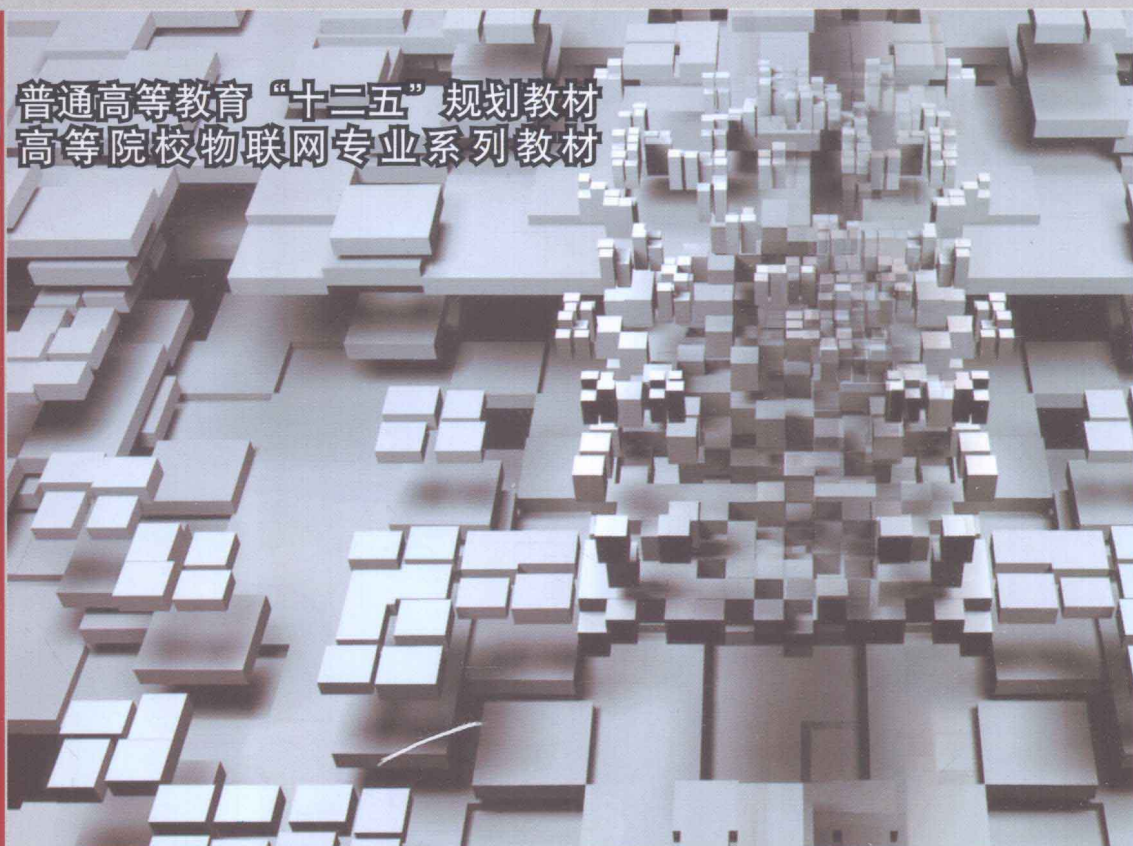


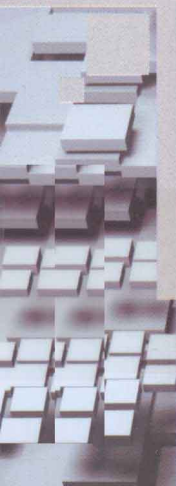


普通高等教育“十二五”规划教材
高等院校物联网专业系列教材



智能无线传感器网络 原理与应用

吴成东 主编



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
高等院校物联网专业系列教材

智能无线传感器网络 原理与应用

吴成东 主编

张云洲 贾子熙
纪 鹏 陈 莉 编著

科学出版社

北 京

前 言

无线传感器网络是无线通信技术、电子技术、计算机网络、传感技术等有机结合的产物。无线传感器网络的概念一经提出,就受到世界范围内学术界和工业界的广泛重视。美国的《商业周刊》曾将无线传感器网络列为 21 世纪最具影响力的 21 项技术之一,《MIT 技术评论》也将无线传感器网络评选为影响人类未来生活最重要的十大新兴技术之一。近 10 年来,无线传感器网络技术得到了飞速的发展,它不仅改变了人们的生活、学习、工作乃至思维方式,而且对于科学技术、经济、政治乃至整个社会都产生了重大影响。

我国对于无线传感器网络的研究起步较晚,但发展态势良好。2006 年,在国家制定的未来 15 年《中长期科学与技术发展规划纲要》中为信息技术确定了三个前沿方向,其中“智能感知技术”和“自组织网络技术”两个方向都与无线传感器网络研究直接相关。在此背景下,国内的高等院校和科研机构对无线传感器网络理论与技术开展了一系列卓有成效的研究,一些企业研究开发了先进的无线传感器网络设备并在工程实践中应用,上述工作有力地推动了我国无线传感器网络技术的发展。

本书本着使读者既能在理论方面全面系统地了解无线传感器网络的理论知识,又能在实践方面掌握一定的无线传感器网络实用技能的原则,从理论与应用有机结合的角度,系统全面地介绍了无线传感器网络的基本概念、理论方法、网络体系结构、系统硬件设备与组网技术、典型网络仿真实验平台等内容,并通过典型工程案例介绍无线传感器网络技术的应用及特点。

本书可作为高等院校研究生和高年级本科生的无线传感器网络课程的教材,也可供无线通信、电子技术、电气工程、计算机网络、自动化技术等领域的工程技术人员学习和参考。

本书由吴成东教授、张云洲副教授、贾子熙讲师、纪鹏讲师、陈莉教授共同编写。其中,第 1、2、3 章由吴成东、陈莉编写,第 4、7 章由纪鹏编写,第 5、6、10 章由张云洲编写,第 8、9 章由贾子熙编写。全书由吴成东统稿。参与本书编写和资料整理工作的有李孟歆教授、楚好讲师、王晓哲副教授,以及研究生程龙、张健、王天宝、黄月、胡楠、董晶晶、滕贺、左超、李翠娟、魏颖等。

在本书的编写过程中,作者参阅了大量文献资料,主要参考文献列于书后,在此谨对这些文献资料的作者表示诚挚的谢意。本书得到了国家自然科学基金和东北大学教材出版基金的资助。科学出版社的余江编辑为本书的顺利出版做了大量的工作。在此,作者对所有为本书顺利出版提供帮助的各界人士表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,加之无线传感器网络技术发展很快,尽管我们力争做到精益求精,但在编写中难免存在疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2011 年 8 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 无线传感器网络概述	1
1.2.1 无线传感器网络系统结构	1
1.2.2 无线传感器网络基本特点	1
1.2.3 无线传感器网络关键技术	3
1.3 无线传感器网络的发展	4
1.3.1 无线传感器网络演变过程	4
1.3.2 无线传感器网络发展现状	5
1.3.3 无线传感器网络未来趋势	7
1.4 无线传感器网络主要应用领域	7
1.4.1 军事领域	8
1.4.2 环境监测领域	8
1.4.3 医疗领域	9
1.4.4 智能家居领域	9
1.4.5 智能交通领域	9
1.4.6 其他领域	9
思考题	10
第 2 章 无线传感器网络节点	11
2.1 概述	11
2.2 节点硬件组成	11
2.2.1 处理器模块	12
2.2.2 存储模块	14
2.2.3 通信模块	14
2.2.4 传感器模块	17
2.2.5 电源模块	18
2.3 无线传感器网络操作系统	20
2.3.1 nesC 语言	21
2.3.2 TinyOS	28
2.3.3 TinyOS 应用实例解析	34
2.3.4 TinyOS 的安装	37
2.4 传感器节点分析	38
2.4.1 常见传感器节点	38
2.4.2 MicaZ 节点分析	40

思考题	47
第3章 无线传感器网络体系结构	48
3.1 传感器网络工作模式	48
3.1.1 网络的组成	48
3.1.2 多跳通信机制	49
3.2 网络整体结构	51
3.2.1 OSI 分层模型	51
3.2.2 网络体系结构分析	52
3.3 无线传感器网络服务质量与体系结构	54
3.3.1 服务质量体系	54
3.3.2 QoS 体系的通信协议	56
3.3.3 QoS 体系下的管理系统	58
3.3.4 QoS 体系功能模块的联系	60
3.4 无线传感器网络跨层优化设计	61
3.4.1 跨层优化设计概述	61
3.4.2 面向 QoS 优化的跨层设计总体框架	62
3.4.3 基于 QoS 保证的跨层设计	63
3.4.4 跨层模型与问题求解方法	64
3.4.5 网络效能最大化模型	66
思考题	66
第4章 无线传感器网络通信与组网技术	68
4.1 概述	68
4.2 物理层	69
4.2.1 物理层概述	69
4.2.2 通信信道分配	70
4.2.3 调制解调方式	72
4.3 MAC 协议	73
4.3.1 MAC 协议概述	73
4.3.2 MAC 协议设计要求	73
4.3.3 基于竞争的 MAC 协议	74
4.3.4 基于信道分配的 MAC 协议	78
4.4 路由协议	79
4.4.1 路由协议概述	79
4.4.2 层次型路由协议	80
4.4.3 以数据为中心的路由协议	82
4.4.4 基于地理位置的路由协议	84
4.5 传输层协议	85
4.5.1 传输层协议概述	85
4.5.2 数据传输可靠性分析	87
4.5.3 多组传输与多径传输	87

4.5.4 无线传感器网络与 Internet 互联	90
思考题	95
第 5 章 无线传感器网络通信技术	96
5.1 IEEE 802.15.4 标准	96
5.1.1 物理层	96
5.1.2 MAC 层	98
5.2 ZigBee 协议规范	99
5.2.1 ZigBee 协议概述	99
5.2.2 ZigBee 网络层	101
5.2.3 ZigBee 应用层	105
5.2.4 ZigBee 安全服务	107
5.3 其他无线通信标准	109
5.3.1 Wi-Fi	109
5.3.2 蓝牙	111
5.3.3 超宽带技术	112
5.3.4 近距离无线传输技术	113
思考题	114
第 6 章 无线传感器网络覆盖与部署技术	115
6.1 无线传感器网络覆盖与部署的意义	115
6.2 无线传感器网络覆盖与部署问题	115
6.2.1 按照节点部署的无线传感器网络分类	115
6.2.2 按照覆盖对象的无线传感器网络分类	117
6.2.3 无线传感器网络覆盖应用特点	120
6.3 节点感知模型	121
6.3.1 二元感知模型(0-1 模型)	121
6.3.2 概率感知模型	122
6.3.3 基于误警率的感知模型	122
6.3.4 方向性传感器的感知模型	125
6.3.5 不规则感知模型	126
6.3.6 多边形感知模型	128
6.3.7 近似圆盘感知模型	129
6.4 无线传感器网络覆盖评价指标	129
6.4.1 覆盖率	130
6.4.2 联合探测/丢失概率	131
6.4.3 覆盖场强一致性	131
6.4.4 覆盖重数	132
6.4.5 覆盖均匀性	132
6.4.6 覆盖时间和平均移动距离	132
6.4.7 其他评价指标	133
6.5 传感器网络节点部署策略与算法	133

6.5.1 传感器网络节点的随机撒布	133
6.5.2 基于几何格点和剖分的节点部署	133
6.5.3 移动传感器网络的部署策略	137
6.6 无线传感器网络覆盖技术面临的挑战	140
6.6.1 覆盖空洞及修复	140
6.6.2 传感器网络的重部署	140
6.6.3 三维空间传感器网络部署	141
6.6.4 复杂环境下的传感器网络部署	141
思考题	143
第7章 无线传感器网络管理技术	144
7.1 网络管理概述	144
7.1.1 无线传感器网络管理面临的问题	144
7.1.2 无线传感器网络管理系统设计要求	145
7.1.3 无线传感器网络管理系统的分类	145
7.2 网络拓扑结构管理	145
7.2.1 网络拓扑结构管理概述	146
7.2.2 基于分簇层次性拓扑结构	148
7.2.3 基于功率控制的拓扑结构	152
7.2.4 启发式节点唤醒和休眠机制	155
7.3 能量管理	157
7.3.1 能量管理概述	157
7.3.2 硬件能耗设计	157
7.3.3 状态调制机制	159
7.3.4 通信能耗	162
7.3.5 拓扑结构能耗分析	163
7.3.6 路由协议能耗分析	163
7.4 网络安全技术管理	165
7.4.1 网络安全技术概述	165
7.4.2 网络安全分类	166
7.4.3 WSN 网络安全设计策略	169
7.4.4 网络安全框架协议分析	175
思考题	179
第8章 无线传感器网络关键技术	180
8.1 时间同步机制	180
8.1.1 时间同步机制概述	180
8.1.2 时钟模型	181
8.1.3 基于接收者和接收者的时间同步机制	182
8.1.4 基于发送者和接收者的双向时间同步机制	184
8.1.5 基于发送者和接收者的单向时间同步机制	187
8.1.6 时间同步机制的误差来源及性能指标	190

8.1.7 时间同步机制的主要应用	191
8.1.8 时间同步机制面临的问题	192
8.2 无线传感器网络定位技术	193
8.2.1 无线传感器网络定位技术概述	193
8.2.2 定位技术基本概念	193
8.2.3 节点定位算法分类	194
8.2.4 典型定位系统	201
8.3 数据融合技术	203
8.3.1 数据融合概述	203
8.3.2 数据融合方法分类	204
8.3.3 主要数据融合方法分析	205
8.4 无线传感器网络目标跟踪技术	210
8.4.1 目标跟踪概述	210
8.4.2 目标跟踪步骤	211
8.4.3 无线传感器网络协作跟踪	211
8.4.4 典型目标跟踪算法比较	216
8.4.5 无线传感器网络主要跟踪技术	218
思考题	220
第9章 无线传感器网络仿真实验工具	221
9.1 NS2	221
9.1.1 NS2 简介	221
9.1.2 Tcl/OTcl 语言简介	222
9.1.3 OTcl 连接	225
9.1.4 NS 基本组件	229
9.1.5 实例分析	233
9.2 OPNET	235
9.2.1 OPNET 仿真流程	236
9.2.2 OPNET 建模	237
9.2.3 OPNET Modeler 开发环境	237
9.3 GloMoSim	239
9.4 TOSSIM	240
9.5 SensorSim	241
9.6 OMNeT++	242
9.7 SENSE	243
思考题	243
第10章 无线传感器网络应用技术	244
10.1 环境领域的应用	244
10.1.1 生态环境监控实验系统	244
10.1.2 山体滑坡监测系统	245
10.1.3 地震监测系统	246

10.1.4 基于无线传感器网的极端环境监测系统	247
10.2 医疗领域的应用	248
10.2.1 人体行为模式监测应用	248
10.2.2 远程监护系统	249
10.3 交通领域的应用	250
10.3.1 车辆检测与识别应用	250
10.3.2 智能交通信息采集系统	251
10.4 农业领域的应用	253
10.4.1 蔬菜园环境监测应用	253
10.4.2 园艺温室环境监控系统	254
10.5 建筑领域的应用	255
10.5.1 建筑质量监测应用	255
10.5.2 建筑火灾探测与监控应用	256
10.5.3 室内空间监控系统	257
10.5.4 智能家居系统	258
10.6 其他应用	259
10.6.1 煤矿安全监测系统	259
10.6.2 高压输电线路监测应用	261
10.6.3 轴承温度监测系统	261
思考题	262
参考文献	263

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

在信息化无处不在的当今社会,人们绝大部分的日常生活行为都与信息资源的开发、采集、传送和处理息息相关。尤其是在 21 世纪,人们对于信息的获取手段提出更高的要求,要求传感器具有小型化、智能化、多功能化和网络化等特点。正是集合了人们对于信息化的迫切需求以及传感器设备的发展趋势,无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)应运而生,并得到快速发展。无线传感器网络的雏形始于 20 世纪 90 年代末,在诞生之初便受到极大的关注,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,将其列为 21 世纪最具影响力和改变世界的十大技术之一。伴随着近 10 年电子和通信技术的蓬勃发展,与无线传感器网络相关的研发工作受到全球众多科研机构 and 公司的关注,并逐渐完成了由概念到产品的转化。如今,无线传感器网络已经被应用于众多领域,如工业生产、环境监测、智能建筑、医疗保健和军事系统等。此外,以物联网为代表的信息革命浪潮正在悄然兴起,作为物联网系统的重要组成部分,无线传感器网络正面临前所未有的发展机遇。在可以预见的未来,无线传感器网络将凭借其“无处不在的计算”深刻地改变与人类生产和生活息息相关的各个领域。

1.2 无线传感器网络概述

1.2.1 无线传感器网络系统结构

无线传感器网络由部署在监测区域内的大量节点组成,这些节点通过无线通信的方式形成多跳自组织监控网络系统,能够协作地实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息,并通过嵌入式系统对信息进行处理,最后通过随机自组织无线通信网络,以多跳中继方式将所感知信息传送到用户终端。因此,可以说无线传感器网络的出现使得逻辑上的信息世界与客观上的物理世界融合在一起,改变了人类与自然界的交互方式。人们可以通过传感网络直接感知客观世界,从而提高人类认识世界的能力。

在无线传感器网络系统中,传感器、感知对象和观察者构成传感器网络的三个要素,其中传感器之间、传感器与观察者之间通过有线或无线网络通信,节点间以 Ad-Hoc 方式进行通信。从结构上来讲,无线传感器网络通常由无线传感器节点、汇聚节点(也称为接收发送节点(sink)或基站(base station))、Internet 或通信卫星及用户等构成,如图 1-1 所示。

1.2.2 无线传感器网络基本特点

无线传感器网络作为一种新型的信息感知系统,除了具有 Ad-Hoc 网络的移动性、独立性、电源能力局限性等共同特征以外,还具有以下鲜明的技术特点。

(1) 应用相关性。无线传感器网络是无线网络和数据网络的结合,一般是为了某个特定的需求而设计的。与传统网络能适应广泛的应用不同,无线传感器网络通常是针对某一特定的应用,是一种基于应用的无线网络。在应用中,各个节点能够协作地实时监测、感知和采集

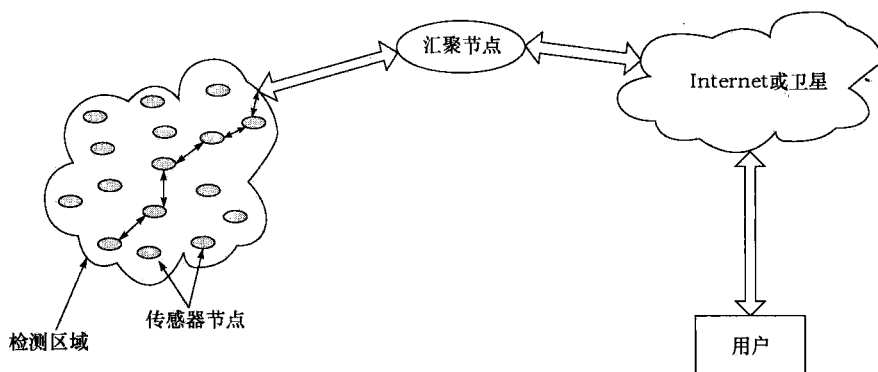


图 1-1 无线传感器网络系统结构

网络分布区域内各种环境或监测对象的信息,并对这些数据进行处理。从而获得详尽而准确的信息,将其传送到需要这些信息的用户。

(2) 网络的大规模性。为了获取精确信息,在监测区域通常部署大量传感器节点,其数量可能达到成千上万,甚至更多。在大规模网络中,通过不同空间视角获得的信息具有更大的信噪比;通过分布式处理大量采集的信息能够提高监测的精确度,降低对单个节点传感器的精度要求。大量冗余节点的存在,使得系统具有很强的容错性能,还能够增大覆盖的监测区域,减少网络空洞或盲区。

(3) 自组网与自维护性。对于由随机撒播大量节点而构成的传感网络而言,每个节点的地位平等,网内没有绝对的控制中心,可以在任何时刻和地点自动组网,传感器节点的位置不能预先精确设定,节点之间的关系也不确定,不像通常使用的网络固定地址和关系。这就需要无线传感器网络能够通过拓扑和网络通信协议自动地进行配置和管理,形成监测多跳无线网络。同时,单个节点或者局部几个节点由于环境改变等原因而失效时,网络拓扑应能随时间动态变化。这就要求无线传感器网络具备维护动态路由的功能,才能保证网络不会因为部分节点出现故障而瘫痪。

(4) 以数据为中心。在无线传感器网络中,各节点内置有不同形式的传感器,用以测量热、红外、声纳、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、土壤成分、移动物体的大小、速度和方向等众多感兴趣的数据。用户关心的是从网络中获取的信息而不是网络本身,所以以数据为中心是无线传感器网络区别于传统通信网络的主要特点。

(5) 路由多跳性。网络中节点通信距离有限,一般在几十米到几百米范围内,节点只能与它的邻近节点直接通信。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。网络的多跳路由通常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。因此,每个节点既可以是信息的发起者,也可以是信息的转发者。

(6) 网络动态性。无线传感器网络是一个动态的网络,网络中的传感器、感知对象和观察者三要素都可能具有移动性。另外,新节点的加入、已有节点故障或失效,及环境条件变化所造成无线通信链路的带宽变化,都会引起无线传感器网络结构的变化。这就要求传感器网络能够适应结构的随时变化,具有动态系统的可重构性。

(7) 节点的可靠性。传感器节点往往要工作在恶劣的环境下,甚至遭到破坏,如有时要利用飞机空投或发射炮弹来进行网络节点的部署,所以要求节点非常坚固、不易损坏,及能适应

各种恶劣环境。由于传感器节点数量很大,监测的环境面积很大,具体的节点位置会时常发生变化,所以不可能人为地进行网络维护。为了防止监测数据被盗取,要求无线传感器网络具有保密性和安全性,要求整个网络的软、硬件具有很好的鲁棒性和容错性。

(8) 节点能量、存储空间和处理能力的有限性。在无线传感器网络中,传感节点数量众多。为降低网络成本,传感节点的体积、存储空间、处理能力都受到很大的限制。在通常情况下,传感节点都布置在偏远、恶劣的环境中,能源由电池提供且难以做到能源的替换,节点能量十分有限。因此,如何克服节点的局限性、降低能耗或者使节点具备成熟的自动获取能源的能力,是目前无线传感器网络设计领域的一个重要技术问题。

1.2.3 无线传感器网络关键技术

无线传感器网络作为当今信息领域新的研究热点,尚有许多关键理论与技术问题有待研究,主要研究内容有以下几个方面:

(1) 网络拓扑控制。无线传感器网络是自组织网络,在保证网络连通和覆盖的前提下剔除不必要的通信链路,形成数据转发的优化网络结构具有重要意义。通过拓扑控制自动生成良好的网络拓扑结构,能够提高路由协议和 MAC 协议的效率,从而节省节点能量以延长网络生存期,并为数据融合、时间同步和目标定位等奠定基础。

(2) 网络协议。传感器网络协议负责使各个独立的节点形成一个多跳的数据传输网络。但由于传感器网络节点的计算能力、存储能力、通信能力以及携带的能量都十分有限,每个节点只能获取局部网络的拓扑信息,其运行的网络协议也不能过于复杂,无线传感器网络除结构动态变化外,网络资源也在不断变化,这些都对网络协议提出更高的要求。目前,研究的重点是网络层路由协议和数据链路层协议。网络层的路由协议决定监测信息的传输路径;数据链路层的介质访问控制用来构建底层的基础结构,控制传感器节点的通信过程和工作模式。

(3) 时间同步。实现时间同步是传感器网络系统协同工作的关键机制之一。无线传感器网络的一些固有特征,如能量、存储、计算和宽带的限制,以及节点的高密度分布,使传统的时间同步算法无法适用。因此,越来越多的研究集中在设计适合无线传感器网络的时间同步算法。目前,已提出多个时间同步机制,其中 RBS(reference broadcast synchronization)、Tiny/Mini-Sync 和 TPSN(timing-sync protocol for sensor network)被认为是三个基本的同步机制。

(4) 定位技术。位置信息是传感器网络节点采集数据过程中不可缺少的部分。在某些应用中,没有位置信息的监测消息通常毫无意义。确定事件发生的位置或数据采集的节点位置是传感器网络最基本的功能之一。根据无线传感器网络的自身特点,定位机制必须满足自组织性、健壮性、能量高效性和分布式计算等要求。目前,主要的定位机制有 TOA(time of arrival)、TDOA(time difference of arrival)、AOA(angle of arrival)和 RSSI(received signal strength indication)。

(5) 网络安全。无线传感器网络作为任务型网络,不仅要进行数据传输,还要进行数据采集、融合及任务协同控制等。如何保证任务执行的机密性、数据产生的可靠性、数据融合的高效性以及数据传输的安全性,就成为无线传感器网络需要全面考虑的安全问题。为了保证任务的机密布置和任务执行结果的安全传递和融合,无线传感器网络需要提供基本的安全机制,如机密性认证、点到点的消息认证、完整性鉴别、新鲜性鉴别、认证广播和安全管理等。

(6) 数据融合。数据融合是将多份数据或信息进行处理,组合出更有效、更符合需求的数

据过程。由于无线传感器网络存在能量约束,因此需要数据融合以减少传输的数据量,有效节省能量。又由于传感器节点的易失效性,因此传感器网络也需要数据融合技术对多份数据进行综合,以提高信息的精确度。数据融合技术可以与传感器网络的多个协议层次进行结合。在传感器网络的设计中,只有面向应用需求设计针对性强的数据融合方法才能最大限度地获益。但数据融合技术也存在缺点,它节省能量、提高信息准确度是以牺牲延迟性和鲁棒性等性能为代价的。

(7) 数据管理。从数据存储的角度看,传感器网络可被视为一种分布式数据库。以数据库的方法在传感器网络中进行数据管理,可以将存储在网络中的数据逻辑视图与网络中的实现进行分离,使传感器网络的用户只需要关心数据查询的逻辑结构,而不用关心细节实现。无线传感器网络数据管理系统的结构主要有集中式、半分布式、分布式以及层次式结构。无线传感器网络中数据的存储采用网络外部存储、本地存储和以数据为中心存储等方式。

(8) 嵌入式操作系统。在无线传感器网络中,每个传感器节点都是一个微型的嵌入式系统,内部的硬件资源有限,需要操作系统对其有限的内存、处理器和通信模块进行节能高效的使用,并提供最大的支持。在无线传感器网络的操作系统支持下,多个应用可以并发地使用系统的有限资源,因此嵌入式操作系统也是传感器网络领域的重要研究内容。

1.3 无线传感器网络的发展

1.3.1 无线传感器网络演变过程

无线网络技术的发展起源于人们对无线数据传输的需求,它的不断进步直接推动了无线传感器网络概念的产生和发展。早在 20 世纪 70 年代,就出现了传统传感器的点对点传输,形成传感器网络的雏形,人们把它称为第一代传感器网络。随着相关学科的不断发展和进步,传感器网络同时还具备了获取多种信息的综合处理能力,并通过与传感控制器的结合,组成兼具信息综合和信息处理两种能力的传感器网络,形成第二代传感器网络。从 20 世纪末开始,现场总线技术开始应用于传感器网络,人们用其组建智能化传感器网络,大量多功能传感器获得应用,并使用无线技术连接,无线传感器网络逐渐形成。到了 21 世纪,信息化技术的进步促进了无线传感器网络的发展,形成从单一化逐渐向集成化、微型化和网络化的发展方向。总之,无线网络技术的发展和进步一直是无线传感器网络发展的最主要推动力,下面分别介绍一些与无线传感器网络的发展过程息息相关的网络形式。

1) ALOHA 系统

ALOHA 系统出现于 20 世纪 60 年代末,是第一个获得成功应用的无线网络,由美国夏威夷大学 Norman Abramson 等研制成功。ALOHA 系统包括 7 台计算机,采用双向星形拓扑连接,横跨夏威夷的四座岛屿。其核心思想是使用共享的公共传输信道,并采用突发占用和碰撞重发的方法组成网络系统。当某一个用户有信息要传递时,立即向信道发送消息,同时检测信道的使用情况。如果出错,则认为和其他用户发送的数据发生了碰撞,于是在某一时延后重发这个数据分组。这里选取“某一时延”是为了防止发生碰撞的用户在检测到碰撞后立即重发分组,从而使各个用户错开重发时间以避免连锁碰撞的恶性循环。

ALOHA 系统有效地将计算机和通信技术结合起来,能够将计算机存储的大量信息传输到需要的地方,在技术上具有重要的意义。

2) 分组无线网

分组无线网(packet radio network, PRNET)最初的研究源于军事通信的需要。基于 ALOHA 系统的成功经验,美国国防部高级研究计划局(DARPA)于 1972 年开始以包交换无线电网为代表的一系列分组无线网络研发计划,研究在战场环境下利用 PRNET 进行数据通信的技术。分组无线网络的后续研究取得不少成果,最主要的进步在于多路访问冲突避免(MACA)无线信道接入协议的开发。MACA 将 CSMA 机制与苹果公司 Localtalk 网络中使用的 RTS/CTS 通信握手机制相结合,很好地解决了“隐蔽终端”和“暴露终端”的问题。

3) 无线局域网

无线局域网通过无线信道实现网络设备之间的通信,并实现通信的移动化、个性化和宽带化,它具有接入灵活、移动便捷、组建方便和易于扩展等诸多优点,作为全球公认的局域网权威,IEEE 802 工作组建立的标准在局域网内得到广泛应用。

目前,无线局域网采用的传媒主要有两种,即无线电波与红外线。无线电波根据调制方式的不同又分为扩展频谱方式和窄带调制方式。

4) 无线个域网

无线个域网(wireless personal area network, WPAN)是为了实现活动半径小、业务类型丰富、面向特定群体以及无线无缝连接而提出的新型无线通信网络技术。WPAN 与无线广域网、无线城域网、无线局域网并列,但覆盖范围相对较小。WPAN 所覆盖的范围一般半径在 10m 以内,必须运行于许可的无线频段。在网络构成上,WPAN 位于整个网络链的末端,用于实现同一地点终端与终端间的连接,如连接手机和蓝牙耳机等。WPAN 设备具有价格便宜、体积小、易操作和功耗低等优点。

5) 无线自组网

无线自组网是一组由带有无线收发装置的移动终端组成的一个多跳自组织的自治网络系统。它是一种无中心的分布式控制网络,每个用户终端兼具路由器和主机两种功能,这为便捷终端实现自由快速的无线通信提供可能。由于无线自组网不依赖任何已有的网络基础设施,终端节点动态随意分布,因此,如何在终端节点移动的情况下保证高质量的数据通信是该领域研究的热点问题之一。

1.3.2 无线传感器网络发展现状

1998 年,Pottie 诠释了无线传感器网络的科学意义,美国国防部投入巨资启动“超视距”战场监控的 SensIT 项目,标志着无线传感器网络的兴起。无线传感器网络最早的代表性论述出现在 1999 年,题为“传感器走向无线时代”。随后在美国的移动计算和网络国际会议上,提出“无线传感器网络是下一个世纪面临的发展机遇”的论断。由于无线传感器网络具有重要的应用价值,引起了世界许多国家的军事部门、工业界和学术界的极大关注。针对无线传感器网络研究较为深入的是美国、欧洲各国及日本、韩国。

美国自然科学基金委员会于 2003 年制定了传感器网络研究计划,投入大量资金用于支持相关基础理论的研究,较著名的研究项目有加州大学伯克利分校的 Smart Dust 研究项目,Sun 实验室的 SPOT 和麻省理工学院 AMPS 项目等。其中,加州大学伯克利分校提出应用网络连通性重构传感器位置的方法,并研制了一套传感器操作系统——TinyOS;南加州大学 Heide-mann J, Silva F 等提出在生疏环境部署移动传感器的方法、无线传感器网络监视结构及其聚集函数计算方法和节省能源的计算聚集树构造算法等;IrisNet 是 Intel 公司与美国卡耐基-梅

隆大学合作开发的技术,其主要设想是利用 XML 语言将分散于全球传感器网络上的数据集集中起来,并加以灵活利用;在传感器网络通信协议的研究方面,美国康奈尔大学、南加州大学 Heidemann J, Silva F 等对无线传感器网络通信协议进行研究,先后提出基于谈判类协议、定向发布类协议、能源敏感类协议、多路径类协议等新的通信协议;在感知数据查询处理技术研究方面,康奈尔大学对感知数据查询处理技术进行研究,研制了一个测试感知数据查询技术性能的 COUGAR 系统;南加州大学 Heidemann J, Silva F 等研究了无线传感器网络上的聚集函数的计算方法,提出节省能源的计算聚集的树构造算法,并通过实验证明恶劣无线通信机制对聚集计算的性能有很大影响。

此外,美国军方投入大量资金对无线传感器相关技术进行研究,比如,将无线传感器网络整合进未来战争中的灵巧传感器网络和沙地直线无线传感器网络,确立了“灵巧传感器网络通信计划”、“战场环境侦察与监视系统”和“无人值守地面传感器群”等多个项目,利用无线传感器网络了解战场态势、获取更广阔视野、帮助制定战斗行动方案等。在工商界,美国 Crossbow 公司利用 Smart Dust 项目的成果开发出 Mote 智能传感器节点,以及用于研究机构二次开发的 MoteWork™ 开发平台。

英国、加拿大、德国、芬兰和意大利等发达国家的研究机构较早加入了传感器网络的研究。其中德国对无线传感器技术的研究和应用一直走在欧洲的前列,2008 年初的欧洲第一届“无线传感器网络论坛”就在德国首都柏林举行。这里聚集了一批像 Siemens、EnOcean 等具有强大研发力量的世界知名企业致力于此技术的研发和商用化推进。此外,欧盟第 6 个框架计划将“信息社会技术”作为优先发展领域之一,并于 2008 年初正式成立欧洲微纳制造技术平台(MINAM),多处涉及对 WSN 的研究。Philips、Ericsson、ZMD、France Telecom 和 Chipcon 等公司也都在对 WSN 进行研发,力图在相关应用领域为用户提供 WSN 的解决方案。

在亚洲,日本是较早进行无线传感器网络研究的国家之一,日本的企业在相关研究中起到了积极的作用。2004 年,日立制作所与 YRP 泛在网络化研究所宣布开发出全球体积最小的传感器网络终端,该终端可以搭载温度、亮度、红外线和加速度等各种传感器,可应用于大型楼宇和普通家庭的日常安全管理之中。日前,三菱电机成功开发了一种用于传感器网络的小型低功耗无线模块,能够使用特定小功率无线通信构筑对等网络,目标是取代目前利用专线构筑的家用安全网络,通过与红外线传感器配合检测是否有人、与加速度传感器配合检测窗玻璃和家具的振动、与磁传感器配合检测门的开关等功能。

此外,韩国信息通信部制定了信息技术“839”战略,其中“3”是指 IT 产业的三大基础设施,即宽带融合网络、泛在传感器网络和下一代互联网协议。韩国政府将无线传感器网络纳入战略计划之中,每年投入大量资金,支持多个实验室和多家公司研发此项技术。

我国对无线传感器网络的研究也十分重视。1999 年,中国科学院在《信息与自动化领域研究报告》中正式提出对于无线传感器网络进行研究的构想,无线传感器网络是该领域提出的五个重大项目之一。国家自然科学基金委员会在 2003 年、2004 年都设立了无线传感器网络相关研究课题。2004 年 3 月,中国科学院和香港科技大学成立了联合实验室,开展传感器网络的研究工作,目标是开展涵盖无线传感器网络研究领域从基础层到应用层所有层次的研究。2006 年,国家制定的未来 15 年《中长期科学与技术发展规划纲要》中为信息技术确定了三个前沿方向,其中两个与 WSN 的研究直接相关,即智能感知技术和自组织网络技术。之后,在国家自然科学基金、国家 863 计划、国家 973 计划等支持下,国内的研究机构包括中国科学技术大学、清华大学、浙江大学、中国科学院计算所、中国科学院合肥智能所、东北大学等单位积

积极开展无线传感器网络领域的研究,并取得了重要进展。较早进行无线传感器网络相关研究的机构还包括中国科学院软件所、自动化所,以及国防科学技术大学、哈尔滨工业大学、北京邮电大学、西北工业大学等单位。

清华大学理论计算机科学研究中以 863 项目“农业生物——环境信息获取与无线传感器网络技术研究”为平台,研究应用无线传感器网络技术实现远程农业信息的获取,取得丰富的科研成果和应用经验;在“FLOWS”项目中,清华大学与香港大学合作开发出低成本灵活的无线传感器节点和演示系统供学术和实际应用;中国科技大学计算机科学技术系以环境监测、矿山安全和军事侦察等实际系统为研究背景,自主研发了能够支持 IPv6 和通信保密的低功耗传感器节点,相应的基于 IPv6 的无线传感网络环境监测系统已投入实际应用;东北大学人工智能与机器人研究所针对大型建筑灾难救援系统效率低、可靠性差等瓶颈性问题,提出基于无线传感器网络的建筑灾难信息感知系统。该系统可以实时探测灾难蔓延的趋势和被困人员的位置,为救援人员提供第一手灾难信息并为其做出辅助决策,极大地提高救援效率。另外,一些国内企业也加入无线传感器网络的研究之中,如宁波中科、深圳天智和成都无线龙等企业一直致力于提供无线传感器网络实用和创新的产品及解决方案。

目前,无线传感器网络研究已逐渐走出节点软硬件体系设计和分层通信协议开发的初级阶段,进入面向应用的整体解决方案研究的高级阶段,侧重于对无线传感器网络节点群体行为的研究,如无线传感器网络信息处理、数据聚合、网络部署与覆盖等问题的研究。

1.3.3 无线传感器网络未来趋势

移动传感器网络是一个集环境感知、动态决策与规划、行为控制与执行等多种功能于一体的综合系统,具有很强的应用相关性,不同应用需要配置不同的网络模型、软件系统与硬件平台。随着技术的发展,移动传感器网络的应用与研究呈现出节点体积小、成本低、能耗少、通信能力强、可维护性和可扩展性好、稳定性和安全性高等趋势。

(1) 成本低。在一个完整的无线传感器网络中,包含成百上千甚至成千上万的传感节点,如何在不影响网络性能的前提下降低节点成本,是无线传感器网络从实验走向实用的关键。

(2) 节点的耗能少。传感节点能量有限,而节点的能量又与网络的寿命紧密联系。目前常见的解决方案为使用高能电池,理想的情况是让节点具备自我收集能量的功能,太阳能及其他自动收集能量技术的开发使用将使无线传感器网络的传感节点寿命更持久。

(3) 安全性能提高。无线传感器网络在实际应用中往往处于环境恶劣、人力不可到达的区域,而且越来越多的应用于军事领域,处于敌方阵地进行探测,难以进行保护或者维修。因此,在设计网络协议时,对保密性提出了更高的要求。针对这一问题,很多科研机构正在进行相关的研究,相信在不远的将来会有所突破,从而使无线传感器网络获得更广泛的应用。

未来的无线传感器网络、移动通信和互联网的融合,使传感器网络信息的传输更加便捷,可以广泛地应用于科学研究与工业生产中,以更高、更快、更准确的方式为人们传输数据和信息,形成一个庞大的物联网络,涉及人类日常生活和社会生产活动的多个领域,改变人类的生活和生产方式。

1.4 无线传感器网络主要应用领域

随着关键技术的深入研究,传感器网络正逐渐深入人类生活的各个领域,如军事、环境监

测和预报、健康护理、智能家居、建筑物状态监控、复杂机械监控、城市交通、空间探索、大型车间和仓库管理以及机场、大型工业园区的安全监测等。目前,无线传感器网络的应用主要集中在以下领域。

1.4.1 军事领域

无线传感器网络技术具有密集型、随机分布的特点,适合应用于恶劣的战场环境中,受到军事发达国家的普遍重视。美国国防部已投入大量的资金支持进行“智能尘埃”传感器技术的研发。

无线传感器网络在军事领域的典型应用有以下几个方面:

(1) 掌握双方军事情况。通过人员和装备附带各种传感器,以及在敌方阵地部署各种传感器等方式,掌握己方和敌方状态及敌方武器部署情况,为己方确定进攻目标和进攻路线提供依据。

(2) 战场监视。将 WSN 部署在敌军驻地和可能的进攻路线上,密切监视敌军的行动,争取宝贵时间,并可根据战况迅速调整和部署新的传感器网络。通过飞机或炮弹直接将传感器节点布撒到敌方阵地内部,或者在公共隔离带部署传感器网络,能够在近距离隐蔽并准确地收集战场信息。

(3) 战果评估。收集战斗目标被破坏程度和损失的评估数据。

(4) 核攻击、生物攻击、化学攻击的检测与侦查。借助无线传感网络获取核、生化爆炸现场的详细数据,可以及早发现己方阵地上的核、生化污染,提供快速反应时间,从而减少损失。

(5) 目标瞄准。可以将 WSN 综合到智能军事装备的引导系统中,实现目标的精确瞄准。传感器网络可以通过分析采集到的数据,得到准确的目标定位信息,从而为火控和制导系统提供精确指导。

(6) 基础设施安全。可用于基础设施安全和反暴。如电厂、通信中心之类通信建筑和设施的保护,可以在这些重要建筑和设备周围布置视频网络、声控网络以及对其他 WSN 节点进行监测,使其免受恐怖分子的袭击。

1.4.2 环境监测领域

随着社会的快速发展,人们对环境问题的关注程度越来越高,需要采集的环境数据也越来越多。无线传感器网络的发展为随机性的环境监测提供便利条件,能够避免传统数据收集方式给环境带来的侵入式破坏,可以广泛用于监测海洋、大气和土壤的成分,对生物的生活状况进行监测,以及行星探测、气象和地理监测、洪水监测等。

无线传感器网络在环境监测领域的典型应用有以下几个方面:

(1) 环境及栖息地的监视。通过在预定区域布置传感器节点,采集监测区域内的相关数据。此种方式克服了采集生态环境数据时对敏感野生动物及其栖居地监测的困难,大大减少了生态环境研究人员的工作量,使无入侵式和无破坏式生态环境监测工作方式成为可能,使无线传感器网络在生态环境检测方面的应用具有很大优势。

(2) 洪灾监测及预警。通过在水坝、山区中关键地点合理地布置一些水压、土壤湿度等传感器,可以在洪灾到来之前发布预警信息,从而及时排除险情、减少损失。

(3) 农田管理。在精细农业中,通过在农田中部署一定密度的空气湿度、土壤湿度、土壤肥料含量、光照强度、风速等传感器,可以更好地对农田管理进行微观调控,促进农作物生长。