

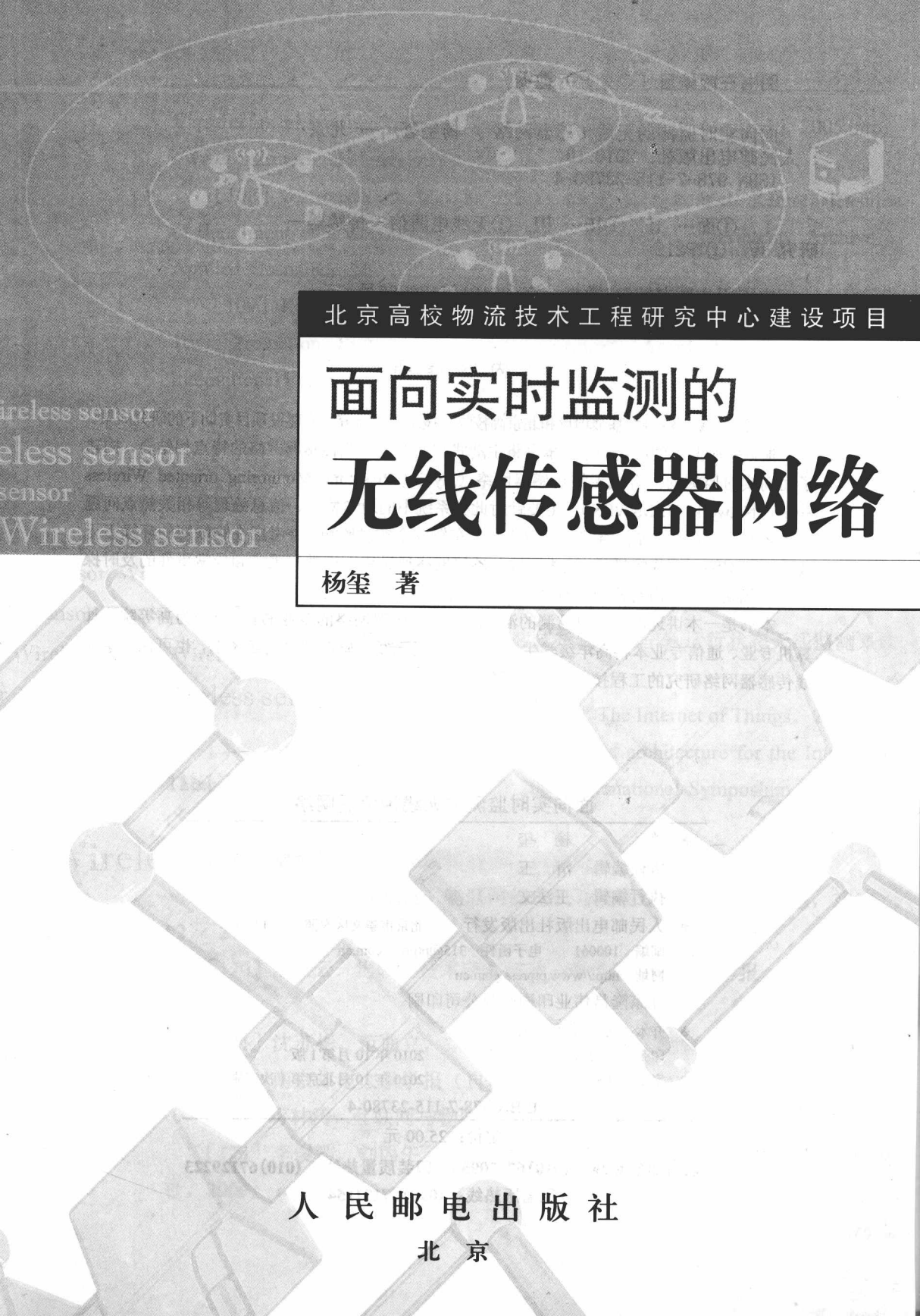
北京高校物流技术工程研究中心建设项目

面向实时监测的 无线传感器网络

杨玺 著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



北京高校物流技术工程研究中心建设项目

面向实时监测的 无线传感器网络

杨玺 著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

面向实时监测的无线传感器网络 / 杨玺著. — 北京:
人民邮电出版社, 2010.10
ISBN 978-7-115-23780-4

I. ①面… II. ①杨… III. ①无线电通信—传感器—
研究 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第173385号

内 容 提 要

本书是国家自然科学基金项目和北京高校物流技术工程研究中心建设项目资助下的研究成果。根据实时监测的应用需求,本书将主动式和反应式无线传感器网络的特点相结合,构建了面向实时监测的混合式无线传感器网络(Hybrid Real-time Monitoring oriented Wireless Sensor Network, HRM-WSN)。主要针对此类系统中的通信协议、信息处理等相关热点问题进行研究,研究探讨如何将其用于货物列车车辆安全实时监测,并考虑在物联网的环境下无线传感器网络所面临的挑战。这类无线传感器网络通过周期性数据采集和异常事件的及时探测,实现观测区域内对象的实时监测。

本书是一本讲述面向实时监测的混合式无线传感器网络的专业书籍,可作为高等院校计算机专业、通信专业本科高年级学生或研究生学习无线传感器网络的参考书,也可供从事无线传感器网络研究的工程技术人员参考使用。

面向实时监测的无线传感器网络

- ◆ 著 杨 玺
责任编辑 滑 玉
执行编辑 王法文
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 700×1000 1/16
印张: 11.25 2010年10月第1版
字数: 165千字 2010年10月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-23780-4

定价: 25.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

前言

随着通信技术、嵌入式计算技术和传感器技术的飞速发展和日益成熟,具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器开始在世界范围内出现。由这些微型传感器构成的无线传感器网络引起了人们的极大关注。无线传感器网络综合了传感器技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术和通信技术,能够协作实时监测、感知、采集网络分布区域内的各种环境或监测对象的信息,并对这些信息进行处理,获得详尽、准确的信息,传送到需要这些信息的用户。

随着物联网概念的提出,无线传感器网络作为物联网的关键技术之一,面临着和其他关键技术相融合的挑战。

本书是一本讲述面向实时监测的混合式无线传感器网络的专业书籍。本书根据面向实时监测任务的应用需求,提出了混合式无线传感器网络系统,主要针对此类系统中的通信协议、信息处理等相关热点问题进行研究,研究探讨如何将其用于货物列车车辆安全实时监测,并考虑在物联网的环境下无线传感器网络所面临的挑战。本书在国家自然科学基金项目“基于车载无线传感器网络的列车运行安全信息监测关键技术研究”(项目编号:60776834)、“具有能量采集、感知的无线传感器网络分簇路由协议研究”(项目编号:60870010)和北京高校物流技术工程研究中心建设项目的资助下展开了相关的研究。

全书共分7章。第1章简要介绍了无线传感器网络技术的概念和研究现状。第2章构建了能够综合主动式和反应式无线传感器网络特点的面向实时监测的混合式无线传感器网络。第3章分析WSN中MAC协议的现状,针对面向实时监测的混合式无线传感器的需求,设计了3种非同步模式媒体访问控制协议。第4章通过对现有路由协议的分析,结合HRM-WSN系统的特点进行路由协议研究,结合不同应用需求设计了3种路由算法。第5章中针对实时监测中异常事件及时探测的需求和传感器硬件资源以及能量供给的限制,提出了一种适应于微控制器的低功耗信号处理方法(即负系数加权伪中值滤波)。第6章研究车载式货物列车车辆运行状态无线监测技术的可行性,

给出了国内外尚缺乏的车载式货物列车车辆运行状态无线监测系统的总体结构分析。第7章简要介绍了物联网的概念、特点、应用和关键技术,以及CPS(Cyber-Physical Systems)的相关概念,并分析了物联网环境下的WSN和HRM-WSN中的研究内容。

无线传感器网络技术发展非常快,目前正处在迅速发展时期,新思想、新技术、新观点不断提出,本书力求比较全面地介绍无线传感器网络的主要技术,由于作者水平所限,书中内容难免存在不足之处,希望广大读者批评指正。

作者

2010年8月

序

无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSN), 是由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点组成的, 通过无线通信方式形成的一个多跳自组织网络, 能够实时监测和采集网络分布区域内的各种检测对象的信息, 并将这些信息发送到网关节点, 是一种全新的信息获取平台。具有快速展开、抗毁性, 并具有低功耗、低成本、分布式和自组织的特点, 近年来, 无线通信技术和低功耗嵌入式技术的飞速发展, 带来了信息感知的一场变革, 为无线传感器网络赋予了广阔的应用前景。目前, 无线传感器网络已经广泛地应用于环境保护与监测、医疗护理、军事与安全救灾、现代交通和现代农业等领域。美国商业周刊和 MIT 技术评论在预测未来技术发展的报告中, 分别将无线传感器网络列为 21 世纪最有影响的 21 项技术和改变世界的 10 大技术之一。

随着物联网概念的提出和政府对于物联网研究的高度重视, 物联网已成为国内学术界和工业界的研究热点。无线传感器网络通过与因特网的高效融合, 能够实现人与物、物与物的互联, 从而形成“物联网”。无线传感器网络也成为推动物联网应用的关键技术之一。

本书作者多年从事无线传感器网技术的研究和教学, 尤其是根据面向实时监测任务的应用需求, 构建了面向实时监测的混合式无线传感器网络 (Hybrid Real-time Monitoring oriented WSN, HRM-WSN)。作者在国家自然科学基金项目和北京高校物流技术工程研究中心建设项目的资助下, 结合货物列车车辆运行监控的应用背景和物联网的应用环境, 在 HRM-WSN 的理论和工程方面展开了创新性的研究。

无线传感器网络是一种新的信息获取和处理技术, 在面向实时监测方面和物联网的应用中, 它有着传统技术不可比拟的优势, 同时也必将开辟出不少新颖而有价值的商业应用。本书归纳和总结了作者在面向实时监测的混合式无线传感器网络方面已有的研究成果, 并对物联网环境下无线传感器网络一些可能

的研究方向进行了简要的阐述,期望能借此推动国内对这一新兴的网络技术的关注与研究。

刘军

2010年8月于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 无线传感器网络概述	1
1.2 无线传感器网络系统	2
1.2.1 WSN 网络结构	2
1.2.2 WSN 的特点	5
1.2.3 WSN 的应用前景	7
1.3 无线传感器网络系统研究现状	9
1.3.1 节点系统的理论和技术	9
1.3.2 通信协议的理论和技术	13
1.3.3 核心支撑技术	15
1.3.4 网络仿真平台研究	18
1.3.5 WSN 实践与应用	20
1.4 小结	21
第 2 章 面向实时监测的混合式无线传感器网络	22
2.1 面向实时监测的混合式无线传感器网络系统概述	22
2.1.1 HRM-WSN 系统特点及应用	23
2.1.2 HRM-WSN 系统在实时监测系统中的应用优势	24
2.2 HRM-WSN 系统结构	25
2.3 HRM-WSN 系统设计原则	26
2.4 HRM-WSN 系统研究内容	28
2.5 小结	31
第 3 章 HRM-WSN 中自适应低功耗 MAC 协议	32
3.1 WSN 中 MAC 协议研究	32

3.1.1	协议能耗分析	32
3.1.2	协议设计目标	33
3.1.3	典型的 MAC 协议	35
3.2	Quorum 矩阵表格和 FRTS 机制	41
3.2.1	Quorum 矩阵表格	41
3.2.2	FRTS 机制	43
3.3	A ² FMAC 协议的设计与分析	44
3.3.1	非同步工作模式的产生	45
3.3.2	A ² FMAC 协议描述	47
3.3.3	协议节能和时延特性分析	47
3.3.4	协议的仿真分析	49
3.4	EA ² MAC 协议的设计与分析	55
3.4.1	扩展 Quorum 矩阵表格	56
3.4.2	EA ² MAC 协议工作模式	57
3.4.3	协议节能特性分析	59
3.4.4	协议仿真分析	61
3.5	VGP-MAC 协议的设计与分析	63
3.5.1	VGP-MAC 协议工作模式	64
3.5.2	VGP-MAC 仿真分析	65
3.6	小结	68
第 4 章	HRM-WSN 中路由协议	69
4.1	WSN 中路由协议研究	69
4.1.1	典型的 WSN 中路由协议	69
4.1.2	HRM-WSN 路由协议设计原则	75
4.2	WSN 路由协议中能量补给	77
4.3	基于减法聚类的无线传感器网络分簇路由算法	78
4.3.1	簇头产生算法	80
4.3.2	簇的形成算法	81
4.3.3	仿真分析	82

4.4	分簇单跳路由算法	85
4.4.1	簇头数量的确定	87
4.4.2	簇头选择机制	88
4.4.3	非簇头归属机制	89
4.4.4	仿真分析	91
4.5	基于 QoS 的多路径路由算法	94
4.5.1	HRM-MP 算法的问题描述	95
4.5.2	HRM-MP 算法设计	96
4.5.3	仿真与分析	100
4.6	小结	102
第 5 章	HRM-WSN 中节点信号处理技术	104
5.1	HRM-WSN 中信号处理技术概述	104
5.1.1	WSN 中信号处理技术	105
5.1.2	中值滤波	106
5.2	加权中值滤波及伪中值滤波算法	107
5.2.1	加权中值滤波	108
5.2.2	加权伪中值滤波	109
5.3	具有选频特性伪中值滤波算法设计与分析	110
5.3.1	Mallows 综合算法	111
5.3.2	具有选频特性的伪中值滤波算法设计	113
5.3.3	仿真与分析	113
5.4	小结	117
第 6 章	车载式货物列车车辆运行状态无线监测系统应用	118
6.1	车载式货物列车车辆运行状态无线监测系统可行性研究	118
6.1.1	货物列车车辆状态监测现状	119
6.1.2	确定状态监测内容	120
6.2	车载式货物列车车辆运行状态无线监测系统	126
6.3	车载式货物列车车辆运行状态无线监测系统实现	128

6.3.1	传感器节点硬件设计	128
6.3.2	汇聚节点设计	138
6.3.3	系统软件设计	138
6.3.4	系统网络通信技术	140
6.4	小结	141
第 7 章 物联网环境下 HRM-WSN 的研究与挑战		142
7.1	物联网与 CPS	142
7.1.1	物联网	142
7.1.2	CPS	152
7.2	物联网环境下的 WSN 技术	154
7.2.1	物联网环境下的 WSN 技术	154
7.2.2	物联网环境下 HRM-WSN 的研究	156
7.3	小结	159
参考文献		160

第1章 绪论

物联网是指通过各种传感和传输手段,将现实世界的信息进行自动化、实时性、大范围、全天候的标记、采集、传输和分析,并以此为基础搭建信息运营平台,构建应用体系,从而增强社会生产生活中信息互通性和决策智能化的综合性网络系统。物联网可划分为信息采集、信息传输、信息运营和整合应用四个层级。根据易观国际(Analysys International)最近发布的国内首部物联网全景报告《中国物联网白皮书之一——无线传感器网络的机遇与挑战》中数据显示,作为物联网现阶段发展核心的无线传感器网络产业,其市场规模将在未来两年内增长15倍,达到40亿元。无线传感器网络的发展,还将带动射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)等其他物联网产业,为其提供更明确的应用方向和更丰富的市场机会。目前,由信息采集层和信息传输层构成的信息感知体系是物联网应用推进的主要领域,而在其中起到关键推动作用的就是无线传感器网络行业。因此,无线传感器网络已经成为政府推进物联网发展的首要着力点,其理论和应用研究也成为热点。

1.1 无线传感器网络概述

近年来,微电子技术、计算机技术、无线通信等技术的进步,推动了低功耗多功能传感器的快速发展,并且孕育了微机电系统(Micro-Electro-Mechanism System, MEMS)技术支持下的无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)。Internet构成了逻辑上的信息世界,改变了人与人之间的沟通方式,而无线传感器网络则将逻辑上的信息世界与客观的物理世界融合在一起,改变了人类与自然界交互的方式^[1,2]。

WSN被认为是21世纪最重要的技术之一,将会对人类未来的生活方式产生巨大影响。麻省理工学院的《技术评论》杂志将无线传感器网络评为对人类未来生活产生深远影响的十大新兴技术之首。WSN的研究起步于20世纪90

年代,从最初利用 MEMS 技术设计微型化的节点设备到对网络本身问题的关注和研究,它已成为国内外学者研究的热点。虽然大量学者已经对 WSN 的各方面开展了研究,并取得了相应的进展和成果,但仍未形成一套完整的理论和技术体系来支撑这一研究领域的发展,还有众多的科学和技术问题尚待突破。此外,如何将 WSN 的基础理论研究和应用相结合,开发具有自主知识产权的 WSN 应用系统具有重要的学术意义和实际应用价值。

1.2 无线传感器网络系统

WSN^[3,4]是由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织网络系统,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息,并发送给观察者。

1.2.1 WSN 网络结构

WSN 系统中包括传感器节点 (sensor node)、汇聚节点 (sink node) 和管理节点,典型的网络结构如图 1-1 所示。在传感器网络中,节点被任意部署在监测区域内,是通过飞行器撒播、人工埋置、火箭弹射等方式完成的。节点通过自组织形式构成网络,并通过多跳路由方式将监测的数据传输到汇聚节点,最终借助互联网、无线网络或卫星将数据信号送至管理节点。系统用户可以通过管理节点查看、查询、搜索相关的监测数据,并对传感器网络进行配置和管理^[5,6]。

网络系统中的传感器节点通常为微型嵌入式系统,其处理能力、存储能力和通信能力相对较弱。与传统无线网络有所不同,传感器节点除了需要进行本地信息收集和数据处理之外,还要对其他节点发送来的数据进行存储、融合、转发等处理。网络中所包含的传感器节点可以根据感测能力、计算能力、通信能力、能量等分为不同的种类,传感器网络由此可分为同构传感器网络 (Homogeneous Sensor Networks) 和异构传感器网络 (Heterogeneous Sensor Networks)。同构传感器网络由相同类型传感器节点组成,异构传感器网络是指由多种不同类型的传感器节点构成的网络。汇聚节点的处理能

力、存储能力和通信能力相对较强，其用于连接 WSN 和外部网络。汇聚节点既可以是一个具有增强功能的传感器节点，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，从而确保其有足够的能量和更多的内存与计算能力。

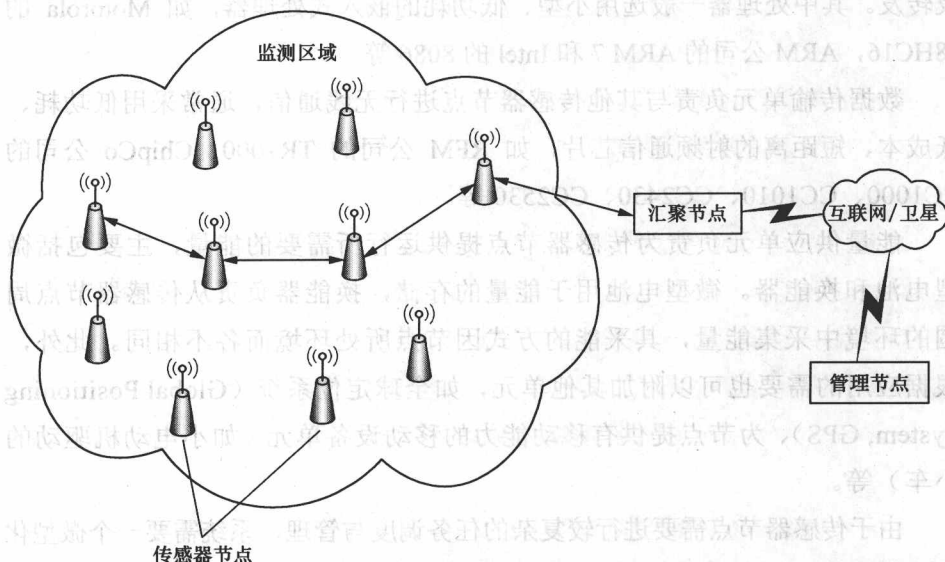


图 1-1 WSN 体系结构图

在不同应用中，传感器网络节点^[7]的硬件结构各不相同，但基本上都由数据采集单元（Data Acquisition Unit）、数据处理单元（Process Unit）、数据传输单元（Data Transfer Unit）和能量供应单元（Power Unit）四部分组成，如图 1-2 所示。

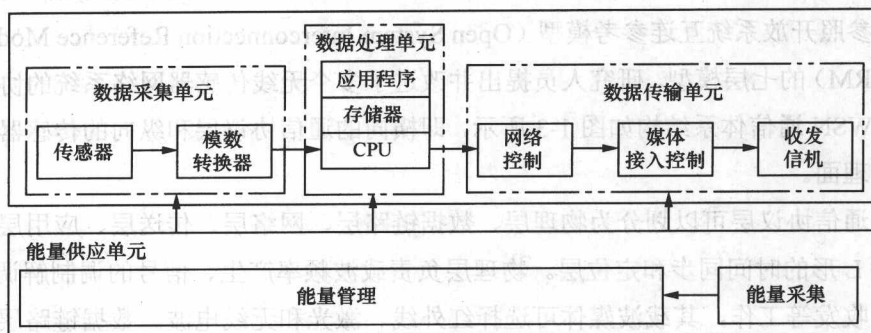


图 1-2 传感器节点体系结构

数据采集单元由传感器与模数转换器 (Analog to Digital Converter, ADC) 组成, 负责监测区域内信息的采集和数据转换, 其中传感器的类型由被监测物理信号的形式所决定。

数据处理单元负责控制整个传感器节点的操作, 实现数据的存储、融合以及转发。其中处理器一般选用小型、低功耗的嵌入式处理器, 如 Motorola 的 68HC16, ARM 公司的 ARM 7 和 Intel 的 8086 等。

数据传输单元负责与其他传感器节点进行无线通信, 通常采用低功耗、低成本、短距离的射频通信芯片, 如 RFM 公司的 TR1000、ChipCo 公司的 CC1000、CC1010、CC2430、CC2530 等。

能量供应单元负责为传感器节点提供运行所需要的能量, 主要包括微型电池和换能器。微型电池用于能量的存储, 换能器负责从传感器节点周围的环境中采集能量, 其采能的方式因节点所处环境而各不相同。此外, 根据应用的需要也可以附加其他单元, 如全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)、为节点提供有移动能力的移动设备单元 (如小电动机驱动的小车) 等。

由于传感器节点需要进行较复杂的任务调度与管理, 系统需要一个微型化的操作系统, 其必须能够高效地使用传感器节点的有限内存、低功耗的处理器、传感器、低速通信设备、有限的电源, 且能够对各种特定应用提供最大的支持。传感器节点既可以采用现有的嵌入式操作系统, 如 Linux、WinCE 等, 亦可以采用加州大学伯克利分校研究人员专门研发的 TinyOS。

传感器网络需要根据用户对网络的需求设计适应自身特点的网络体系结构, 为网络协议和算法的标准化提供统一的技术规范, 使其能够满足用户的需求。参照开放系统互连参考模型 (Open System Interconnection Reference Model, OSI-RM) 的七层模型, 研究人员提出并改进了多个无线传感器网络系统的协议栈, WSN 通信体系结构如图 1-3 所示, 即横向的通信协议层和纵向的传感器网络管理面。

通信协议层可以划分为物理层、数据链路层、网络层、传送层、应用层以及倒 L 形的时间同步和定位层。物理层负责载波频率产生、信号的调制解调、信号收发等工作, 其载波媒体可选择红外线、激光和无线电波。数据链路层负责媒体接入和错误控制, 其中媒体接入协议保证可靠的点对点 and 点对多点通信,

错误控制则保证源节点发出的信息可以完整、无误地到达目标节点。网络层协议负责路由生成和选择,无线传感器网络中大多数节点无法直接与网关通信,需要通过中间节点进行多跳路由。故一个网络设计成功与否,路由协议非常关键。传送层负责将传感器网络的数据提供给外部网络。应用层包括一系列基于监测任务的应用层软件。其中,定位层和时间同步层在协议中的位置比较特殊,通过倒 L 形体现出其既依赖于传输控制以下各层,同时又为各层提供信息支持。

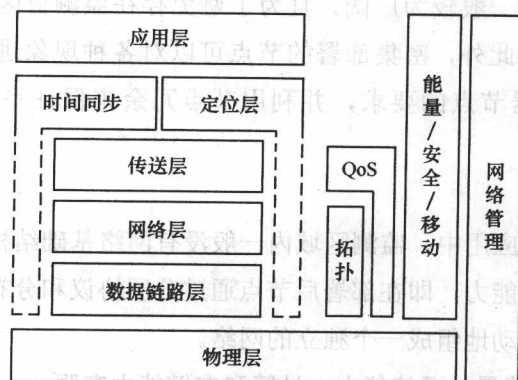


图 1-3 WSN 通信体系结构

网络管理面则可以划分为能耗管理面、移动性管理面以及安全管理面,管理面的存在主要是用于协调不同层次的功能以求在能耗管理、移动性管理和安全管理方面获得综合考虑的最优设计。其中,能量/安全/移动管理以及 QoS (Quality of Service) /拓扑管理等功能部分融入到各层协议中,用以优化和管理协议流程;部分独立于协议外层,通过各种收集和配置接口对相应机制进行配置和监控。

1.2.2 WSN 的特点

WSN 与现有的无线网络虽然有许多相似之处,但同时也存在许多差别,具有其自身的特点。目前,常见的无线网络包括蜂窝移动通信网、无线局域网、蓝牙网络、无线自组织网 (Mobile Ad-hoc Network, MANET) 等,其设计目标是在高度移动的环境中通过动态路由和移动管理技术,为用户提供高质量服务和高效带宽利用,能源节约是次要考虑因素。而在无线传感器网络

中,大多数传感器节点是固定不动的,只有少数节点需要移动,它们通常运行在无人值守的、人类无法接近的、恶劣甚至危险的远程环境中,加上传感器节点自身的限制,故 WSN 的首要设计目标是能源的高效使用,延长网络的生命周期成为无线传感器网络的核心问题^[3,4]。

与传统的无线网络相比,WSN 具有以下的特点。

1. 规模大

在监测区域内通常部署了大量传感器节点,且传感器节点分布更为密集。由于监测区域一般较为广阔,且为了避免存在监测盲区,用户需要部署大量传感器节点。此外,密集部署的节点可以对各种现象进行精确传感,降低了对单个传感器节点的要求,并利用节点冗余来保证系统的容错性和顽健性。

2. 自组织

在传感器网络应用中,监测区域内一般没有网络基础结构,这就要求传感器节点具有自组织能力,即在部署后节点通过分层协议和分布式算法协调各自的行为,快速、自动地组成一个独立的网络。

3. 节点电源能量、通信能力、计算和存储能力有限

传感器节点一般由自身所带的小体积的电池供电,部署环境的复杂性使得电池充电和更换比较困难,因此在 WSN 设计过程中,任何技术和协议的使用都要考虑节点电源能量有限,以节能为首要条件。

考虑到传感器节点的能量限制和网络覆盖区域大,节点的通信带宽较窄且经常变化,通信覆盖范围有限,此外传感器之间的通信断接频繁使得节点的通信并不像一般的移动设备。

传感器节点由于受价格、体积和功耗的限制,均采用嵌入式处理器和存储器,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。

4. 动态性

无线传感器网络是一个动态的网络,环境干扰、节点移动或节点失效都会导致拓扑结构发生变化,因此网络应该具有动态拓扑组织功能。

5. 节点易于失效

WSN 节点受环境的影响以及自身资源的限制,使得其易于因故障或电源耗尽而失效。但由于 WSN 具有很强的抗毁性,部分节点的失效并不会影响整个