

WILEY

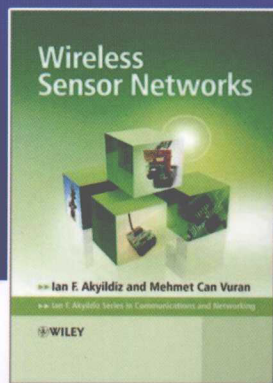
Internet of Things

物联网工程与技术规划教材

无线传感器网络

Wireless Sensor Networks

[美] Ian F. Akyildiz Mehmet Can Vuran 编
徐平平 刘昊 褚宏云 等译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

物联网工程与技术规划教材

无线传感器网络

Wireless Sensor Networks

[美] Ian F. Akyildiz 编
Mehmet Can Vuran

徐平平 刘昊 褚宏云 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书重点论述了无线传感器网络技术的基础和应用。全书共分 18 章,详细阐述了无线传感器网络各层的关键技术:物理层的调制/解调和编码技术、链路层的差错控制技术和介质访问控制协议;网络层的路由协议;传输层的 TCP/IP 协议;应用层的信源编码、查询处理和网络管理;跨层解决方案;时间同步技术;定位技术;拓扑管理;新颖的无线传感器网络:无线传感和执行器网络、无线多媒体传感网络、水下无线传感网络、地下无线传感网络等。本书内容深入浅出、概念清晰、阅读流畅、理论和实际应用相结合,是一本比较全面、系统、深入的无线传感器网络的专著。

本书可作为高等院校通信类、信息类、电子类等专业的高年级本科生及低年级研究生的教材,也可作为相关领域的科研人员及工程师的参考书。

Wireless Sensor Networks, Ian F. Akyildiz, Mehmet Can Vuran

ISBN: 978-0-470-03601-3

Copyright © 2010, John Wiley & Sons, Ltd.

All rights reserved. This translation published under license.

AUTHORIZED TRANSLATION OF THE EDITION PUBLISHED BY JOHN WILEY & SONS, LTD.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Ltd.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文版专有翻译出版权由 John Wiley & Sons, Ltd. 授予电子工业出版社。未经许可,不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

本书封底贴有 John Wiley & Sons, Ltd. 防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2011-3074

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络/(美)阿基迪兹(Akyildiz, I. F.), (美)沃安(Vuran, M. C.)编;徐平等译.

北京:电子工业出版社,2013.3

书名原文:Wireless Sensor Networks

物联网工程与技术规划教材

ISBN 978-7-121-19160-2

I. ①无… II. ①阿… ②沃… ③徐… III. ①无线电通信-传感器-高等学校-教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 293230 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:李秦华

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:28.25 字数:723.2 千字

印 次:2013 年 3 月第 1 次印刷

定 价:69.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

译者序

无线传感器网络作为国内外学术界、产业界共同关注的热点课题，其背景意义重要性不必赘言，相关翻译作品也有很多。我们翻译的 *Wireless Sensor Networks* 这本书是 Wiley 出版社 2010 年 8 月出版的属于 Ian F. Akyildiz 的通信与网络系列丛书之一，由美国佐治亚理工学院的 Ian F. Akyildiz 和内布拉斯加大学林肯分校的 Mehmet Can Vuran 联合编辑。本书的各章节由多国研究人员和应用人员组成的一个团队撰写，他们是其领域中的专家和趋势的领军性人物，展现了学术界和产业公司的高端水准，包括加州大学、伦敦大学、剑桥大学、米兰理工大学、佐治亚理工学院、得克萨斯大学、首尔国立大学、中国台湾新竹交通大学、滑铁卢大学、亚琛工业大学、普林斯顿大学、巴黎第六大学、阿尔卡特朗讯科技、贝尔实验室、美国通信技术理论与技术咨询委员会的研究现状。因此，这本书代表了无线传感器网络中大量当前问题的最深入思考、最有成效的解决方案和最新的技术进展。

本书理论结合实践，较为全面地介绍了无线传感器网络的各项关键技术及应用，涵盖内容包括无线传感器平台和网络架构；无线传感器网络的军事和生活应用；无线传感器网络设计影响因素；对应 TCP/IP 参考模型，详细介绍了无线传感器网络各层的关键技术，包括：物理层的技术和协议、链路层的差错控制技术和 MAC 协议；网络层的路由协议；传输层的技术和协议等。应用层的应用实例有：信源编码、查询处理和网络管理；跨层解决方案；定时同步技术；定位技术；拓扑管理；新颖的无线传感器网络：无线传感和角色网络、无线多媒体传感网络、水下无线传感网络、地下无线传感网络。各章突出了重要的技术挑战和最新研究成果。剖析了无线传感器网络为什么、怎样能在哪些领域可以发挥重大作用。特别地，为读者解决无线传感器网络应用中面临的当前问题提供了架构、协议、建模、分析和解决方案的深刻而全面的指导，同时分析预测技术经济模型、前沿应用的市场趋势，兼顾了学术意义和 market 价值。

本书内容深入浅出、概念清晰、阅读流畅、理论和实际应用相结合，是一本比较全面、系统、深入的无线传感器网络的专著，其基本理论切入起点跨越到实际应用的写作特点，既可作为传感器技术和传感器网络等专业的大学研究生专业课教材，对于正在寻找这个领域中开放性问题的研究生而言，将会非常有用，同时也可供需要跟踪最新研究并利用最新技术的无线/移动通信和网络管理领域的科研人员及工程师阅读参考。可以说本书是一本面向通信与信息系统、物联网与泛在网等领域相关教师和学生、科研和工程技术人员的综合参考书。

本书的翻译工作中，徐平平负责前言、第 1 章至第 6 章及第 18 章，刘昊负责第 7 章至第 10 章、褚宏云负责第 11 章至第 14 章及附录等其他部分，张萌老师、黄成老师、吴琼老师分别负责第 15 章至第 17 章。刘昊和褚宏云负责了初校统稿，徐平平负责了最后的审校

定稿。感谢电子工业出版社在书稿翻译过程中的悉心指导和全力支持，感谢东南大学的黄航博士、朱文祥博士、蒋富龙博士，王侃博士等参与协助翻译和清样审校。本书的翻译出版凝聚了我们传感器网络技术研究课题组的集体智慧和辛勤的汗水，特别要感谢我们硕士研究生团队同学们的无名奉献！译稿对原书中的部分疏漏和术语进行了补充和注释。由于译者水平有限，加之时间比较仓促，翻译中难免存在不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

译 者

前 言

无线传感器网络(WSN)已经引起了那些和物理世界具有紧密关联的、范围广泛的学科领域的兴趣。分布式的环境感知能力,基于无线通信技术的简单灵活的部署方式,使得 WSN 成为影响我们日常生活的重要因素。通过提供分布式的实时的环境感知信息,WSN 将现代通信技术基础建设拓展到了物理世界中。

WSN 由微小的传感器节点组成,这些节点既具有获取信息数据的功能也承担着网络中继的功能。每个传感器节点都由若干传感器、微处理器和无线收发机组成,这些有效的传感器节点紧密相连获取物理现象的数据。传感器节点通过片上微处理器可以完成复杂的任务而不是仅仅传输它们感知到的信息,通过无线收发机可以实现相互连接以传输这些数据。传感器节点一般都是静止的并由能量有限的电池提供能源,所以即使节点位置没有变化,网络拓扑结构也会由于传感器节点的能量管理操作而发生动态变化。例如,为了节省能量,节点会关闭它们的收发机,但这样就使得它们与网络断开,从而导致网络拓扑的变化。在这种复杂环境中,如何使传感器节点功耗最小并保持联网是最主要的挑战。具有高能效机制的 WSN 相对于其他任何依赖电池的系统将具有更长的网络生存期。

2002 年 3 月,我们的调查报告“Wireless sensor networks: A survey”发表在 Elsevier 检索期刊 *Computer Networks* 上。接着,2002 年 8 月,“Wireless sensor networks: A survey”的精编版发表在 *IEEE Communications Magazine* 上。这些年来,以上两篇文章在超过 8000 个检索索引的检索库 Elsevier 和 IEEE Communication Society (ComSoc) 中高居文章被下载次数排名前十^①。此后,挑战 WSN 特性的研究得到了迅速发展。最近十年来,WSN 技术的研究获得了可喜的成果,高技术含量的产品得以制造和改进,由此开创了一个由 WSN 技术推动的崭新市场。经过这些年的努力,WSN 的部署已经成为现实,诸多研究机构也从中获得了宝贵的经验。此外,许多专家正致力于对现有 WSN 能效解决方案的改进研究,并着眼于新型的 WSN 技术,例如水下和地下传感器网络。这些年来,我们也一直致力于 WSN 的研究,在近十年里发表了大量的论文并做了四个分别关于无线传感器与执行器网络、水下无线传感器网络、地下无线传感器网络和多媒体无线传感器网络的综述性的报告。

2003 年夏,随着 WSN 技术的研究开始明朗化,我们开始第二轮撰写 WSN 综述性报告以研究最新的解决方案。大量的研究成果以及学术界和工业界的兴趣激励我们对 WSN 展开了进一步的研究并且撰写了本书。本书既可以作为研究生的教材以激发他们的创新思想,也可以为科研人员和工程师提供有关 WSN 技术的概况,并通过对 WSN 最新技术的深度剖析和对怎样优化现有技术继而应用到新兴应用和服务中的介绍,引起读者更有深度的思考。本书涵盖了现有的 WSN 技术研究、应用以及众多应用领域中对这些技术的改进。本书凝聚了作者自己的研究成果以及由标准委员会做出的相关共识。由于近十年来对 WSN 的研究众多,本书不可能涵盖每一种解决方案,如有疏漏纯属无意。

^① 根据 2009 年 10 月 Google 学术的数据。

本书的内容主要遵循 TCP/IP 协议栈的分层架构,从物理层开始详细介绍了每一层的技术,并且深入分析了诸如同步、定位和拓扑控制的跨层解决方案和服务策略以及 WSN 的其他特性。本书深入阐释了网络架构每一层的功能、协议和算法,旨在向读者介绍现有技术并且在本书最后一章中指出了 WSN 所需要面对的巨大研究挑战,以此来启发读者对现有方案进行改进和优化。

第 1 章是对 WSN 的概述,概要地介绍了传感器平台和网络结构。第 2 章对 WSN 现有的应用进行了总结,包括军用和民用。第 3 章综述了 WSN 的特性、关键设计因素和限制条件。第 4 章致力于 WSN 物理层的研究,包括物理层的技术、无线通信的特点和物理层的标准。第 5 章主要介绍了 WSN 的 MAC 协议,重点介绍了应用广泛的最基础的载波侦听多点访问/冲突避免(CSMA/CA)技术、由 CSMA/CA 改进而来的截然不同的解决方案:基于时分多点接入(TDMA)的 MAC 以及二者的混合方案。第 6 章重点介绍了 WSN 中的差错控制技术并且分析了它们对高效通信的影响。第 5 章和第 6 章介绍的都是数据链路层的技术。第 7 章致力于 WSN 的路由协议研究。将网络层的路由协议分为四类:以数据为中心的路由协议、分层路由协议、地理路由协议和基于服务质量(QoS)的路由协议。第 8 章首先指出了传输层解决方案的挑战,然后阐述了传输层的协议。第 9 章介绍了每层之间的跨层相互作用以及对通信表现的影响。此外,详细阐述了跨层通信方法。第 10 章指出了时间同步的挑战,并且介绍了几种针对这些挑战的解决方法。第 11 章描述了定位技术的挑战并将定位技术分为三类:测距技术、基于测距的定位协议和无须测距的定位协议。第 12 章介绍了 WSN 中的拓扑管理方案。具体而言,解释了部署、能量控制、活动状态、调度和分簇方法。第 13 章介绍了无线传感器与执行器网络(WSAN)的概念和特点。特别强调了传感器和执行器之间以及不同执行器之间协同问题的解决方案。此外,还讨论了 WSA 中的通信问题。第 14 章介绍了无线多媒体传感网(WMSN)的挑战和多种网络拓扑。还介绍了现有的多媒体传感器平台并遵循 TCP/IP 协议栈结构描述了各层的协议。第 15 章致力于水下无线传感网络(UWSN),主要分析了水下环境对通信的影响。研究了水下声波传播的基础,总结了协议栈各层的解决方案。第 16 章描述了地下无线传感网络(WUSN)的特点和应用。特别地,详细介绍了 WUSN 在土壤、矿井和隧道环境中的应用及特点。同时研究了在上述情况下的信道特点,并指出了给通信带来的挑战。最后,第 17 章讨论了 WSN 发展面临的巨大挑战。

撰写一本教科书肩负有很大的责任和挑战。一般情况下,作者承担一本书的主要撰写工作,除了作者之外,还有很多人都为此书做出了贡献。首先要感谢 John Wiley & Sons 公司的 Birgit Gruber,是他提议撰写本书的。感谢 John Wiley & Sons 公司的 Tiina Ruonamaa、Sarah Tilley 和 Anna Smart 真诚、长期而耐心的帮助。感谢他们对创作本书的协助、构想、贡献和支持。我们也要感谢直接或间接对本书做出贡献的人。特别地,我们真诚地感谢 Özgür B. Akan、Tommaso Melodia、Dario Pompili、Weilian Su、Eylem Ekici、Cagri Gungor、Kaushik R. Chowdhury、Xin Dong 和 Agnelo R. Silva 的帮助。

我(MCV)也要特别感谢在我就读于土耳其安卡拉比尔肯特大学(Bilkent University, Ankara, Turkey)和亚特兰大佐治亚理工学院(Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA)期间所有鼓励过我的教授们。感谢内布拉斯加大学林肯分校(University of Nebraska-Lincoln)计算机科学与环境工程的同事与朋友在创作本书时所做的贡献。我要特别感谢我的博士生导师 Ian F. Akyildiz 教授,他引导我面对 WSN 的挑战,真心地感谢在我读博和后来的工作中, Ian

F. Akyildiz 教授对我的指导、信任和给予的帮助。我也要向我的妻子 Demet 表示感谢，因为她的爱、她的支持、她的建议和她的奉献，本书才得以完成。我要感谢我的母亲 Ayla，感谢她的母爱、支持和鼓励，这是作为一个母亲能做到的一切。最后用本书纪念我的父亲 Mehmet Vuran，怀念那段美好的时光，他是我完成本书以及一生中实现其他成就的最大动力。

我(IFA)要特别感谢我的妻子和孩子多年来的支持，如果没有他们长期的关爱、理解和宽容，我可能一事无成。还要感谢我以前和现在的博士生，在过去的 25 年里，他们已经成为了我的家庭成员。因为和他们在一起让我感受到了研究工作的激情，所以他们值得给予最高和最真诚的感谢。看到他们这些年来在事业上的进步是我一生最大的满足，欣喜之情难以表达。他们也为本书的撰写做出了许多贡献。

Ian F. A kyildiz 和 Mehmet Can Vuran

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 传感器微尘平台	1
1.1.1 低端平台	3
1.1.2 高端平台	4
1.1.3 标准化工作	4
1.1.4 软件	9
1.2 WSN 工艺和协议栈	9
1.2.1 物理层	10
1.2.2 数据链路层	11
1.2.3 网络层	11
1.2.4 传输层	12
1.2.5 应用层	12
参考文献	13
第 2 章 WSN 应用	15
2.1 军事应用	15
2.1.1 智能微尘	15
2.1.2 狙击手侦测系统	16
2.1.3 VigilNet 系统	17
2.2 环境应用	18
2.2.1 大鸭岛实验	18
2.2.2 CORIE	19
2.2.3 ZebraNet 系统	20
2.2.4 火山监测	21
2.2.5 洪水早期检测	21
2.3 医疗应用	22
2.3.1 人工视网膜	23
2.3.2 病人监测	24
2.3.3 应急响应	25
2.4 家庭应用	25
2.4.1 用水监测	25
2.5 工业应用	26
2.5.1 预防性维护	26

2.5.2	结构健康监测	27
2.5.3	其他商业应用	28
	参考文献	28
第3章	WSN 设计影响因素	32
3.1	硬件约束	32
3.2	容错性	34
3.3	可扩展性	35
3.4	生产成本	35
3.5	WSN 的拓扑结构	35
3.5.1	预部署和部署阶段	35
3.5.2	后期部署阶段	36
3.5.3	额外节点的重新部署阶段	36
3.6	传输介质	36
3.7	功耗	37
3.7.1	传感	38
3.7.2	数据处理	39
3.7.3	通信	40
	参考文献	43
第4章	物理层	45
4.1	物理层技术	45
4.1.1	RF	45
4.1.2	其他技术	47
4.2	射频无线通信概述	48
4.3	信道编码(差错控制编码)	49
4.3.1	分组码	50
4.3.2	联合信源信道编码	51
4.4	调制	53
4.4.1	FSK	54
4.4.2	QPSK	54
4.4.3	二进制和 M 进制调制	55
4.5	无线信道效应	56
4.5.1	衰减	57
4.5.2	多径效应	57
4.5.3	信道差错率	58
4.5.4	圆盘图表单元与统计信道模型	59
4.6	物理层标准	61
4.6.1	IEEE 802.15.4	61

4.6.2 现有的收发机	63
参考文献	64
第5章 介质访问控制	66
5.1 MAC层的挑战	66
5.1.1 功耗	67
5.1.2 结构	67
5.1.3 基于事件的网络	68
5.1.4 相关性	68
5.2 CSMA 机制	68
5.3 基于竞争的介质访问	71
5.3.1 S-MAC	72
5.3.2 B-MAC	76
5.3.3 CC-MAC 协议	79
5.3.4 其他基于竞争的 MAC 协议	84
5.3.5 小结	88
5.4 预留的介质访问	88
5.4.1 TRAMA	89
5.4.2 其他预留的 MAC 协议	92
5.4.3 小结	95
5.5 混合介质访问	95
5.5.1 Zebra-MAC	96
参考文献	99
第6章 差错控制	102
6.1 差错控制方案的分类	102
6.1.1 功率控制	102
6.1.2 ARQ	103
6.1.3 FEC	103
6.1.4 HARQ	104
6.2 WSN 中的差错控制	104
6.3 跨层分析模型	107
6.3.1 网络模型	107
6.3.2 预期跳距	109
6.3.3 功耗分析	110
6.3.4 时延分析	112
6.3.5 解码时延和功耗	113
6.3.6 BER 和 PER	113
6.4 差错控制方案的比较	114

6.4.1	跳距延伸	115
6.4.2	发射功率控制	116
6.4.3	混合差错控制	117
6.4.4	小结	118
	参考文献	119
第7章	网络层	121
7.1	路由选择的挑战	121
7.1.1	功耗	121
7.1.2	可扩展性	122
7.1.3	寻址技术	122
7.1.4	鲁棒性	122
7.1.5	拓扑结构	122
7.1.6	应用	123
7.2	以数据为中心和等级化的路由协议	123
7.2.1	洪泛	124
7.2.2	谣传	125
7.2.3	信息协商机制	125
7.2.4	定向扩散	127
7.2.5	定性评价	129
7.3	分层协议	129
7.3.1	LEACH	130
7.3.2	PEGASIS	130
7.3.3	TEEN 和 APTEEN	131
7.3.4	定性评价	132
7.4	地理路由协议	133
7.4.1	MECN 和 SMECN	133
7.4.2	有损连接的地理转发方案	134
7.4.3	PRADA	136
7.4.4	定性评价	138
7.5	基于 QoS 的协议	138
7.5.1	SAR	138
7.5.2	最小成本路径转发	139
7.5.3	SPEED	140
7.5.4	定性评价	141
	参考文献	142
第8章	传输层	145
8.1	传输层的挑战	145

8.1.1 端到端的通信方式	145
8.1.2 应用相关性	146
8.1.3 能量消耗	146
8.1.4 非对称执行	146
8.1.5 路由/寻址受限	146
8.2 RMST	147
8.2.1 定性评价	149
8.3 PSFQ	150
8.3.1 定性评价	152
8.4 CODA	152
8.4.1 定性评价	154
8.5 ESRT 协议	154
8.5.1 定量评价	157
8.6 GARUDA	157
8.6.1 定性评价	161
8.7 实时可靠性传输(RT) ² 协议	161
8.7.1 定性评价	165
参考文献	165
第9章 应用层	167
9.1 信源编码(数据压缩)	167
9.1.1 传感器 LZW	167
9.1.2 分布式信源编码	169
9.2 查询处理	170
9.2.1 查询表示	171
9.2.2 数据融合	175
9.2.3 COUGAR	177
9.2.4 Fjords 架构	179
9.2.5 微融合服务	181
9.2.6 TinyDB	183
9.3 网络管理	185
9.3.1 MANNA	187
9.3.2 SNMS	188
参考文献	190
第10章 跨层解决方案	192
10.1 层间影响	192
10.2 跨层的相互作用	194
10.2.1 MAC 层和网络层	194

10.2.2	MAC 层和应用层	196
10.2.3	网络层和物理层	197
10.2.4	传输层和物理层	198
10.3	跨层模块	198
10.3.1	启动判决	199
10.3.2	传输启动	201
10.3.3	汇聚节点竞争	201
10.3.4	基于角度的路由	204
10.3.5	局部跨层拥塞控制	205
10.3.6	小结: XLP 跨层的相互作用和性能	208
	参考文献	209
第 11 章	时间同步	212
11.1	时间同步的挑战	212
11.1.1	低成本的时钟	212
11.1.2	无线通信	213
11.1.3	资源受限	213
11.1.4	高部署密度	213
11.1.5	节点易失效	214
11.2	NTP	214
11.3	定义	215
11.4	TPSN	216
11.4.1	定性评价	217
11.5	RBS	218
11.5.1	定性评价	219
11.6	ACS	220
11.6.1	定性评价	221
11.7	TDP	221
11.7.1	定性评价	223
11.8	RDP	223
11.8.1	定性评价	224
11.9	小型/微型同步协议	224
11.9.1	定性评价	226
11.10	其他协议	226
11.10.1	LTS	226
11.10.2	TSync	226
11.10.3	渐进优化同步	227
11.10.4	移动网络同步	227
	参考文献	228

第 12 章 定位	229
12.1 定位中的挑战	229
12.1.1 物理层的测量	229
12.1.2 计算的约束	230
12.1.3 全球定位系统的不足	230
12.1.4 低端的传感器节点	231
12.2 测距技术	231
12.2.1 接收信号强度	231
12.2.2 到达时间	232
12.2.3 到达时间差	233
12.2.4 到达角	234
12.3 基于测距的定位协议	234
12.3.1 Ad Hoc 定位系统	235
12.3.2 有噪测距定位	237
12.3.3 基于时间的定位系统	238
12.3.4 辅助移动定位	240
12.4 基于预留的定位协议	241
12.4.1 凸位置估计	241
12.4.2 近似三角形内点系统	242
参考文献	244
第 13 章 拓扑管理	245
13.1 部署	246
13.2 功率控制	247
13.2.1 LMST	247
13.2.2 LMA 和 LMN	248
13.2.3 干扰感知功率控制	249
13.2.4 CONREAP	251
13.3 活动调度	252
13.3.1 GAF	253
13.3.2 ASCENT	254
13.3.3 SPAN	256
13.3.4 PEAS	258
13.3.5 STEM	260
13.4 分簇	263
13.4.1 分层分簇	263
13.4.2 HEED	265
13.4.3 覆盖保持分簇	266
参考文献	270

第 14 章 无线传感器和执行器网络	272
14.1 WSAN 的特点	274
14.1.1 网络架构	274
14.1.2 物理结构	275
14.2 传感器节点与执行器节点协作	277
14.2.1 传感器节点与执行器节点通信要求	278
14.2.2 执行器节点的选举	278
14.2.3 最优解决方案	281
14.2.4 分布式事件驱动的分簇和路由协议	282
14.2.5 性能	284
14.2.6 传感器节点与执行器节点协作的挑战	289
14.3 执行器节点与执行器节点协作	289
14.3.1 任务分配	290
14.3.2 最优解方案	291
14.3.3 局部拍卖协议	293
14.3.4 定性评价	294
14.3.5 执行器节点与执行器节点协作的挑战	295
14.4 WSAN 协议栈	296
14.4.1 管理域	296
14.4.2 协作域	297
14.4.3 通信域	297
参考文献	298
第 15 章 无线多媒体传感器网络	300
15.1 设计挑战	301
15.1.1 多媒体信源编码	301
15.1.2 高带宽要求	302
15.1.3 具体应用服务质量要求	302
15.1.4 多媒体网内处理	302
15.1.5 功耗	302
15.1.6 覆盖范围	302
15.1.7 资源限制	303
15.1.8 可变的信道容量	303
15.1.9 跨层耦合功能	303
15.2 网络结构	303
15.2.1 单层结构	304
15.2.2 多层结构	304
15.2.3 覆盖	305

15.3 多媒体传感器的硬件	307
15.3.1 音频传感器	307
15.3.2 低分辨率视频传感器	308
15.3.3 中分辨率视频传感器	310
15.3.4 多媒体传感器网络配置举例	311
15.4 物理层	313
15.4.1 TH-IR-UWB	314
15.4.2 MC-UWB	314
15.4.3 UWB 测距	314
15.5 MAC 层	314
15.5.1 FRASH MAC	316
15.5.2 实时独立信道 MAC	317
15.5.3 MIMO 技术	317
15.5.4 开放研究问题	317
15.6 差错控制	318
15.6.1 联合信源信道编码和功率控制	318
15.6.2 开放研究问题	320
15.7 网络层	320
15.7.1 MMSPEED	321
15.7.2 开放研究问题	324
15.8 传输层	324
15.8.1 多跳缓冲和自适应性	325
15.8.2 错误的鲁棒图像传输	326
15.8.3 开放研究问题	327
15.9 应用层	328
15.9.1 流量管理和接入控制	328
15.9.2 多媒体编码技术	329
15.9.3 静态图像编码	329
15.9.4 分布式信源编码	331
15.9.5 开放研究问题	332
15.10 跨层设计	333
15.10.1 跨层控制单元	333
15.11 进一步研究的问题	335
15.11.1 网内处理的协作	336
15.11.2 同步	337
参考文献	337
第 16 章 水下无线传感器网络	341
16.1 设计挑战	342