

分类号: TP212.9

密 级: _____
单位代码: 10359
学 号: 2006G226

合肥工业大学
Hefei University of Technology

硕士学位论文

MASTER DISSERTATION



论文题目: 面向环境监测无线传感器网络节点的设计

学位类别: 工程硕士

学科专业:
(工程领域) 计算机应用技术

作者姓名: 赵 露

导师姓名: 周国祥 教授 王伟伟 副教授

完成时间: 2009 年 11 月

面向环境监测无线传感器网络节点的设计

**Design of Wireless Sensor Network Nodes for
Environment Monitoring**

作 者 姓 名	赵 露
学 位 类 型	工 程 硕 士
专 业 领 域	计算机应用技术
研 究 方 向	无线传感器网络
导 师 及 职 称	周国祥 教授 王伟伟 副教授

2009 年 11 月

合 肥 工 业 大 学

本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合合肥工业大学硕士学位论文质量要求。

答辩委员会签名:(工作单位、职称)

主 席: 中国科大 教授 汪海

委 员:

王浩 合肥工业大学 教授

梁华国 合肥工业大学 教授

侯慧娟 合肥工业大学 教授


欧阳峰 合肥工业大学 副教授

导 师:

周国祥 合肥工业大学 教授

独 创 性 声 明


本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的
研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含
其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得合肥工业大学
或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究
所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名： 签字日期：2009年12月10日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解合肥工业大学有关保留、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。本人授权合肥工业大学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)


学位论文作者签名：

签字日期：2009年12月10日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：

通讯地址：

导师签名：

签字日期：2009年12月10日

电话：

邮编：

面向环境监测无线传感器网络节点的设计

摘 要

无线传感器网络,作为一种全新的信息获取和处理技术能够广泛地应用于多个领域,近年来成为国内外传感器技术领域的热点研究课题。它是在特定的背景下以一定的网络模型规划的一组传感器节点的集合,传感器节点是为传感器网络特别设计的微型计算机系统,在整个网络体系中处于重要的地位。

本文主要以环境监测为背景,设计了一种无线传感器网络节点。论文完成的主要工作如下:

(1)对无线传感器网络的起源和发展、研究现状,以及几项关键技术进行了深入的了解,探讨了无线传感器网络节点研制的基本原则和思想。

(2)在对无线传感器网络节点的结构进行了分析后,本文提出了一种能够用于环境监测,基于 CC2431 的节点设计方案。节点的硬件平台设计主要包括 CC2431 和传感器模块;软件平台主要是 TinyOS 操作系统,并对 TinyOS 的移植进行了分析。

(3)论文工作中对无线传感器网络在井下环境监测的一些技术做了一些研究,并在此基础上提出了一套用于煤矿的无线传感器网络监测系统。

面向环境监测的无线传感器网络节点已开发完成,实践证明该节点的设计能够满足井下各种环境参数的监测,取得了较好的效果。

关键词: 无线传感器网络;节点;Tiny OS;环境监测

Design of Wireless Sensor Network Nodes for Environment Monitoring

ABSTRACT

Wireless Sensor Network (WSN) is a hot research subject in sensor technology area recent years, which is widely used in many fields as a new information technology of acquisition and processing. It is a certain network planning model in the specific context, which is consisted of a collection of sensor nodes. Sensor node is a micro-computer system. It is specifically designed for wireless sensor networks. It plays an important role in the whole network.

In this paper, to environmental monitoring as the background, designed a wireless sensor network node. It achieves the main jobs:

(1) The dissertation carried out a sound study on the development, Present status, some key technique, as well as the basic Principles and Philosophy of WSN.

(2) In this dissertation, a new kind design of sensor node based on CC2431, which can be used in environment monitoring is proposed after analyzing the structure of sensor node. Its hardware design mainly includes modules of CC2431 and sensor; TinyOS is used in software system, and its transplant technique is introduced and analyzed.

(3) The work also studied the technology of environment monitoring in coal WSN, and a monitoring system is build for monitoring the environment information of humidity in coal mine.

Wireless sensor network nodes for environment monitoring has been developed and is proven that the node is designed to meet the down-hole monitoring of various environmental parameters, and achieved good results.

Keywords: wireless sensor network; node; Tiny OS; environment monitoring

致 谢

为期近一年的论文写作即将画上一个圆满的句号，本论文是在我的导师周国祥老师的悉心指导下完成的，在论文写作的过程中，从论文的选题到确定思路，从资料的搜集、提纲的拟定到内容的写作与修改，继而诸多观点的梳理，周老师都给予了高度的关怀及帮助，使得论文能够顺利完成。

周老师渊博的学识，敏锐的学术洞察力，严谨的治学态度，一丝不苟的负责精神，以及对学生孜孜不倦的教诲都给予了我极其深刻的印象，让我受益匪浅。在此，谨向周老师表示我最衷心地感谢和最诚挚的敬意。

感谢我的家人，感谢你们一直以来给予我的支持和鼓励，帮助我度过难关。

感谢母校合肥工业大学的培养和教育，感谢计算机与信息学院的老师们。

最后，感谢在我的人生路上曾经支持、鼓励、帮助过我的人，对此我充满深深的感激之情，再次谢谢你们！

作者：赵露

2009 年 11 月 26 日

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 研究现状	4
1.2.1 无线传感网络节点研究的发展	4
1.2.2 无线传感器网络的特点	7
1.3 本文的工作和主要内容	8
1.4 本文组织结构	9
第二章 无线传感器网络节点设计相关技术	10
2.1 节点硬件结构设计	10
2.2 操作系统设计	12
2.2.1 TINYOS 的执行模式	14
2.2.2 TINYOS 的组件模型	15
2.2.3 NESC	16
2.3 网络协议设计	17
2.3.1 ZIGBEE 协议	19
2.3.2 Zigbee 的技术参数及优势	20
2.4 本章小结	21
第三章 无线传感器网络节点的总体设计	22
3.1 传感器节点系统结构	22
3.1.1 传感器节点的特点	22
3.1.2 传感器节点的结构	23
3.1.3 传感器节点的实现方案	25
3.1.4 传感器节点的应用限制	26
3.2 基于 CC2431 的节点硬件设计	27
3.2.1 节点主要芯片选型比较	27
3.2.2 节点的硬件平台结构	31
3.3 本章小结	32

第四章 传感器节点的软件体系结构.....	33
4.1 基于 CC2431 的传感器节点的软件系统概述.....	33
4.2 传感器节点的操作系统.....	33
4.2.1 TINYOS 操作系统.....	34
4.2.2 TINYOS 调度机制.....	35
4.2.3 TINYOS 的移植 ^[62]	37
4.3 传感器节点的通信协议.....	39
4.3.1 MAC 协议.....	39
4.3.2 路由协议.....	39
4.4 传感器节点的驱动程序.....	40
4.4.1 ADC.....	40
4.4.2 TIMER.....	40
4.4.3 LED.....	41
4.4.4 UART.....	41
4.5 本章小结.....	41
第五章 无线传感器网络在井下环境监测系统中的应用.....	42
5.1 概述.....	42
5.2 井下环境监测系统的构想方案.....	42
5.3 路由协议的设计.....	44
5.3.1 基本信息表(BIT)的建立.....	45
5.3.2 路由恢复.....	46
5.4 井下无线传感器网络数据的采集.....	47
5.5 实验数据与分析.....	49
5.6 本章小结.....	51
第六章 结论与展望.....	53
6.1 工作总结.....	53
6.2 展望.....	54
参考文献.....	55

插图清单

图 1-1 无线传感器网络的平面结构.....	1
图 1-2 无线传感器网络的分簇结构.....	3
图 1-3 GAINS 节点实物图.....	6
图 2-1 无线传感器节点功能框图.....	11
图 2-2 TinyOS 体系结构	14
图 2-3 Zigbee 协议架构.....	19
图 3-1 传感器节点结构.....	23
图 3-2 CC2431 的 RF 和模拟部分.....	30
图 3-3 基于 CC2431 的节点硬件平台架构	31
图 3-4 SHT1x 与 CC2431 连接电路图	32
图 4-1 节点的软件系统结构	33
图 4-2 TinyOS 调度系统	35
图 4-3 任务队列为空	36
图 4-4 任务队列中任务数为三	36
图 4-5 TinyOS 系统结构图	38
图 5-1 井下 WSN 监控系统结构.....	43
图 5-2 无线传感器网络在井下巷道中的布置	44
图 5-3 路由恢复	46
图 5-4 只有同面备用节点符合选取要求的路由恢复	47
图 5-5 无线传输数据测试.....	50
图 5-6 时间延迟结果	51
图 5-7 丢包率的结果	51

表格清单

表 2-1 短距离无线通信技术	18
表 2-2IEEE 802.15.4 的主要技术特征	20
表 2-3IEEE802.15.4 LLC 层和 MAC 层主要功能	20
表 3- 1 典型节点的内部硬件结构比较	29
表 4-1 TinyOS 支持的部分硬件平台特性	34
表 4-2 TinyOS 源码目录	37
表 4-3 TinyOS 移植要实现的硬件表示层模块及接口	38

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

无线传感器网络(WSN, Wireless Sensor Networks), 作为一项新型的信息采集技术日益受到国内外科研工作者的高度重视。无线传感器网络, 指在环境中布置的传感器节点以无线通信方式组织成网络, 传感器节点完成一些数据采集工作, 节点通过无线传感网络将数据发送到网络中, 并最终由特定的应用接收。传感器节点集成传感器件、数据处理和通信模块, 并通过自组织的方式构成网络。借助于传感器节点中内置的形式多样的传感器, 可以测量所在周边环境中的热、红外、声、雷达和地震波等信号, 从而探测包括温度、湿度、噪声、光强度、压力、速度和方向等物质现象。无线传感器网络是一种全新的信息获取和信息处理模式。

无线传感器网络的节点通过飞行器撒播、人工埋置等方式任意散落在被监测区域内, 以自组织方式构成网络。根据节点数目的多少, 传感器网络可按平面结构和分簇结构^[1]来构建。平面结构比较健壮, 但是控制开销大, 可扩展性不佳, 主要适用于中小型网络。在分簇结构中, 网络被划分成簇, 每个簇包含一个簇头和多个簇成员, 簇头和网关构成虚拟骨干网。分簇结构的优点是网络可扩充性好, 容易实现网络的管理和同步, 主要用于大规模的无线传感器网络。

无线传感器网络的平面结构如图 1-1 所示。在传感器网络中, 大量传感器节点被随机部署在监测区域内, 节点以自组织方式构成网络, 节点监测到的数据通过其他传感器节点逐跳地进行传输, 在传输的过程中数据可能被多个中间节点处理。经过多跳路由后, 监测数据传输到汇聚(Sink)节点, 最后由 Internet 或者卫星进行收集并传送给用户。

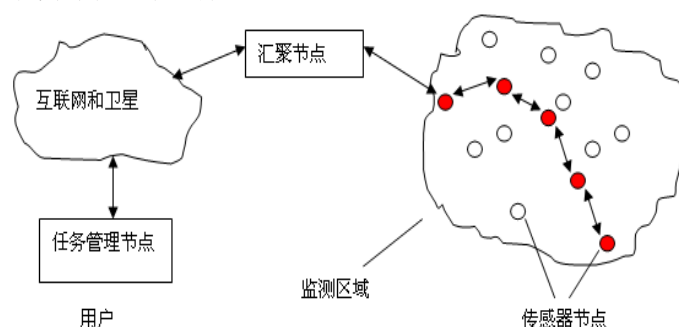


图 1-1 无线传感器网络的平面结构

无线传感器网络中的节点分为两种：普通的传感器节点和汇聚节点。

普通节点, 是一个微型的嵌入式系统, 它的处理能力、存储能力和通信能力相对较弱, 通过携带能量有限的电池供电。从网络功能上看, 每个传感器节

点兼顾传统网络节点的终端和路由器双重功能，除了进行本地信息收集和数据处理外，还要对其他节点转发来的数据进行存储、管理和融合等处理，同时与其他节点协作完成一些特定的任务。

汇聚节点(Sink 节点)，节点处理能力、存储能力和通信能力相对较强，它连接传感器网络与 Internet 等外部网络，实现两种协议栈之间的通信协议转换，同时发布管理节点的监测任务，并把收集的数据转发到外部网络上。汇聚节点既可以是一个具有增强功能的普通节点，有足够的能量供给和更多的内存与计算资源，也可以是没有监测功能仅带有无线通信接口的特殊网关设备。

在平面结构的无线传感器网络中，所有节点具有相同的地位，所以又被称为对等式结构。平面结构的网络比较简单，源节点和目的节点间一般存在多条路径，网络负荷由这些路径共同承担，一般情况下不存在瓶颈，网络比较健壮。但是在无线传感器网络中，由于节点数量较大，密度较高，平面结构在节点的组织、定位、节点与基站之间的路由建立、控制与维持的报文开销上都存在着很大的问题，这些开销会占用很大的带宽，影响网络数据的传输速率，严重情况下甚至会造成整个网络的崩溃。另外，节点在进行报文传输时，由于所有节点都起着路由的作用，因此，某个节点在产生并发送报文之后，在这个节点和基站节点之间会使得大量的节点参与存储转发工作，很难进入休眠状态，从而使整个系统在宏观上将损耗很多能量。平面结构的可扩充性差，每个节点都需要知道到达其它所有节点的路由，维护这些动态变化的路由信息则需要大量的控制信息。

在分簇结构中，网络被划分为多个簇。每个簇由一个簇头和多个簇成员组成，这些簇头形成了高一级的网络。分簇后的网络体系结构如图 1-2 所示。簇成员负责数据的采集，而簇头节点负责簇间数据的转发，这大大减少了网络中路由控制信息的数量，因此具有很好的可扩充性。簇头可以预先指定，也可以通过分簇算法选举产生。由于簇头可以通过选举随时产生，所以分簇结构具有很强的抗毁性，维护分簇结构需要节点执行分簇算法。

分簇结构存在的一个明显问题就是簇头的能量消耗问题，簇头的发送和接收报文的频率要高出普通节点几倍甚至十几倍，这样簇头在发送、接收报文时会消耗很多能量，而且很难进入休眠状态，从而相对普通节点，其寿命要短的多。这就需要在簇内执行合适的算法以更新簇头。分簇结构比平面结构复杂的多，由此也产生了很多相应的算法和协议。分簇结构解决了平面结构中的网络堵塞问题，整体能量消耗较少，实用性也较高。

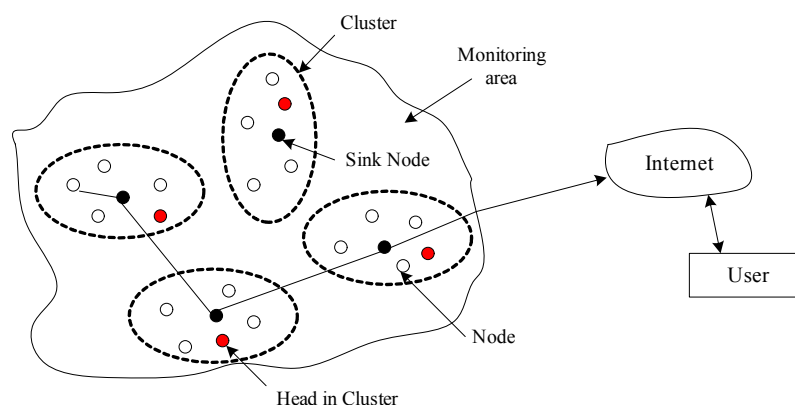


图 1-2 无线传感器网络的分簇结构

由于无线传感器网络的特殊性，其应用领域与普通通信网络有着显著的区别^{[2] [3] [4]}，主要包括以下几类。

(1) 军事应用。

军事应用^[5]是无线传感器网络技术的主要应用领域，由于其特有的无需架设网络设施、可快速展开、抗毁性强等特点，是数字人战场无线数据通信的首选技术，是军队在敌对区域中获取情报的重要技术手段。无线传感器网络可以布置在敌方的阵地上，用来收集敌方一些重要目标的信息，并跟踪敌方的军事动向。无线传感器网络由于其具有可快速部署、可自组织、隐蔽性强和高容错性的特点，在军事上有着非常广的应用，因此许多国家不惜巨资进行研究。

(2) 紧急和临时场合。

在发生了地震、水灾、强热带风暴或遭受其他灾难打击后，固定的通信网络设施（如有线通信网络、蜂窝移动通信网络的基站等网络设施、卫星通信地球站以及微波接力站等）可能被全部摧毁或无法正常工作，对于抢险救灾来说，这时就需要无线传感器网络这种不依赖任何固定网络设施、能快速布设的自组织网络^[6]技术。边远或偏僻野外地区、植被不能破坏的自然保护区，无法采用固定或预设的网络设施进行通信，也可以采用无线传感器网络来进行信号采集与处理。无线传感器网络的快速展开和自组织特点，是这些场合通信的最佳选择。

(3) 环境监测^[7]和预报

随着人们生活水平的提高，越来越多的人开始关注人类自身生存的环境，环境科学因此得到了飞速发展，环境科学涉及的范围越来越广泛，对环境监测的技术要求也越来越高，如对大气污染的监测，对河流的监测、对候鸟迁徙状况的了解、洪水的预测、森林环境的检测，以及用于对行星探测、气象和地理研究等。环境检测是无线传感器的早期应用之一。无线传感器网络可以用来检测空气的质量，并跟踪污染源。无线传感器网络还可以用来为化学和生物灾害提供早期的预警等。在一些紧急的情况如火灾，还可以利用无线传感器来确定火灾的中心和强度等。基于传感器网络的 ALERT 系统中就是利用数种传感器来

监测降雨量、河水水位和土壤水分，并依此来预测山洪爆发的可能性。利用传感器网络可以方便的实现对环境有效的监测，还可以在环境遭到突然破坏的情况下进行紧急检测和分析，以便采取补救措施。例如在森林遭到火灾时，可以利用飞机或者炮弹把传感器节点随机部署在着火区域，通过这些节点在很短的时间内将火源的具体位置、火势的大小以及火势的走向等信息传送给消防部门，以便有效的进行扑救。

(4) 空间探索

无线传感器网络可为探索外部星球提供方便，可借助于航天器将传感器节点散播在要探测的星球，可以实现对星球的长时间的监测。这种方法成本比较低，节点体积小，之间可以通信，也可以和地面检测站进行通信。NASA 的 JPL 实验室研制的 SensorWeb: 就是为进行火星探测而准备的，它已在佛罗里达宇航中心周围的环境监测项目中进行了测试和完善。

(5) 卫生保健^[8]

传感器网络在医疗卫生系统 and 健康护理方面的应用主要是监测人体的各种生理数据，跟踪和监控医院内医生和患者的行动，以及医院的药物管理等。可以在病人身上安装用于检测身体机能的传感器节点，这些信息汇总后，传送给医生，进行及时处理，为远程医疗创造条件。利用传感器网络可以长时间的收集人体的生理数据，收集的数据为了解人体健康状况以及研制新药提供帮助，且这些微型节点也不会为人的正常生活带来不便。

上面列举了无线传感器网络的几种主要应用领域，在其它方面应用也比较多，如交通管理、矿井的监测等。总之，随着传感器网络的研究进一步发展，越来越多的领域将得到广泛应用，而且会带来丰厚的经济效益和社会效益。

1.2 研究现状

1.2.1 无线传感网络节点研究的发展

在无线传感器网络节点的研究开发方面，国外的许多大学和研究机构纷纷投入了大量的研发力量从事研究工作，根据时间先后和技术特点，传感器网络节点的研究大致可以划分四个时代^[9]。

第一代(1996-1999 年): 具有代表性的节点平台有 UCLA 的 WINS^[10], UC Berkeley 的 Smart Dust^[11]、WeC 和 Rene^[12]。WINS 是较早的节点，是 DARPA1995 年资助项目“Low Power Wireless Integrated Microsensors”^[13]的研究成果，主要是展示 CIMS(CMOS Integrated Microsensors) 技术在设计微型化低功耗无线传感器构成组件的优势，并没有特别强调无线通信及网络技术，因此最终没有形成影响力。Smart Dust 即“智能尘埃”，是 MEMS 技术在微型化 WSN 节点方面的一次尝试，节点最终的物理尺寸只有近 8mm，节点间利用光进行通信，具有一定的处理能力。Smart Dust 节点证明了 MEMS 技术在微型化设备方

面的潜力，是 WSN 研究非常重要的一个领域。WeC 和 Rene 节点是由 D.Culler 领导的研究小组设计，它是 UCB Mote 的雏形，主要的差别在于后者有较灵活的扩展性，用户可以通过较丰富的数/模通道和总线支持不同种类的传感器。而前者是一个相对独立的系统，仅集成了温度、光强度的传感器电路，扩展能力有限，且不支持通用标准接口。

第二代(2000-2001 年)：随着 WSN 的研究受到广泛的关注，相继出现了多种节点平台，典型的有 UCB 的 Mica 和 Dot^[14]，MIT 的 uAMPS-I 和 uAMPS-II^[15]，以及 Rockwell 公司的 HYDRA。Mica 和 Dot 分别是 WeC 和 Rene 的升级，与后者相比，Mica 和 Dot 提供了更丰富的传感器接口和内存资源，Mica 被成功用在 Sensor Webs 项目中原理性地演示了无人机器撒播 WSN 节点进行目标跟踪的新军事侦察模式的可行性。如果说 UCB 的 Mote 系列是利用成熟的商用器件 COST (Commercial Off the Shelf)构建的节点，那么 MIT 的 uAMPS-I 也是 COST 设计，特点是采用支持分级电压的处理器和自适应调节发送功率的技术来节省能耗。uAMPS-II 则提高了集成度，在 FPGA 验证设计的基础上，定制了两片 ASIC 来处理射频通信。uAMPS 曾被用在 DARPA 支持的 PASTA(Power Aware Sensing and Tracking and Analysis)项目^[16]中。Rockwell 公司的 HYDRA 是一个商用节点平台，体积稍大，著名的 Sensor IT 项目就用它概念性地实现并演示了美国五角大楼所期望的“超视距”战场监测应用。

第三代(2002-2003 年)：随着研究的深入，人们开始关注到特殊环境中自组织 WSN 的应用，降低能耗，尽可能延长网络生命周期等关键性问题的研究。具有代表性的节点有：Mica2 和 MicaDot2，以及 NASA JPL 实验室的 Sensor Web^[17]。Sensor Web 最初被定位于进行火星的长时间观测，在可再生能源不成熟的条件下，面对这样的应用设计者们只能尽力寻找低功耗的节点设计方案。目前，Sensor Web 已被应用在多个项目中进行实际测试。Mica2 和 MicaDot2 属于 UCB 的 Mote 系列，修正了 Mica 通信距离短、易受干扰和不可靠等一些技术缺陷，采用了新的微处理器 Atmega1128 和射频芯片 CC1000 来降低节点的功耗。尽管 Mica2 还存在一些缺陷，但是它基本上已经成为目前 WSN 研究主流的试验平台。此外，国内外多个研究机构根据各自的研究需要陆续研究出了功能类似的各具特点的试验节点，如 Wisenet, PicoNode, HelioMote, iBadge, Eyes 和 U3。国内中科院、清华大学和哈尔滨工业大学等院校的研究小组也先后研制出了类似 Mica2 的节点。

第四代(2004 年至今)：2004 年底，Chipcon 率先发布了支持 Zigbee 的射频芯片，这成为 WSN 节点研发的又一个分水岭。随后的研究开始重点关注新无线通信技术与标准在 WSN 节点设计中的应用。到目前为止，已经相继研发出了一系列的第四代节点，典型的有 MicaZ, Telos, EmberNode, Imote, Imote2, BTNode3 和 DSYS25。MicaZ 是 Crossbow 公司用支持 Zigbee 的 CC2420 直接代替

Mica2 的 CC1000 研制的。Telos 是 UCB Mote 系列的第四代节点，设计上的改进很大，除了支持 Zigbee，Telos 还支持 USB 接口，省去了对开发板的依赖，方便开发和使用。通过采用新型的微处理器 TI 公司的 MSP430，减小了休眠工作电流和系统唤醒时间，能耗显著降低了，Telos 的功耗大约是 Mica2 的十分之一。研究数据表明^[14]，节点组网进行同步试验，用两节 5 号电池供电，每 3min 进行一次同步，Mica2，MicaZ 和 Telos 的工作时间分别是 543days，328days 和 945days。EmberNode^[18]是在 Ember 公司推出的支持 Zigbee 的商用硬件和软件平台开发的 WSN 节点。Imote 和 Imote2 节点是 Intel 公司研制的 WSN 试验节点。在 Imote 中仅支持蓝牙，到了 Imote2，蓝牙、Zigbee 和 WiFi 同时支持。Imote 完全采用 Intel 的微处理器，如 ARM 和 XScale，并配备了一定的协处理器来管理系统能耗。BTNode3^[19]是瑞士联邦研究院 (ETH Zurich) 研发的第三个版本的 WSN 节点，采用的是蓝牙技术。DSYS25^[20]是爱尔兰国家微电子研究中心为分布式自治传感器项目研发的试验节点，再一次尝试了纯粹的射频通信技术在 WSN 中应用的可行性，它选用了 Nordic 公司的 nRF2401，支持多通道，传输率可达 1Mb/s，高于 CC1000 的 76.8kb/s。虽然结合 Active Message 机制设计了占空比控制机制来节省能耗，但整个系统的功耗依然很大。

国内在传感器节点的研究方面，中科院计算所研制出了兼容国外同类产品的软件平台的高可靠性、使用便捷的无线传感器网络节点 GAINS^[21]系列节点，如图 1-3 所示。GAINS 系列节点主要包括 GAINS1、GAINS2、GAINS3、GAINSZ、GAINSJ、miniGAINS，以及 GAINZ 等。除了串口的接入节点外，中科院计算所还推出了 USB 接口的接入节点，USB 设备不但可以充当与 PC 之间的通信接口，还可以对节点电池进行充电，另外还实现了 USB 供电和电池供电的自动切换。

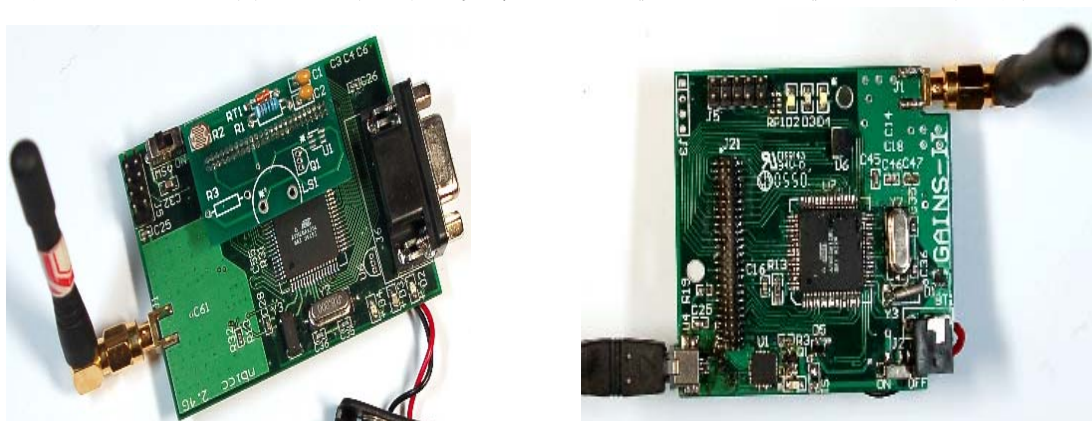


图 1-3 GAINS 节点实物图

现有的无线传感器网络设计都大约遵循以下几方面的约定：通信距离短，传输速率低，节点处理能力弱，存储空间有限等。基于这些约定，传感器节点硬件的研究取得了较大进展，提出了超低功耗、成本低廉等实现途径，并将这些设计思想体现在具体的实现上。

随着无线传感器网络应用领域的不断扩展，以及很多应用方面有较高的实

实时性要求，这些约定已经成为无线传感器网络发展的瓶颈。如某些领域需要很高的采样频率、较远的传输距离、较高的实时性。这些要求虽然能通过无线通信协议的完善得到部分实现，但是最根本解决办法还是硬件设计的高性能化。在语音识别和图像处理等领域也都需要增加传感器节点的采样频率和处理能力。所有这些都说明节点的高性能化势在必行，而高性能化对节点的功耗和成本又提出了挑战。

1.2.2 无线传感器网络的特点

目前常见的无线网络包括移动通信网、无线局域网、蓝牙网络、Ad hoc 网络等，与这些网络相比，无线传感器网络^{[22] [23]}具有以下特点：

(1) 硬件资源有限

节点由于受价格、体积和功耗的限制^[24]，其计算能力、程序空间和内存空间比普通的计算机功能要弱很多。这一点决定了在节点操作系统设计中，协议层次不能太复杂。

(2) 电源容量有限

网络节点由电池供电，电池的容量一般不是很大。其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，这个节点也就失去了作用（死亡）。因此在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。

(3) 无中心

无线传感器网络中没有严格的控制中心，所有节点地位平等，是一个对等式网络。节点可以随时加入或离开网络，任何节点的故障不会影响整个网络的运行，具有强的抗毁性。

(4) 自组织

网络的布设和展开无需依赖于任何预设的网络设施，节点通过分层协议和分布式算法协调各自的行为，节点开机后就可以快速、自动地组成一个独立的网络。

(5) 多跳路由

网络中节点通信距离有限，一般在几百米范围内，节点只能与它的邻居直接通信。如果希望与其射频覆盖范围之外的节点进行通信，则需要通过中间节点进行路由。固定网络的多跳路由使用网关和路由器来实现，而无线传感器网络中的多跳路由是由普通网络节点完成的，没有专门的路由设备。这样每个节点即可以是信息的发起者，也是信息的转发者。

(6) 动态拓扑

无线传感器网络^[25]是一个动态的网络，节点可以随处移动；一个节点可能会因为电池能量耗尽或其他故障，退出网络运行；一个节点也可能由于工作的

需要而被添加到网络中。这些都会使网络的拓扑结构随时发生变化，因此网络应该具有动态拓扑组织功能。

(7) 节点数量众多，分布密集

为了对一个区域执行监测任务，往往有成千上万传感器节点空投到该区域。传感器节点分布非常密集，利用节点之间高度连接性来保证系统的容错性和抗毁性。

1.3 本文的工作和主要内容

随着低功耗无线电通信技术、嵌入式计算技术、微型传感器技术及集成电路技术的飞速发展和日益成熟，使得大量的、低成本的微型传感器通过链路自组织成分布式无线传感器网络成为现实。由于受到成本以及体积等原因的限制，无线传感器节点的处理能力、通信带宽以及电池容量等资源有限。传感器节点在实现各种网络协议和应用系统时，存在以下一些现实约束^[26]。

(1) 电源能量有限

传感器节点体积微小，通常携带能量十分有限的电池。由于传感器节点个数多、成本低，分布区域广，而且部署区域一般环境复杂，传感器节点通过更换电池的方式来补充能源是不现实的。如何有效利用能源，延长网络的工作寿命成为设计上需要考虑的关键因素。

(2) 通信能力有限

随着通信距离的增加，能耗将急剧增加。因此，在满足通信连通度的前提下应尽量减少单跳通信距离。由于传感器节点的能量限制和网络覆盖区域大，传感器网络采用多跳路由的传输机制。传感器节点的无线通信带宽有限，如何设计网络通信机制以满足传感器网络的通信要求是传感器网络面临的挑战之一。

(3) 计算和存储能力有限

传感器节点是一种微型的嵌入式设备，要求价格低功耗小，这些限制必然导致其携带的处理器能力比较弱，存储容量比较小。为了完成各种任务，传感器节点需要完成监测数据的采集和转换、数据的管理和处理、应答汇聚节点的任务请求和节点控制等多种工作。如何利用有限的计算和存储资源完成诸多协同任务成为传感器网络设计的挑战。

针对的无线传感器节点的特点，本文主要对面向环境监测领域的传感器网络节点的软硬件设计做了一些探讨。文章首先对无线传感器网络的相关技术做了介绍；接下来，针对环境监测的具体领域，对节点展开研究，包括节点的硬件和软件系统结构；其次，介绍了传感器网络节点的定位技术；最后，作为节点上的一个应用，本文还探讨了在所设计的节点上建立井下环境监测系统的问题。

1.4 本文组织结构

本文一共分为六章，论文的内容组织如下：

第一章为绪论。介绍了本文的研究背景，无线传感器网络节点的国内外研究现状，讨论了无线传感器网络的特点及其应用领域。然后，明确了本文的研究目标和意义，最后阐述了本文的主要工作和组织结构。

第二章介绍了无线传感器网络节点设计的节点硬件结构、操作系统及网络协议等相关技术。

第三章介绍了无线传感器网络节点的设计，重点介绍了硬件的设计原则与详细的硬件的设计。在分析了节点的设计要求后，详细介绍了传感器节点的软硬件平台，对比分析了现有的节点结构。本文提出了一种适用于面向环境监测的节点设计方案，核心芯片采用德州仪器公司的 CC2431。

第四章介绍了传感器节点的软件系统，重点介绍了 TinyOS 的架构，所设计的节点主要软件选用 TinyOS 操作系统，并介绍了 TinyOS 的移植技术。

第五章介绍了基于本文设计的节点上建立的井下环境监测系统。

第六章为总结与展望。总结了本文的主要工作，并对今后下一步的工作提出了建议。

第二章 无线传感器网络节点设计相关技术

无线传感器网络综合了传感器、嵌入式计算、分布式信息处理、现代网络及无线通信等技术，是多学科高度交叉的新兴前沿热点研究领域。网络中大量节点以无线多跳的无中心方式连接，通过各种高度集成的微型传感器对感兴趣事件或目标属性进行监测，利用嵌入式系统和低功耗处理器对感知数据进行处理，并基于网络通信实现协作信息处理，再以多跳中继方式将数据传输给用户。当前，无线传感器网络的研究主要集中在硬件设计、操作系统设计、网络协议设计、信息处理等方面。

传统网络面向数据传输，无线传感器网络则面向应用，以数据为中心。传统的网络设计方法对传感器网络并不充分，但仍可参考传统网络分层的方法，从应用层、传输层、网络层、数据链路层和物理层来考察其网络设计问题。此外，交叉层优化可在资源消耗和性能提升之间获得平衡，受到越来越多的关注。

无线传感器网络中，数据具有空域广布、时域累积和高度冗余的特点，要求资源有限的多个节点通过协商和合作完成网络信息处理。这种节点间的协作信号信息处理需综合考虑信息增益、网络性能、资源消耗和可靠性等约束。

2.1 节点硬件结构设计

传感器是数据采集、数据处理的关键部件，它可以将物理世界中的一个物理量映射到一个定量的测量值，使人们对物理世界形成量化认识。传感器技术是新技术革命和信息社会的重要技术基础。

传感器节点包括一个传感器模块用于感知周围世界中的物理量，一个数字处理模块用于处理传感器模块采集的信号以及完成网络协议的功能，一个无线电收发模块用于无线通信和一个电源模块用于为传感器的各种操作提供能量。

传感器由于受到测量范围和精度的限制，一般只能覆盖环境中的一个有限的地理区域。而传感器节点由于在体积与成本方面受到限制，覆盖范围较小、测量准确度较差。为了实现对物理世界的监测，每个传感器节点需要具有将采集到的数据以单跳或多跳的方式发送给远程监测站的能力。

无线传感器网络中的节点构成和具体的应用要求密切相关，针对不同的实际应用，节点的设计也各不相同。此外根据应用需要，可能还会有定位系统，电源管理单元和移动单元等。节点必须消耗极低的能量，具有很低的产品费用，能适应无人值守的各种环境。处理器可以采用通用嵌入式微处理器，也可以采用运算速度高、功能多、功耗低和节约成本的单片机。

传感器网络节点可以从逻辑上划分为六个子系统：网络控制器、无线网络接口、网关网络接口、传感器接口、和路由选择与发现目标。节点的逻辑结构如

图 2-1 所示。

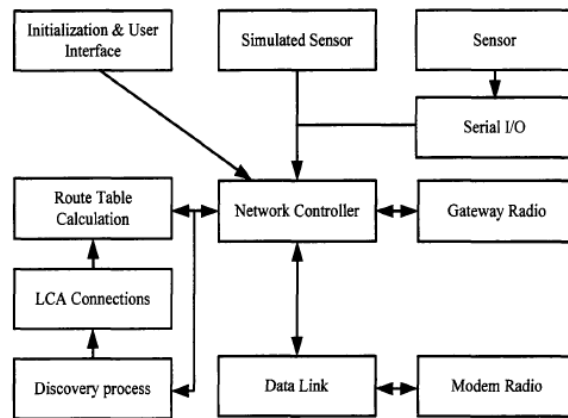


图 2-1 无线传感器节点功能框图

系统的核心是网络控制器。网络控制器的任务是调度整个系统的活动并且控制信息从不同的子系统传递到相应的通信接口^[27]。网络控制器位于射频子系统(无线电装置)和传感器子系统之间,控制系统的起动,通过自动配置形成一个节省能源的网络,控制数据在传感器和网关节点间传送。网络控制器维护路由表,初始化路径搜索,自动配置系统,并且允许在特定环境下重新配置系统。网络控制器的主要目标是将应用层从网络中分离出来,并且响应应用层的请求。

路由选择和路径搜索子系统为网络控制器提供执行任务的必要信息,通过使用网络数据的公共表产生网络拓扑和路由选择所必须的信息。

路径搜索通过使用单跳、未答复信息包的方法,建立和传播关于网络中节点存在的信息路由计算根据路径搜索存储的数据建立起多级跳跃网。从无线网络接收到的数据链路层信息,或者直接传送到无线网络,或者通过网关的无线设备传输^[28]。应用层(传感器接口)的信息被传送的本地网关的无线装置或者其他无线网络,以便传输到远程网关。

通过以上对无线传感器节点的功能性描述,我们不难把无线传感器节点系统结构抽象出来。无线传感器节点被抽象为三个部分:传感器接口、射频子系统和网络控制器。如上所述,无线传感器节点的核心部分是网络控制器。主要负责对传感器数据的采集和无线通信协议的处理。传感器接口主要完成传感器的模拟量到数字量的转换。射频子系统负责与网络通信,收发数据包。

我们可以看出,无线传感器节点的核心控制部分主要表现为网络控制的功能。这主要是因为,在无线传感器网络出现的初期,出于微型化、超低功耗的设计目标,大家不约而同的把无线传感器节点赋以处理能力弱、存储空间小等特点。所以节点的功能也就主要表现为采集数据、无线通信两个方面。对于采集到的数据,在节点一级不做处理,或者仅做很少的处理。虽然有的组织在节点的具体实现上强调了节点的处理能力,但是这种设计并不是主流。

新领域的应用是计算机发展的推动力量。同样,随着应用的不断扩大,无线传感器网络遵循一种“即抛即用”的原则,而且自组成网,不主张人为地供

电或多次更换电源。对功耗的要求比较严格。在智能建筑的应用中,无线传感器节点被嵌入到建筑物中,追求更长时间的使用寿命。对功耗要求更加苛刻。所以无线传感器设计的目标之一就是超低功耗。计算消耗的能量远小于无线传输消耗的能量。所以通过增加节点的计算量从而减少无线通信的负载也是实现超低功耗设计的一种方法。这也就得出和前面两种情况一样的结论:增加无线传感器节点的处理能力,促使其核心控制部件转变角色。最终导致无线传感器网络节点系统结构的改变。

通过以上分析我们可以看出,新的应用和无线传感器节点内在发展的需要都促使其系统结构发生改变。

通过上述的分析,我们可以发现新型面向环境监测的无线传感器节点系统结构具有以下特点:

(1)支持更多种类的传感器

这有助于扩展无线传感器网络的应用领域。

(2)无线传感器节点具有较强的处理能力

这是智能节点系统结构最重要的体现。节点不但要具有信息采集和网络传输的功能,还必须承担图像处理、目标识别等更重要的任务。

(3)支持较高的采样频率

在节点对模拟量传感器实现较高采样频率的同时,我们也必须注意到,有些种类的模拟量传感器的采样频率是没有必要提高的,如温度、湿度等,因为这些环境信息的变化并不是特别迅速。在支持这些传感器时,节点应该表现出传统的体系结构的特性。

(4)更好地支持无线通信协议

传统的节点系统结构体现的是非常弱的处理能力,所以也很难实现高性能的网络特性。节点处理能力的加强,特别是如果我们把节点的核心控制部件映射出网络处理器的结构特点,那么节点就会更好地支持无线通信协议。对于优化整个网络的性能也是大有裨益的。

2.2 操作系统设计

操作系统是用户和硬件之间的一个中介,用于管理硬件资源和控制应用程序的运行,它能够对硬件进行抽象,对任务进行分解等。虽然操作系统在嵌入式开发中有很多好处,但是并不是任何应用都需要使用操作系统,这完全取决于软件项目的复杂程度。通过对其应用进行需求分析,决定是否需要使用操作系统。

操作系统是无线传感器网络节点软件的灵魂,由于无线传感器网络的特殊性,导致无线传感器网络对操作系统的需求相对于传统操作系统有较大的差异。如果不在节点上设计操作系统,而是直接在硬件上设计应用程序,首先会导致

面向无线传感器网络的应用难度加大,应用程序开发人员不得不直接面对硬件进行编程,无法得到像传统操作系统那样提供的丰富服务;而且软件的重用性很差,程序员的开发效率减低,开发成本增加。

目前,嵌入式操作系统的种类较多,其中比较流行的有 uC/OS - n、Linux、eCoS、windowsCE、Vxworks、QNX 等^[29]。这些嵌入式操作系统在开放性、实用性以及性能等方面各有千秋。除了商用产品外,也有一些免费的嵌入式操作系统,如 uC/OS-II、Linux、eCos 等。但由于传感器网络硬件资源的有限性,上述介绍的操作系统很难在无线传感器网络节点上正常运行,同时为满足无线传感器网络应用的多样性,我们的操作系统必须满足以下几个要求:

- (1) 小代码量:由于节点的内存有限,因此操作系统核心代码量必须比较小。
- (2) 低功耗:无线传感器网络节点一般都采用电池一次供电方式,低功耗的操作系统有利于延长网络节点的生存周期。
- (3) 实时性:在一些无线传感器网络的应用中,要求用户在发出命令之后,终端节点能够接收反馈信息给用户,这要求操作系统有比较强的实时性,能够及时接收命令,采集信息并反馈回查询用户。
- (4) 健壮性:无线传感器网络应用的特殊环境,要求节点上的操作系统的健壮性。
- (5) 容错性:无线传感器网络很多情况下都应用环境比较恶劣的区域,一些节点很有可能由于环境或其他原因而失效,而人工更换比较困难,这就要求我们的操作系统具有较好的容错性能,能够及时发现这种节点失效的情况,并作出正确的判断通过自身调节来保证整个网络正常的工作。

而针对无线传感器网络开发的专用操作系统有 TinyOS、MANTISOS、MagnetOS、SenOS、PEEROS、AmbiteniRT、Bertha 等^[30],他们的结构大致可以分为组件结构、虚拟机、层次结构、状态机、函数库等几种。最为流行的 TinyOS 是组件结构的系统。其体系结构如图 2-2 所示。TinyOS 设计的目标是代码量小,能耗低,并发性高,鲁棒性好,可以适应不同的应用^[31]。采用轻量级线程技术、主动消息通信技术、事件驱动模式、组件化编程等,使得其成为面向传感器网络的操作系统。其应用程序由一个调度器和一个或多个组件构成,编程语言为 NesC。组件包括两类:模块和配置,组件间通过配置文件连接在一起,形成一个可执行程序。

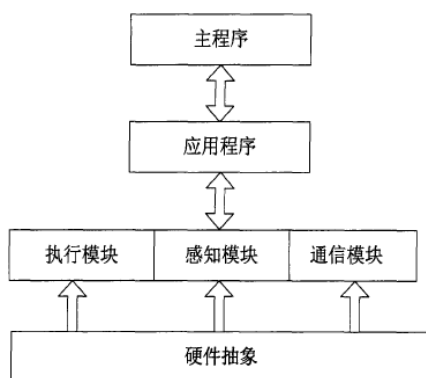


图 2-2 TinyOS 体系结构

2.2.1 TinyOS 的执行模式

Tinyos 的基于事件的执行模型可以实现无线传感器网络操作的高效性。这种执行模型只需要非常小的空间就可以实现并发型操作。

在基于事件的系统中，各个没有联系的处理任务共享一个执行上下文。因此在 TinyOS 中，每一个通知的事件都对应有一个事件处理函数、执行上下文。当通知事件后，事件处理函数会立即执行，然后返回系统。

由此可以看出，CPU 可以一直处于低功耗操作，只有在事件通知时才会进入工作状态，而不需要主动地去等待一个事件的发生。这在一定程度上限制了功率的消耗，可以实现低功耗操作。

而基于事件的执行模型带来的一个问题就是，当在事件处理函数中运行一个计算时间较长的操作时，可能会破坏其他一些对实时性要求很严格的操作。如果对该计算时间较长的操作的处理始终都不能结束，就会影响到其他事件处理函数的立即执行。由此，TinyOS 提供了一种称为任务的执行机制，它是一种在组件内部实现并发操作的轻量线程，是一种可以被推迟执行的处理过程。任务形式的执行机制使得需要较长时间的运算可以在后台运行，而系统的事件处理函数可以继续运行。对任务的调度使用了简单的先入先出调度队列 FIFO。

Tinyos 的并发模型为两层调度方式。其中，事件可以抢占任务，对硬件中断进行快速响应，但是任意两个任务之间是不可以互相抢占的。

在基于中断事件的执行模型下，由于事件是可以抢占任务执行的，因而可能会造成任务中某些诸如关键变量的改变，从而导致程序运行结果错误，而有的时候是很难被察觉的，对于调试者而言，是很难定位问题的。因此，在 TinyOS 中，就需要采取一种保护措施，对关键的变量及程序代码进行保护，不被其他硬件中断所打断。而这种相对于其他硬件中断处理函数的保护就被称为原子性。

对于任务与事件之间的关系而言，一个任务相对于另一个任务而言，是具有原子性的，因为任务与任务之间是不能被互相打断的；而任务相对于事件而言，是非原子性的，因为任务可以被任意的事件所打断。

2.2.2 TinyOS 的组件模型

一般而言, TinyOS 操作系统的组件分为 3 种类型:硬件抽象组件, 合成硬件组件和高层软件组件。

硬件抽象组件对物理硬件设备进行了 TinyOS 的组件化, 是在组件中对节点硬件平台相关寄存器及 U0 端口具体的操作, 比如使射频收发器发送或接收一个比特。该组件提供直接对硬件寄存器进行操作的命令, 以及通知由硬件产生的事件, 比如发送与接收比特完毕的事件。这种硬件抽象组件可以是对简单的硬件资源, 比如 F0 端口的抽象, 也可以是对较复杂的硬件资源, 比如编解码加速器的抽象。

合成硬件组件所起到的作用即为将硬件抽象组件与高层软件组件进行连接。它是高于硬件抽象组件一层的组件。它可以利用硬件抽象组件提供的接口实现高于硬件抽象组件一层的功能, 比如对字节的发送与接收。

高层的软件组件实现了对整个系统的控制、建立路由和数据传输。另外, 用于对数据进行计算或聚合的组件也属于该类组件。

基于事件的执行模型对底层硬件功能具有有效的扩展和补充作用, 因此就需要软件与硬件之间可以方便地进行迁移, 而 TinyOS 的组件模型可以实现这种迁移。尺寸固定的预先分配的存储空间的使用可以为软件组件硬件化提供设计需求。软件到硬件的迁移对于无线传感器网络节点是非常重要的, 这样可以在集成度、功耗和成本之间达到折中, 来满足各种需求。

主动消息模式 (AM) 是一种可广泛使用的简单的, 可扩展的通信机制, 它起初是针对于并行和分布式计算系统的基于消息的通信机制而设计出的。每个节点的主动消息模式都维护了一个应用程序的处理函数。该处理函数提供了从传感器网络中提取数据分组, 并将数据进行计算和处理, 或者回传一个响应分组的功能。在这种情况下, 就相当于网络使用了一个最小的消息缓存来完成上述的一系列工作流程。

主动消息通信模型必须满足 3 个基本的通信机制^[32]来适应无线传感器网络的需求, 这三个基本通信机制包括:支持有确认机制的消息传输、消息定位与消息分发。这三个基本通信机制是满足无线传感器网络通信的最基本的要求, 研究开发者可以在这三个基本通信机制上构建出更丰富的功能, 实现对通信机制的扩展。

在主动消息通信模型的缓存交换管理机制^[32]中, 使用了一个预先分配的固定的分组缓存空间来存放分组。当底层将接收到的数据分组提交给上层后, 上层会返回给底层一个空闲的存储空间用于存放下一个接收到的分组。当有分组同时到达, 并需要将它们进行存储时, 就可以从私有数据分组上简单地分配出额外的空间来对分组进行存储。系统必须清楚, 哪些缓存是空闲的, 而哪些存放了有用的数据。在任何时候, 应用程序都应当保持对一定数量缓存的控制。

同时，主动消息模式提供一种显示确认机制。当接收端成功地接收到一个分组并且 CRC 校验正确后，会立即向发送端发回一个确认分组来表示正确接收到了分组。该确认机制所发回的确认分组并不包含完整的确认和与该确认相匹配的信息，而仅仅包含一个特殊的序列作为确认信息。这种确认机制除了降低了功耗，也简化了确认信息的处理过程。这样发送方就可以在非常短的时间内初始化一个重发活动或找到一个新的接收者。这种简单的反馈机制大大简化了应用层的路由和可靠传输算法。

2.2.3 NesC

起初在开发 TinyOS 操作系统时，是使用 c 语言的，在实现 TinyOS 的基于事件和组件的执行模型时，为了减少编程时的代码量就需要使用大量的宏定义^[35]。而大量使用宏定义使得 TinyOS 组件化的开发显得很麻烦。于是，就需要开发出一种新的编程语言，来解决这些问题，便于 TinyOS 操作系统的开发。

因此，开发人员设计出 NesC 语言^[38]成为无线传感器网络的嵌入式操作系统的编程语言，它是完全贴切于无线传感器网络操作系统需求的编程语言，它克服了 C 语言的很多缺点来提高代码效率和代码的健壮性。首先，该语言避免使用了函数指针，使得编译器能够清楚的知道所调用的函数的位置。这样就方便了跨组件之间的优化。第二，该语言并不支持动态内存分配，而是由组件静态地声明程序状态，这样就避免了内存的崩溃。

NesC 语言所提供的编程模型，将与环境的相互作用，并发性和通信结合为一体，并且可以实现传感器网络的应用。由此，就可以说 NesC 语言的贡献在于它将基于事件的执行方式，灵活的并发模式和基于组件的应用程序设计完整地结合起来满足操作系统特殊的需求。由于是根据 Tinyos 操作系统的构建需求所设计的，在设计 Nesc 语言^[38]时需要遵循的基本原则包括：首先，NesC 应用程序建立在组件之上，这些组件由预先定义的，双向的接口所定义；第二，NesC 语言定义了一种基于任务和事件，以及在编译时检测数据竞争的并发模型。

在 TinyOS 中，一个组件包括两类接口，分别为该组件向外提供的接口与使用的其它组件所提供的接口^[36]，其中，组件所提供的接口可以清楚地表达出该组件向外所提供的服务而组件所提供的与使用的接口定义了该组件是如何与其它组件发生相互作用的，这种相互作用可以是对其他组件所提供的接口命令的调用，以及其他组件通知给该组件的事件。

每一个接口都有一个定义该接口的接口定义组件，在该组件中，罗列出了该接口所有的命令和事件，但各个接口的命令实现函数是在提供该接口的组件中进行定义。

在 Tinyos 中，接口是组件的唯一的访问途经，接口是双向的^[37]，每个接口包含所实现的命令和通知的事件。其中，命令是由提供该接口的组件所实现

的函数，事件在使用该接口的组件中进行实现。

一个接口 *i* 的命令或事件 *f*，被命名为 *i.f*。名为 *i.f* 的命令或事件是用前缀 *command* 或 *event* 来定义的。一个命令的调用如同通常的命令调用方法，由关键字 *Call* 作为前缀。在通知事件时，使用关键字 *signal* 来完成对事件的通知。

例如：

```
interface Send{
  command result_t send(TOS_Msg *msg, uint16_t length);
  event result_t sendDone(TOS_Msg *msg, result_t success);
}
```

在该接口中，分别定义了用于发送分组的命令，与通知分组发送完毕的事件。

一个接口的命令和事件是可以携带参数^[38]的，这些参数是整个组件功能实现的有用的信息。如上面所提到的接口 *Send*，在命令中携带了存放发送信息的结构体 *TOS_Msg* 的地址指针，并且携带了长度参数。在通知该接口的事件中，携带的参数为 *TOS_Msg* 的地址指针，即，将该地址空间返回，以及指示发送是否成功的参数 *success*。

一个组件可以提供一个实例化接口，也就是使用一个标示符输出同一个接口的多个实例。典型的接口为 *Timer* 接口，可以提供一个 8 位的 *id*，由此，根据 *id* 的不同，就可以提供出多个独立的 *Timer* 接口给不同的组件使用来实现定时功能。由于为 8 位 *id*，则最多可以提供 256 个 *Timer* 接口实例。为了避免 *id* 选择上的冲突，在将接口进行连接时，NesC 提供了一种特殊的 *unique* 关键字，来为每一个使用 *Timer* 接口的组件选择一个唯一的标示。

2.3 网络协议设计

无线传感网络与现有的无线网络存在很大的区别。传统无线网络的首要设计目标是提供高服务质量和高效带宽利用，其次才考虑节约能量；而传感器网络的首要设计目标是能量的高效使用，因为传感网节点的能量是有限的，通常情况下是不可供给的。如何实现能量的高效使用是设计无线传感器网络的一个挑战。节能体现在无线传感器网络设计软硬件设计的很多环节，其中如何设计低功耗的硬件平台是非常关键的一部分。无线传感器网络节点作为一种微型化的嵌入式系统构成了无线传感器网络的基础层支撑平台，因为无线传感网络节点大部分是采用电池供电，工作环境通常比较恶劣、而且数量大，更换电池变得非常困难，所以低功耗及能量的高效利用是设计无线传感器网络最重要的设计准则之一，从无线传感器网络的节点的硬件设计到整个网络各层的协议设计都把节能作为设计的目标之一，尽可能延长无线传感器网络的寿命。

无线传感器网络中的传感器节点之间互联采用短距离的无线通信方式，现在流行的无线短距离通信技术有蓝牙技术（Bluetooth）^[39]、IEEE802.11b^[40]、红外通信技术、超宽带技术（UWB）^[41]、Zigbee 技术^[42, 43]和普通射频模块，各种无线通信技术指标参考表 2-1 所示。

表 2-1 短距离无线通信技术

无线技术	频率 (Hz)	距离 (m)	功耗	传输速率 (kbps)
Bluetooth	2.4G	10	低	10000
802.11b	2.4G	100	高	11000
RFID	50k~5.8G	<5	--	200
ZigBee	2.4G	10~75	低	250
IrDA	infrared	1	低	16000
UWB	3.1~10.6G	10	低	100000
RF	300~1000M	10*x~100*x	低	10*x

蓝牙技术是一种开放性短距离无线通信技术标准，由爱立信、诺基亚、东芝、IBM 和英特尔公司 5 家厂商在 1998 年提出，主要应用于移动设备间的小范围连接，本质上是用以代替线缆。它采用跳频技术，使用 2.4G Hz 频段进行通信，具有较高的抗干扰能力和安全性能。可以支持数据和语音传输，最高速率为 1Mbps，一般有效通信范围为 10 到 100 米。然而使用蓝牙技术实现无线通信，需要专门蓝牙芯片的支出，蓝牙芯片的价格的 6-10 美元之间，这对无线传感器网络来说成本偏高。而且，蓝牙协议栈比较复杂，完整协议栈有 250k 字节，不适合采用低端处理器的传感器节点。

IEEE802.11 是无线局域网 (WLAN) 标准，主要用于实现小范围内的移动组网和无线接入。在 802.11 的基础上又推出 802.11a 和 802.11b 两个标准。802.11a 工作在 5GHz 的频段，速率高达 54Mbps，由于设备昂贵，应用较少。802.11b 使用开发的 2.4GHz 微波频段，最高速率为 11Mbps，在办公环境下传输距离约 100m 左右，在室外可达 300m。802.11b 的射频和基带协议比较复杂，实现成本高，同时对硬件实现要求有比较大的存储空间和处理能力，它的平均功耗在 1W 左右，这些因素决定了 802.11b 不适合作为无线传感器网络的无线通信技术。

红外 (Infrared Red) 通信技术是通过波长为 850nm 的红外光传输数据，红外光线直线传输、易受遮拦，且只支持点对点视距连接，收发装置的光路夹角一般在 30 度内，常用通信距离为 1~3m。红外技术只能实现点对点的连接，无法实现点对多点的连接，这样就无法灵活地构成网络，同时红外通信必须在视线可达的范围内定向传输，中间不能出现任何阻挡，同时要求通信设备的位置相当固定，无法用于移动设备，因此红外通信技术不能应用于无线传感器网络中。

超宽带技术 (UWB) 具有发射信号功率谱密度低、系统复杂度低、对信道衰落不敏感、安全性好，数据传输率高、能提供数厘米的定位精度等优点，缺点是传输的距离只有 10m 左右，隔墙穿透力不好。

Zigbee 的基础是 IEEE 802.15.4，这是 IEEE 无线个人区域网 (Personal Area

Network, PAN) 工作组的一项标准, 被称作 IEEE 802.15.4 (Zigbee) 技术标准。ZigBee 是一种近距离、低复杂度、低功耗、低数据速率、低成本的双向无线通信技术, 完整协议栈只有 32k, 可以嵌入各种设备中, 同时支持地理定位功能。以上特点决定 Zigbee 技术非常适合应用在无线传感网中。Zigbee 技术的缺点是还不十分成熟。基于普通射频模块的短距离通信技术相对比较成熟, 符合无线传感器网络低速率、低功耗的应用要求, 但是需要自定义通信协议, 这样做的最大优点是灵活性好, 可以根据系统的具体需求来灵活开发无线通信协议, 缺点就是增加了系统开发的复杂性。

2.3.1 Zigbee 协议

Zigbee 技术的物理层、MAC 层采用了 IEEE802.15.4(无线个人局域网) 协议标准, Zigbee 在 IEEE802.15.4 的基础上进行了完善和扩展, 定义了系统的高层。Zigbee 协议栈架构如图 2-3 所示。

IEEE802.15.4 在物理层定义了两个标准, 分别是 868/915MHz 物理层和 2.4GHz 物理层。两个物理层使用相同的物理层数据包格式, 都是基于 DSSS(直接序列扩频), 信道接入方式都采用 CSMA-CA; 不同的是它们的工作频率、调制技术、扩频码片长度和传输速率。868MHz(欧洲 ISM) 频段只有一个信道, 传输速率为 20kbps; 916MHz(美国 ISM) 频段有 10 个信道, nsSS 采用了每符号 15 个码片, 传输速率为 40kbps。868/915MHz 频段均采用 BPSK 调制, 2.4GHz 是全球统一的无须申请的 ISM 频段, 有 16 个信道, 提供 250kbPs 的传输速率 Dsss 采用了每符号 32 个码片物理层采用 0-QPSK 调制。表 2-2 概括 IEEE802.15.4 的一些特点。

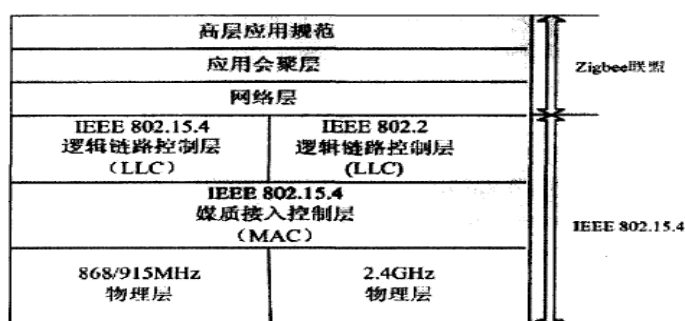


图 2-3 Zigbee 协议架构

IEEE802.15.4 的数据链路层分成逻辑链路控制(LLC)和媒介访问控制(MAC)两个子层。IEEE802.15.4 的 MAC 层采用了简单灵活的协议, 以保证低成本、易实现、低功耗等特点。IEEE802.15.4 的 MAC 子层支持多种逻辑链路层(LLC)标准, 通过 SSCS(Service-Specific Convergence sublayer 业务相关的会聚子层)协议承载 IEEE802.2 类型的 LLC 标准, 同时也允许其他 LLC 标准直接使用 IEEE802.15.4 的 MAC 层的服务, MAC 层与硬件联系紧密, 依赖于不同的物理层而实现。其中 LLC 在 IEEE802.6 标准中定义, 为 IEEE802 标准所共用。

IEEE802.15.4 的 MAC 层为了增加灵活性，支持 64bit 的 IEEE 地址和 16bit 的短地址两类地址。Zigbee 网络中所有设备都被分配以唯一的 64bit 的 IEEE 地址，此地址的分配是动态的。16bits 的局部地址处理起来更方便，节约功耗。一旦网络建立，可以使用短地址使网络可以支持超过 65000 个节点。

表 2-2 IEEE 802.15.4 的主要技术特征

复杂程度	比现有标准低	通信时延	≥15ms
目的	只支持数据通信	信道接入方式	CSMA-CA
频段、速率及信道数	868MHz: 20kbps, 1 925MHz: 40kbps, 10 2.4GHz: 250kbps, 16	MAC 的控制方式	星型，对等网络
支持节点数	65000	寻址方式	64bit IEEE 地址， 8bit 网络地址
连接层结构	开放式	温度	-40~85℃
传输范围及速率	室内: 10m, 250kbps 室外: 30~75m, 40kbps 300m, 20kbps	应用	传感器、控制领域等

在 LLC 和 MAC 两层主要完成设备间无线链路的建立、维护和结束，信道接入控制，帧校验，传输可靠性保证和控制，数据报的分段与重组等功能。为了提高数据传输的可靠性，IEEE802.15.4 采用了载波侦听多址/冲突避免 (CSMA/CA) 的信道接入方式和完全握手协议。分组传送的最大尺寸为 128 字节，其中允许最大净负荷为 104 字节，这足以解决低速的数据传送。为了节约功耗，提高电源使用效率，MAC 层的访问方式还支持信标 (beacon) 访问。由主节点每隔一段时间群发一个 Beacon 帧，而子节点首先保持在“睡眠”状态，每隔同样一段时间醒来一次，查看这个 Beacon 帧内是否有其地址，有则可以发送数据，否则仍然进入“睡眠”，这个间隔时间可以从 15 毫秒至 252 秒不等。避免了节点一直“苏醒”状态下功耗的浪费。表 2-3 列出了 IEEE802.15.4 的 LLC 层和 MAC 层主要功能。

表 2-3 IEEE802.15.4 LLC 层和 MAC 层主要功能

LLC 子层的主要功能:	IEEE802.15.4 的 MAC 协议主要功能:
传输可靠性保障和控制	设备间无线链路的建立、维护和结束
数据包的分段与重组	确认模式的帧传送与接收
数据包的顺序传输	信道接入控制
	帧校验
	预留时隙管理
	广播信息管理

2.3.2 Zigbee 的技术参数及优势

Zigbee 是为建立一种可靠的、高性价比的、低功耗的，可以实现监测和控制的无线网络而制定的，是一套完整的、开放的、全球统一的标准，是被全球公认的具有互操作性的解决方案，适用于家庭自动化与远程控制领域技术优势包括以下几个方面^[44]：

(1) 协议简单

Zigbee 采用基本的主-从结构配合静态的星型网络,因此更加适用于使用频率低、传输速率低的设备;

(2) 功耗低

由于工作周期很短,收发信息功耗也较低,并且采用了多种节能方式,电池的使用时间最终决定于不同的网络应用,通常情况下,ZigBee 两节五号电池可以支持长达 6 个月到 2 年的使用时间;

(3) 时延短

设备搜索时延典型值为 30ms,休眠激活时延典型值为 15ms,活动设备信道接入时延为 15ms,这对某些时间敏感的信息至关重要,另外还节省了能量消耗,能够满足大多数情况下应用的时延要求;

(4) 可靠

由于 ZigBee 采用了防碰撞机制,同时对需要固定带宽的通信业务采用预留专用时隙的策略,避免了发送数据时的竞争和冲突。在接入层采用确认的数据传输机制,每个发送的数据包必须等待接收点的确认信息,才可发送下一个数据包;

(5) 成本低

低数据速率、简单的协议和小的存储空间大大降低了 Zigbee 的成本,每块芯片的价格约为 2 美元,另外 zigBee 协议不需要支付专利费;

(6) 网络容量大

每个 zigBee 网络最多可支持 255 个设备,也就是说每个 zigBee 设备可以与另外 254 台设备相连接,一个区域内可以同时存在最多 100 个 ZigBee 网络;

(7) 安全

zigbee 提供了数据完整性检查和鉴权功能,采用 AES-128 加密算法,同时不同的应用可以依据各自的具体要求灵活确定其安全属性;

(8) 工作频段灵活

使用的频段分别为 2.4GHz、868MHz(欧洲)及 915MHz(美国),均为免执照频段。

2.4 本章小结

针对无线传感器网络的特点,本章重点对课题所涉及到的 WSN 相关的技术背景、理论知识等做了相关介绍。首先从节点的结构入手,介绍了目前主流无线传感器网络节点硬件平台的系统结构设计;其次针对无线传感器网络的特点介绍了现有操作系统技术,重点说明了 TinyOS 操作系统的结构、模型及接口等相关技术;最后探讨了目前应用在无线传感器网络上的一种网络协议—zigbee 协议,介绍了 ZigBee 协议的架构、技术特征和技术优势。

第三章 无线传感器网络节点的总体设计

3.1 传感器节点系统结构

3.1.1 传感器节点的特点

无线传感器网络由大量的传感节点组成，不同的应用要求配套不同的网络模型、软件系统和硬件平台。可以说，传感器网络是在特定的背景下以一定的网络模型规划的一组传感器节点的集合，传感器节点是为传感器网络特别设计的微型计算机系统，在整个网络体系中处于重要的地位。

无线传感器网络中的节点是整个网络的核心部分，节点的设计关系到整个传感器网络的性能以及网络的生命周期。因此，为了提高整个网络的性能以及网络寿命，综合分析文献^{[1][45, 46, 47]}，节点的设计需要从以下几个方面考虑。

(1) 低功耗

传感器节点的体积小，能量供给通常由电池提供。最大化传感器网络的生命周期首先要解决问题就是单个的无线传感节点必须是低功耗的。

(2) 灵活性

因为无线传感器网络应用比较广，不同的应用对节点的要求也不同，所以无线传感网络的节点结构必须足够灵活，在需要添加新的硬件部件时可以在现有的节点上直接添加，而不是开发新的节点。

(3) 稳定性

为了最大化网络寿命，要求每个节点都能够在一定范围的环境中稳定的工作。即使是单个节点失效时，其他节点仍然能够快速自组织成网络保证整个传感器网络的正常运行。此外，网络中的节点还要能够适应来自外部的干扰。

(4) 安全性

无线通信中的数据容易被拦截，要保证网络中的私有数据进行可靠传输的方法就是把所有的传输数据进行编码。因此，为了保证网络中所有传输数据的安全，每个节点必须保证自身内部数据的安全，能够执行复杂的密码算法，并且保证难以从任何网络节点中获取密钥。

(5) 体积小和低成本

节点的大小和成本对于整个网络的部署有着关键而直接的影响。节点的体积越小，成本越低，才能够在监测区域内部署大量的节点。当然，体积微小和低成本，必须在保证节点可以正常工作的前提下，对节点内部软硬件设计的精简。

3.1.2 传感器节点的结构

传感器节点完成对周围环境中对象的感知并进行适当的处理后，将测量值无线传送给监控中心。因此，传感器节点的基本功能是：准确地采集环境参数的值，并进行初步的处理，遇险情时进行声光报警；接收监控中心的数据请求命令，将采集的数据发往监控中心等。

无线传感器网络中的节点^[48]由传感器模块、处理器模块、无线通信模块和能量供应模块四个部分组成，如图 3-1 所示。

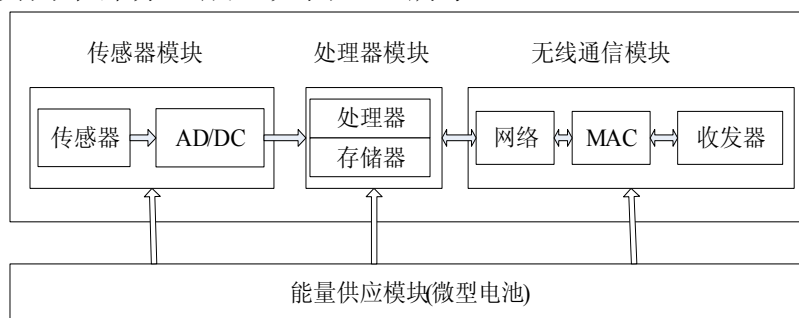


图 3-1 传感器节点结构

传感器模块负责监测区域内信息的采集和数据转换；处理器模块负责控制整个传感器节点的操作，存储和处理本身采集的数据以及其他节点发来的数据；无线通信模块负责与其他传感器节点进行无线通信，交换控制信息和收发采集数据；能量供应模块为传感器节点提供运行所需的能量，一般采用微型电池。

(1) 处理器模块

处理器模块是无线传感器节点的控制核心和数据处理核心，所有的设备控制、任务调度、能量计算和功能协调、通信协议、数据融合和数据存储都将在这个模块的支持下完成，所以处理器的选择在整个传感器节点的设计中是至关重要的。

传感器节点的处理器模块作为硬件平台的中心模块，除了应具备一般单片机的基本性能外还应该具有适应整个网络需要的特点：

- ①在外形的尺寸上要尽可能的小，这将直接决定整个节点的大小。
- ②集成度要尽量高。一般都选择集成程序存储器、静态存储器、ADC 转换器、定时器和计数器等多种功能于一体的处理器。
- ③要求功耗低且支持睡眠模式。由于能耗的限制，希望处理器尽可能的节能，且能在不需要工作时处于睡眠状态。
- ④运行速度要尽量快。有任务处理时快速处理，然后快速进入睡眠状态，目的还是节能。但必须注意的是，速度越快的处理器功耗越大，因此还要根据实际应用对于处理器的速度进行权衡。
- ⑤要有足够的 I/O 接口，以方便与其它功能模块的连接。
- ⑥安全性要求。对于某些特殊场合的应用，处理器的安全功能也非常重要，一方面要保护内部的代码不被非法成员窃取，另一方面能够为安全存储和安全

通信提供必要的硬件支持。

目前使用较多的有 ATMEL^[49] 公司的 AVR 系列单片机, 它采用 RISC 结构, 吸取了 PIC 及 8051 单片机的优点, 具有丰富的内部资源和外部接口。集成度方面, 其内部集成了几乎所有关键部件; 指令执行方面, 微控制单元采用 Harvard 结构, 因此, 指令大多为单周期; 能源管理方面, AVR 单片机提供了多种电源管理方式, 尽量节省节点能源; 可扩展性方面, 提供了多个 I/O 口, 并且和通用单片机兼容; 另外, AVR 系列单片机提供的 USART(通用同步异步收发器) 控制器, SPI(串行外围接口) 控制器, 与无线收发模块相结合, 实现了大吞吐量, 高速率的数据收发。

此外, TI 公司的 MSP430 超低功耗处理器、Motorola 公司和 Renesas 公司的处理器以及作为 32 位嵌入式处理器的 ARM 单片机, 都在无线传感器网络方面得到了广泛应用。尤其是 ARM 处理器功耗低, 处理速度快, 集成度也相当地高, 而且地址空间非常大, 可以扩展大容量的存储器。但是在普通的传感器网络节点中使用, 其价格、功耗以及外围电路的复杂度还不很理想。而对于需要大量内存、外存以及高数据吞吐率和处理能力的传感器网络汇聚节点, ARM 处理器是一个很好的选择。

(2) 无线通信模块

无线通信模块用于传感器节点间的数据通信, 解决无线通信中载波频段选择、信号调制方式、数据传输速率、编码方式等, 并通过天线进行节点间、节点与基站间数据的收发。

与一般的网络通信类似, 传感器网络的数据通信协议也包括了物理层、链路层、网络层和应用层, 与节点硬件平台有关的主要是物理层和链路层。

物理层主要解决编码调制、通信速率、通信频段的选取等问题, 物理层的编码调制关系到频率带宽、通信速率、收发功率等有关问题。采用不同的调制方式应用于不同的节点技术中, 节点本身的通信速率受到网络结构的限制, 不可能很大, 一般都是低功耗、低数据量传输。但是, 提高通信速率从而节省通信时间, 对于系统最为关键的节能问题有一定帮助, 在频段的选择方面, 无线传感器网络推荐使用免许可证频段——ISM(工业、科学和医疗) 频段, 其通信频率达 2.4GHz。

链路层负责数据流的多路复用、数据帧检测、媒体接入和差错控制等, 保证传感器网络内点到点和点到多点的连接。本层可采用超低功耗的 802.15.4 的无线数据通信协议, 即 Zigbee 协议^[50, 51]。Zigbee 是一个具有统一技术标准的短距离无线通信技术, 具有 3 个工作频段, 分别为 700MHz、866MHz、2.4GHz, 划分为 16 个信道, 数据传输速率为 250Kbit/s。用 Zigbee 技术组成的无线传感器网络结构简单、体积小、成本低、功耗低, 适合应用于无线传感器网络的数据节点。

目前,在无线通信领域应用较多的无线通信模块有 Chipcon 公司的 CC1000、CC2420、CC1010, 以及 RFM 公司的 TR1000 等, NORDIC ATMEL 公司也有相关产品。

(3) 传感器模块

传感器模块是硬件平台中真正与外部信号量接触的模块, 一般包括传感器探头和变送系统两部分, 探头采集外部的温度、光度和磁场等需要传感的信息, 将其送入变送系统, 后者完成将上述物理量转化为系统可以识别的原始电信号, 并且通过积分电路、放大电路的整形处理, 最后经过 A/D 转换成数字信号送处理器模块。

对于不同的探测物理量, 传感器模块将采用不同的信号处理方式。因此, 对于温度、湿度、光度、声音等不同的信号量, 需要设计相应的检测与传感器电路, 同时, 需要预留相应的扩展接口, 以便于扩展传感更多的物理信号量。

(4) 能量供应模块

能量供应模块作为整个无线传感器节点的基础模块, 是节点正常顺利工作的保证。传感器网络一般都是布置在特殊或危险的区域, 由于是无线网络, 所以无法采用普通的工业电能, 只能使用自己已存储的能源或者是自然界的给予。

一般来说, 目前使用的大部分都是电池。在实际的应用系统中, 可以根据目标环境选择特殊的能源供给方式, 例如在沙漠这种光照比较充足的地方可以采用太阳能电池, 在地质活动频繁的地方可以通过地热资源或者震动资源来积蓄工作电能, 在空旷多风的地方可以采用风力获取能量支持。不过从体积和应用的简易性上来说, 化学电池还是传感器网络中重点使用的能量载体。

此外, 要形成一个完整的无线传感器节点, 达到扩展性、灵活性、高效性的要求, 还需要一些外部支持系统, 主要包括外部存储器、模数转换、外部接口等。

3.1.3 传感器节点的实现方案

无线传感器节点的实现大致可以分为三个层次: 板级系统、芯片级系统、微电子机械系统^[52]。其中微电子机械技术被认为是和无线通信协议并列的无线传感器网络两大关键技术之一。

从板级实现层次上看, 微处理器的选择处于核心地位。不同种类、不同性能的处理器的直接决定着存储器的大小、电源能量的多少、支持的传感器种类、能达到的采样频率, 以及整个系统所表现出来的整体性能。从节点级看, 处理能力弱的微处理器更易实现廉价低功耗的无线传感器节点。所以在板级实现阶段, 8 位的单片机一直是节点设计的首选。但是, 当从整个网络的角度去思考价格和功耗问题时, 我们可以采用处理能力比较强的微处理器。虽然单个节点的成本明显高于功能弱的微处理器实现的节点, 但是节点的处理能力明显加强,

一个节点的作用高于若干个单片机节点发挥的作用，这样一个节点就可以替代若干个功能弱的节点，整个网络的成本也就明显下降，而网络表现的功能不但不会降低，而且可能更加强大。节点通信消耗的能量是远大于计算消耗的能量。节点处理能力的增强可以有效减少通信负载，从而不但容易实现节点低功耗，而且也有利于整个网络低功耗的实现。从整个网络的层次考虑，成本和功耗驱动着选择更高性能的微处理器。在具体实现时，32 位微处理器的使用更能体现这一思想。

芯片级实现主要包括 ASIC 和 SOC 两种实现技术。类似于对板级实现层次的探讨，从节点级和网络级两个层面分析，成本和功耗驱动着我们选择后者作为节点的芯片级实现方案。除此之外，SOC 实现方案更加有利于我们展开关于网络协议的研究，因为利用 SOC 技术实现的节点更容易映射出网络处理器的结构特性。基于 SOC 技术实现的节点，将会为无线传感器网络协议的研究开辟更加广阔的发展空间。

3.1.4 传感器节点的应用限制

传感器节点在实现各种网络协议和应用系统时，存在以下一些现实约束。

(1) 电源能量有限

传感器节点体积微小，通常携带能量十分有限的电池。由于传感器节点个数多、分布区域广，而且部署区域环境复杂，有些区域甚至人员不能到达，所以传感器节点通过更换电池的方式来补充能源是不现实的。如何高效使用能量来最大化网络生命周期是传感器网络面临的首要挑战。

传感器节点消耗能量的模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块。随着集成电路工艺的进步，处理器和传感器模块的功耗变得很低，绝大部分能量消耗在无线通信模块上。无线通信模块存在发送、接收、空闲和睡眠四种状态。无线通信模块在空闲状态一直监听无线信道的使用情况，检查是否有数据发送给自己，而在睡眠状态则关闭通信模块。研究表明，无线通信模块在发送状态的能量消耗最大，在空闲状态和接收状态的能量消耗接近，略少于发送状态的能量消耗，在睡眠状态的能量消耗最少。如何让网络通信更有效率，减少不必要的转发和接收，不需要通信时尽快进入睡眠状态，是传感器网络协议设计需要重点考虑的问题。

(2) 通信能力有限

无线通信的能量消耗与通信距离的关系为： $E=k*d^n$

其中，参数 n 满足关系 $2 < n < 4$ 。 n 的取值与很多因素有关，例如传感器节点部署贴近地面时，障碍物多干扰大， n 的取值就大；天线质量对信号发射质量的影响也很大。考虑诸多因素，通常取 n 为 3，即通信能耗与距离的三次方成正比。随着通信距离的增加，能耗将急剧增加。因此，在满足通信连通度的前

前提下应尽量减少单跳通信距离。一般而言,传感器节点的无线通信半径在 100m 以内比较合适。

考虑到传感器节点的能量限制和网络覆盖区域大,传感器网络采用多跳路由的传输机制。传感器节点的无线通信带宽有限,通常仅有几百 kbps 的速率。由于节点能量的变化,受高山、建筑物、障碍物等地势地貌以及风雨雷电等自然环境的影响,无线通信性能可能经常变化,频繁出现通信中断。在这样的通信环境和节点有限通信能力的情况下,如何设计网络通信机制以满足传感器网络的通信需求是传感器网络面临的挑战之一。

(3) 计算和存储能力有限

传感器节点是一种微型嵌入式设备,要求它价格低功耗小,这些限制必然导致其携带的处理器能力比较弱,存储器容量比较小。为了完成各种任务,传感器节点需要完成监测数据的采集和转换、数据的管理和处理、应答汇聚节点的任务请求和节点控制等多种工作。如何利用有限的计算和存储资源完成诸多协同任务成为传感器网络设计的挑战。

随着低功耗电路和系统设计技术的提高,目前已经开发出很多超低功耗微处理器。除了降低处理器的绝对功耗以外,现代处理器还支持模块化供电和动态频率调节功能。利用这些处理器的特性,传感器节点的操作系统设计了动态能量管理(DPM, dynamic power management)和动态电压调节(DVS, dynamic voltage scaling)模块,可以更有效地利用节点的各种资源。动态能量管理是当节点周围没有感兴趣的事件发生时,部分模块处于空闲状态,把这些组件关掉或调到更低能耗的睡眠状态。动态电压调节是当计算负载较低时,通过降低微处理器的工作电压和频率来降低处理能力,从而节约微处理器的能耗,很多处理器如 Strong ARM 都支持电压频率调节。

3.2 基于 CC2431 的节点硬件设计

3.2.1 节点主要芯片选型比较

无线传感网络节点的设计主要包括硬件体系结构设计、软件体系结构设计和软硬件协同设计三个方面。根据传感器网络的应用,虽然传感器网络节点不同,但是在硬件结构上最主要的区别是节点内部采用不同的处理器、无线通信协议和与应用相关的传感器。处理器从 4 位的微控制器到 32 位 ARM 内核的高端处理器都有所应用。常用的无线通信协议有 802.11b、802.15.4(Zigbee)、Bluetooth、UWB 和自定义协议。

(1) 处理器

传感器网络节点使用的处理器一般应该满足低成本、低功耗、集成度高和速度快等因素。常用的处理器有:

①ATMEL 公司的 AVR 系列,著名的 Mica 系列和 GAINS 系列节点就是使用这

种处理器。其中, Mica2 节点采用 Atmel 增强型微控制器 ATmega128L。该微控制器拥有丰富的片上资源, 包括 4 个定时器、4 KB SRAM、128 KB Flash 和 4 KB EEPROM, 拥有 UART、SPI、I2C、JTAG 接口, 方便无线芯片和传感器的接入; 有 6 种电源节能模式, 方便低功耗设计。采用该处理器的另外一个优点是: 编译器很多, 其中 GCC(WINAVR)是完全免费、开放的软件。由于以上优点和 Mica2 节点的影响, 在实际的无线传感器设计中应用很多。

②TI 公司的 MSP430 系列, 新一代的节点 Telos 节点就是使用这种处理器。MSP430 系列提供业界较低的电流消耗, 工作电压为 1.8 V, 实时时钟待机电流的消耗仅为 $1.1\mu\text{A}$, 而运行模式电流低至 $300\mu\text{A}$ (1MHz), 从休眠至正常工作整个唤醒过程仅需 $6\mu\text{s}$ 。

③Chipcon 公司的 CC2430、CC2510, 在单个芯片上整合了 Zigbee 射频前段、内存和微控制器(8051), 低成本和低功耗, 本文正是选用这种芯片, 在下面会详细分析介绍。

④Freescale 公司的 HCS08 系列的低电压、低功率微处理器, 一般配合 Freescale 公司的射频芯片。

⑤ARM 系列处理器功耗低, 处理速度快, 集成度也相当高, 地址空间非常大, 可以扩展大容量的存储器。使用 ARM 处理器的节点能量消耗比采用微控制器大很多, 多数支持 DVS(动态电压调节)或 DFS(动态频率调节)等节能策略, 但是其处理能力也强很多, 适合图像等高数据量业务的应用。在普通传感器节点中使用, 其价格、功耗以及外围电路的复杂度还不是十分理想。但是, 对于需要大量内存、外存以及高数据吞吐率和处理能力的汇聚节点, ARM 系列处理器是理想的选择。

(2) 无线通信

在现有的无线通信协议中, 根据无线传感器网络的特性, 适用的通信协议是支持 IEEE802.15.4 标准的 Zigbee^[53]协议技术。Zigbee 是一种近距离、低复杂度、低功耗、低数据速率、低成本的双向无线通信技术, 完整的协议栈只有 32KB, 可以嵌入各种设备中, 同时支持地理定位功能, 以上特点决定 Zigbee 技术非常适合应用在无线传感器网络中。目前市场上常见的支持 Zigbee 协议的芯片制造商有 Chipcon 公司和 Freescale 半导体公司, Figure8 公司还专门开发了 Zigbee 协议栈。Chipcon 公司的 CC2420 芯片应用较多, Toles 节点和 XYZ 节点都是采用该芯片, Chipcon 公司提供包含 Figure8 公司开发的 Zigbee 协议的完整开发套件。Freescale 半导体公司提供 Zigbee 的 2.4GHz 无线传输芯片有 MC13191、MC13192、MC13193, 该公司还提供配套的开发套件。

根据以上分析和文献^{[16][54,55]}, 现有的主要节点内部采用的处理器和无线通信芯片如表 3-1 所示。

表 3-1 典型节点的内部硬件结构比较

节点名称	处理器 / 公司	无线芯片 / 技术
WeC	AT90S8535 / ATMEL	TR1000 / RF
Renee	Atmega1163 / ATMEL	TR1000 / RF
Mica	Atmega1128 / ATMEL	TR1000 / RF
Mica2	Atmega1128 / ATMEL	CC1000 / RF
Mica2Dot	Atmega1128 / ATMEL	CC1000 / RF
Mica3	Atmega1128 / ATMEL	CC1020 / RF
Micaz	Atmega1128 / ATMEL	CC2420 / Zigbee
Toles	MSP430F149 / TI	CC2420 / Zigbee
XYZnode	ML67Q500x / OKI	CC2420 / Zigbee
Zabranet	MSP430F149 / TI	9Xstream / RF
Gainz	Atmega1128 / ATMEL	CC2420 / Zigbee

(3) 节点处理芯片 CC2431

CC2431^[56]是 TI 公司推出的带硬件定位引擎的片上系统(SOC)解决方案,具有 2.4GHz DSSS(直接序列扩频)射频收发器核心和高效的 8051 控制器,能够满足低功耗 Zigbee/IEEE 802.15.4 无线传感器网络的应用需要。

本文选用 CC2431 芯片作为节点硬件平台的核心部分,CC2431 芯片以强大的集成开发环境作为支持,内部线路的交互式调试遵从 IDE 的 IAR 工业标准,得到嵌入式机构很高的认可。它结合 Chipcon 公司全球先进的 Zigbee 协议栈、工具包和参考设计,展示了领先的 Zigbee 解决方案。其产品广泛应用于汽车、工控系统和无线感应网络等领域,同时也适用于 Zigbee 之外 2.4 GHz 频率的其他设备。

CC2431 工作时的功耗很低,因为它结合了集成模块的低功耗特点,并根据不同的功率要求定义了四种不同的负载功率模式,且不同模式之间的转换切换速度很快。在数字部分,时钟分块控制技术用来减少动态的功率消耗,如果模块处于非激活状态,可以用关断电源的方法来获得超低的静态功耗。

CC2431 的尺寸只有 $7 \times 7\text{mm}$ 48-pin 的封装,采用具有内嵌闪存的 $0.18\mu\text{m}$ CMOS 标准技术,可实现数字基带处理器,RF、模拟电路及系统存储器整合在同一个硅晶片上。

CC2431 最要的子系统是 MCU 子系统和射频部分,其中 MCU 包括存储器及外设。其他模块提供电源管理,时钟分配和测试等重要功能。

①MCU 和存储器子系统

针对协议栈,网络和应用软件的执行对 MCU 处理能力的要求,CC2431 包含一个增强型工业标准的 8 位 8051 微控制器内核,运行时钟 32MHz。由于更

快的执行时间和通过除去被浪费掉的总线状态的方式,使得使用标准 8051 指令集的 CC2431 增强型 8051 内核,具有 8 倍的标准 8051 内核的性能。

- CC2431 包含一个 DMA 控制器, 8k 字节静态 RAM, 其中的 4k 字节是超低功耗 SRAM。32k, 64k 或 128k 字节的片内 Flash 块提供在电路可编程非易失性存储器。
- CC2431 集成了 4 个振荡器用于系统时钟和定时操作: 一个 32MHz 晶体振荡器, 一个 16MHz RC 振荡器, 一个可选的 32.768kHz 晶体振荡器和一个可选的 32.768kHz RC 振荡器。
- CC2431 也集成了用于用户自定义应用的外设。一个 AES 协处理器被集成在 CC2431, 以支持 IEEE802.15.4 MAC 安全所需的 (128 位关键字) AES 的运行, 以实现尽可能少的占用微控制器。
- 中断控制器为总共 18 个中断源提供服务, 它们中的每个中断都被赋予 4 个中断优先级中的某一个。调试接口采用两线串行接口, 该接口被用于在电路调试和外部 Flash 编程。I/O 控制器的职责是 21 个一般 I/O 口的灵活分配和可靠控制。
- CC2431 包括四个定时器: 一个 16 位 MAC 定时器, 用于为 IEEE802.15.4 的 CSMA/CA 算法提供定时以及为 IEEE802.15.4 的 MAC 层提供定时。一个一般的 16 位和两个 8 位定时器, 支持典型的定时/计数功能, 例如, 输入捕捉、比较输出和 PWM 功能。
- CC2431 内集成的其他外设有: 实时时钟, 上电复位, 8 通道、8-14 位 ADC, 可编程看门狗, 两个可编程 USART, 用于主/从 SPI 或 UART 操作。

为了更好的处理网络和应用操作的带宽, CC2431 集成了大多数对定时要求严格的一系列 IEEE802.15.4 MAC 协议, 以减轻微控制器的负担。主要包括: 自动前导帧发生器、同步字插入/检测、CRC-16 校验、CCA、信号强度检测/数字 RSSI、连接品质指示 (LQI)、CSMA/CA 协处理器。

②射频及模拟收发器

CC2431 的射频和模拟部分实现了相关物理层的操作, 如图 3-2 所示。

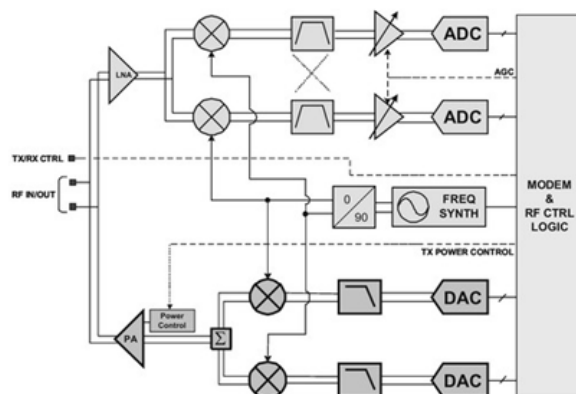


图 3-2 CC2431 的 RF 和模拟部分

CC2431 的接收器是基于低-中频结构之上的, 从天线接收的 RF 信号经低噪声放大器放大并经下变频变为 2MHz 的中频信号。中频信号经滤波、放大, 再通过 A/D 转换器变为数字信号, 经过自动增益控制, 信道过滤, 解调在数字域完成以获得高精度度及空间利用率。集成的模拟通道滤波器可以使工作在 2.4GHz ISM 波段的不同系统良好的共存。

③CC2431 的定位引擎

CC2431 无线定位引擎^[57]基于 RSSI(Received Signal Strength Indicator) 技术。RSSI 是指节点接收到的无线信号强度大小。在基于接收信号强度指示 RSSI 的定位中, 已知发射节点的发射信号强度, 接收节点根据接收到信号的强度计算出信号的传播损耗, 利用理论和经验模型将传输损耗转化为距离, 再利用已有的算法计算出节点的位置。定位系统由未知节点和信标节点组成, 信标节点是一个位于已知位置的静态节点, 这个节点知道自己的位置并可以将其位置通过发送数据包通知其他节点。未知节点从信标节点处接收数据包信号, 获得信标节点位置坐标及相应的 RSSI 值并将其送入定位引擎, 然后可以读出由定位引擎计算得到的自身位置。

3.2.2 节点的硬件平台结构

近年来, 煤矿事故发生连续不断, 由于煤炭生产主要在地下作业, 工作环境比较恶劣, 如工作区域狭窄、照明差、潮湿, 存在有害气体等很多不安全因素。在矿井环境监测中通常需要对矿井温度、湿度、粉尘、坑壁压力、各种气体浓度等参数进行检测。

本文设计一种用于测量井下温湿度的传感器节点, 传感器模块我们选用 SHT1x 系列温湿度一体传感器, 这种传感器体积只有火柴头大小, 且成本很小。核心部分采用 CC2431 芯片, 用电池给节点提供能量。节点的硬件平台架构如图 3-3 所示。

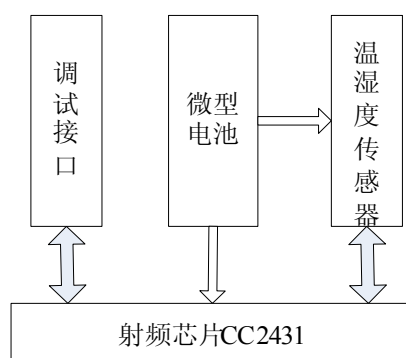


图 3-3 基于 CC2431 的节点硬件平台架构

传感器采用 SHT1x 系列温湿度一体传感器, 与 CC2431 的通信电路如图 3-4 所示。

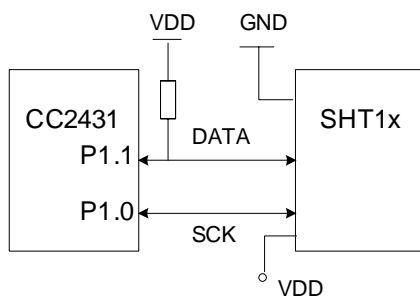


图 3-4 SHT1x 与 CC2431 连接电路图

SHT1x 采用两条串行线与 CC2431 进行数据通信，CC2431 的引脚 P1.0 用于 SCK，P1.1 用于 DATA。SCK 数据线负责处理器和 SHT1x 同步通信，DATA 三态门用于数据的读取。DATA 在 SCK 时钟下降沿之后改变状态，且仅在 SCK 时钟上升沿有效。数据传输期间，在 SCK 时钟高电平时 DATA 必须保持稳定。为避免信号冲突，CC2431 中的微处理器应驱动 DATA 在低电平，需要一个 10kΩ 的外部上拉电阻将信号提拉至高电平。

3.3 本章小结

无线传感器网络由大量的传感节点组成，不同的应用要求配套不同的网络模型、软件系统和硬件平台。根据无线传感器网络的特点，本章首先对传感器节点的设计要求进行了概括，分析了传感器节点的结构，主要分为处理器模块、通信模块、传感器模块和能量供应模块四部分。然后，根据不同阶段对传感器节点的三种实现：板级系统、芯片级系统和微电子机械系统进行了比较，分析了无线传感器网络中节点的应用限制。

本章在对传感器节点硬件设计的核心部分处理器及无线通信进行了芯片的选型比较后，提出了一种能够用于井下环境监测的，基于 CC2431 的节点设计方案。节点的硬件平台设计主要包括 CC2431 和传感器模块。

第四章 传感器节点的软件体系结构

4.1 基于 CC2431 的传感器节点的软件系统概述

无线传感器网络是一种分布式的自组织网络计算机系统,它由大量廉价的、能量有限的多功能微型传感器节点组成。由于 WSN 的特殊性,导致其对操作系统的需求相对于传统的操作系统有较大差异。因此,需要针对 WSN 的特点,研究和设计面向 WSN 的操作系统(WSNOS)^[58]和相关软件。

WSNOS 是为了提高软件的重用性、降低应用开发的难度,它应该由提供物理设备的抽象和高协调性的通用函数来实现。其独特性在于资源极端受限(处理器速度、存储器大小、内存大小、通讯带宽、资源数量以及电源容量等)、设备的特殊性和缺乏一致的抽象层次。因此,WSNOS 的设计目标是高效地使用传感器节点的有限资源,且能够对各种特定应用提供最大的支持。其设计策略应该是一个资源库,从中抽取一部分组成应用,在面向 WSN 的操作系统支持下,利用有限资源对整体系统进行高效率的事件处理、能源管理、命令处理和工作描述。

本文设计的无线传感网络节点的软件系统包括嵌入式操作系统、通信协议和驱动程序三个部分组成,可归纳为面向系统层和面向用户层两大部分,如图 4-1 所示。

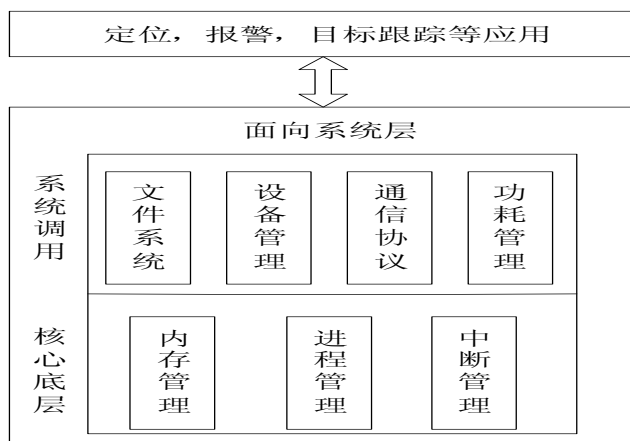


图 4-1 节点的软件系统结构

4.2 传感器节点的操作系统

传感器网络节点可以直接在硬件上实现应用程序。但是这种方式存在的问题是:首先,直接面对硬件进行编程,具有一定的难度,而且无法得到像传统操作系统那样提供的丰富服务;其次,软件重用性低,无法继承已有的软件成果,每次都要从头开始。因此,传感器节点上需要有独立的操作系统软件。

目前应用于无线传感器网络节点的操作系统主要有两种。一种是移植现有

的嵌入式操作系统，如 Linux，uCOS-II，uClinux 等。在移植这种操作系统时，必须根据节点的应用，对操作系统的内核进行相应的裁剪，使得这种嵌入式的操作系统实现起来相对简单，在有限的节点资源上能够正常运行。另一种操作系统，是专门设计用于无线传感器网络的操作系统。比如加州大学伯克利分校研究设计的 TinyOS 操作系统。这种操作系统有助于提高传感器网络的性能，发挥硬件的特点，降低节点功耗，而且简化了应用的开发。本文设计的无线传感器网络节点就是采用 TinyOS 操作系统。

4.2.1 TinyOS 操作系统

TinyOS^[31]是加州大学伯克利分校开发的开源微型操作系统，专为无线传感器网络设计，目前在无线传感器网络操作系统领域占据了主导地位。TinyOS 基于组件的架构使其能够快速实现各种应用。TinyOS 的组件库包括网络协议、分布式服务、传感器驱动以及数据获取工具等，一个完整的应用系统是由这些库组合起来的，不用的组件不会引入进来，从而达到减少内存需求的目的。TinyOS 采用了事件驱动模型，这样可以在很小的空间中处理高并发事件，并且能够达到节能的目的，因为 CPU 不需要主动去寻找感兴趣的事件。

目前 TinyOS 已经可以运行在很多硬件平台上，在 TinyOS 网站上公开原理图的硬件平台有 Telos(Rev A)，Telos(Rev B)，Mica2Dot，Mica2，Mica，此外，还有一些商业和非商业组织也有一些硬件平台可运行 TinyOS，主要有欧洲的 Eyes，MoteIV 提供的 TmoteSky，Crossbow 公司的 MicaZ 以及 Intel 公司的 Mote。

表 4-1 TinyOS 支持的部分硬件平台特性

硬件平台	MCU	RAM	FLASH	RF 芯片
Telos(Rev A)	MSP430 F149	2K	60K	CC2420
Telos(Rev B)	MSP430 F1611	10K	48K	CC2420
Mica2Dot	ATMEGA 128L	4K	128K	CC1000
Mica2	ATMEGA 128L	4K	128K	CC1000
Mica	ATMEGA 103	4K	128K	TR1000
MicaZ	ATMEGA 128L	4K	128K	CC2420
Eyes	MSP430 F149	2K	60K	TR1001
Tmote	MSP430 1611	10K	48K	CC2420

TinyOS^[59]操作系统所特有的一些技术，如轻量级线程(lightweight thread)技术、主动消息(active message)通信技术、事件驱动(event-driven)模式、组件化编程(component-based programming)等有助于提高传感器网络的性能，发挥节点硬件的特点，降低其功耗，并且能够简化应用的开发。

在传感器网络中，单个传感器节点的硬件资源有限，采用比一般线程更为简单的轻量级线程技术和两层调度(two-level scheduling)方式，可有效使用传感器节点的有限资源。这种模式下，一般的轻量级线程(task，即 TinyOS 中

的任务)按照 FIFO 方式进行调度,轻量级线程之间不允许抢占;而硬件处理线程(在 TinyOS 中,称为硬件处理器),即中断处理线程可以打断用户的轻量级线程和低优先级的中断处理线程,对硬件中断进行快速响应。当然,对于共享资源需要通过原子操作或同步原语进行访问保护。

在通信协议方面,由于无线传感器节点 CPU 和能量资源有限, TinyOS 的通信层采用的关键协议是主动消息通信协议。主动消息通信是一种基于事件驱动的高性能并行通信方式,在一个基于事件驱动的操作系统中,单个的执行上下文可以被不同的执行逻辑所共享。TinyOS 是一个基于事件驱动的嵌入式操作系统,所以 TinyOS 中的系统模块可快速响应基于主动消息协议的通信层传来的通信事件,有效地提高 CPU 的使用率。

除了提高 CPU 使用率的优点外,主动消息通信与二级调度策略的结合还有助于省电操作。节能操作的一个关键问题就是能够确定何时传感器节点进入省电状态,从而让整个系统进入某种省电模式(如休眠等状态)。TinyOS 的事件驱动机制迫使应用程序在做完通信工作后,隐式地声明工作完成。而且在 TinyOS 的调度下,所有与通信事件相关联的任务在事件产生时可以迅速进行处理。在处理完毕且没有其他事件的情况下, CPU 将进入睡眠状态,等待下一个事件激活 CPU。

4.2.2 TinyOS 调度机制

事件驱动的 TinyOS 采用两级调度^[60]:任务和硬件事件处理。任务是一些可以被抢占的函数,一旦被调度,任务运行完成彼此之间不能相互抢占。硬件事件处理被执行去响应硬件中断,可以抢占任务的运行或者其他硬件事件处理。TinyOS 的任务调度队列只是采用简单的先入先出算法。任务事件的调度过程如图 4-2 所示。TinyOS 的任务队列如果为空,则进入极低功耗的 Sleep 模式。当被事件触发后,在 TinyOS 中发出信号的事件关联的所有任务被迅速处理。当这个事件和所有任务被处理完成,未被使用的 CPU 循环被置于睡眠状态而不是积极寻找下一个活跃的事件。

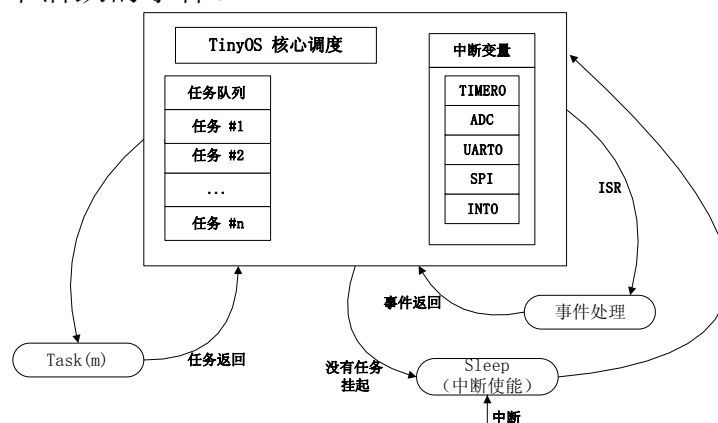


图 4-2 TinyOS 调度系统

为了减少中断服务程序的运行时间，降低中断响应延迟，中断服务程序的设计应尽可能精简，以此来缩短中断响应时间。TinyOS 把一些不需要在中断服务程序中立即执行的代码以函数的形式封装成任务，在中断服务程序中将任务函数地址放入任务队列，退出中断服务程序后由内核调度执行。内核使用一个循环队列来维护任务列表。默认情况下，任务列表大小为 8。图 4-3 是任务队列为空时的情形，图 4-4 表示有三个任务在队列中等待处理。内核根据任务进入队列的先后顺序依次调度执行。TOSH_run_next_task() 函数负责从队列中取出指针 TOSH_sched_full 所指的任务并执行。内核在一个无限循环中调用 TOSH_run_next_task()，当队列不为空时依次执行所有任务函数。

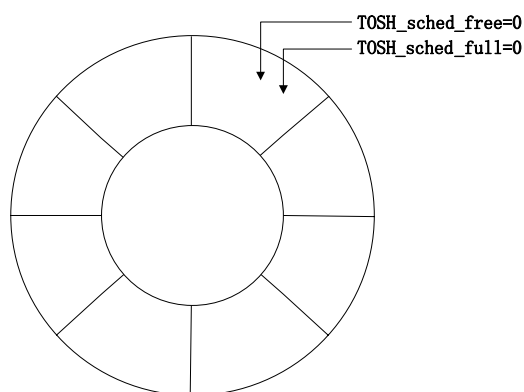


图 4-3 任务队列为空

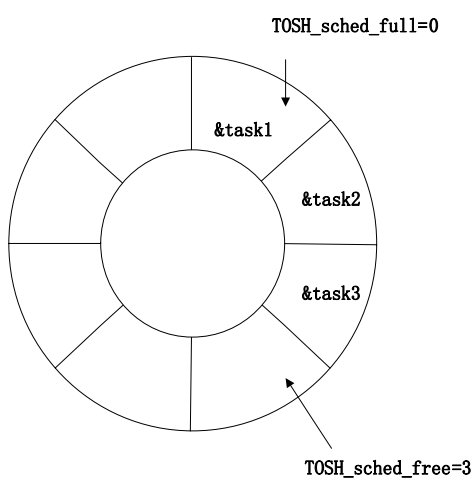


图 4-4 任务队列中任务数为三

由前所述，TinyOS 调度模型有以下特点^[61]：

- (1) 任务单线程运行到结束，只分配单个任务栈，这对内存受限的系统很有利。
- (2) 没有进程管理的概念，对任务按简单的先入先出队列进行调度。对资源采取预先分配，且目前这个队列里最多只能有 7 个待运行的任务。
- (3) 先入先出的任务调度策略是电源敏感的。当任务队列为空时，处理器休眠，随后由外部事件唤醒 CPU 进行任务调度。

(4) 两级的调度结构可以实现优先执行少量同事事件相关的处理，同时打断长时间运行的任务。

(5) 基于事件的调度策略，只需少量空间就可获得并发性，并允许独立的组件共享单个执行上下文。同事事件相关的任务集合可以很快被处理，不允许阻塞，具有高度并发性。

(6) 任务之间互相平等，没有优先级的概念。

4.2.3 TinyOS 的移植^[62]

TinyOS 目前有 1.x 和 2.0 两个主要分支，虽然 TinyOS 2.0 在设计上具有很多优点，但出于兼容性的考虑，选择了对 TinyOS 1.x 的移植^[63]。整个 TinyOS 开发系统主要由三部分组成：TinyOS 源代码树、nesC 编译器和目标机交叉编译器。nesC 是平台独立的编译器，它负责将 TinyOS 中定义的基本系统组件与用户自定义的组件组合成的应用程序编译成 C 语言形式的中间代码，然后调用相应的交叉编译器构造最终的目标机可执行的二进制代码。为了在传感器节点上移植 TinyOS，首先要了解 TinyOS 源代码结构，表 4-2 列出了 TinyOS 的主要目录。

表 4-2 TinyOS 源码目录

目录名	功能描述
apps	TinyOS 标准应用程序和测试程序目录
contrib	用户代码目录，包含各种基于 TinyOS 的开源项目
doc	文档和在线教程
tools	开发工具和程序
tos	TinyOS 核心部分和接口
tools/java	Java 程序和各类 GUI
tools/make	编译工具，可以添加新的编译选项设置
tools/matlab	TinyOS 与 Matlab 接口文件
tos/interfaces	TinyOS 定义的组件接口目录
tos/lib	各种系统库代码，包括 TinyDB、多跳组件等
tos/platform	各种节点的硬件驱动
tos/sensorboards	各种传感器板驱动
tos/system	TinyOS 系统组件和驱动，包括 EEPROM、UART 等
tos/types	TinyOS 数据结构定义，如 Active Messages

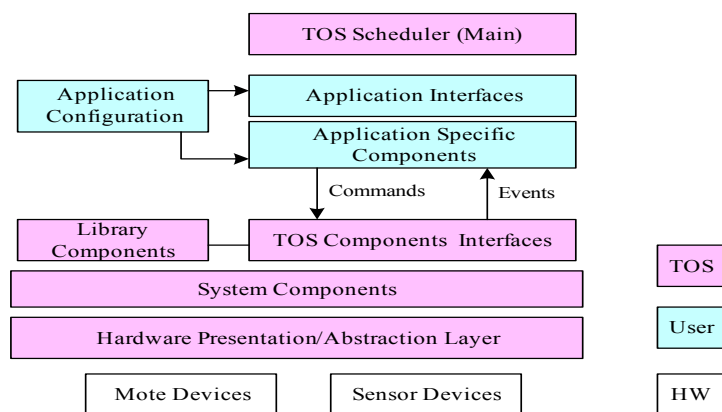


图 4-5 TinyOS 系统结构图

TinyOS 的系统结构如图 4-5 所示，节点硬件和系统组件通过一组事先定义好的硬件抽象层接口交互。硬件抽象层在系统中主要用来屏蔽硬件的特性，将上层组件和物理硬件进行隔离，便于系统移植。节点上 TinyOS 系统移植主要工作是为节点实现系统定义的硬件抽象接口。

TinyOS 中和硬件相关的源代码主要有两类：一类是 HPL*.nc 的文件，主要是节点各种物理器件或微控制器内部功能块抽象，如 RF 芯片、数模转换器和定时器等；另一类是与硬件平台相关的头文件 hardware.h 和 .platform，头文件定义了各类硬件操作的宏，.platform 文件则用来对平台进行配置。把 TinyOS 移植到一个新的平台上主要有以下几个步骤：

- (1) 在 tos/platform 下添加新平台目录，该目录用来存放硬件相关代码；
- (2) 编写 .platform 文件，在文件中指定交叉编译器类型，微控制器类型等；
- (3) 编写 hardware.h 文件，将微控制器的端口按照硬件的链接重新映射为新的宏；
- (4) 参考其它平台的硬件代码编写新的平台的节点代码，表 4-3 列出了通常需要实现的硬件表示层模块及其相应接口；
- (5) 在 tools/make 下为 make 系统添加新平台的编译选项。

表 4-3 TinyOS 移植要实现的硬件表示层模块及接口

模块	接口和命令
HPLClock	Clock / StdControl
VoltageM	ADC / StdControl
HPLPowerManagementM	PowerManagement / command result_t Enable() / command result_t Disable()
HPLInit	command result_t init()
HPLUARTC	HPLUART
HPLADCC	HPLADC
I2CC	I2C / StdControl

4.3 传感器节点的通信协议

无线通信协议的设计目的是为了使具体的无线传感器网络通信机制与上层应用分离，为传感器节点提供自组织的无线网络通信功能。

为了减少网络设计的复杂性，通讯协议采用分层设计，参考 OSI 标准模型构成，采用这种分层设计可以提高系统的灵活性，在保持各层协议之间接口不变的情况下，各层协议可以独立进行开发，并尝试不同的算法。由于无线传感器网络具有自组织的网络结构和突发型数据业务的特点，通信协议的设计重点是数据链路层媒体接入控制 (MAC) 算法和网络层路由算法的实现。

4.3.1 MAC 协议

MAC^[63] 层协议决定无线信道的使用方式，在传感器节点之间多点通信时协调分配有限的无线通信资源，MAC 协议构建起无线传感器网络的底层基础结构，对传感器网络的性能尤其是降低功耗有很大的影响。由于多个节点共享无线通信信道，且无线传感器网络通常采用多跳通信方式，因此 MAC 协议要解决隐藏终端和暴露终端问题，使用分布式控制机制实现信道资源共享。本文设计的节点 MAC 层采用 Zigbee 协议中的基于竞争的 MAC 协议。

Zigbee 协议中的 MAC 协议^[64]是在 802.11 MAC 协议基础上，针对传感器网络的节省能量需求而提出的传感器网络 MAC 协议。ZigbeeC 协议假设通常情况下传感器网络的数据传输量少，节点协作完成共同的任务，网络内部能够进行数据的处理和融合以减少数据通信量，网络能够容忍一定程度的通信延迟。

Zigbee 基于 RTS/CTS 调度，并返回无线消息来减少监听的开销。Zigbee 保持分段操作 (split-phase) 和无拷贝特性。所谓分段操作即：在 TinyOS 中由于任务之间不能互相占先执行，所以 TinyOS 没有提供任何阻塞操作。为了让一个耗时较长的操作尽快完成，一般来说都是将对这个操作的需求和这个操作的完成分开来实现，以便获得较高的执行效率。

针对碰撞重传、串音、空闲侦听和控制消息等可能造成传感器网络消耗更多能量的主要因素，Zigbee 协议采用以下机制：周期性侦听/睡眠的低占空比工作方式，控制节点尽可能处于睡眠状态来降低节点能量的消耗；邻居节点通过协商的一致性睡眠调度机制形成虚拟簇，减少节点的空闲侦听时间；通过流量自适应的侦听机制，减少消息在网络中的传输延迟；采用带内信令来减少重传和避免监听不必要的数据；通过采用串扰避免和消息传递机制，减少了串扰和控制数据包带来的能量损耗；采用消息分割和突发传递机制来减少控制消息的开销和消息的传递延迟。

4.3.2 路由协议

网络层是完成节点之间的路由建立、维护过程。路由协议负责将数据分组

从源节点通过网络转发到目的节点，它主要包括两个方面的功能：寻找源节点和目的节点间的优化路径，将数据分组沿着优化路径正确转发。在无线传感器网络中，节点能量有限且一般没有能量补充，因此路由协议需要高效利用能量，同时传感器网络节点数目往往很大，节点只能获取局部拓扑结构信息，路由协议要能在局部网络信息的基础上选择合适的路径。

本文设计的节点采用基于查询的定向扩散(DD, directed diffusion)路由^[65]机制。DD 算法是一种基于数据相关的路由算法，Sink 节点接受远程监控终端的查询指令(“兴趣”)，然后周期地通过洪泛的方式把兴趣数据包广播到覆盖所有传感器节点的监测区域。数据包在传播的过程中，DD 路由协议逐跳的在每个节点上建立反向的从数据源到 Sink 节点的数据传输梯度，梯度的建立根据成本最小化和能量自适应原则。最后，节点把采集到的数据沿着梯度反方向传送到 Sink 节点。当网络中的节点采集到相关的匹配数据后，向所有感兴趣的邻居节点转发这个数据，收到该数据的邻居节点，如果不是 Sink 节点，则采取同样的方法转发该数据。这样，Sink 节点会收到从不同路径上传送过来的相同数据，在收到这些数据后，Sink 节点选择一条最优的路径为强化路径，则后续的数据就沿着这条路径传输。

4.4 传感器节点的驱动程序

TinyOS 硬件驱动模块主要包括 ADC 模数转换、Timer 定时器、watchdog 看门狗、LED、UART 串口以及 cCI000 射频芯片等的驱动，下面对这些外设的硬件驱动设计分别进行介绍^[66]。

4.4.1 ADC

传感器节点系统程序提供对传感数据的采集，提供 RSSI(接收信号强度)的采集，对于 ADC 驱动设计实现主要包括以下几个接口：

(1) 硬件初始化接口，主要负责对 ADC 的控制寄存器进行设置，将 ADC 配置为预期的工作模式，在系统初始化时调用。采用两路单端输入通道，一路用于传感数据的模数转换，一路用于 RSSI(接收信号强度)的模数转换、选择 ADC 的参考电压、ADC 使能、ADC 中断使能、ADC 进入单次转换模式等。

(2) 采集数据接口，主要负责选择输入通道，并启动一次 AD 转换，供其他需要 AD 转换数据的模块调用。

(3) 中断服务程序，存储采集到的数据，并调用相应的模块接口函数来接收并处理数据，如传感数据、RSSI 等。

4.4.2 Timer

定时器主要负责产生定时中断，通过中断服务的调用来执行定时事件。定

时器的设计采用软定时器的方法，一个硬件上的定时器可以配置多个软件定时器，提高了硬件资源的利用率。定时器的驱动主要包括以下几个部分：

(1) 硬件初始化接口，将 MCU 的 Timer0 配置为每 1ms 产生一次定时中断，主要包括将 Timeor 设置为 CTC 模式，设置比较寄存器值，选择时钟源和预分频值、Timer0 使能、中断使能等。

(2) 软定时器设置接口，需要设置定时器的模块调用此接口函数，传入软定时器 ID 号和定时间隔，ID 号必须唯一，定时间隔为 1ms 的整数倍。考虑到应用较为简单，最多 Timer0 可使用四个软定时器。

(3) 中断服务程序。中断产生间隔为 1ms，每次中断都对各个已经设置的软定时器时钟变量进行累加并比较，当时钟值与该软定时器的定时间隔匹配时，调用相应模块的定时执行任务程序，并将时钟变量清零。

4.4.3 LED

本文所设计的传感器节点上有三个 LED，可用于辅助程序调试和指示节点状态。LED 用普通 I/O 口驱动，对于 LED 的驱动只需要给相应的 I/O 引脚置 1 或者清零就能实现。不过在初始化时需要设置这些 I/O 口的数据方向寄存器。

4.4.4 UART

UART 接口通过 MAX3232 专用芯片作 RS232/TTL 电平转换，然后跟 PC 机进行串口通信。对 UART 的驱动

为 PC 机与 GAINS 节点通信提供服务。UART 驱动主要包括以下几个部分：

(1) UART 硬件初始化，主要包括波特率设置、接收器与发送器使能、设置帧格式、数据位、停止位，中断使能等。

(2) UART 数据包发送接口，供需要往串口发送数据包的模块调用。此接口函数将数据包以中断的方式按字节写入发送寄存器并发送。

(3) UART 数据包接收接口，接收 PC 机通过串口发来的数据包，并将数据以任务的形式交给其他模块处理。

4.5 本章小结

本文设计的无线传感网络节点的软件系统包括嵌入式操作系统、通信协议和驱动程序三个部分组成。由于 WSN 的特殊性，导致其对操作系统的需求相对于传统的操作系统有较大差异。本章对美国加州大学伯克利分校开发的开源微型操作系统 Tiny OS 的特点和调度机制做了详细的叙述，将其作为本节点的嵌入式操作系统，并说明了其移植到硬件设计的过程。

此外，本章还叙述了节点所采用的通信协议和相关硬件驱动程序的编写。

第五章 无线传感器网络在井下环境监测系统中的应用

5.1 概述

近年来,煤矿事故发生连续不断,由于煤炭生产主要在地下作业,工作环境比较恶劣,如工作区域狭窄、照明差、潮湿,存在有害气体等很多不安全因素。在矿井环境监测中通常需要对矿井温度、湿度、粉尘、坑壁压力、各种气体浓度等参数进行检测。现有的监测系统需要在矿井内设置有线通信线路传递监测信息^[67]。但是,随着生产过程中矿井结构的不断变化,坑道空间变得狭窄,通信线路的延伸和维护实现起来就变得复杂,而且如果线路发生故障,整个监测系统就可能瘫痪。所以,改进井下的有线通信系统,分析设计无线通信网络系统对矿井内环境的监测,预防矿井事故的发生具有重大的意义。

煤矿井下是非自由空间,掘进巷道、采煤工作面以及采空区的环境条件对WSN提出了特殊的要求和挑战,现有的可应用于井下的无线通信平台标准,在应用对象、信道条件、实现目标上都与矿井无线监测的具体要求存在很大的差别,难以可靠、有效的满足矿井无线安全监测的需求。

矿井无线传感器网络拓扑结构变化频繁,随着开采的深入,新的传感器节点的加入和旧节点的移动或失效时有发生,因此要求网络具备很好的拓扑重建、路由更新的动态调整性能,即必须具备鲁棒性和可扩展性^[68]。常规无线传感器网络节点能量受限,路由协议设计必须优先考虑如何降低节点和网络的能耗,而井下无线传感器网络的网关节点可通过有线方式供电,传感器节点可由矿灯电池供电,并可以进行定期的维护、更新或更换电池,所以井下无线传感器网络不以追求能量高效为主,更加强调可靠性,健壮性。

煤矿安全监控数据具有突发性和区域相关性的特点,当有险情发生时局部安全参数会发生剧烈变化,需要对监测数据密集采样,必须研究节能高效的,实时信息路由技术,保证报警信息上传的及时性。目前提出的能量感知的路由协议,定向扩散和谣传等基于查询的路由协议,GEAR和GEM等基于地理位置的路由协议等是以一般的无线传感器网络作为研究对象的。由于传感器网络路由协议具有很强的应用相关性,这些路由协议都不能很好的适用于井下无线传感器网络监测的具体应用环境,必须设计与井下无线传感器网络监测的具体应用环境相适应的特定路由机制。

5.2 井下环境监测系统的构想方案

在传统的煤矿瓦斯监测系统中,由于监测系统的设施、装置等位置比较固定,因而使传感器探头不能随着采掘的进度跟进到位,从而使得监测系统往往形同虚设,而且井下联网有一定的难度,有关人员无法进行有效的监管,以致

事故无法预警。所以此设计思想是要让环境监测系统能够随着采掘的进度跟进到位，能够把井下信息实时、准确地传送到相关人员。

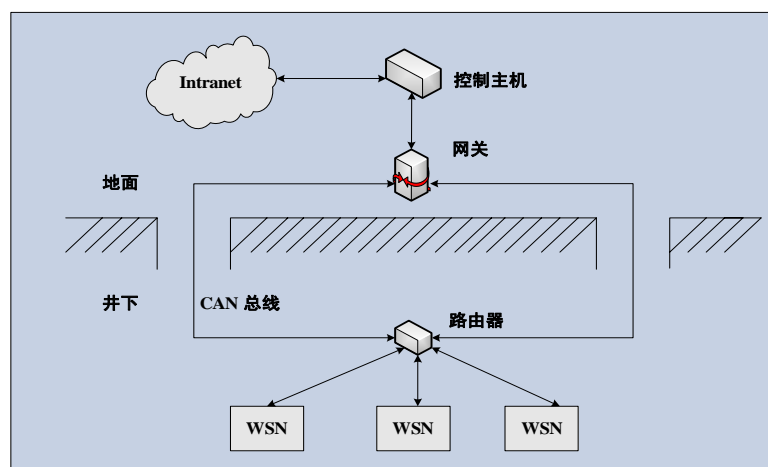


图 5-1 井下 WSN 监控系统结构

煤矿监视系统主要是监视各种传感器数据并且在异常情况发生时控制某些电气设备。如图 5-1，井下可以部署一个树型结构的网络来进行环境监控^[69]。无线传感器网络（WSN）将被部署在工作区域，例如：巷道、采掘面、工作面等等，并且它们将被连接到 CAN 总线上。每个 WSN 将由一些由煤矿工人所携带的移动节点和大量固定在工作区域墙壁上的固定节点组成。数据将由无线通讯的方式采集，经过汇集后由 CAN 总线负责传输给控制主机。

根据井下环境对 WSN 的要求，如图 5-2，我们在井下监测系统中采用两种硬件结构相同但功能不同的节点，主通信节点和备用节点。系统设计如下：首先，井下多为狭窄的巷道，而无线信号是以扇形向外辐射传输，如果节点全部摆放在巷道同侧会影响无线信号的有效传输，丢包率大幅增加，有效通信距离变短，影响正常通信。所以，本方案中，所有主通信节点在井下巷道中交替摆放。其次，为满足鲁棒性，所有主通信节点之间的中间位置放置备份节点，平时备份节点处于休眠状态，数据延固定路径传输，当出现故障时备用节点可以被快速激活自动组网恢复网络功能，保证数据的正常传输。为满足可扩展性，各采掘层节点编号由上往下递增，随着采掘进度，新布置的节点编号只要保证增加就可以。最后，为满足数据传输的及时性，当网络出现损坏节点时，能够快速恢复网络。为每个节点建立组网优先级表，如果出现节点损坏的情况，无法继续传输信息的节点广播激活和要求转发消息，收到响应消息后按优先级处理，重新组网。只需要几次广播就可以恢复数据正常传输。

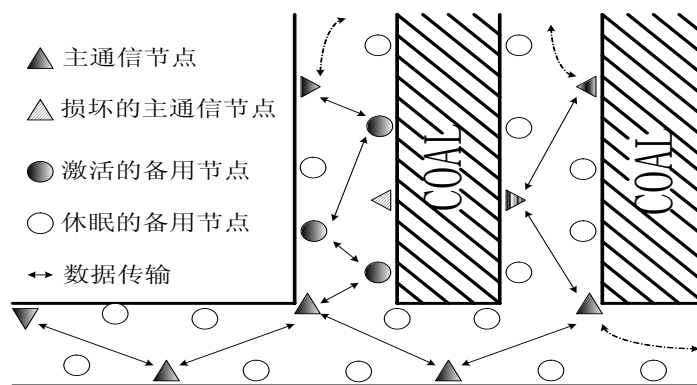


图 5-2 无线传感器网络在井下巷道中的布置

5.3 路由协议的设计

传统的 WSN 的数据获取路由协议大都采用层次路由^[70]。这样可以使得路由协议的实现相对简单，但是也会导致一些问题。层次路由一般适用于网络节点较少的环境，但是由于井下环境恶劣，需要部署大量的节点进行监视。如果采用层次路由，会给整个网络带来较大的开销和数据传输延时，无法满足监测数据突发性的要求。此外，随着开采的深入，矿井无线传感器网络拓扑结构变化频繁，新节点的加入和节点的移动或失效等情况时有发生，因此要求网络具备很好的拓扑重建、路由更新的动态调整性能，即必须具备鲁棒性和可扩展性。

因此，根据煤矿监控系统的需要，井下 WSN 监测系统的路由协议应该具备 4 个特点^[71]。

(1) 基于查询的路由协议

在诸如井下环境监测、煤矿安全评估等应用中，需要不断查询传感器节点采集的数据，汇聚节点发出任务查询命令，传感器节点向查询节点报告采集的数据。所以井下数据获取路由协议应该采用以数据为中心基于查询的路由协议。

(2) 支持地理位置信息查询

在采煤器械跟踪、各煤区现有煤量的计算等应用中，往往需要唤醒距离跟踪目标最近的传感器节点，以得到关于目标的更精确的位置等相关信息。此外，因为煤矿安全监控具有突发性的特点，网络必须知道突发事件所在的准确区域。在这类应用中，通常需要知道目的节点的精确地理位置。

(3) 数据传输的实时性和可靠性

井下无线传感器网络的某些应用对通信的服务质量有较高的要求，如可靠性和实时性等。传感器节点到汇聚节点的数据通道要保持一定的传输速率，确保实时性。

(4) 网络拓扑的鲁棒性

考虑到及时处理可能出现的突发事件，我们希望通过由工作人员携带的移动 Sink 节点来查询某区域的环境信息或报警信息。移动 sink 节点还应该能够自由的在网络中漫游，并且可以及时收到传感器节点发送的监测信息。此外，

随着采掘的深入，一些节点由于某些因素可能会失效，一些新节点可能需要加入网络。WSN 的网络拓扑可能会频繁变化。因此，路由协议必须要具有良好的鲁棒性。

值得注意的是，我们考虑采用矿灯来给节点供电^[72]，这样可以使得节点在相当长的时间内不会因为能量的原因失效。因此本文提出的协议不考虑能量消耗的因素。

5.3.1 基本信息表(BIT)的建立

为实现上述设计，我们为每个节点建立基本信息表(Z, S, C, N, PRI)，该信息表用来记录节点的一些基本信息，其中 Z 表示节点所在的采掘层；S 表示节点在墙壁的哪一面，如果某节点的 S 设为 0 则和它在同一面的节点 S 都设为 0 对面的节点 S 设为 1；C 是节点属性 C 为 0 时表示节点是主通信节点，C 为 1 时表示节点为备用节点；N 是节点的编号，每一掘进层的节点由上往下编号递增。

为了快速恢复路由，为节点建立组网优先级表 PRI。因为主通信节点和备用节点在重新组网时的地位不同，他们的组网优先表也就不一样，具体如下：

(1)主通信节点优先级表的设置

井下环境复杂，电磁干扰大，主通信节点间的通信可能因为一时的干扰断掉而不是真正的出现损坏节点。所以重新组网时依然把主通信节点的优先级设为最高。根据前面所述，我们尽量避免同一面的节点通信，为保证通信质量，对面备用节点优先级设为第二。同面备用节点优先级最低，我们可以看出在极端情况下虽然使用同面节点通信，但其距离却只有有效通信距离的 2/3，所以基本可以保证通信需求，而且，路由恢复时当只有同面备用节点符合选取要求时我们做了特殊处理，这将在后面具体介绍。

(2)备用通信节点优先级表的设置

备用通信节点依然设置对面主通信节点优先级最高。离该请求信息转发的备用节点最近的对面备用节点优先级比离它较远备用节点优先级高，判断距离可以根据编号，比如 3 号备用节点发送请求转发和激活信息时，4 号 5 号备用节点都能收到，因为 4 比 5 小所以其优先级比 5 号节点的优先级高。同面主通信节点优先级第四。和主通信节点一样，同面备用节点的优先级最低，我们也同样做了特殊处理。

基本信息表在冗余备份协议中十分重要，数据的正常传输，出现节点损坏时路由恢复，以及建立新路由后试图恢复主通信节点间的通信都要靠这张表里的数据实现。比如要求信息转发节点发送激活信息后，收到的响应信息就是响应节点的基本信息表，它通过响应节点的基本信息表判断对方是主通信节点还是备用通信节点，并和自己的基本信息表比较以确定是同面节点还是对面节点以及是否符合数据转发的方向，因为数据可以是向井上传递的反馈信息也可能

是向井下传递的查询信息。组网时要根据信息方向选取节点。可以说基本信息表就是冗余备份路由协议的灵魂。

5.3.2 路由恢复

井下环境复杂，各种电磁波干扰节点间正常通信，频发事故很容易破坏节点，但即使当矿难发生时，也要保证数据正常传输，所以无线传感器网络应用到井下时，良好的路由恢复功能至关重要，当特殊情况造成节点损坏时，能够迅速恢复通信，保证数据正常传输是第一要求。我们设计的网络中每个主通信节点和一对主通信节点间的备用节点，这三个节点只要保证有一个能正常工作就能保证网络的运转，也就是说在最好情况下网络 2/3 的节点损坏依然能够保证网络正常工作，而且出现损坏节点时能够快速恢复路由，既保证了网络的鲁帮性又能快速恢复路由，保证数据上传的及时性。

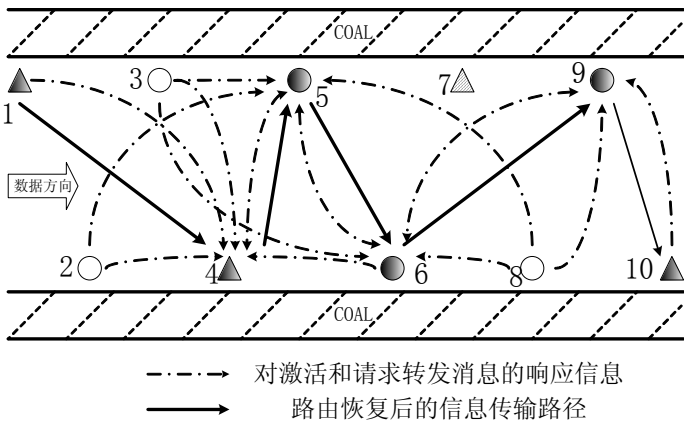


图 5-3 路由恢复

如图 5-3 所示，假设用户向井下发送查询信息，信息到达 4 号主通信节点后由于 7 号主通信节点损坏，无法与 7 号主通信节点建立连接。于是 4 号节点发送激活和请求转发消息，它可能收到 1 号主通信节点，2 号 3 号 5 号 6 号备用节点的响应信息(响应信息包含响应节点的基本信息表)。因为要转发的数据是向井下的查询信息，路由恢复时被选中的节点编号必须比 4 号节点大，所以 1 号主通信节点，2 号 3 号备用节点被排除，5 号和 6 号节点符合要求。4 号节点把 5 号 6 号节点的基本信息表和自己基本信息表比较。4 号节点的基本信息表是 (Z, 0, 0, 4, PRI) 5 号 6 号备用节点的基本信息表分别是 (Z, 1, 1, 5, PRI) (Z, 0, 1, 6, PRI)，可以知道 5 号节点是对面备用节点，6 号是同面备用节点，然后查询优先级表，选中 5 号节点作为转发节点，更改路由表后把查询信息转发给 5 号节点然后向控制中心传输 7 号节点出错信息。5 号节点继续组网选中 6 号节点，然后 6 号选中 9 号备用节点，9 号选中 10 号节点。这样网络就恢复了正常工作。

当路由恢复时只有同面备用节点符合选取要求时做特殊处理。如图 5-4 所示，假如 5 号和 7 号节点损坏。4 号节点广播激活和请求转发信息后只有 6 号

同面备用节点符合选取要求。此时如果直接和 6 号备用节点建立连接则违反了我们的同面节点尽量不通信的原则。所以 4 号节点不和 6 号备用节点建立连接而是和它上一个对面备用节点 3 号节点建立连接。3 号选择下跳节点时因为已经和 4 号建立连接，所以即使收到 4 号节点的响应信息也把 4 号节点排除，而选取 6 号节点。这样数据通过 3 号备用节点转发到 6 号备用节点从而恢复了路由。

当然如果极端情况下 3 号节点也损坏时则只有让 4 号节和 6 号备用节点建立连接。后面的模拟数据表明虽然 4 号和 6 号处在同面，但因为其距离只是有效通信距离的 2/3 所以丢包率是可以接受的。

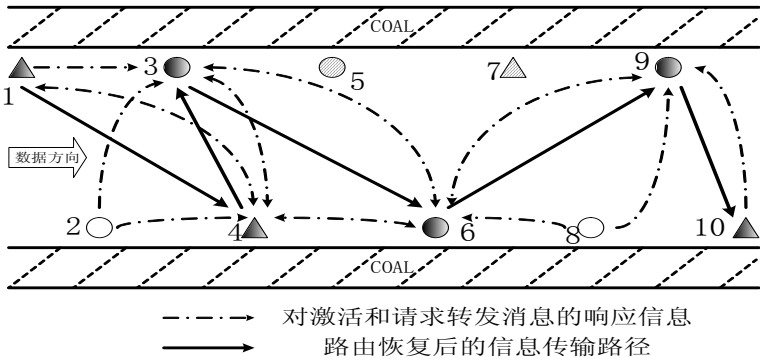


图 5-4 只有同面备用节点符合选取要求的路由恢复

5.4 井下无线传感器网络数据的采集

对于煤矿井下环境监测工作来说，一方面需要对监测区域进行全面的多种参数数据的采集，整体了解相应区域的环境情况；另一方面，当某项环境指标值达到比较危险的范围时，要求网络能够及时报警，预防安全事故发生。对于无线传感器网络监测系统，其整个网络的供电方式主要是采用电池供电，在考虑整个网络数据采集方式的时候，必须要考虑节能的原则，以保证网络长时间稳定运行。基于以上两点考虑为网络设计了周期巡检和中断两种数据采集模式。

周期巡检工作方式下协调器每隔一定的周期发送特定参数的收集命令，端节点在接收到该参数的收集命令后开始收集参数，然后将收集的参数发送到协调器；协调器在收集完参数后向整个网络广播睡眠命令，整个网络的端节点进入睡眠状态，以达到省电的目的。对于周期巡检的数据收集方式，主要解决网络同步、数据采集、数据融合等问题。

网络同步不是网络中的各个设备节点在物理时间上的绝对同步，而是保证网络在数据收集、休眠上保持相对的同步，避免出现信道冲突而导致数据无法发送以及出现整个网络部分设备永远处于休眠的情况。在无线传感器网络中主要采用 CSMA/CA 的冲突避免策略，采用该机制的设备，在每次发送数据帧或 MAC 层命令时，要等待一个任意长的周期，在这个任意的退避时间后，如果设备发

现信道空闲,就会发送数据帧和 MAC 层命令;反之,如果设备发现信道正忙,将等待任意长的周期后,再次尝试接入信道。CSMA/CA 的冲突避免策略在应用于周期巡检工作方式中,会出现设备长时间处于等待发送的状态。在周期巡检方式下,当协调器向整个网络发送数据收集命令后,在一个很短的时间内,所有簇(是由主路由器及其端设备子节点、以及具有和主路由器相同网络深度的辅助路由器这三部分组成)内的端设备都开始发送数据。这不仅会造成在同一簇内的端设备之间的冲突,对于一些相邻簇内的端节点也存在发生冲突的可能性,冲突将使一些端设备无法向协调器发送数据,影响整个周期巡检的数据收集。针对周期巡检的方式,设计了一种网络同步:是整个网络各级路由器之间的相对同步。这种网络同步并非是绝对在时钟上的同步,只是在数据收集和端节点睡眠上的相对同步,通过这种网络同步再结合无线传感器网络协议原有的 CSMA/CA 冲突避免策略,可以实现周期巡检数据可靠、稳定的收集。

第一级路由器在接收到协调器发来的数据收集命令后,立即向其簇所在的端节点设备转发数据收集命令;对于第二级路由器,在接收到协调器发送过来的数据收集命令之后,先延迟 100ms 后,再向其簇所在的端节点设备转发数据收集命令;第三级路由器在接收到协调器发送来的数据收集命令之后,先延迟 200ms 后,再向其簇所在的端节点设备转发数据收集命令;以此类推,对于第 N 级路由器,在接收到协调器发送来的数据收集命令之后,先延迟 $(N-1)*100\text{ms}$ 后,再向其簇所在的端节点设备转发该数据收集命令。对于任何一级的路由器, R_c 和 R_o 之间相隔 300ms,也就是说主路由器从发送数据收集命令到收集完整簇的数据后向协调器发送数据之间的间隔为 300ms。这样每一级路由器往协调器发送收集数据的时间都不同,靠近协调器的主路由器首先收集完数据,离协调器远的主路由器晚收集完数据,避免了路由器往协调器发送数据的过程中产生冲突的现象发生。整个网络数据收集的时延,也就是协调器从发送数据收集命令后,到收集到最后一级路由器发送来的数据所用的时间记为 T_c 。如果不考虑数据在传输阶段的时延,那么有 $T_c=(N-1)*100+300\text{ms}$,对于层次型网络,我们设计的其最大网络深度为 20,则 $T_c=2200\text{ms}$,也就是说整个网络在数据收集阶段其最大的时延在 2.2 秒,这完全是在可以接受的范围之内。

当协调器收到最后一级路由器发送来的数据之后,协调器开始向整个网络广播睡眠命令,任何一级的路由器在收到协调器发送的睡眠命令之后,立即向其簇所在的端设备转发睡眠命令,端节点设备在收到睡眠命令之后立即进入睡眠状态。这种睡眠机制,整个网络的端节点基本同步的进入睡眠状态,为下一个周期的数据收集做好同步基础。

数据融合是将多份数据或信息进行处理,组合出更有效、更符合用户需求的数据的过程。在传感器网络中数据融合起到非常重要的作用,主要表现在以下两个方面:

(1)节省能量,传感器网络是由大量的传感器节点覆盖到监测区域组成,其邻近节点之间信息采集存在一定的冗余度,数据融合就是针对上述情况对冗余数据进行网内处理,即中间节点在转发传感器数据之前,首先对数据进行综合,去掉冗余信息,将需要传输的数据量最小化,减少数据传输量就减少了能量消耗。

(2)提高数据收集效率,在网内数据融合,可以在一定程度上提高网络收集数据的整体效率。数据融合减少了需要传输的数据量,可以减轻网络的拥塞,降低数据的传输时延。

数据融合可以在传感器网络协议中多个层次之间实现,既可以在 MAC 协议中实现,也可以在路由协议或应用层协议中实现。煤矿井下多参数无线传感器网络由于采用了层次型网络的拓扑结构,所以对其实现数据融合,考虑在应用层上进行。数据融合主要分为两步来完成:一是端节点在收集完数据后,对收集的多参数数据进行数据融合后,再往路由器上传送;二是路由器在收到端节点的数据后,对整簇的数据进行融合后,再将数据传送到协调器。

端设备节点集成了多种传感器,可以实现对多种参数的采集,多中参数的数据要在端节点进行融合之后再传送到路由器。

端节点地址大小为一个字节,是端节点的低字节的网络地址,由于同一簇内端节点的地址在高位字节上是一样的,主要的差别是在低位字节上,所以只需要一个字节便可标识端节点;参数类型,是指所收集的参数的类型,数据是所收集参数的值,用两个字节来表示。

端节点收集完数据之后将数据传送到该簇的路由器节点,路由器节点在接收到端节点发送来的数据后,要进行处理,处理之后再传送到协调器。

我们使用一个字节来表示路由器的地址,数据在端节点和路由器进行处理之后发往协调器,协调器可以清楚的知道某一级路由器下的某个端节点所收集的参数及其数据值,这为协调器向外部网络提供信息提供了保证。

5.5 实验数据与分析

CC2431 的设计传输速率是 250kbps,但实际的传输速率要低于标称值。原因包括(1)按照 MAC 层数据传输算法 CSMA/CA 的要求,每次传输前都需要随机的延迟一段时间。(2)协议中为采用确认帧传输,要求完成一次传输后,再下一次开始执行 CSMA/CA 算法之前,保留至少 12 个 symbol time(在 2.4G 频段下,一个 symbol time 为 16us)用于确认帧的发送。(3)在传输中为了接收同步,需要加入前导码和帧开始分隔码(定界符),标准值为 5 个字节。(4)发送方的数模转换和 CRC 冗余码插入和接收方的模数转换以及 CRC 校验等都需要一定的时间。实际应用中需要对其进行测试。

测试条件为，实验室环境，采用点对点数据传送，节点距离 1m，延时时间计算:确认帧传输方式、非标准 CSMA/CA 算法。因为这样的延时时间单位为 symbol time，延时时间过长，在干净的信道环境下不需要这样长时间的延时。使用后反而导致传输速率大大下降，实际的延迟时间的设置为延时系统中维持的时钟(用来检查各种操作是否超时)的高字节的系统周期(若值为 0，取低字节)。这样最多延时 11.6us。

测试的数据分 4 组，每组数据发送节点定时发送数据帧，帧长从 12 字节到 127 字节变化。从试验数据来看，发送速度越快，丢帧率越高，帧越长，丢帧率也越高。无差错的稳定传输最大速度分别为 149kbps、190 kbps、202 kbps、207 kbps。在不同的发送速率下，能稳定传输的帧长分别为 22 字节、52 字节、87 字节和 117 字节。

测试数据如图 5-5 所示。

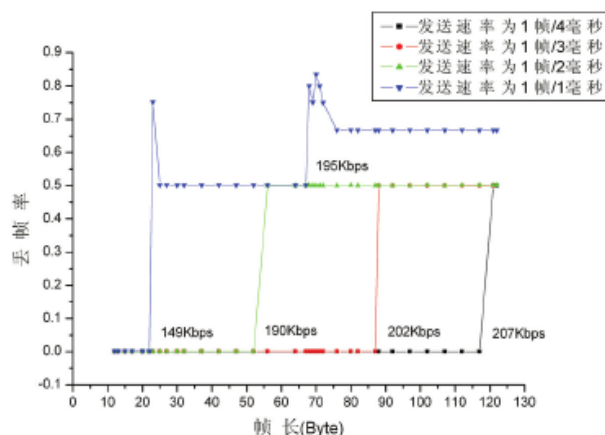


图 5-5 无线传输数据测试

从试验的结果来看，实际应用中数据包的长度不宜太长，也不宜过短。发送速率不宜太高，否则发送失败导致重传会降低传输速率和加大信道繁忙程度。

无线传感器网络每个节点的无线覆盖区域比 GPRS，GSM 等无线网络要小很多，但无线传感器网络设计的目标就是通过区域内大量节点的分布来完成覆盖。而且在实际的应用可能无法及时的补给能源。所以需要尽可能的降低每个节点的能耗。带外接天线的 CC2431 的标称传输距离为 50~70m。试验中使用的 PCB 天线，传输效果没有外接天线那么好。下面给出几组试验数据，一组为室内环境，一组为户外空旷环境，一组为户外有障碍条件下。发射功率为 0dBm，传输速率在 80kbps(帧长为 50 字节，5ms 发送一帧)。

室内条件下 15 米范围内，10 次试验丢帧率为零，20~30m 范围内丢帧率不稳定。室外有障碍条件下，20m 范围 10 次试验丢包率为零，20~50m 之间会因为障碍和天线方向的原因，丢帧率不稳定。

室外无障碍条件下，30m 范围 10 次试验丢包率为零，30~50m 之间会因为天线方向的原因，丢帧率不稳定。节点采用的倒 F 型天线没有外接天线效果好，没有达到标称的 50~70m 通信距离。

为了验证本文提出的冗余路由协议，我们利用前文中设计的无线传感器网络节点进行了实验。数据从传感器节点到控制终端的时间延迟和丢包率的结果如图 5-6 和 5-7 所示。图 5-6 中“+”表示数据包传输的时间延迟，图中峰值是由各种路由恢复造成的。较高的峰值是极端情况下路由恢复的时延。而较低的峰值是一般情况下路由恢复的时延。可以看出即使在极端情况下数据包通过路由恢复后的路由传输上来的时延都不会超过 220ms。所以传感器节点探测到的数据可以及时的传输到控制中心。

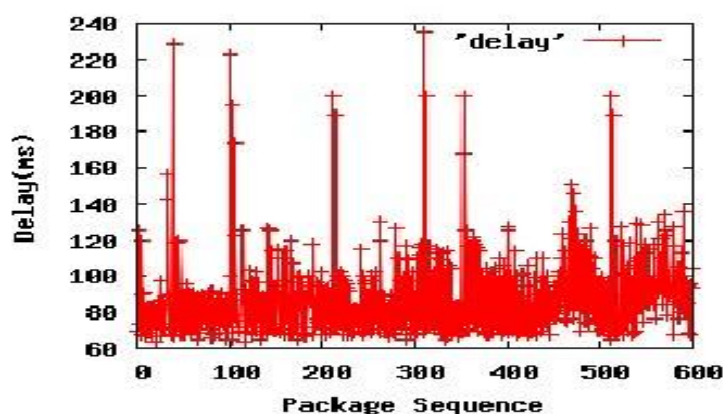


图 5-6 时间延迟结果

图 5-7 中的“+”表示没有路由恢复的丢包率。“x”表示一般情况下路由恢复后的丢包率。“*”则是网络经过极端情况下的路由恢复后的丢包率，可见极端情况下的处理方式使得数据传输的丢包率控制在可以接受的 15%左右。

通过实验结果，我们可以得到如下结论：该无线传感器网络可以传输大部分的数据，但一些数据因为电磁干扰，能量和传输距离等原因不能成功的被传输到控制中心。所以仍然需要对算法进行改进以保证数据正常传输。

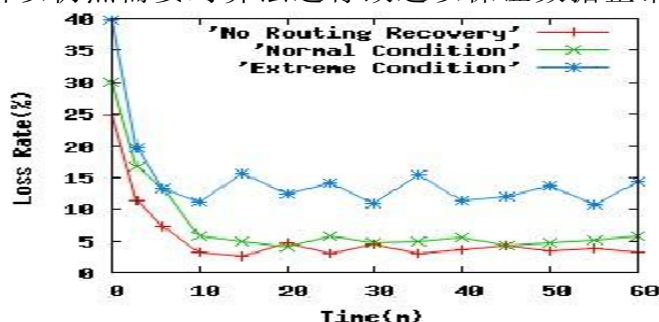


图 5-7 丢包率的结果

5.6 本章小结

在矿井环境监测中通常需要对矿井温度、湿度、粉尘、坑壁压力、各种气体浓度等参数进行检测。煤矿井下是非自由空间，掘进巷道、采煤工作面以及采空区的环境条件对 WSN 提出了特殊的要求和挑战，现有的可应用于井下的无线通信平台标准，在应用对象、信道条件、实现目标上都与矿井无线监测的具

体要求存在很大的差别，难以可靠、有效的满足矿井无线安全监测的需求。

本章首先对井下无线传感器网络环境监测系统的设计要求进行了分析，提出了一套可用于井下无线监测的无线传感器网络环境监测系统结构方案。在此方案的基础上，针对井下无线传感器网络的特点，对无线传感器网络井下数据传输路由进行了分析。在分析的基础上，提出了一种可靠数据传输路由。

第六章 结论与展望

6.1 工作总结

无线传感器网络，作为一种全新的信息获取和处理技术能够广泛地应用于多个领域，近年来成为国内外传感器技术领域的热点研究课题。它是在特定的背景下以一定的网络模型规划的一组传感器节点的集合，传感器节点是为传感器网络特别设计的微型计算机系统，在整个网络体系中处于重要的地位。

在日常工作生活中，我们需要对环境中温度、湿度、粉尘等各种参数进行监测。此为，在一些特定的环境中，如：井下，通常需要对矿井温度、湿度、坑壁压力、各种气体浓度等参数进行检测。

本文的工作就是在对现有无线传感器网络节点进行充分总结分析的基础上，进行面向环境监测无线传感器网络节点设计的研究，主要工作总结如下：

(1) 以设计无线传感器网络节点为目的，对无线传感器网络的起源和发展、研究现状，以及相关关键技术进行了深入的了解，从无线传感器网络节点的研究现状出发，探讨了无线传感器网络节点研制的基本原则和思想。

(2) 针对无线传感器网络的特点，论文对课题所涉及到节点结构、操作系统、网络协议等相关技术做了详细的分析。论文介绍了目前主流无线传感器网络节点硬件平台的系统结构设计；针对无线传感器网络的特点介绍了几种主流无线传感器网络操作系统技术，分析了 TinyOS 操作系统的结构、模型及接口等相关技术，着重介绍了 TinyOS 操作系统的执行模式、组件模型以及 TinyOS 操作系统的编程语言 NesC。

(3) 对无线传感器网络节点的结构进行了分析，包括硬件平台和软件系统。针对无线传感器网络节点低功耗、灵活性、稳定性的特点，本文提出了一种基于 CC2431 芯片，能够用于环境监测的节点设计方案。节点的硬件平台设计主要包括处理器模块、无线通信模块、传感器模块和能量供应模块。软件平台主要是 TinyOS 操作系统，并对 TinyOS 的移植进行了分析。此为在 TinyOS 操作系统上编写了传感器节点的驱动程序和无线传感器网络的无线通信协议。

(4) 对无线传感器网络用于井下环境监测系统的设计要求进行了分析，提出了一套可用于井下无线监测的无线传感器网络环境监测系统结构方案。在此方案的基础上，针对井下无线传感器网络的特点，对无线传感器网络井下数据传输路由进行了分析。在分析的基础上，提出了一种可靠数据传输路由。

6.2 展望

本文的研究还存在很多不够完善的地方，进一步的工作可以从以下几个方面展开：

(1) 由于无线传感器网络节点由电池供电，电池的容量一般不是很大。其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，这个节点也就失去了作用（死亡）。因此在未来的节点设计过程中，硬件设计和相应的软件系统和通信协议的设计要进一步提高其能量有效性。

(2) 节点由于受价格、体积和功耗的限制，其计算能力、程序空间和内存空间比普通的计算机功能要弱很多。因此在未来的节点设计中，应该尽量简化节点的硬件和软件的设计层次。

参考文献

- [1] 陈利虎. 无线传感器网络实验平台的研究[M]. 湖南: 国防科技大学出版社, 2004.
- [2] 石军锋, 钟先信, 陈帅, 邵小良. 无线传感器网络结构及特点分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版). 2005, 28(2):16-19.
- [3] 李凤保, 李凌. 无线传感器网络技术综述[J]. 仪器仪表学报. 2005, 26(8):559-561.
- [4] 何宁, 王漫, 方昀, 刘赐平, 裴俊. 面向无线传感器网络应用的传感器技术综述[J]. 计算机应用与软件.
- [5] 纪阳, 张平. 无线传感器网络的体系结构[J]. 中兴通讯技术. 2005. 11(4):32-35.
- [6] 孙亭, 杨永田, 李立宏. 无线传感器网络技术发展现状. 电子技术应用[J]. 2006, 6:1-6.
- [7] 刘敏钰, 吴泳, 伍卫国. 无线传感网络(WSN)研究[J]. 微电子学与计算机. 2005, 22(7):58-61.
- [8] 李凤保, 李凌. 无线传感器网络技术综述[J]. 仪器仪表学报. 2005, 26(8):559-561.
- [9] 李晓维. 无线传感器网络技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
- [10] Asada G, Dong M, Lin T S, Newberg F, Pottie G, Kaiser W J, Marcy H O. Wireless Integrated Network Sensors: Low Power Systems on a Chip[C]. In: Proc. of the 1998 European Solid State Circuits Conference, 1998.
- [11] Kahn J M, Katz R H, Pister K S J. Mobile Networking for Smart Dust [C]. ACM/IEEE Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCon 99), Seattle, WA, 1999.
- [12] Joseph Polastre, Robert Szewczyk, Cory Sharp, David Culler. The mote revolution: Low power wireless sensor network [C]. In: proc. of the 16th symposium on high performance chips (HotChips), 2004.
- [13] Kaiser W J. Low Power Wireless Integrated Microsensors[EB/OL]. [http:// www.janet.ucla.edu / WINS / lwim-innovative.htm](http://www.janet.ucla.edu/WINS/lwim-innovative.htm).
- [14] Bult K, Burstein A, Chang D, Dong M, Kaiser W J. Wireless Integrated Microsensors [C]. Proceedings of Conference on Sensors and Systems (Sensors Expo). Anaheim, CA, USA, 1996: 33-38.
- [15] Wang, Chandrakasan A P. Energy-efficient DSPs for wireless sensor

- networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(4): 68-78.
- [16] Kristof Van Laerhoven, et al. Medical Healthcare Monitoring with Wearable and Implantable Sensors [C]. In: Proceeding of the UbiComp, 2004.
- [17] PASTA[EB/OL]. <http://pasta.east.isi.edu/>.
- [18] Ember Company[EB/OL]. <http://www.ember.com>.
- [19] Jan Beutel. Btnodes: A Distributed Environment for Prototyping Ad Hoc Networks. <http://www.btnode.ethz.com>.
- [20] Brendan O'Flynn, Andre Barroso, Stephen Bellis, et al. The development of a Novel Miniaturized Modular Platform for Wireless Sensor Networks [C]. In: Proceeding of the IPSN Track on Sensor Platform, Tools and Design Methods for Networked Embedded Systems (IPSN2005/SPOTS2005), Los Angeles, USA, 2005.
- [21] GAINS[EB/OL]. <http://www.wsn.org.cn>.
- [22] 陈涛, 刘景泰, 郝志刚. 无线传感网络研究与运用综述[J]. 总线与网络. 2005, 7: 41-46.
- [23] 孙利民. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [24] 盛超华, 陈章龙. 无线传感器网络及应用[J]. 微型电脑应用. 2005, 21(6): 11-14.
- [25] 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.
- [26] 肖健, 吕爱琴, 陈吉忠, 朱明华. 无线传感器网络技术中的关键性问题[J]. 传感器世界. 2004, 7: 14-18.
- [27] Lei S, Jin W, Hui X. Connecting Sensor Networks with TCP/IP Network[A]. Proceedings of International Workshop on Sensor Networks (IWSN, 06), Harbin, China: 2006, 451 — 454
- [28] 乐燕芬 李淑秋. 多传感器网络分布式数据接口卡的设计[J]. 仪表技术与传感器. 2003(3): 35 — 37.
- [29] 武强. 选择嵌入式实时操作系统应注意的几个问题[J]. 航空计算技术, 2002, 32(3): 90 — 92
- [30] 夏俐陈曦赵千川. 无线传感器网络及应用简介[J]. 通信学报, 2004, 25(1): 34 — 37
- [31] Structure of TinyOS System, <http://www.tinyos.net>, 2003.
- [32] Jason Lester Hill. System Architecture for Wireless Sensor Networks[D]. California: University of California, Berkeley, 2003.
- [33] 减丽娜, 许明, 赵晶. 无线传感器网络的研究与应用[J]. 商场现代化, 2006, (480): 52-53.

- [34]于宏毅.无线传感器网技术发展研究报告[R].郑州:解放军信息工程大学, 2005.
- [35]Ivan Stojmenovic.Handbook of Sensor Networks [M] .New Jersey:Wiley-Interscience, 2005:173-187.
- [36]李晶,王福豹,段渭军等.无线传感器网络节点操作系统研究[J].计算机应用研究, 2006, 23(8):28-30.
- [37] B.Warneke, M.Last, B.Leibowitz, et al.Smart Dust:Communicating with a Cubic-millimeter Computer[J]. IEEE Computer, 2001, 32(1):43 — 51.
- [38]David Gay , Philip Levis , David Culler , et al.NesC 1.1 Language Reference Manual[EB/OL]. :TinyOS 官方网站, 2005-03-30.
- [39]Soo-Hwan Choi,Byung-Kug Kim,Jinwoo Park,Chul-Hee Kang,Doo-Seop Eom. An Implementation of Wireless Sensor Network for Security System using Bluetooth. IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol.50, No.1, FEBRUARY 2004: 236~238
- [40]IEEE Std. 802.11b, Supplement to Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band, IEEE Std.802.11b-1999, 1999
- [41]LUCIAN STOICA, ALBERTO RABBACHIN, ZACK SHELBY, AND JUSSI HAAPOLA. UWB Wireless Sensor Networks: UWEN-A Practical Example IAN OPPERMANN, UNIVERSITY OF OULU CENTER FOR WIRELESS COMMUNICATIONS IEEE Radio Communications, December 2004
- [42]Joseph Polastre, Robert Szewczyk, and David Culler. Telos: Enabling Ultra-Low Power Wireless Research[J]. Computer Science Department University of California, Berkeley. 2005 IEEE:366~367
- [43]The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. IEEE Std 802.15.4-2003: 13~17
- [44]彭瑜.低功耗、低成本、高可靠性、低复杂度的无线电通信协议—zigbee. 自动化仪表, 2005, 5(26):1 — 4.
- [45]崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 李天璞, 刘巍, 赵泽.无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163-174.
- [46]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.
- [47]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.
- [48]吴键.智能无线传感网络节点的设计和实现[D].南京航空航天大学, 2006.
- [49]ATMEL. ATmega128L. Datasheet. <http://www.atmel.com>.

- [50]ZigBee Specification Versio1.0, December 14th, 2004, Sponsored by: ZigBee Alliance, June 27, 2005.
- [51]Patirck Kinney. ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Work[EB/OL]. [http:// www. zigbee. org/err/resources](http://www.zigbee.org/err/resources).
- [52]唐金腾.无线传感器网络智能节点的研究与实现[D].黑龙江：哈尔滨工业大学硕士学位论文，2005.
- [53]李文仲 段朝玉等. ZigBee 无线网络技术入门与实践[M] 北京：北京航空航天大学出版社 2007.4
- [54]姜连祥，汪小燕.无线传感器网络硬件设计综述. <http://www.mesnet.com.cn>.
- [55]中科院计算所 WSN 产品 Gains 白皮书 v0.3.pdf [EB/OL]. <http://www.wsn.org.cn>.
- [56]System-on-Chip for 2.4 GHz ZigBee/IEEE 802.15.4 with Location Engine [EB/OL]. [http:// www. ti.com](http://www.ti.com).
- [57]CC2431 Location Engine [EB/OL]. <http://www.lierda.com>.
- [58]王万里,郑扣根,姚翔,吴朝晖.无线网络传感器及其微型操作系统的研究[J]. 计算机应用研究.2005,9:39-42.
- [59]周贤娟,韩树人,鄢化彪,刘生华.无线传感器网络节点操作系统-TinyOS 综述 [J].矿山机械.2007,35(9):112-115.
- [60]尹震宇,赵海,林恺,刘楠,徐久强.无线传感器网络操作系统调度策略[J].计算机工程.2007,33(17):77-80.
- [61]王晓东,戴华平,孙优贤.无线传感器网络混合任务的系统级低功耗实时调度算法研究[J].传感技术学报. 2007,20(11):2487-2483.
- [62]刘华,杨志家.基于 ARM 核处理器的 TinyOS 实现.信息与控制 [J].2006,35(2):275-279.
- [63] IEEE Standards 802.15.4, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3 Park Avenue. New York. NY 10016-5997. USA. 2003.
- [64]Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C]. In: Proc 21st Int'l Annual Joint Conf IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM2002), New York, NY, 2002.
- [65]Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks[C]. In: Proc 6th Annual Int'l Conf on Mobile Computing and Networks (MobiCOM 2000), Boston, MA, 2000.

- [66]马峻岩.传感器网络节点设计与系统状态监测组件研究[D].陕西：西北工业大学硕士学位论文，2007.
- [67]N.Xu, S.Rangwala, K.K.Chintalapudi, D.ganesan, A.Broad, etal., “a Wireless Sensor Network for Structural Monitoring[C]”. in Proceedings of ACM SenSys, 2004
- [68]X.D.Wang, X.G.Zhao, Z.Liang,et al, “ploying a Wireless Sensor Network on the Coal Mines[C] ”. In Proceeding of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control,2007.
- [69]B.Meng, Z.xiaoguang, Z.G.Hou and T.Min, “A Wireless Sensor Network Used in Coal Mines[C]”. in proceedings of IEEE Networking, Sensing and Control, London, UK, April. 2007.
- [70]王玉芬，张治斌，李长江． 无线传感器网络在煤矿瓦斯监测系统中的应用[J]． 煤炭科学技术， 2007， 26(1).
- [71]金 纯,齐岩松,罗祖秋,等. ZigBee在矿井安全领域的应用[J].煤矿安全, 2006 (2).
- [72]钱春丽,张兴敢． 用于矿井环境监测的无线传感器网络[J].电子技术应用, 2006 (9).

攻读硕士学位期间发表的论文

1. 面向环境监测的无线传感器网络节点的分析与设计. 宿州学院学报, 2009 年 8 月



合肥工业大学硕士学位论文