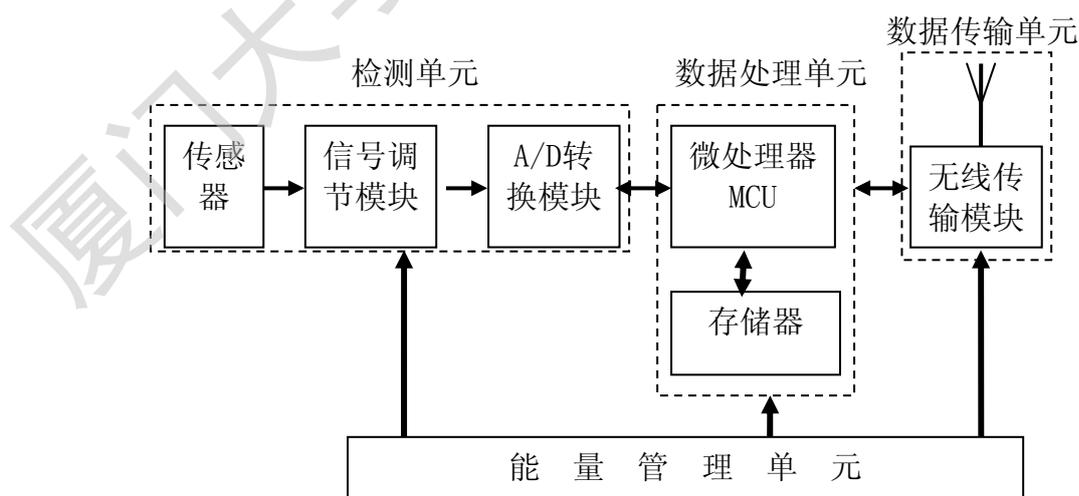


图 1-2 无线传感节点硬件组成

其中检测单元负责把模拟信号转变为数字信号，然后送与数据处理单元；数据处理单元由 MCU 和存储器组成，实现数字信号的存储和处理，如 FFT 变换，AR

变换等，并实现与无线传输模块的通信；数据传输单元负责将数据通过无线的方式发送出去，传送到 Sink 节点上；能量单元则负责为各个单元提供高效稳定的能量。

与一般的无线传感网相比，大型建筑的结构健康监测网络有以下几个特点：

- (1) 传感器节点数多，覆盖面积大。建筑物一个地方的损伤可能导致整个建筑物坍塌，所以健康监测节点的分布必须密集，传感器节点数多。用于大型结构上的健康监测网络还必须保证大覆盖范围。
- (2) 节点供电不便，为节能，短距离多跳传输方式成为趋势。节点采用电池供电，其无线通信模块的能耗占总能耗大部分。在需要大覆盖范围情况下，以短距离多跳传输方式代替单跳长距离传输成为趋势。
- (3) 节点安装的位置通常预先设计，较为固定；且某些节点安装在较难到达的位置，维修不便。例如桥梁健康监测中，有一部分节点将会布置在桥拱内。所以必须选取合适网络的拓扑结构，以方便网络的维护。
- (4) 突发数据量较大，实时性要求不高，但存在数据传输瓶颈。由于健康监测理论目前仍处于理论研究阶段，需要大量的原始数据进行验证，所有采集数据都必须往 Sink 节点传输，因此，越接近采集中心的数据链路负载就越重。为避免来不及转发的数据丢失，节点必须有一定的空间来缓存转发数据。同时，也可利用数据融合技术来减少需要传输的数据量。
- (5) 时间同步要求高。从采集得到的数据中提取建筑物的物理特性时，要求不同位置的采集数据间有相关性，所以希望每个位置的节点都能在同一时刻开始、以相同的频率采集，这需要时间同步算法的支持。

在节点硬件设计、拓扑结构选择、路由算法设计、网络管理程序设计时需综合考虑以上几个特点。基于以上特点，国内外对基于健康监测的无线传感网络协议架构和软硬件实现都进行了大量研究。

1.2.2 国外发展现状

应用于建筑物健康监测的无线传感监测网络在国际研究十分热门，这些研究主要可以分为两方面：一方面是监测平台研发阶段，这包括硬件电路的设计、驱动的实现及组网的实现。另一方面是对网络性能的优化，包括拓扑结构的优化、节能机制的优化、通信速率的提高、同步精度和复杂度的改进。1998 起学术研

究机构和商业机构对无线传感监测网络平台的硬件、软件及协议都进行了大量的研发,并取得了飞速的进展[7]。其中,美国Michigan和Stanford大学的Lynch、Law和Kiremidjian等人研发的针对土木工程结构监测的、具有计算功能的低能耗无线传感器(WiMMS),在国际上得到广泛关注[8]。WiMMS系统是由服务器端和客户端节点构成的一个星形网络。其节点是基于ADS8341的采样芯片、Atmega128L的处理器芯片、128K的ExSRAM、24xStream无线收发模块设计的,可以达到19.2kbps的通信速率,理想情况下通讯距离为室外1000m、室内300m,工作电压为5.0V,工作状态下所耗电为77mA,休眠状态下为100uA。Lynch课题组在WiMMS基础上针对土木应用开发了网络管理机制,并通过广播的方式实现了采集同步。随着研究的深入,人们发现星形拓扑已容纳下不断增大的节点数,因此针对两层结构的无线传感器网络拓扑和时间同步机制进行深入的研究。Sazanov等人也在2004年研发了基于MSP430F1611和ChipconCC2420的传感网系统,这是基于802.15.4的低功耗、短距离、支持多跳无线传感网。同时,随着节点数的增加,节点分布已超过单跳范围,简单的广播机制已无法达到采集同步。Kottapalli对时间同步机制展开了研究。节点数的增加使得路由算法的重要性日益突出。美国科学基金在加州大学Los Angeles分校的Embedded Networked Sensing研究中心的Govindan等人在无线传感网络的路由协议、传输信号同步和多跳(Multi-Hop)数据传输等方面开展了最新的研究[9]。在商业类型的无线传感监测系统方面,美国加州大学Berkeley分校与Crossbow公司最早研发的基于‘智能尘埃’(smart mote)和对开源的传感网络操作系统(TinyOS)得到广泛的关注和应用[10]。此外,Spencer、Mitchell和欧洲学者Casati等人[11-13]也根据传感器技术,尤其是MEMS技术、微处理技术,研究了各自的无线传感监测系统。美国Ember(www.ember.com)、Microstrain(www.microstrain.com)和Intel等公司[14]近几年也研发出未对公众开放的无线传感监测系统。

1.2.3 国内发展现状

目前,国内关于传感器网络方面的研究成果总体上来说还只是处于起步阶段,但是国家和研究机构投入的科研力度很大,在推动实现无线传感器网络技术的自主知识产权方面,很多研究所和大学都作出了相当大的贡献。

我国对无线传感网络具有研究性质的工作在 2004 年才逐渐开始, 2005 年发展的非常迅速。孙利民等在《无线传感器网络》一书中对无线传感网络的应用作了详细的解释并提出了自己的一些看法和研究成果[15]。哈尔滨工业大学以欧进萍为代表的课题组对无线传感网络的研究也迅速开展起来。起初, 国内使用的无线传感器网络软硬件平台大都是购买国外的产品, 在此平台上对无线通信协议、同步和定位中间件、数据融合、网络管理、时间同步算法、Qos 方面进行改进研究, 很少有对硬件进行自主研发的。如李宏伟等在 2005 年发表的博士论文中介绍哈尔滨工业大学课题组应用 Crossbow 生产的无线传感单元 MICA 节点进行测试实验[4]。2006 年起, 鉴于国外开发的平台价格昂贵和知识产权等问题, 硬件平台的自主开发引起了各研究机构的重视, 一些研究机构基于非标准的无线通信协议进行平台的开发, 并获得了相应的成果。喻言等在 2006 年发表的博士论文中介绍了其课题组自主研发的基于 Atmega8L 控制芯片和 CC1000 无线收发芯片设计的无线传感器节点, 提出了三层无线网络拓扑结构, 采用 LEACH 路由协议。该系统通讯速率 76.8Kbps, 通讯距离达 300m, 工作电压为 2.1V-3.6V[1]。齐立群在 2007 年发表的硕士论文中, 介绍了其自主研发的基于 Atmega128 控制芯片和 PTR8000 的无线收发模块设计的无线传感器节点[6], PTR8000 是讯通公司基于 Nrf905 通信芯片设计的无线通信模块, 工作为 1.9~3.6V, 数据速率为 50Kbps, 在开阔地无干扰情况下传输距离约 400M, 接收/发送时电流为 12.5/11mA, 掉电模式下工作电流为 2.5uA。

与此同时, 短距离无线通信技术迅速发展, 其中的 ZigBee 技术以其低功耗、短距离、低复杂度、支持大网络容量、支持多跳、标准成熟、软硬件开发方便等特点, 被公认是最适合应用于无线传感网络的协议标准。北京邮电大学相关课题组在结构健康监测网络的架构中采用了 ZigBee 组网技术。纪航宇在其 2008 年发表的硕士论文中, 使用了节点-基站-SINK 的方式设计了整个无线传感网络[5]。这网络中, 使用 Mote TPR2420 作为一般传感器节点, 结合 ARM9 和 Mote TPR2420 设计基站, 并在 SINK 节点添加 GPRS 模块, 构建了整个无线传感网系统。TPR2420 传感节点是由 Crossbow 公司推出的, 在单一平台上包含所需要的基本资源, 包括: USB 编程能力、具有 10KRAM 的 MSP430 单片机、CC2420 射频芯片、1MB 扩展 Flash。TPR2420 工作电压为 3V, 在接收模式下, 系统电流消耗为 24.8mA, 空闲和休眠模式下, 仅为 uA 级。通信距离为 75-100M, 传输速率为 250Kbps。软件

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库