



物联网核心技术丛书

无线传感器 网络技术

郑 军 张宝贤 编著



- ☑ 融东南大学、中科院等科研院所多年的理论和应用研究
- ☑ 写作大纲由国内**近二十家**与物联网相关的企业、科研机构和知名高校共同讨论完成
- ☑ 本书编写得到了“**感知中国**”**物联网联盟**的大力推动和支持



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

物联网核心技术丛书



东南大学科技出版基金资助

无线传感器网络技术

郑 军 张宝贤 编著



机械工业出版社

本书系统、全面地介绍无线传感器网络的概念、发展现状、无线传感器网络与物联网的区别；重点介绍无线传感器网络组网方面的各种通信协议和关键技术，内容涉及物理层、数据链路层、网络层、传输层的协议和标准，时间同步、拓扑控制、定位、数据融合等技术，以及无线传感器网络与蜂窝网、互联网等网络互联融合的技术；最后介绍无线传感器网络的发展趋势。

本书结构清晰，重点突出，内容充实，集科学性、先进性和实用性于一体，适合目前国内物联网发展过程中对相关核心技术的需求。

本书主要面向从事无线传感器网络研究和实践的科研和工程技术人员，也可作为高等院校通信、网络、计算机、电子和自动化等信息技术专业的高年级本科生和研究生相关课程的教材和参考书，还可作为从事物联网相关领域研究、开发和管理的人员了解无线传感器网络技术的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络技术/郑军，张宝贤编著. —北京：机械工业出版社，2012.2

(物联网核心技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 111 - 37795 - 5

I. ①无… II. ①郑… ②张… III. ①无线电通信 - 传感器
IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 049623 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：郝建伟 罗子超

责任印制：杨 曦

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2012 年 6 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm × 260mm · 15.25 印张 · 376 千字

0001—4000 册

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 37795 - 5

定价：39.80 元



凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010)88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010)68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010)88379649

封面无防伪标均为盗版

读者购书热线：(010)88379203

物联网核心技术丛书

编审委员会

(以姓氏笔画为序)

名誉主任 刘海涛

主 任 马 建

副 主 任 牛志升 杨志强 张宏科 周立军

委 员 马晓东 马华东 牛建伟 王文东 王双全

孙利民 刘 越 刘 军 任 勇 任丰原

朱珍民 吴健康 陈益强 陈灿峰 张宝贤

张 林 郑 军 罗海勇 赵立君 隆克平

钱跃良 徐勇军 梁久楨 彭 力 阚志刚

秘 书 长 胡毓坚

出版说明

伴随工业化向信息化的发展，智能化管理和服务已进入快速发展的阶段，物联网正是在这样的背景下发展起来的新兴产业。物联网被预言其拥有万亿级市场应用前景，已被世界各国作为应对金融危机、振兴经济的重点领域。物联网的发展，将促进传统生产生活方式向现代方式转变，将大大提高生产力，并提升人们的生活质量，极大拓展信息网络和信息技术应用空间，并将成为我国加快培育发展战略性新兴产业的重要突破口和未来经济发展的重要引擎。

为了适应物联网技术发展的新趋势和新特点，以及新时期对物联网专业技术人才培养工作的需要，机械工业出版社邀请来自全国从事物联网相关研究和教学工作的单位，如无锡物联网产业研究院、中国科学院、北京邮电大学、清华大学、东南大学、电子科技大学、北京航空航天大学、江南大学等，以及产业界，如中国移动、国家电网、诺基亚等的首席科学家、校长、院长、资深研究员、教授、高工、研究及教学团队，成立了丛书编委会，共同策划了这套涵盖物联网核心技术的丛书，并且将陆续出版。在编写过程中，得到了无锡市新区管委会、国家传感信息中心管委会、无锡市信息化和无线电管理局等政府机构的支持和指导，特别是得到了“感知中国”物联网联盟的大力推动和支持。

这套丛书将力求做到：内容全面、客观、公正、系统，对物联网产业的发展具有一定的指导意义，有助于促进物联网知识的普及和物联网产业的健康有序发展。通过讲述物联网的概念、作用、本质和发展现状，将给人民大众的工作、生活和学习带来革命性的影响。丛书的出版将对物联网相关产业发展规划的制定、物联网应用的推广、物联网知识的普及起到有益的促进作用，将使更多的人通过了解物联网进而投身物联网的研究与应用，从而助力于推动物联网技术及产业在中国的发展。

这套丛书的选题是开放式的。随着物联网技术日新月异的发展，我们将不断更新和补充选题，使这套丛书及时反馈物联网领域的新发展和新技术。我们也欢迎在科研、生产和教学第一线有丰富经验的科技人员和教师积极参与这项工作。

物联网技术发展迅速而且涉及领域非常宽，这套丛书的选题和编审如有缺点和不足之处，诚恳希望各位读者提出宝贵意见，以利于今后不断改进。

机械工业出版社

前 言

进入 21 世纪以来,随着信息技术与感知技术的快速发展,以及人们对于物理世界信息需求的不断增长,物联网作为一种能够实现物与物之间广泛和普遍互联的新型网络,正在受到世界各国越来越广泛的关注和重视。目前,业界普遍认为,物联网将继续计算机、互联网和移动通信之后掀起一次新的信息产业革命,成为未来社会进步和发展的重要基础设施,将给人们的日常生活带来翻天覆地的变化。

无线传感器网络作为物联网的“末梢神经”,是一种综合信息采集、处理和传输功能于一体的智能网络信息系统。无线传感器网络由大量传感器节点组成,这些传感器节点被部署在指定的地理区域,通过无线通信和自组织方式形成无线网络,能够实时感知与采集指定区域内的各种环境数据和目标信息,并将所感知与采集到的数据和信息传送给监控中心或终端用户,实现对物理世界的感知、人与物理世界之间的通信和信息交互。如果说互联网的出现改变了人与人之间的沟通方式,那么无线传感器网络的出现将改变人类与自然界之间的交互方式,使人类可以通过无线传感器网络直接感知客观世界,极大地提高人类认识、改造物理世界的能力。因此,无线传感器网络在民用和军事领域具有十分广阔的应用前景。在民用领域,无线传感器网络可以应用于环境监测、工业控制、医疗健康、智能家居、科学探索、抢险救灾和公共安全等方面;在军事领域,无线传感器网络可以应用于国土安全、战场监视、战场侦察、目标定位、目标识别、目标跟踪等方面。

无线传感器网络能够实现对物理世界的感知,是实现物联网的重要基础。无线传感器网络技术涉及微电子、网络通信和嵌入式计算等主要技术,是当前国际上备受关注的、多学科交叉的一个前沿热点研究领域。由于无线传感器网络拥有广阔的应用前景,近年来引起了国际上许多国家的高度重视。1999 年,美国《商业周刊》将无线传感器网络技术列为 21 世纪最重要的 21 项技术之一,认为这一技术将对未来社会进步和人类生活产生巨大影响,极大地改变人们的生活、工作以及人与物理世界交互的方式。因此,无线传感器网络在过去的十多年中得到了广泛、深入的研究,并在基础理论、关键技术和实际应用等方面取得显著的成果。然而,尽管一些商用的无线传感器网络系统已经出现,并开始投入实际应用,无线传感器网络在传感器、组网、节能、可靠性等技术方面仍然受到许多限制,特别是针对物联网发展来说,许多相关技术和问题还有待进一步探索、研究和解决。

本书作为《物联网核心技术丛书》中的主要专著之一,从物联网核心技术的角度,系统、全面地介绍无线传感器网络的概念、发展现状、所面临的主要技术挑战及其未来发展。全书分为 12 章。第 1 章介绍无线传感器网络的概念、特征、关键技术、设计目标、应用领域、发展概况以及在物联网中所处的地位和作用;第 2 章介绍无线传感器网络的体系架构,包括节点结构、网络结构和协议栈等;第 3 章介绍无线传感器网络 MAC 协议;第 4 章介绍无线传感器网络路由协议;第 5 章介绍无线传感器网络传输协议;第 6 章介绍无线传感器网

络的时间同步技术；第7章介绍无线传感器网络的拓扑控制技术；第8章介绍无线传感器网络的定位技术；第9章介绍无线传感器网络的数据融合技术；第10章介绍无线传感器网络协议标准；第11章介绍无线传感器网络与蜂窝网、互联网的互联融合技术；第12章介绍和讨论无线传感器网络的发展趋势。本书结构清晰，重点突出，内容充实，集科学性、先进性和实用性于一体，适应目前国内物联网发展过程中对相关核心技术的需求。

本书第1~3、6~10章由郑军编写，第4、5、11、12章由张宝贤编写。作者多年从事无线传感器网络领域的理论和应用研究，在国内外最新研究成果的基础上，结合自身研究工作的体会与总结，精心编写了本书，希望能够给读者带来一些有益的启迪和帮助。

本书的出版得到了东南大学科技出版基金资助。本书作者的研究工作得到了国家自然科学基金项目（No. 61071115 和 No. 61173158）和教育部博士点基金项目（No. 20110092110007）的资助。在此一并表示感谢。

本书撰写过程中，得到了东南大学童慧、吴旭和中科院研究生院郝洁、田锐、余晟等人的帮助，同时，也得到了家人的鼓励和支持，在此表示感谢。

由于时间仓促，在撰写过程中难免出现不准确或疏漏的地方，敬请读者批评指正。

编者

目 录

出版说明

前言

第 1 章 概述	1
1.1 无线传感器网络的概念与特征	1
1.1.1 无线传感器网络的概念	1
1.1.2 无线传感器网络的特征	2
1.2 无线传感器网络的关键技术	4
1.2.1 微机电系统技术	4
1.2.2 无线通信技术	4
1.2.3 硬件与软件平台	5
1.3 无线传感器网络的设计目标	6
1.4 无线传感器网络的应用领域	8
1.4.1 环境监测	8
1.4.2 国防军事	8
1.4.3 工业监控	9
1.4.4 健康医疗	9
1.4.5 智能家居	9
1.4.6 公共安全	10
1.5 无线传感器网络的发展与现状	10
1.5.1 无线传感器网络的发展历程	10
1.5.2 无线传感器网络的研究现状	11
1.6 无线传感器网络与物联网	12
1.6.1 物联网的概念	12
1.6.2 无线传感器网络与物联网的区别	13
1.7 本章小结	15
参考文献	15
第 2 章 无线传感器网络的体系结构	18
2.1 无线传感器节点结构	18
2.2 无线传感器网络结构	19
2.2.1 单跳网络结构	19
2.2.2 多跳网络结构	19
2.3 无线传感器网络分类	21

2.3.1	单跳网络和多跳网络	21
2.3.2	静止网络和移动网络	21
2.3.3	确定性网络和非确定性网络	22
2.3.4	静止汇聚节点网络和移动汇聚节点网络	22
2.3.5	单汇聚节点网络和多汇聚节点网络	22
2.3.6	同构网络和异构网络	22
2.4	无线传感器网络协议栈	22
2.4.1	应用层	23
2.4.2	传输层	23
2.4.3	网络层	24
2.4.4	数据链路层	24
2.4.5	物理层	25
2.5	无线传感器网络体系结构设计准则	26
2.6	本章小结	27
	参考文献	27
第3章	无线传感器网络的 MAC 协议	29
3.1	概述	29
3.1.1	无线传感器网络 MAC 协议的特点	29
3.1.2	无线传感器网络 MAC 协议的分类	30
3.2	无线传感器网络 MAC 协议设计	33
3.2.1	设计目标	33
3.2.2	节能设计	34
3.2.3	技术挑战	34
3.3	无线传感器网络的 MAC 协议	35
3.3.1	竞争型 MAC 协议	36
3.3.2	非竞争型 MAC 协议	42
3.3.3	混合型 MAC 协议	46
3.4	本章小结	48
	参考文献	49
第4章	无线传感器网络的路由协议	51
4.1	概述	51
4.1.1	无线传感器网络路由协议的特点	51
4.1.2	无线传感器网络路由协议的分类	52
4.2	无线传感器网络路由协议设计	53
4.2.1	设计目标	54
4.2.2	技术挑战	54
4.3	无线传感器网络的路由协议	55
4.3.1	基于分层的路由协议	55
4.3.2	基于能量的路由协议	59

4.3.3	基于位置的路由协议	61
4.3.4	基于移动性的路由协议	64
4.3.5	基于机会的路由协议	68
4.3.6	基于多路径的路由协议	71
4.3.7	数据为中心的路由协议	73
4.4	无线传感器网络的组播路由协议	78
4.4.1	基于树的组播路由协议	78
4.4.2	基于位置的组播路由协议	79
4.4.3	基于能量的组播路由协议	80
4.4.4	基于地域群播的组播路由协议	81
4.5	本章小结	82
	参考文献	82
第5章	无线传感器网络的传输协议	85
5.1	概述	85
5.1.1	无线传感器网络传输协议的特点	86
5.1.2	无线传感器网络传输协议的分类	87
5.2	无线传感器网络传输协议设计	88
5.2.1	设计目标	88
5.2.2	技术挑战	89
5.3	无线传感器网络的拥塞控制基本机制	89
5.3.1	拥塞避免机制	90
5.3.2	拥塞消除机制	90
5.4	无线传感器网络的可靠传输基本机制	92
5.4.1	丢包恢复机制	92
5.4.2	冗余传输机制	93
5.4.3	速率控制机制	93
5.5	无线传感器网络的典型传输协议	93
5.5.1	拥塞控制协议	94
5.5.2	可靠传输协议	98
5.5.3	拥塞控制和可靠传输混合协议	103
5.6	本章小结	104
	参考文献	104
第6章	无线传感器网络的时间同步技术	106
6.1	概述	106
6.1.1	无线传感器网络时间同步的必要性	106
6.1.2	无线传感器网络时间同步的特点	107
6.1.3	无线传感器网络时间同步的技术挑战	108
6.2	时间同步的概念与原理	108
6.2.1	时钟模型	108

6.2.2	时钟同步的定义	109
6.2.3	时钟同步的策略	110
6.3	无线传感器网络的时间同步协议	111
6.3.1	基本同步协议	111
6.3.2	多跳同步协议	115
6.3.3	长期同步协议	118
6.4	本章小结	119
	参考文献	120
第7章	无线传感器网络的拓扑控制技术	121
7.1	概述	121
7.1.1	无线传感器网络拓扑控制的概念	121
7.1.2	无线传感器网络拓扑控制的必要性	121
7.1.3	无线传感器网络拓扑控制的技术挑战	122
7.2	基于功率控制的拓扑控制机制	123
7.2.1	基于节点度的功率控制算法	123
7.2.2	基于邻近图的功率控制算法	124
7.3	基于层次结构的拓扑控制机制	126
7.3.1	自适应分簇算法	126
7.3.2	分布式分簇算法	129
7.4	本章小结	131
	参考文献	131
第8章	无线传感器网络的定位技术	133
8.1	概述	133
8.1.1	无线传感器网络节点定位的必要性	133
8.1.2	无线传感器网络定位技术的特点	134
8.1.3	无线传感器网络节点定位的技术挑战	134
8.2	无线传感器网络定位技术基础	134
8.2.1	节点定位的基本概念	135
8.2.2	定位系统的基本组成	135
8.2.3	节点定位的测距技术	136
8.2.4	节点位置的计算方法	137
8.2.5	节点定位的性能指标	139
8.3	无线传感器网络的定位算法	140
8.3.1	基于测距的定位算法	140
8.3.2	无需测距的定位算法	143
8.4	本章小结	149
	参考文献	149
第9章	无线传感器网络的数据融合技术	151
9.1	概述	151

9.1.1 无线传感器网络数据融合的概念	151
9.1.2 无线传感器网络数据融合的必要性	152
9.1.3 无线传感器网络数据融合的技术挑战	152
9.2 无线传感器网络的数据融合方法	153
9.3 无线传感器网络的数据融合策略	154
9.3.1 基于路由的数据融合	154
9.3.2 基于树的数据融合	156
9.3.3 基于分簇的数据融合	158
9.3.4 基于移动代理的数据融合	160
9.4 本章小结	161
参考文献	161
第10章 无线传感器网络的协议标准	163
10.1 概述	163
10.2 IEEE 802.15.4 标准	164
10.2.1 IEEE 802.15.4 标准概述	164
10.2.2 物理层规范	165
10.2.3 MAC 层规范	166
10.3 ZigBee 标准	172
10.3.1 ZigBee 标准概述	173
10.3.2 网络层规范	175
10.3.3 应用层规范	181
10.4 本章小结	183
参考文献	184
第11章 无线传感器网络与蜂窝网、互联网的互联融合	185
11.1 概述	185
11.2 无线传感器网络的特征及其对网络互联融合的影响	186
11.2.1 无线传感器网络的特征	186
11.2.2 无线传感器网络特征对网络互联融合的影响	187
11.3 无线传感器网络与蜂窝网的互联融合	188
11.3.1 互联融合的网络架构	188
11.3.2 互联融合的关键技术	190
11.3.3 互联融合的 M2M 平台	191
11.4 无线传感器网络与互联网的互联融合	193
11.4.1 互联融合的网络架构	193
11.4.2 互联融合的关键技术	194
11.4.3 互联融合的 6LoWPAN 体系架构	196
11.5 本章小结	199
参考文献	199
第12章 无线传感器网络的发展趋势	201

12.1	概述	201
12.2	无线传感器网络的总体趋势	201
12.2.1	应用多样性	202
12.2.2	可管理性	203
12.2.3	技术标准化	203
12.2.4	网络互联融合	204
12.3	无线多媒体传感器网络	204
12.3.1	网络特征	204
12.3.2	网络应用	205
12.3.3	网络结构	206
12.3.4	关键技术	206
12.4	无线容迟传感器网络	208
12.4.1	网络特征	208
12.4.2	网络应用	209
12.4.3	网络结构	211
12.4.4	关键技术	212
12.5	无线传感器与执行器网络	213
12.5.1	网络特征	213
12.5.2	网络应用	213
12.5.3	网络结构	214
12.5.4	关键技术	215
12.6	无线传感器网络的标准化趋势	216
12.6.1	国内标准化工作现状和趋势	216
12.6.2	国际标准化工作现状和趋势	217
12.7	本章小结	219
	参考文献	220
附录		223
附录 A	英汉术语对照表	223
附录 B	英汉缩略语对照表	225

第1章 概述

无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN）是一种综合信息采集、信息处理和信息传输功能于一体的智能网络信息系统。这种网络信息系统能够实时感知和采集各种环境数据和目标信息，实现人与物理世界之间的通信与信息交互，在军事和民用领域有着十分广阔的应用前景。无线传感器网络技术是实现物联网（The Internet of Things, IoT）的重要基础，它涉及微电子、网络通信和嵌入式计算等主要技术，是当前国际上备受关注的、多学科交叉的一个前沿热点研究领域。本章介绍无线传感器网络的概念与特征、关键技术、设计目标、应用领域，以及发展与现状，并介绍无线传感器网络与物联网之间的关系。

1.1 无线传感器网络的概念与特征

无线传感器网络是一种新型的无线网络，与传统的无线网络相比，它自身有许多特点。本节简要介绍无线传感器网络的基本概念及其主要特征。

1.1.1 无线传感器网络的概念

随着微机电系统（Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS）、无线通信和嵌入式计算等技术的不断进步和日益成熟，低成本、低功耗、多功能的微型传感器近年来得到了快速发展，其在微小的体积内能够集成传感器、嵌入式微处理器和无线收发器等器件，不仅具备信息采集的能力，同时也具备数据处理的和无线通信的能力。无线传感器网络是一种由大量这样的微型传感器节点组成的面向任务的无线自组织网络系统。这些传感器节点被密集部署在某个指定的地理区域内，通过无线通信和自组织方式形成多跳的无线网络，用来感知、采集和处理所监测区域内的各种环境数据或目标信息，并将所感知和采集到的数据和信息传送给监控中心或终端用户，协作完成指定的任务^[1-2]。通过采用不同类型的传感器，无线传感器网络可以测量温度、湿度、亮度、噪声、压力、移动物体的大小、速度和方向等各种不同的物理信息。

无线传感器网络是一种新型的信息感知和数据采集网络系统，它能够在任何时间、任何地点和任何环境条件下获取各种详尽、准确的环境数据或目标信息，实现对物理世界的感知、人与物理世界之间的通信和信息交互。如果说互联网的出现改变了人与人之间的沟通方式，那么无线传感器网络的出现将改变人类与自然界之间的交互方式，使人类可以通过无线传感器网络直接感知客观世界，极大地提高人类认识和改造物理世界的能力。因此，无线传感器网络在民用和军事领域具有十分广阔的应用前景。在民用领域，无线传感器网络可以应用于环境监测、工业控制、健康医疗、智能家居、科学探索、抢险救灾和公共安全等方面；



在军事领域,无线传感器网络主要应用于国土安全、战场监视、战场侦察、目标定位、目标识别和目标跟踪等方面^[3]。

由于无线传感器网络广阔的应用前景,近年来引起了国际上许多国家的高度重视。1999年,美国《商业周刊》将无线传感器网络技术列为21世纪最重要的21项技术之一,认为这一技术将对未来社会进步和人类生活产生巨大的影响^[4]。可以预计,随着无线传感器网络技术的不断发展,各种无线传感器网络应用将在各个领域得到广泛的应用,极大地改变人们的生活、工作以及和物理世界交互的方式^[5]。

1.1.2 无线传感器网络的特征

无线传感器网络是一种面向任务的无线自组织网络系统,通常由大量密集部署在某个监测区域的传感器节点以及一个或多个位于区域内或区域附近的数据汇聚节点组成,如图1-1所示。这些传感器节点体积小,但配备有传感器、嵌入式微处理器和无线收发器等器件,集信息采集、数据处理和无线通信等功能于一体,能够通过无线通信和自组织方式形成网络,对监测区域内的各种环境数据或目标信息进行监测和处理,并将所监测到的数据和信息传送给汇聚节点,协作完成指定的监测任务。同时,传感器节点还可以通过汇聚节点作为网关,连接到现有的网络基础设施上(如互联网、卫星网、移动通信网等),从而将采集到的数据和信息传送给远程的监控中心或终端用户使用。

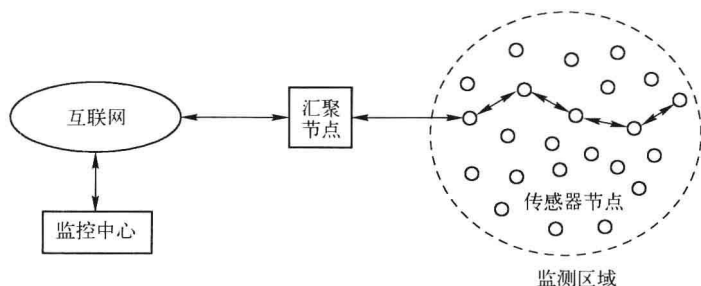


图 1-1 无线传感器网络基本结构示意图

无线传感器网络是一种特殊的无线自组织网络,它与传统的无线自组织网络有许多类似之处,主要表现在自组织特性、分布式控制、拓扑动态性等方面。

(1) 自组织特性

在许多无线传感器网络应用中,传感器节点通常是随机部署的,节点的位置和节点间的相邻关系预先无法确定。例如,通过飞机将大量传感器节点撒播在面积广阔的原始森林或用火炮将传感器节点投射到敌方战区。因此,传感器节点需要具有自组织能力。在部署后,能够在任何时间、任何地点自动构建或多跳的无线网络,组网不依赖任何固定网络设施,并且能够在网络拓扑发生变化的情况下自动重构网络。

(2) 分布式控制

无线传感器网络没有严格的控制中心,所有传感器节点地位平等,节点之间通过分布式控制协调工作,是一个分布式感知网络。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,具有很强的抗毁性。

(3) 拓扑动态性

无线传感器网络的拓扑结构会由于各种不同的因素而频繁发生变化。例如,环境条件的变化会影响无线信道的质量,造成通信链路的间断。传感器节点由于工作环境恶劣容易损坏,并随时可能由于各种原因发生故障而失效,节点会由于能量耗尽而死亡,节点会加入或离开网络,某些节点和监测目标具有移动性等。所有这些情况的发生都会使网络的拓扑结构发生变化。因此,无线传感器网络的拓扑结构具有很强的动态性。

但是,无线传感器网络与传统的无线自组织网络也存在较大差别,主要表现在网络规模大、节点能力受限、节点可靠性差、多对一传输模式、应用相关性、冗余度高、以数据为中心等方面^[1-2]。

1) 网络规模大。为了保证网络有效、可靠地工作,获取准确的监测数据或目标信息,无线传感器网络通常需要大规模地部署在指定地理区域。这里,大规模主要包括两个方面的含义:一方面是传感器节点分布的区域范围大且节点数量多。例如,在原始森林采用传感器网络进行森林防火或环境监测,需要部署大量传感器节点,数量成千上万;另一方面,传感器节点部署的密度高,在一个很小的区域范围内,密集部署了许多传感器节点。与传统无线自组织网络相比,其节点的数量和密度均有若干数量级的提高。无线传感器网络不是依靠单个节点的能力,而是通过大量冗余节点的协同工作来完成所指定的任务。

2) 节点能力受限。传感器节点通常由电池供电。由于传感器节点的微型化,节点的电池容量十分有限。而且在大多数情况下,传感器节点被部署在恶劣或敌对的环境下,更换电池或给电池充电非常困难或不可能。因此,传感器节点的能量十分受限,这对节点的工作寿命和网络的生存时间具有决定性的影响。同时,传感器节点低成本、微型化的要求大大限制了节点的处理能力和存储容量,使其不能进行复杂的计算。此外,传感器节点在体积、能量方面的限制会在很大程度上影响节点的通信能力。

3) 节点可靠性差。无线传感器网络通常部署在恶劣或敌对的环境中,传感器节点往往在无人值守的状态下工作,这使得节点和网络的维护变得十分困难,甚至不可能。因此,传感器节点容易损坏或发生故障。

4) 以数据为中心。无线传感器网络是一个以数据为中心的网络,用户通常只关心指定区域内所监测对象的数据,而不关心某个具体节点所监测到的数据。用户在查询数据或事件时,通常直接将所关心的对象或事件发布给网络,而不是传送给网络中某个具体的节点,网络在获取指定对象或事件的信息后汇报给用户。这就是无线传感器网络以数据为中心的特点,它不同于传统网络的寻址过程,能够快速、有效地收集各个节点的信息,融合提取出有用信息并直接传送给终端用户。

5) 多对一传输模式。在无线传感器网络中,节点所监测和采集到的信息和数据通常由多个源节点向一个汇聚节点传送,呈现为多对一的数据传输模式。这种数据传输模式与传统网络中的模式有着明显的不同。

6) 冗余度高。无线传感器网络通常采用大量传感器节点协同完成指定的任务,这些节点被密集地部署在指定的地理区域,多个传感器节点所获取的数据和信息通常具有较强的相关性和较高的冗余度。



7) 应用相关性。无线传感器网络是一种面向任务或应用的网络,不同的传感器网络应用关心不同的物理量,对网络的设计有不同的要求,其硬件平台、软件系统和网络协议也必然有很大差别。因此,无线传感器网络不可能像互联网那样采用统一的通信协议。传感器网络的设计通常需要针对具体的应用进行,这是传感器网络设计区别于传统网络设计的明显特征。

1.2 无线传感器网络的关键技术

无线传感器网络的基本概念最初在 30 年前已经被提出^[3]。当时,由于传感器、计算机和无线通信等技术的限制,这一概念只是一种想象,还无法成为能够广泛应用的一种网络技术,其应用主要局限于军用系统。近年来,随着微机电系统、无线通信技术和低成本制造技术的进步,使得开发与生产具有感知、处理和通信能力的低成本智能传感器成为可能,从而促进了无线传感器网络及其应用的迅速发展。

1.2.1 微机电系统技术

微机电系统技术是制造微型、低成本、低功耗传感器节点的关键技术。这种技术建立在制造微米级机械部件的微型机械加工技术基础上,通过采用高度集成工序,能够制造出各种机电部件和复杂的微机电系统。微型机械加工技术有不同的种类,如平面加工、批量加工、表面加工等,它们采用不同的加工工序^[6-7]。大部分微型机械加工工序都是在一个 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 厚,由硅、晶状半导体或石英晶体组成的基片上,完成一系列加工步骤,比如薄膜分解、照相平版印刷、表面蚀刻、氧化、电镀、晶片接合等,不同的加工工序可以有不同的加工步骤。通过将不同的部件集成到一个基片上,可以大大减小传感器节点的尺寸。采用微机电系统技术,可以将传感器节点的许多部件微型化,比如传感器、通信模块和供电单元等,通过批量生产还可以大大降低节点的成本以及功率损耗。

1.2.2 无线通信技术

无线通信技术是保证无线传感器网络正常运作的关键技术。在过去的数十年中,无线通信技术在传统无线网络领域已经得到广泛的研究,并在各个方面取得了重大进展。在物理层,已经设计出各种不同的调制、同步、天线技术,用于不同的网络环境,以满足不同的应用要求。在链路层、网络层和更高层上,已开发出各种高效的通信协议,以解决各种不同的网络问题,如信道接入控制、路由、服务质量、网络安全等。这些技术和协议为无线传感器网络无线通信方面的设计提供了丰富的技术基础。

目前,大多数传统的无线网络都使用射频(Radio Frequency, RF)进行通信,包括微波和毫米波,其主要原因是射频通信不要求视距(Line of Sight)传输,能提供全向连接。然而,射频通信也有一些局限性,比如辐射大、传输效率低等^[8],因此其不是适合微型、能量有限传感器通信的最佳传输媒体。无线光通信(Optical Radio Communication)是另一种可能适合传感器网络通信的传输媒体。与射频通信相比,无线光通信有许多优点。例如,光发射器可以做得非常小;光信号发射能够获得很大的天线增益,从而提高传输效率;光通信具有很强的方向性,使其能够使用空分多址(Spatial Division Multiple Access, SDMA),减少