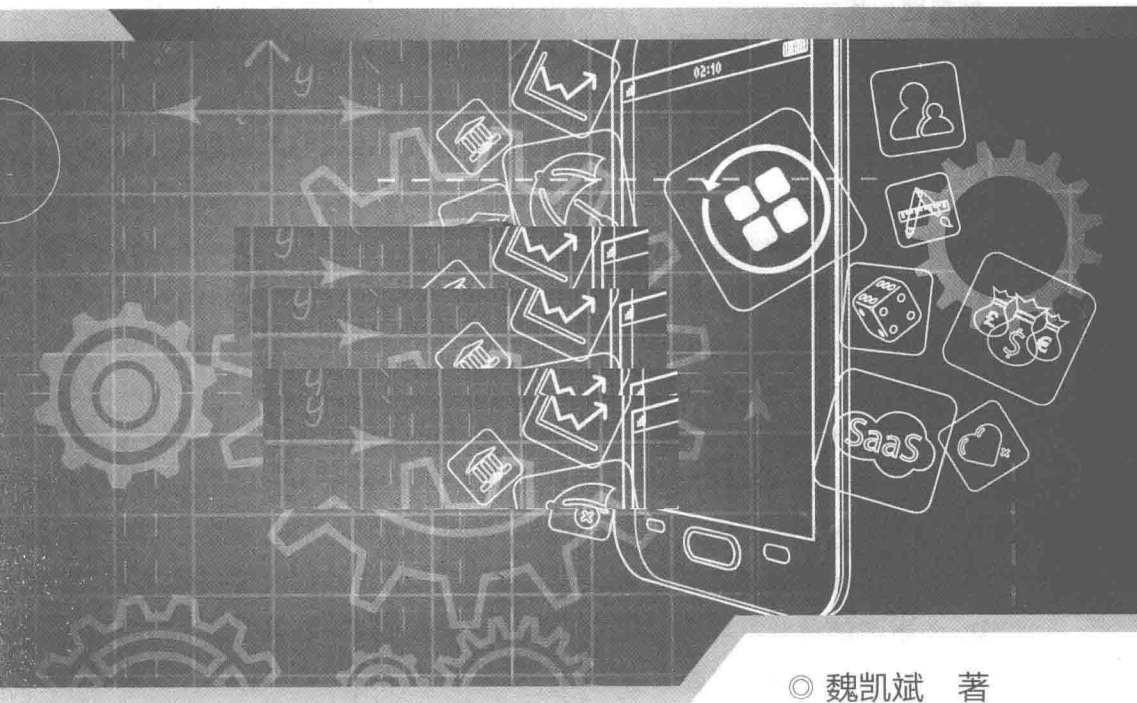


无线传感网络 及其

在工业领域应用研究



◎ 魏凯斌 著



电子科技大学出版社

University of Electronic Science and Technology of China Press

无线传感器网络由大量低成本、低功耗的微型传感器节点通过自组织方式连接而成，能够实时感知、监测和采集覆盖区域内的各种环境信息，并进行处理后报告给感兴趣的用戶。无线传感器网络具有部署灵活、可靠性强、扩展方便、经济性好等特点，在军事安全、工业控制、医疗卫生及环境监测等领域具有广泛的应用前景，受到学术界和工业界的高度重视。

无线传感器网络往往应用在恶劣的外部环境或无人区域，能量通常是由干电池或纽扣电池来提供，很难进行补充，所以进行节能设计并提高整体网络的最大生命周期将是一个重要的研究课题。笔者对此进行研究，主要围绕多基站最大生命周期模型、路由节能算法以及节点故障诊断等关键技术展开，最后在对无线传感器网络软硬件平台研究的基础上设计了一个节能高效原型系统。

本书针对工业环境的特点和工业监控的实际需求，总结了工业应用对无线传感器网络的具体要求，分析了无线传感器网络的特点，根据这些特点结合工业需求，总结出了生产过程监控、物流监控、环境监控和设备监控等典型的工业应用。针对这些工业应用，本书分析了将无线传感器网络应用于工业中的难点，提出了基于无线传感器网络的解决方案并优化软硬件设计，使其不仅适合工业应用，而且具备了更长的网络生命周期。最后，本书以某企业的实际应用为例，详细分析和阐述了无线传感器网络的软硬件设计方案。

本书得到甘肃省高等学校科研项目“基于WSN的铁路平交道口预警系统关键技术研究(NO.2013B-078)”和甘肃省科技计划项目“基于无线传感网络的智慧交通数据传输体系架构与关键技术研究”的资助，项目编号为1610RJZE135。

第一章 无线传感网络的概述	001
第一节 无线传感网络的定义及特点	002
一、无线传感器网络的定义	002
二、无线传感器网络的特点	003
第二节 无线传感网络的发展历程	007
一、无线传感器网络技术的发展历程	007
二、无线传感器网络技术的重点	009
三、无线传感器网络技术的发展趋势	011
第三节 无线传感器网络的现状	013
一、无线传感器网络技术体系及其发展现状	013
二、基于无线传感器网络的应用系统发展现状	017
第四节 无线传感网络的主要应用领域	020
一、工业控制	020
二、智能家居	021
三、环境监测	023
四、精细农业	024
五、军事应用	027
第二章 IEEE 802.15.4 标准与 ZigBee 协议规范	031
第一节 IEEE 802.15.4 协议概要	032
一、无线传感器网络	032
二、无线传感器网络和 IPv6over IEEE 802.15.4 协议	033
三、IPv6over IEEE 802.15.4 协议的技术特点	034
四、嵌入式 IPv6 协议栈的设计	035

第二节 ZigBee 协议栈	037
一、什么是 ZigBee	037
二、ZigBee 的技术特点	038
三、ZigBee 和 IEEE 802.15.4 的关系 (如图 2-3 所示)	039
四、ZigBee 与其他无线网络标准的比较	040
五、ZigBee 的应用范围	042
六、ZigBee 协议栈	042
七、ZigBee 网络层的实现	045
第三节 超帧及 802.15.4CSMA CA 信道访问机制	048
一、ZigBee 中的超帧结构	048
二、MAC 层信道访问机制 CSMA CA	051
三、应答重传机制	052
四、CSMA/CA 机制	053
五、BEB 机制	056
六、RTS/CTS 模式	058
七、物理载波监听和虚拟载波监听	061
八、DIFS、SIFS 与 Slot Time	062

第三章 无线传感网络的体系结构

065

第一节 无线传感网络的节点结构	066
一、典型节点	066
二、节点组成	068
三、节点特性	073
第二节 无线传感器的网络结构	074
一、传感器节点	075
二、汇聚节点	075
三、网络拓扑结构	076
第三节 跨层设计方法	080
一、WMN 典型结构与特点	081
二、WMN 主要网络协议或算法设计对跨层设计的要求	083

三、多媒体业务 QoS 保证对跨层设计的要求	086
四、WMN 跨层设计原则与方法	087
五、WMN 跨层设计中亟待深入研究的问题	089
第四章 无线传感网络定位及测距技术	091
第一节 定位技术 (追踪)	092
一、无线传感器网络定位技术基本概念	093
二、主要的定位方法	095
三、基于测距的算法	096
第二节 测距技术	102
一、无线传感器网络中的测距方法	102
二、TOF 测距方法原理	103
第三节 非测距定位技术	105
一、基于非测距的算法概述	105
二、DV-Hop 定位算法	107
三、新型 WSN 定位研究分析	109
四、研究前景与应用分析	111
第五章 无线传感网络的安全性技术	113
第一节 无线传感网络中的安全机制	114
一、无线传感器网络安全的基本理论	114
二、无线传感器网络的安全机制	117
三、无线传感器网络运行的操作系统	123
四、链路层加密方案——TinyOS 的安全防护措施	125
五、无线传感器网络安全综合解决方案	128
第二节 无线传感网络的入侵检测技术	131
一、无线传感器网络可能遇到的入侵形式	131
二、典型的入侵检测方法	133
三、无线传感器网络中入侵检测的体系结构	135
四、无线传感器网络中典型检测算法	138

第三节	无线传感器网络中的密钥管理	142
一、	无线传感器网络密钥管理的基本要求	143
二、	无线传感器网络的密钥管理方案	144
三、	密钥预分配方案	146
四、	无线传感器网络密钥管理的深入探讨	153
第六章	构建面向工业应用的无线传感网络系统模型	157
第一节	工业领域中的无线传感网络结构设计	158
一、	网络拓扑结构优化设计	158
二、	网络自组织方法	160
三、	多数据汇集点网络传输实现	161
四、	性能评价	165
第二节	工业领域中的无线传感网络数据收集与分析	168
一、	无线传感器网络数据收集模式	168
二、	数据收集方法分类	169
三、	基于时空相关性的数据收集	174
四、	基于压缩感知的数据收集	176
第七章	设计工业适用的无线传感网络设备	179
第一节	无线传感网络节点的设计	180
一、	基于无源技术的无线传感器网络节点设计	180
二、	基于 RFID 技术的无线传感器网络节点设计	185
第二节	无线传感网络网关的设计	190
一、	矿井无线传感器网络的网关设计	190
二、	面向水环境监测的无线传感器网络网关设计	195
三、	无线传感器网络 M2M 网关的设计与实现	200
第三节	无线传感网络后台监控的设计	208
一、	系统监控平台的构成	208
二、	监控系统后台软件的设计与实现	209

第八章 工业应用中无线传感网络的特点	217
第一节 传感器节点的结构	218
一、测温节点的体系结构	218
二、测温节点的硬件系统设计	219
三、测温节点的软件系统设计	221
四、实际应用	222
第二节 频段选择	223
一、MAC 协议与频段	223
二、无线传感器网络的频段感知管理	225
第三节 收发芯片选择	229
一、无线传感器网络中收发芯片的能量效率	229
二、收发芯片系统架构	229
三、收发芯片选择	230
四、国内外各大芯片厂商及模块厂商产品比对	231
第四节 天线选择	235
一、天线是无线传感器网络应用研究的重要问题	235
二、全向天线和定向天线	235
三、应用场景分析	236
第五节 微处理器芯片选择	237
一、选择微处理器芯片要考虑的需求	237
二、选择 CPU 时需考虑的重要参数	238
第六节 传感器选择	240
一、根据测量对象与测量环境确定传感器的类型	240
二、灵敏度的选择	240
三、频率响应特性	240
四、线性范围	241
五、稳定性	241
六、精度	241

第七节 总体设计	243
一、系统需求分析	243
二、监测系统的总体设计方案	245
三、软硬件系统的设计要求	247
第九章 案例分析	249
一、系统设计方案	250
二、系统硬件系统设计	252
三、系统软件设计	253
四、实际应用测试	256
参考文献	257



第一节 无线传感网络的定义及特点

微电子机械系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)、传感测量技术、嵌入式计算和无线通信等众多学科技术的快速发展使得低成本、低功耗、多功能的传感器节点成为可能。由大量微型传感器节点以 Ad-Hoc 形式自组织形成的无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSNs) 可以对外界不同的监测对象进行持续的全局感知, 获取丰富的物理世界状态信息, 从而支撑不同类型的感知应用。无线传感器网络具有较强的信息感知与数据处理能力, 能够实现客观上的物理世界与逻辑上的信息世界的融合, 是实现物联网的关键技术之一。作为崭新的信息获取与处理模式, 无线传感器网络已经成为一种新型的计算模式并得到了广泛的关注。美国《技术评论》杂志将无线传感器网络列为改变未来世界的十大新兴技术之首; 美国《商业周刊》更是将无线传感器网络列为 21 世纪高技术领域的四大支柱产业之一以及 21 世纪对世界最具影响力的技术之一。

一、无线传感器网络的定义

无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSN) 是指将大量的具有通信与计算能力的微小传感器节点, 通过人工布设、空投等方法设置在预定的监控区域。由它构成的“智能”自治监控网络系统, 能够检测、感知和采集各种环境信息或检测对象的信息。

无线传感器网络广阔的应用前景吸引了世界各国政府、学术界以及产业界的广泛关注。美国较早开展了无线传感器网络方面的研究与应用。著名的研究项目有加州大学洛杉矶分校和罗克韦尔研究中心的 WINS (Wireless Integrated Network Sensors) 项目, 主要以建立分布式传感器网络并与 Internet 互联为目标; 麻省理工学院承担的 MAMPS (Micro-Adaptive Multi-domain Power Aware Sensors) 项目, 致力于开发一个完全面向低功耗需求的无线传感器网络系统, 著名的低功耗组网协议 LEACH (Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy) 即为该项目的重要研究成果; 加



州大学伯克利分校承担的 Smart Dust 项目,主要负责研究并设计低成本、低功耗的传感器网络节点芯片;加州大学伯克利分校随后承担的 NEST (Network Embedded Systems Technology) 项目形成了包括大鸭岛生态环境监测系统、TinyOS 操作系统和 TinyDB 数据库在内的一批杰出研究成果。欧盟、日本和韩国等也在无线传感器网络领域先后开展了大量相关的研究与应用项目。

虽然我国在这方面的研究起步较晚,但是在国务院、国家自然科学基金委员会、科技部以及工业和信息化部等政府机构的重视之下,相关研究与应用发展迅速。国务院在制定《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》时将“传感器网络及智能信息处理”列为未来信息产业及现代服务业的重点方向之一。2006 年,国家重点基础研究发展计划项目“无线传感器网络的基础理论及关键技术研究”启动,该项目致力于解决“低耗自组、异构互联和泛在协同的复杂系统及资源优化的自组织网络”问题,研究新一代无线传感器网络的基础理论和关键技术。2010—2011 年,国家科技部启动了三项与无线传感器网络相关的“973”项目,涉及物联网环境下的无线传感器网络的基础理论研究。当前,国内涉及无线传感器网络研究的高等院校及研究机构日益增多,相关的研究成果也被国际学术界权威会议和期刊所接收,相应的无线传感器网络应用系统在国际、国内也具有一定的影响力。

二、无线传感器网络的特点

作为一个涉及多学科技术的新兴研究领域,无线传感器网络潜在的广泛应用使其在近十年来得到了大量的研究与关注。相比于传统的有线和无线网络,无线传感器网络有其自身的鲜明特点,而这也为无线传感器网络协议及系统设计带来了一系列挑战性问题。无线传感器网络领域的研究主要需要考虑其如下几方面的特点。

1. 节点能量有限

大部分传感器节点仅仅依靠部署时携带的干电池提供能量,其能量存储十分有限。大部分无线传感器网络部署在野外甚至危险的环境条件下,加之无线传感器网络大规模部署的特性,传感器节点的电源一般很难甚至不可能



更换。有限的电源能量严重限制了传感器节点的生命周期，因能量耗尽的传感器节点将削弱网络的通信与感知能力，降低网络的整体效率。如何有效地利用网络中所有传感器节点有限的能量，尽可能地延长网络寿命一直是无线传感器网络研究的重点。

2. 节点计算和存储能力有限

传感器节点一般配置有嵌入式的低功耗微处理器和存储器，针对感知数据具有一定的计算和存储能力。然而，受限于节点设计成本，传感器节点的计算和存储能力都十分有限，如典型的 TelosB 传感器节点（如图 1-1 所示），只配置了 8MHz 的微处理器 MSP430 以及 10KB 的 RAM。这也就要求无线传感器网络相关协议与算法设计需要考虑传感器节点的实际计算和存储能力，

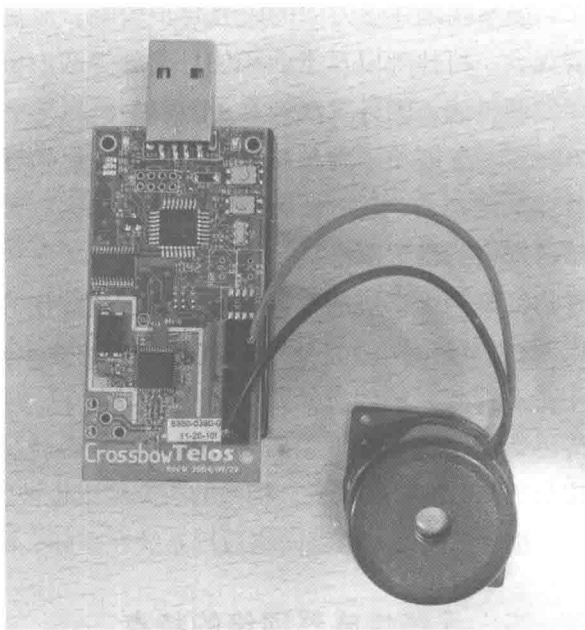


图 1-1 TelosB 传感器节点

因为它不能涉及复杂计算和大空间数据存储。如何利用大量的计算和存储能力都有限的传感器节点进行协同的分布式信息处理是有效利用无线传感器网络的一个重大挑战。

3. 网络动态性强

无线传感器网络的通信能力具有较强的动态性，这不仅缘于低成本的传感器节点本身，也因为不具可靠性的无线通信。传感器节点的加入及失效都会对网络拓扑造成一定的影响。受外部环境及无线传输干扰等因素影响，无线传感器网络中经常存在链路通信质量下降甚至失效等现象，导致数据包丢



失以及网络拓扑的动态变化。针对网络的动态性,无线传感器网络的协议与算法设计需要具有较强的动态适应性,能够根据动态网络拓扑及时调整恢复,保证信息获取与处理的正常进行。

4. 应用驱动型网络

无线传感器网络是任务型网络,需要根据实际应用的需求进行软硬件平台的搭建及网络部署。不同的无线传感器网络应用需要监测不同的物理世界对象,采集不同颗粒程度的感知数据,因此也将形成不同规模的无线传感器网络。针对某些应用(如森林环境监测应用),我们可以密集部署大量廉价的传感器节点以提供监测区域完整的数据视图。这种应用场景中往往形成“密集”数据采集网络,大量冗余信息的传输将浪费大量的网络能量,相应的传感器节点睡眠调度机制与有效的数据收集方法显得尤为重要。而有些实际应用(如城市道路交通状况监测应用)受制于监测区域规模和传感器节点制造及部署维护成本,只能在关键位置部署传感器节点,形成“稀疏”数据采集网络。此种情况下用户往往得不到全区域完整的监测数据,这就需要设计相应的算法来有效利用采集得到的部分感知数据来恢复完整的监测信息。针对不同实际应用的需求,设计相应的无线传感器网络协议与算法是构造高效的无线传感器网络应用系统的关键。

5. 以数据为中心的网络

不同于IP网络等以地址为中心,无线传感器网络是以数据为中心的网络,其核心目标是高效准确地实现感知数据的获取与处理,实现物理世界与信息世界的融合。无线传感器网络中所有节点都具备感知能力、通信能力和计算存储能力,它们能产生大量的感知数据并对其进行简单的计算处理,然后按照实际应用所设定的数据收集方式将数据汇聚到基站,供相关应用进行后期处理与分析。无线传感器网络产生的大量感知数据是用户实际感兴趣的信息,如何高效准确地收集这些区域范围内分布式产生的数据是无线传感器网络研究的重要课题。

近十余年以来,国内外的研究者已经对无线传感器网络的关键技术(包括低功耗介质访问控制协议、路由协议、数据收集、拓扑控制和能量控制与



管理等)和支撑技术(包括时间同步、定位技术、安全技术、故障诊断等)进行了深入研究,并形成了大量行之有效的协议与算法。关键技术和支撑技术的发展成熟,以及无线传感器网络的自组织、自管理特性使其能够快速组建并具有较强的容错性。当前,无线传感器网络已经被广泛地应用到各个领域并逐步深入人们的日常生活当中,包括军事安防、环境监测、火山监测、文物环境监测与预防性保护、桥梁建筑物健康监测、精细农业、智慧城市管理等。



第二节 无线传感网络的发展历程

作为信息科学领域的重要技术,无线传感器网络实现了传统科学与新兴技术的完美结合,代表着未来信息传播技术的发展方向,具有广阔的应用前景。无线传感器网络是科学技术发展的必然产物,该技术有效地将计算机技术、通信技术和传感器技术结合在一起,能够独立地完成信息的传输、采集和处理。随着科学技术的进一步发展,无线传感网络技术也在不断地发展和完善,其应用范围将越来越广,在未来的社会发展中该项技术必将成为最具影响力的技术。

无线传感网络主要是由大量部署在信号检测区域的传感器节点通过无线通信的方式形成的一个多跳的自组织网络。通过传感器实现协作地对网络覆盖区域信号的传输、采集以及处理,同时将信息传送给观察者以方便其根据要求进行下一步的操作控制,从而实现人类社会和物理世界、计算世界的连通。一个完整的无线传感器网络需要由管理中心、远程通信网、传感器节点、用户元素以及无线传感器网络组成。

一、无线传感器网络技术的发展历程

无线传感器网络的发展经历了三个阶段,即智能传感器阶段、无线智能传感器阶段和无线传感器网络阶段。

1. 智能传感器阶段

主要是将计算能力加入传感器中,从而实现传感器接受信息并计算的功能,增强了传感器采集信息的能力和处理信息的能力。

智能传感器阶段最早可以追溯到 20 世纪 70 年代越战时期使用的传统的传感器系统。当年美越双方在密林覆盖的“胡志明小道”进行了一场血腥较量,这条道路是胡志明部队向南方游击队源源不断输送物资的秘密通道,美军曾经绞尽脑汁动用航空兵狂轰滥炸,但效果不大。后来,美军投放了 2 万多个“热带树”传感器。



所谓“热带树”传感器实际上是由震动和声响传感器组成的系统，它由飞机投放，落地后插入泥土中，只露出伪装成树枝的无线电天线，因而被称为“热带树”（如图 1-2 所示）。当人员、车辆等目标在其附近行进时，“热带树”便能探测到目标产生的震动和声响信息，并立即将数据通过无线电发给指挥中心。指挥管理中心对信息数据进行处理后，得到行进人员、车辆的位置、规模和行进方向等信息，尔后指挥空中战机实施轰炸。通过“热带树”的帮助，美机总共炸毁或炸坏越南 4.6 万辆卡车。



图 1-2 越南战争时期美军使用的无线传感器，被伪装成“热带树”的模样

经过近半个世纪的战争实践，到伊拉克战争，随着军事信息技术的发展进步，军事物联网终于登上现代战争舞台。当时，美军中央战区指挥官汤米·菲利克斯命令任何进入其所辖战区的物资必须贴有 RFID 标签（射频识别电子标签），其目的就是要得到一张动态物流全景图。按照这张全景图，后勤补给可以获得更快、更精确、更实时的信息，大大缩短了美军的平均后勤补给时间，极大提高了后勤物资保障的效率。



2. 无线智能传感器阶段

这个阶段是指将无线通信功能运用到传感器中,不仅使传感器具有无线通信的能力,还使传感器的感知触角得到延长,大大降低了传感工程的投入成本。如美军研制的分布式传感器网络系统、海军协同交战能力系统、远程战场传感器系统等。这种现代微型化的传感器具备感知能力、计算能力和通信能力。因此在 1999 年,美国《商业周刊》将传感器网络列为 21 世纪最具影响的 21 项技术之一。

3. 无线传感器网络阶段

这个发展阶段是将无线网络传输技术与无线智能传感技术结合在一起,以实现传感之间的信息交换和通信,使传感器成为可协调控制的物体,从而实现了物与物的互联,以方便加工信息传递到世界的任何一个角落。

从 21 世纪开始至今,传感器网络技术特点在于网络传输自组织、节点设计低功耗。除了应用于军事情报部门,无线传感器网络在其他领域更是获得了很好的应用,2002 年,美国国家重点实验室——橡树岭实验室提出了“网络就是传感器”的论断。

无线传感网在国际上被认为是继互联网之后的第二大网络,2003 年美国《技术评论》杂志评出对人类未来生活产生深远影响的十大新兴技术,传感器网络被列为第一。

二、无线传感器网络技术的研究重点

1. MAC 协议研究

MAC 协议是在研究控制无线传感器网络功耗问题时提出来的,对于降低无线传感器网络结点功耗和解决通信冲突问题具有重要的意义。MAC 协议控制传感器中的无线通信模块,因此无线传感器网络的能量效率主要取决于 MAC 层运行效率,这也使 MAC 协议成为现在研究最为热门的技术。通常情况下,MAC 协议采用“侦听/休眠”交替的信道侦听机制进行工作,该工作机制有效地避免了无线传感器的空闲侦听,大大降低了传感器的功