

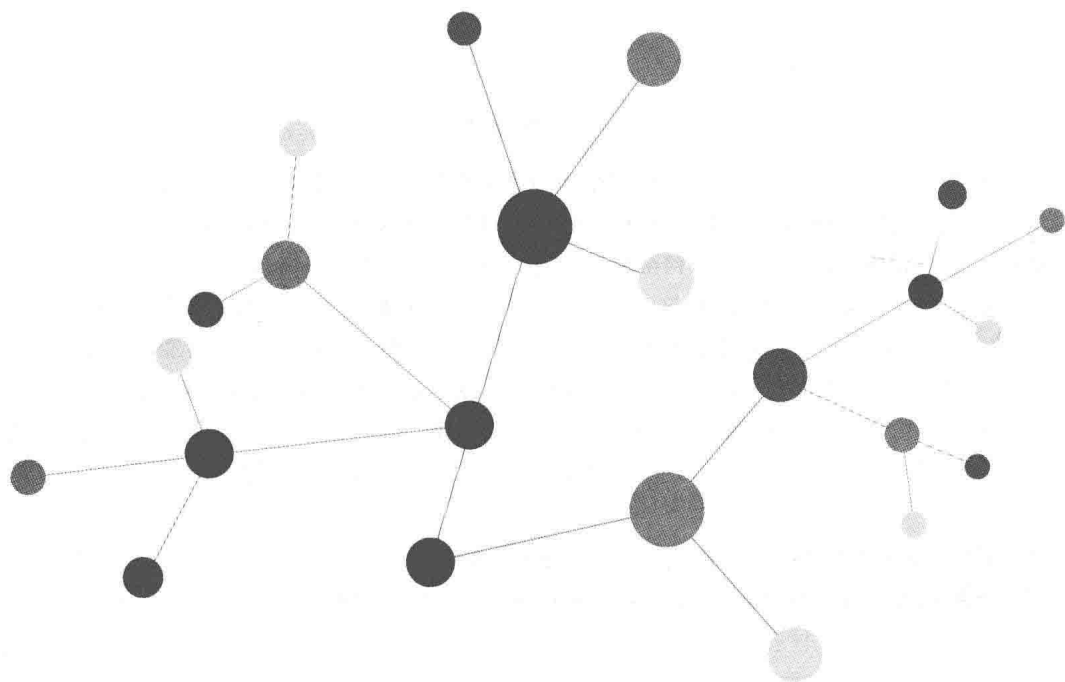
Wireless Sensor Networks
Theory and Applications

无线传感器网络

理论及应用

孙利民 张书钦 李志 杨红 等著

清华大学出版社



Wireless Sensor Networks
Theory and Applications

无线传感器网络

理论及应用



孙利民 张书钦 李志 杨红 等著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书在跟踪国内外无线传感器网络理论和技术发展的基础上,结合在该领域内的研究和实践经验,全面分析了无线传感器网络的基本原理和应用技术,以及无线传感器网络领域的研究和应用成果,具体包括:无线传感器网络的无线传感器网络概述、传感器网络节点、操作系统、无线传感器网络体系结构、无线通信基础、拓扑控制技术、MAC 协议、路由技术、传输控制技术、实用化组网标准协议、感知覆盖、时间同步、定位技术、仿真与测试、安全技术等。本书内容深入浅出、概念清晰,基础与前沿相结合,理论与实践相结合,系统性与新颖性相结合,是一本比较全面、系统、深入的无线传感器网络技术专著。

本书可作为高等院校物联网工程专业,以及计算机类、通信类、信息类、电子类等专业的高年级本科生、研究生教材和教学参考用书,也可供从事相关行业的工程技术人员与研究人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络:理论及应用/孙利民等著. —北京:清华大学出版社,2018
ISBN 978-7-302-49994-7

I. ①无… II. ①孙… III. ①无线电通信—传感器—计算机网络—研究 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 076668 号

责任编辑:薛 慧

封面设计:何凤霞

责任校对:王淑云

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:33.25 字 数:806千字

版 次:2018年8月第1版 印 次:2018年8月第1次印刷

定 价:79.00元

产品编号:078374-01

前言

PREFACE

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由部署在监测区域内的传感器节点,以无线自组织方式构成多跳无线网络,节点间协同地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息。无线传感器网络终端节点的通信距离一般只有几十米,所采集的数据信息通过其他节点以逐跳的方式传输到汇聚节点。物联网是指通过各种信息传感设备,实时采集任何需要监控、连接、互动的物体或过程等各种需要的信息,实现了物与物、物与人、所有的物品与网络的连接。物联网的核心和基础是在互联网基础上的延伸和扩展,并进行物与物的信息交换和通信。无线传感器网络无疑作为物联网的重要组成部分,实现了感知数据的采集、处理和传输功能,它的出现直接推动了物联网的发展。

无线传感器网络的基本思想最初起源于20世纪70年代的军事领域。随着微电子、计算和无线通信等技术的进步,实现了在低功耗、多功能、微小体积的传感器节点上集成信息采集、数据处理和无线通信等多种功能。无线传感器网络节点具有自治能力,能够自主组网,不需要布线,而且节点的低功耗和微型化,能够部署在越来越多的应用场景,可安装在工控设备、运输车辆、历史建筑、林木等之上,甚至可植入到人或其他动物的体内,而伴随着互联网和3G/4G网络的广泛应用,更是能实现无处不在的感知,极大地丰富了人类的感知能力和范围。作为信息时代的一项变革性的技术,无线传感器网络真正实现了“无处不在的计算”理念。

无线传感器网络作为信息技术领域中一个全新的发展方向,同时也是新兴学科与传统学科进行领域间交叉的结果,已经引起了学术界和工业界的广泛关注,相关的研究和应用不断深入。目前在拓扑控制、路由、感知覆盖、时间同步、安全等方面已经产生了一大批成果,并涉及信息论、控制、图论、人工智能等方面的理论。无线传感器网络以其独有的特点和优点使其应用越来越广泛,对于经济 and 生活的很多领域都具有重大的影响和革命性的作用。

无线传感器网络目前正处于蓬勃发展的阶段,已经成为继计算机、互联网与移动通信网之后信息产业新一轮竞争中的制高点,对人们的社会生活和产业变革带来巨大的影响。美国《商业周刊》将无线传感器网络列为21世纪最具影响的21项技术之一,《技术评论》杂志也将其列为未来改变世界的十大新兴技术之首。我国在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中,将无线传感器网络列入重大专项、优先发展主题、前沿领域,它也是国家重大专项“新一代宽带无线移动通信网”中的一个重要研究方向,同时国家重点基础研究发展计划(973计划)也将无线传感器网络列为其重要研究内容。中国政府近年来大力

开展智慧城市建设,无线传感器网络通过遍布城市各个角落的智能传感器感知城市的交通流量、空气质量、噪声等,并根据感知结果来优化交通流量调度、治理雾霾天气等。可以说,无线传感器网络为智慧城市建设提供了基础支撑。

无线传感器网络有越来越多的应用,很多应用都需要进行大规模的部署,以达到高覆盖、高精确感知等目的。如森林火灾监测等,需要部署成千上万的节点来完成监测任务。然而,与小规模应用相比,大规模应用中除了节点数量上的区别外,还会产生能量供应受限、节点管理困难、感知数据流不均衡等一系列问题。因此,在大规模应用时,无线传感器网络及节点显著呈现出应用性、资源受限性、异构性、动态性等特征,导致网络在可扩展性、可靠性、自治性等方面还存在很多挑战。传感器网络涉及多学科交叉的研究领域,应用的多样性和复杂性也决定了有非常多的问题需要解决,非常多的关键技术需要深入研究。不同的问题之间,不同的关键技术之间,常常相互作用,相互影响,需要协同研究。这些研究挑战多归结于无线传感器网络在能效、无线通信质量、计算能力等方面的限制,因此,在系统设计时应该针对这些限制给出方案,如通信协议应该足够轻量化,能耗应该足够少,以适应微型传感器节点在计算和通信等方面的限制。现在已经有大量的文献涉及无线传感器网络的各个方面。而本书各章节是由在无线传感器网络领域具有十多年研究和应用经验的团队撰写,旨在对无线传感器领域的基本概念、挑战、问题、发展趋势、模型和工具提供全面的介绍,展现了学术界和工业界应用的高端水准和应用现状。因此,这本书中展现了无线传感器网络中大量问题的最深入思考、最典型的解决方案和最新的技术进展。

本书比较系统地介绍了无线传感器网络的基础理论、支撑技术和若干应用。全书从结构上可以分为三个部分:第一部分(第1~5章)讨论无线传感器网络的基础知识,第二部分(第6~9章)关注网络支撑技术,第三部分(第10~15章)介绍覆盖、定位、时间同步、安全、实用组网协议、仿真和测试等高级主题。

第1章介绍了无线传感器网络的基本概念、典型应用、主要特征、挑战及关键技术,并讨论了相关的标准化工作,还与其他类型的网络进行了对比分析。

第2章分析了节点硬件的设计需求,介绍了节点的结构和外部接口及设计技术,并探讨了通用、专用、高性能、网关这四类节点的设计特点。

第3章分析了无线传感器网络操作系统的设计要求,以及常用的调度、内存分配、重编程等设计技术,并讨论了 TinyOS 和 Contiki 的实现特点。

第4章分析了无线传感器网络的协议体系结构特点,讨论了几种典型的协议结构,还探讨了无线传感器网络的跨层设计概念,以及全 IP 化、网络管理等方面的内容。

第5章介绍了无线传感器网络相关的无线通信技术,包括基本概念、频谱、媒介、无线信道、调制解调、扩频、多路复用和多路接入等。

第6章介绍了无线传感器网络中拓扑控制的基本概念,以及功率控制、睡眠调度和分簇这三类拓扑控制技术、代表性的算法和协议、拓扑控制技术的发展方向和最新进展。

第7章讨论了无线传感器网络 MAC 协议设计的特点和所面临的挑战,并分类介绍了竞争型、分配型、混合型的 MAC 协议,以及各类协议的优点和缺点。

第8章论述了无线传感器网络自身特点对路由协议设计的影响,描述了多种典型的路由协议,并分析了实用化的路由协议。

第9章具体阐述了无线传感器网络对传输控制协议的设计挑战,并介绍了拥塞控制机制和可靠传输机制的关键技术和一些经典协议。

第10章描述了无线传感器网络系统中应用较为广泛的标准化协议,包括 IEEE 802.15.4、ZigBee、蓝牙、WirelessHART、ISA100、WIA-PA、6LowPAN 等。

第11章介绍了无线传感器网络中覆盖技术的基本概念、主要研究挑战,并分析了点覆盖、区域覆盖和栅栏覆盖三类覆盖问题的经典算法和协议,以及一些新的研究方向。

第12章介绍了无线传感器节点中时间同步的概念、主要研究挑战,并分析了几种代表性的时钟同步协议,以及一些新的研究方向。

第13章展示了无线传感器网络中定位技术的基础知识和基本算法,以及主要研究挑战,并分析了几类定位算法的基本原理和典型实例,以及一些新的研究方向。

第14章从无线传感器网络的系统研发、原型搭建、运行维护和产品商用四个阶段,分别介绍了模拟仿真、系统验证、在线监测和协议测试等技术和工具。

第15章分析了无线传感器网络的主要威胁、安全需求、安全体系,还讨论了密钥管理、身份认证与访问控制、安全定位、入侵检测、容侵与容错、安全路由等安全技术。

本书主要有以下特点:

(1) 基础与前沿相结合。本书注重无线传感器网络的基本概念、基本原理、基本架构、基本协议、典型应用,以及节点硬件构成、典型节点开发平台、操作系统,力求展示出无线传感器网络重要和基础的内容,适合于初学者对无线传感器网络有清楚的认识和理解。书中还在拓扑控制、路由、传输控制等专题中深入地阐述了主要的技术路线及当前的研究成果。

(2) 理论与实践相结合。由于无线传感器网络具有多学科高度交叉的特点,涉及的理论问题多、难度大,书中在阐述各类协议和算法的同时,也结合应用分析了目前在无线传感器网络系统中应用较为广泛的标准化协议,如 IEEE 802.15.4、ZigBee、蓝牙、WirelessHART、ISA 100、WIA-PA、6LowPAN。为使读者对传感器网络仿真与测试技术有一定的理解,书中还专门介绍了无线传感器网络研究和应用中用来进行模拟仿真、系统验证、在线监测和协议测试的产品工具。

(3) 系统性与新颖性相结合。本书涉及无线传感器网络的各个方面,注重内容的系统性,以无线传感器网络的技术体系为叙述框架,从无线传感器网络的基础知识、基本架构开始,层层深入展开论述了各种关键支撑技术,以及建立在基本架构与关键技术之上的应用技术和开发技术,内容全面,体系完整。本书还紧跟无线传感器网络的学科和技术发展动态,

将最近出现的新技术、新手段和新工具融入内容体系,使读者能够了解无线传感器网络的最新技术和应用。

本书由孙利民组织编写,与每章作者深入讨论并进行了最后的修改。张书钦在后期做了大量的整理和修改工作。本书第1、2、4章由孙利民编写,第3、5、10章由张书钦编写,第6、11章由杨红编写,第7、12章由李志编写,第8、9章由李立群编写,第13章由陈永乐编写,第14章由赵忠华编写,第15章由徐静和段美姣合作编写。在本书的编写过程中,得到了许多老师、同学和同事的关心、帮助和指正,在此谨表谢意。特别感谢刘伟、孙玉研、齐庆磊、王小山、易峰等博士提供了诸多材料以及宝贵意见,还要感谢张俊宝博士做了大量审校工作。

本书可作为高等院校物联网工程专业,以及计算机类、通信类、信息类、电子类专业的高年级本科生、研究生教材和教学参考用书,也可供从事相关行业的工程技术人员与研究人员参考。相比其他无线传感器网络书籍,本书的一个重要优点是受众广泛,针对了研究、开发、应用维护等方面的人员。

本书得到了国家自然科学基金委联合基金重点项目(No. U1766215)和北京市科学技术委员会项目(No. Z161100002616032)的资助,在此表示感谢。

由于时间仓促和撰写水平有限,本书的错误和不足在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2018年3月于北京

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 传感器网络的概念	2
1.1.1 传感器及其发展	2
1.1.2 无线传感器网络	5
1.1.3 无线传感器网络的优势	7
1.2 传感器网络的典型应用	7
1.2.1 应用类型	7
1.2.2 典型应用领域	8
1.3 传感器网络的应用特征	13
1.3.1 感知信息收集的任务型网络	13
1.3.2 以数据为中心的网络	13
1.3.3 资源限制的传感器节点	14
1.3.4 可扩展的动态自治网络系统	15
1.3.5 大规模的异构系统	17
1.4 传感器网络关键技术	17
1.4.1 系统设计的挑战	17
1.4.2 关键技术	22
1.5 传感器网络的标准化	30
1.5.1 标准化工作概述	30
1.5.2 IEEE 802.15 标准族	32
1.5.3 基于 IEEE 802.15.4 的协议族	33
1.5.4 其他标准	33
1.6 传感器网络技术的发展	34
1.7 本书章节安排	39
习题	40
参考文献	41
第 2 章 传感器网络节点	43
2.1 设计需求	44

2.2	结构与接口	45
2.2.1	数据通路	46
2.2.2	外部接口	47
2.3	硬件模块	48
2.3.1	传感模块	48
2.3.2	处理器模块	49
2.3.3	无线通信模块	52
2.3.4	能量供应模块	54
2.3.5	存储模块	59
2.4	节能技术	61
2.4.1	动态功耗管理	61
2.4.2	动态电压调节	63
2.5	节点硬件平台	64
2.5.1	通用平台	65
2.5.2	专用平台	68
2.5.3	高性能平台	69
2.5.4	网关平台	71
2.6	本章小结	72
	习题	73
	参考文献	74
第3章	操作系统	77
3.1	概述	78
3.1.1	传感器网络对操作系统的需求	78
3.1.2	传感网络操作系统的设计要素	79
3.2	体系结构	80
3.3	调度	81
3.3.1	事件驱动	81
3.3.2	多线程	82
3.3.3	混合调度结构	83
3.4	文件系统	84
3.5	内存分配	85
3.5.1	静态内存分配	85
3.5.2	动态内存分配	86
3.6	重编程	87
3.6.1	单一映像	88
3.6.2	虚拟机	88
3.6.3	可加载模块	89

3.6.4	增量更新	91
3.7	典型的节点操作系统	92
3.7.1	TinyOS 操作系统	92
3.7.2	Contiki 操作系统	95
3.7.3	常见操作系统的对比分析	99
3.8	本章小结	100
	习题	101
	参考文献	101
第 4 章	无线传感器网络体系结构	105
4.1	网络结构	106
4.1.1	扁平结构与分层结构	106
4.1.2	单 sink 与多 sink	108
4.2	协议体系结构	110
4.2.1	传统的 TCP/IP 分层协议结构	110
4.2.2	二维型传感器网络协议模型	112
4.2.3	细腰型传感器网络协议结构	115
4.3	跨层设计	118
4.3.1	跨层设计的基本概念	118
4.3.2	典型的跨层协议结构	121
4.4	全 IP 化	124
4.4.1	传感器网络全 IP 化的必要性	125
4.4.2	全 IP 化的挑战及标准化工作	126
4.5	网络管理	128
4.5.1	传感器网络管理概述	129
4.5.2	传感器网络管理功能	130
4.5.3	传感器网络管理系统结构	131
4.6	本章小结	136
	习题	136
	参考文献	137
第 5 章	无线通信基础	140
5.1	无线通信技术概述	141
5.2	无线通信频谱	142
5.2.1	电磁频谱	142
5.2.2	ISM 免费频段	143
5.2.3	ISM 频段的干扰与共存性	144
5.3	无线通信媒介	145
5.3.1	无线电波	146

5.3.2	红外线	146
5.3.3	激光	146
5.4	天线	147
5.5	无线电波传播特性	149
5.5.1	无线信号基本传播机制	149
5.5.2	无线信号覆盖范围	150
5.5.3	无线信号强度表示	150
5.6	无线信道传播模型	151
5.7	调制与解调	152
5.7.1	调制与解调基本概念	153
5.7.2	数字调制技术	153
5.8	扩频通信技术	155
5.8.1	直接序列扩频	156
5.8.2	跳频扩频	157
5.9	无线信道的多路复用	158
5.9.1	频分复用	159
5.9.2	时分复用	159
5.9.3	码分复用	160
5.9.4	空分复用	160
5.9.5	正交频分复用	160
5.10	超宽带技术	161
5.11	本章小结	162
	习题	163
	参考文献	163
第6章	拓扑控制技术	165
6.1	网络拓扑结构简介	166
6.2	拓扑控制基础知识	168
6.2.1	基本术语	168
6.2.2	影响因素	169
6.2.3	拓扑控制的设计目标	170
6.2.4	拓扑控制的主要技术	171
6.3	功率控制	172
6.3.1	基于节点度的功率控制	172
6.3.2	基于邻近图的功率控制	174
6.3.3	基于方向的功率控制	176
6.3.4	基于干扰的拓扑控制	177

6.4	睡眠调度	178
6.4.1	连通支配集算法	179
6.4.2	ASCENT 算法	181
6.4.3	SPAN 算法	182
6.5	分簇	184
6.5.1	LEACH 算法	184
6.5.2	GAF 算法	185
6.5.3	HEED 算法	187
6.5.4	TopDisc 算法	188
6.6	本章小结	190
	习题	190
	参考文献	191
第 7 章	MAC 协议	193
7.1	概述	194
7.1.1	无线网络的信道访问控制方式分类	195
7.1.2	传感器网络 MAC 协议的特点	196
7.1.3	传感器网络 MAC 协议的节能设计	197
7.2	竞争型的 MAC 协议	198
7.2.1	IEEE 802.11 MAC(DCF 模式)	199
7.2.2	S-MAC	200
7.2.3	B-MAC(SenSys)	202
7.2.4	RI-MAC(SenSys)	204
7.3	分配型的 MAC 协议	206
7.3.1	TRAMA(TDMA-W)	206
7.3.2	BMA-MAC (IPSN'04)	208
7.3.3	DMAC (IPDPS'04)	209
7.4	混合型的 MAC 协议	211
7.4.1	Z-MAC (SenSys, CSMA/TDMA)	212
7.4.2	Funneling-MAC (SenSys, CSMA/TDMA)	215
7.5	本章小结	217
	习题	217
	参考文献	219
第 8 章	路由技术	222
8.1	传统网络中的路由	223
8.1.1	有线 Internet 网络中的路由	223
8.1.2	Ad Hoc 网络中的路由	225

8.2	传感器网络中的路由	226
8.2.1	传感器网络的路由需求	226
8.2.2	传感器网络特点对路由协议设计的影响	227
8.2.3	路由选择考虑的因素	228
8.2.4	传感器网络路由的评价标准	231
8.3	传感器网络路由协议分类	232
8.4	典型传感器网络路由协议	234
8.4.1	洪泛和闲聊路由	234
8.4.2	以数据为中心的路由	235
8.4.3	地理位置信息路由	239
8.4.4	层次式路由	243
8.4.5	QoS 路由	246
8.4.6	多径路由	251
8.4.7	基于节点移动的路由	254
8.4.8	实用化路由协议介绍	257
8.5	本章小结	260
	习题	260
	参考文献	261
第 9 章	传输控制技术	263
9.1	传输控制协议概述	264
9.1.1	传输层协议的功能	264
9.1.2	TCP 协议	265
9.1.3	传感器网络中的传输控制	266
9.1.4	传感器网络传输层协议评价指标	268
9.2	拥塞控制机制	269
9.2.1	拥塞产生的原因	269
9.2.2	拥塞的分类	271
9.2.3	拥塞控制	271
9.2.4	典型的拥塞控制方法	274
9.2.5	拥塞避免	283
9.3	可靠传输机制	285
9.3.1	可靠性的定义	285
9.3.2	可靠性保障的基本思想	285
9.3.3	典型的可靠性保障机制	287
9.4	本章小结	299
	习题	299
	参考文献	300

第 10 章 实用化组网标准协议	303
10.1 IEEE 802.15.4	304
10.1.1 网络设备类型	305
10.1.2 网络拓扑结构	305
10.1.3 物理层	307
10.1.4 MAC 层	309
10.2 ZigBee	318
10.2.1 网络节点类型及网络拓扑	319
10.2.2 协议栈	320
10.2.3 网络层	320
10.2.4 应用层	324
10.2.5 ZigBee 安全框架	328
10.3 工业无线网络	330
10.3.1 WirelessHART	331
10.3.2 ISA 100.11a	332
10.3.3 WIA-PA	334
10.3.4 WIA-PA、WirelessHART、ISA SP100 三种工业无线技术的比较	336
10.4 6LowPAN	337
10.4.1 网络结构与设备	338
10.4.2 协议栈	338
10.4.3 适配层	339
10.4.4 路由协议	344
10.5 蓝牙	346
10.5.1 网络结构与设备	347
10.5.2 蓝牙协议栈结构	347
10.5.3 射频	348
10.5.4 基带	349
10.5.5 蓝牙组网技术	357
10.5.6 蓝牙应用规范	359
10.5.7 低功耗蓝牙	359
10.6 本章小结	367
习题	368
参考文献	368
第 11 章 感知覆盖	371
11.1 覆盖基本知识	372
11.1.1 基本概念和术语	372
11.1.2 节点感知模型	373

11.1.3	覆盖问题的分类	375
11.1.4	传感器网络覆盖技术考虑的主要因素	376
11.2	点覆盖	377
11.2.1	确定性点覆盖	377
11.2.2	随机点覆盖	379
11.3	区域覆盖	380
11.3.1	确定性区域覆盖	380
11.3.2	随机区域覆盖	381
11.4	栅栏覆盖	385
11.4.1	最坏与最佳情况覆盖模型	386
11.4.2	基于暴露量的覆盖模型	388
11.5	本章小结	389
	习题	389
	参考文献	389
第 12 章	时间同步	391
12.1	基础知识	392
12.1.1	本地时间	392
12.1.2	时间同步	393
12.1.3	协议分类	394
12.1.4	面临的挑战	395
12.2	基于消息的时间同步协议	397
12.2.1	网络时间协议	398
12.2.2	参考广播协议	399
12.2.3	TPSN 同步协议	401
12.2.4	FTSP 同步协议	404
12.2.5	tiny-sync 和 mini-sync 同步协议	407
12.2.6	最新进展	410
12.3	基于全局信号的时间同步协议	412
12.3.1	授时同步	412
12.3.2	基于电力线的时钟同步协议	414
12.3.3	基于 FM 无线信号的时钟同步协议 ROCS	415
12.4	本章小结	416
	习题	417
	参考文献	419
第 13 章	定位技术	421
13.1	基础知识	422
13.1.1	无线定位	422

13.1.2	传感器网络定位	423
13.2	测距技术	426
13.2.1	基于 ToA 的测距	426
13.2.2	基于 TDoA 的测距	427
13.2.3	基于 AoA 的测距	428
13.2.4	基于 RSS 的测距	429
13.3	基于测距的定位算法	429
13.3.1	定位方法	430
13.3.2	定位系统	432
13.4	测距无关的定位算法	435
13.4.1	质心算法	436
13.4.2	MSP 算法	437
13.4.3	APIT 算法	438
13.4.4	DV-Hop 算法	439
13.4.5	MDS-MAP 定位算法	441
13.4.6	指纹定位算法	442
13.5	其他相关问题讨论	443
13.5.1	节点可定位性	443
13.5.2	定位误差分析	444
13.5.3	定位误差控制	445
13.5.4	移动节点辅助定位	446
13.6	本章小结	447
	习题	448
	参考文献	449
第 14 章	仿真与测试	451
14.1	概述	452
14.2	模拟仿真	453
14.2.1	TOSSIM	454
14.2.2	OMNeT++	458
14.2.3	NS-2	460
14.2.4	其他工具	461
14.3	系统验证	463
14.3.1	HINT	463
14.3.2	MoteWorks	469
14.3.3	MoteLab	470
14.4	在线监测	471
14.4.1	网络嗅探	471

14.4.2	网络断层扫描	472
14.5	协议测试	473
14.5.1	一致性测试	474
14.5.2	互操作性测试	476
14.5.3	性能测试	476
14.6	本章小结	479
	习题	479
	参考文献	480
第 15 章	安全技术	482
15.1	概述	483
15.1.1	安全威胁	483
15.1.2	安全需求	486
15.1.3	安全机制	488
15.2	密钥管理	489
15.2.1	密钥管理协议的安全需求	489
15.2.2	密钥管理协议的分类	490
15.2.3	对称密钥管理	491
15.2.4	非对称密钥管理	495
15.3	认证及完整性保护	498
15.3.1	基于对称密码体制的广播认证方案	498
15.3.2	基于非对称密码体制的认证方案研究	500
15.4	入侵检测	502
15.4.1	入侵检测体系	502
15.4.2	入侵检测方法	503
15.4.3	入侵容忍	504
15.5	其他安全技术	505
15.5.1	安全路由	505
15.5.2	安全定位	506
15.5.3	安全时间同步	508
15.5.4	安全数据融合	509
15.5.5	隐私及匿名保护	510
15.6	本章小结	511
	习题	512
	参考文献	513