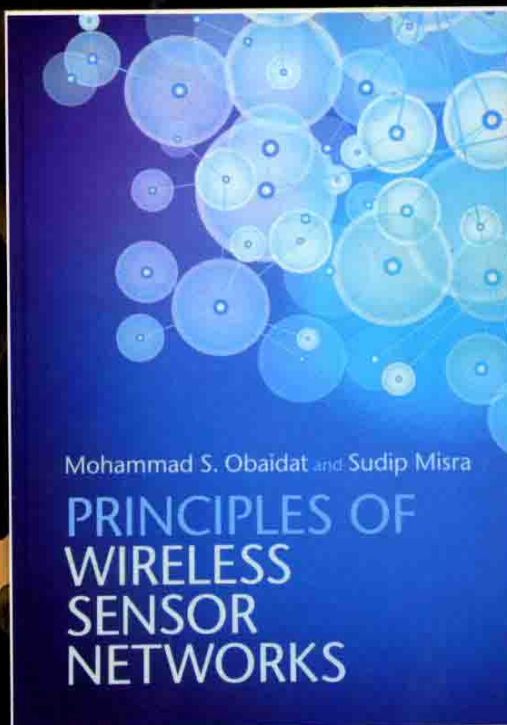


无线传感器网络原理

[美] 穆罕默德 S. 奥拜达特 (Mohammad S. Obaidat) 著
[印] 苏迪普·米斯拉 (Sudip Misra)
吴帆 刘生钟 傅新喆 胡叶 译

Principles of Wireless Sensor Networks



机械工业出版社
China Machine Press

计 算 机 科 学 丛 书

无线传感器网络原理

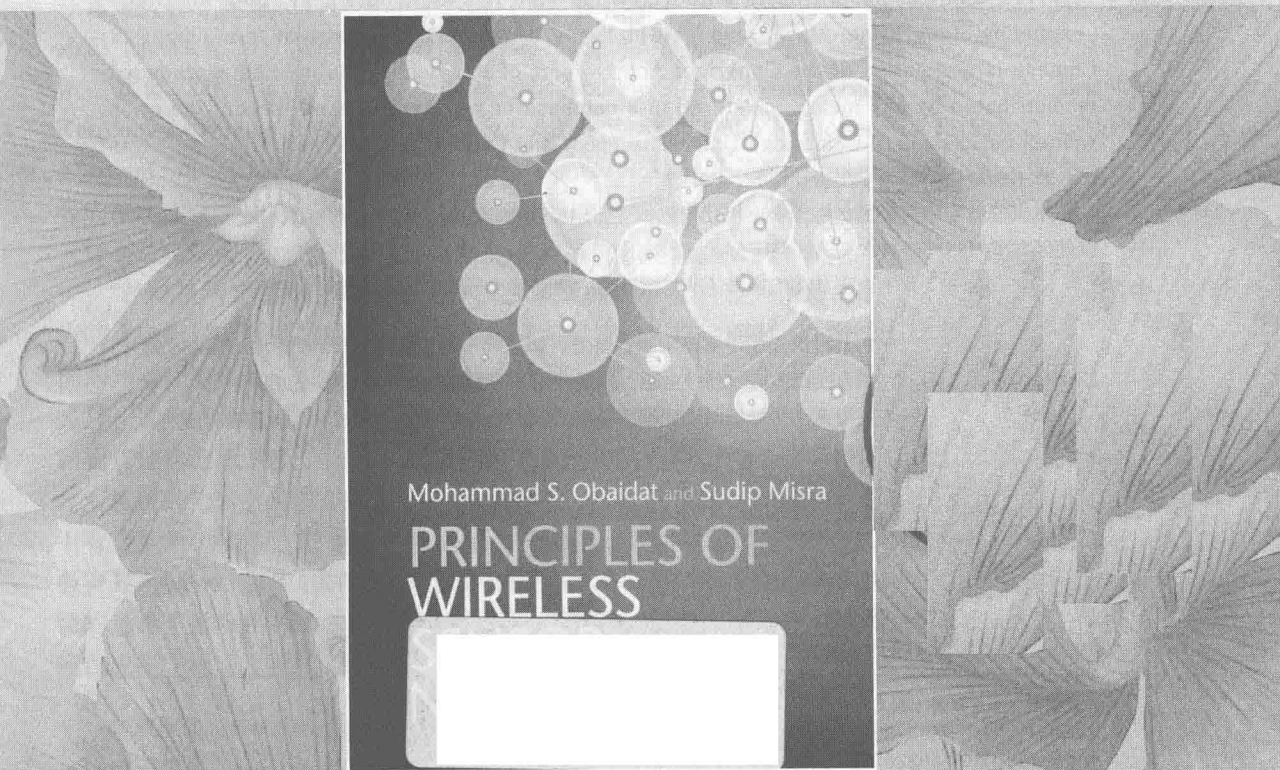
[美] 穆罕默德 S. 奥拜达特 (Mohammad S. Obaidat)

[印] 苏迪普·米斯拉 (Sudip Misra)

著

吴帆 刘生钟 傅新喆 胡叶 译

Principles of Wireless Sensor Networks



 机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

无线传感器网络原理 / (美) 穆罕默德 S. 奥拜达特 (Mohammad S. Obaidat) 等著; 吴帆等译. —北京: 机械工业出版社, 2017.9

(计算机科学丛书)

书名原文: Principles of Wireless Sensor Networks

ISBN 978-7-111-58000-3

I. 无… II. ①穆… ②吴… III. 无线电通信 - 传感器 - 计算机网络 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 224282 号

本书版权登记号: 图字 01-2015-3692

This is a Chinese simplified edition of the following title published by Cambridge University Press:

Mohammad S. Obaidat, Sudip Misra, Principles of Wireless Sensor Networks, ISBN 978-0-521-19247-7.

© Cambridge University Press 2014.

This Chinese simplified for the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press and China Machine Press in 2017.

This Chinese simplified is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorized export of this simplified Chinese is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and China Machine Press.

本书原版由剑桥大学出版社出版。

本书简体字中文版由剑桥大学出版社与机械工业出版社合作出版。未经出版者预先书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

此版本仅限在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 销售。

本书采用自底向上方式讨论无线传感器网络, 首先讲解基础知识, 接着分析网络和协议, 然后研究定位、拓扑管理、安全、建模和仿真等高级主题, 最后介绍水下传感器网络等新型应用。

本书适合作为高等院校无线传感器网络课程的教材, 同时也是研究人员和技术人员的有益参考。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 曲 熠

责任校对: 李秋荣

印 刷: 北京诚信伟业印刷有限公司

版 次: 2017 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 185mm×260mm 1/16

印 张: 17.5

书 号: ISBN 978-7-111-58000-3

定 价: 89.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

文艺复兴以来,源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范,使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势;也正是这样的优势,使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中,美国的产业界与教育界越来越紧密地结合,计算机学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线,由此而产生的经典科学著作,不仅擘划了研究的范畴,还揭示了学术的源变,既遵循学术规范,又自有学者个性,其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年,在全球信息化大潮的推动下,我国的计算机产业发展迅猛,对专业人才的需求日益迫切。这对计算机教育界和出版界都既是机遇,也是挑战;而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下,美国等发达国家在其计算机科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此,引进一批国外优秀计算机教材将对我国计算机教育事业的发展起到积极的推动作用,也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始,我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力,我们与Pearson, McGraw-Hill, Elsevier, MIT, John Wiley & Sons, Cengage等世界著名出版公司建立了良好的合作关系,从他们现有的数百种教材中甄选出Andrew S. Tanenbaum, Bjarne Stroustrup, Brian W. Kernighan, Dennis Ritchie, Jim Gray, Alfred V. Aho, John E. Hopcroft, Jeffrey D. Ullman, Abraham Silberschatz, William Stallings, Donald E. Knuth, John L. Hennessy, Larry L. Peterson等大师名家的一批经典作品,以“计算机科学丛书”为总称出版,供读者学习、研究及珍藏。大理石纹理的封面,也正体现了这套丛书的品位和格调。

“计算机科学丛书”的出版工作得到了国内外学者的鼎力相助,国内的专家不仅提供了中肯的选题指导,还不辞劳苦地担任了翻译和审校的工作;而原书的作者也相当关注其作品在中国的传播,有的还专门为其书的中译本作序。迄今,“计算机科学丛书”已经出版了近两百个品种,这些书籍在读者中树立了良好的口碑,并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也被越来越多实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑,这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着计算机科学与技术专业学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化,教育界对国外计算机教材的需求和应用都将步入一个新的阶段,我们的目标是尽善尽美,而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正,我们的联系方式如下:

华章网站: www.hzbook.com

电子邮件: hzjsj@hzbook.com

联系电话: (010) 88379604

联系地址: 北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码: 100037



华章科技图书出版中心

近年来,由于无线传感器系统、片上系统和无线通信系统等技术的发展,无线传感器网络领域得到了迅速的发展,并取得了长足的进步。无线传感器网络由大量静止或移动的微型传感器组成,传感器之间通过无线的方式进行通信,组成一个多跳自组织网络。无线传感器网络中包含众多类型的传感器,在环境监测、医疗护理、军事、目标追踪等多个领域都具有广泛的应用前景。无线传感器网络技术在学术界和工业界都已经引起了非常广泛的关注,被认为是 21 世纪对世界影响最大的技术之一。

本书采用自底向上的顺序,首先从无线传感器网络中最基本的概念和知识出发,对无线传感器节点、相关应用等做了详细的介绍和分析;接下来在网络和协议层面对无线传感器网络做了介绍,包括介质访问机制、路由机制和传输协议等;之后分析了一些高级主题,如定位、拓扑管理、性能评估和安全问题等;最后介绍了一些新型的无线传感器网络,如无线移动传感器网络、无线多媒体传感器网络、水下无线传感器网络、无线地下传感器网络等。从整体上来看,本书的叙述自底向上、由浅入深,不仅可以帮助没有相关研究背景的读者快速熟悉这个领域的基本概念与相关发展,而且有相关研究背景的读者也可以将本书作为一本非常好的工具书。本书结构清晰,组织顺序一目了然,可以帮助读者在短时间内了解某一方面的具体问题,相信对于相关人员的研究是一种非常好的补充和背景储备。作为课堂教学的课本,本书对于本科阶段和研究生阶段的无线传感器网络课程都是非常好的选择。教学人员可以从基本概念出发进行介绍,并根据具体的时间安排选择自己的课堂教授内容。

在本书的翻译工作中,我们得到了上海交通大学先进网络实验室各位老师和同学的支持和帮助。感谢各位老师和同学的帮助和意见!也感谢机械工业出版社华章公司的编辑为本书所做的润色、排版和校对工作!感谢每一位在翻译工作中为我们提出宝贵意见和建议的读者!

由于时间仓促,加之水平有限,翻译工作中难免有所疏漏,还请广大读者给予批评指正,我们将及时做出修正。

译者

2017 年 5 月

于上海交通大学

概览和目标

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 的灵感主要来自于具有通信和感知功能的小型低成本装置。近年来无线传感器网络领域的研究发展迅速, 这种分布式的传感器网络在民用和军事领域都具有广阔的应用前景。传感器网络的潜在应用包括战场上的入侵检测、目标追踪、生境监测、患者检测和火灾监测。网络构建不需要基础设施, 只需要很少的提前计划和节点部署。不需中央控制的自组织能力是这类网络的智能特性, 利用这些特性, 网络可以在复杂情况下迅速构建起来。这些智能特性还使得网络得以在出现失效节点的情况下正常运转。

尽管传感器网络具有以上提及的优良特性, 但实现网络的自主、无意识、无故障运行还有很多挑战。其中一些挑战归结于扩展性、服务质量、能效和安全方面的问题。传感器网络协议应该足够轻量化, 从而适应小型传感器节点的计算能力限制。传感器网络通常大规模部署, 并需要正常工作数年。显然, 这种情况下电池能量是一个重要问题, 这可以通过节能或能量感知的协议来解决。最后, 服务质量对于需要及时响应的应用至关重要。

现在大量的文献涉及无线传感器网络的方方面面。本书旨在对无线传感器领域的基本概念、挑战、问题、发展趋势、模型和研究结果提供全面的介绍。在写作时, 我们致力于使本书成为重要的核心问题和专项问题的有益参考资料。我们努力覆盖尽可能广的主题, 同时希望本书成为学生、教师、研究人员和从业人员的重要参考书。由于现有的传感器网络书籍主要面向研究人员, 因此我们相信受众的广泛性会成为本书的一个重要优点。我们致力于使本书对学术界和工业界具有同样重要的价值。

组织和特点

本书的 14 个章节在内容上大致可划分为三部分: 第一部分 (第 1 ~ 3 章) 讨论无线传感器网络的基础知识, 第二部分 (第 4 ~ 6 章) 关注网络和协议层面, 第三部分 (第 7 ~ 14 章) 介绍定位、拓扑管理、安全、建模和仿真等高级主题。

第 1 章简要介绍无线传感器网络, 包括网络中的基础技术、应用、分类和挑战。同时介绍无线传感器节点的基础组件, 并对传感器网络进行分类。最后讨论了无线传感器网络与无线网状网络和 RFID 系统的不同。

第 2 章详细介绍无线传感器节点的组件、结构和操作。首先讨论无线传感器网络的限制和设计挑战, 并通过举例呈现了传感器节点的硬件体系结构和操作系统。这一章还包括基础设施对无线传感器网络性能指标的影响。最后讨论用来制造低功耗、低成本传感器节点的 MEMS 技术。

第 3 章介绍无线传感器网络的主要应用, 包括环境监测、医疗、智能家居、国土安全、水下应用、农业和温室检测以及军事应用。

第 4 章主要介绍无线传感器网络中的介质访问控制。首先讨论传统 MAC 机制存在的问

题,接着详细讨论为无线传感器网络设计的 MAC 机制。

第 5 章讨论无线传感器网络路由的相对优势、劣势及挑战,我们将现有的路由机制分类,并介绍各类机制中具有代表性的例子。

第 6 章介绍无线传感器网络中的传输协议和服务质量问题。首先明确传输协议的需求,然后讨论因特网传输协议在无线传感器网络中的实用性,最后将传输协议分为不同类别,并介绍每一类中的例子。

第 7 章介绍无线传感器网络的定位和目标追踪机制。首先讨论定位的基础知识和不同的测距技术,之后详细介绍现有定位机制的分类以及每一类中的实例,最后以相似的方式讲解目标追踪机制。

第 8 章讨论拓扑管理与控制的重要性。同前几章类似,我们将介绍现有机制的分类,并介绍每一类中的例子。

第 9 章介绍用于评估无线传感器网络系统性能的最新技术。首先讨论建模和仿真技术,它们在网络性能评估中发挥着关键作用,之后讨论与性能评估有关的性能指标和基本模型。

第 10 章讨论安全问题,全面研究无线传感器网络面临的挑战、漏洞、攻击和现有的解决方案,并将其与主要的安全技术进行比较。

第 11 章讨论与无线移动传感器网络相关的问题,包括覆盖、连通性和部署。

第 12 章讨论无线传感器网络的一个变种——无线多媒体传感器网络(WMSN),还讨论了 WMSN 的挑战和特有应用,以及 WMSN 的网络、节点架构和通信层。

第 13 章介绍水下无线传感器网络(UWSN)。首先介绍 UWSN 的挑战和特点,以及 UWSN 的水下物理学及动力学。然后介绍 UWSN 的传感器节点、组件、网络架构以及定位服务。最后介绍 UWSN 的协议栈,并简要讨论每层的相关机制。

第 14 章介绍无线传感器网络的另一个变种——无线地下传感器网络(WUGSN),不仅涉及 WUGSN 的应用、挑战和网络架构,而且包括这种网络的协议栈、通信信道和路由机制。

读者对象

本书主要面向学生群体,包括各种层次的学生——初入领域的、中等水平的和已经对领域有深入了解的。为了达到这个目标,我们力求使本书的总体结构和内容对各层次的学生都有帮助。

本书的另一个受众群体是科研人员,包括学术界、工业界以及政府中的研究人员。为了满足此群体的需要,本书的多数章节都介绍了一些未来的研究方向。

最后,我们也考虑了工业界读者以及需要了解技术实用性的从业者的需求,即理论知识与现实生活中传感器网络应用的对接。

致谢

在此感谢我们的学生。他们试读了本书的部分章节并提供了反馈,还参与了本书的准备工作。

非常感谢剑桥大学出版社的编辑,是他们的不懈努力与合作让我们对出版截止日期有了更清楚的认识。我们还要感谢家人们,尤其是我们的妻子,他们在本书写作期间对我们提供了巨大的帮助。

出版者的话

译者序

前言

第 1 章 无线传感器网络概述 1

1.1 背景 1

1.2 无线传感器节点的组成 2

1.3 传感器网络的分类 3

1.4 无线传感器网络的特点 4

1.5 无线传感器网络面临的挑战 5

1.6 无线传感器网络和无线网状网络的
对比 7

1.7 总结 8

参考文献 8

**第 2 章 无线传感器节点：结构与
操作** 10

2.1 无线传感器网络的限制 10

2.2 设计挑战 12

2.3 硬件体系结构 12

2.4 操作系统与环境 14

2.5 传感器节点示例 16

2.6 基础设施对无线传感器网络性能
指标的影响 16

2.7 MEMS 技术 17

2.8 硬件平台 18

2.8.1 片上系统传感器节点 18

2.8.2 增强通用个人计算机 18

2.8.3 专用传感器节点 18

2.9 软件平台 19

2.10 总结 19

参考文献 19

**第 3 章 无线传感器网络的应用：
概述与案例研究** 21

3.1 目标检测与追踪 21

3.1.1 能量 22

3.1.2 可靠性 23

3.1.3 复杂度 23

3.1.4 目标对环境扰动的识别
(现象学) 23

3.1.5 传感器的选择 24

3.2 轮廓与边缘检测 24

3.2.1 连续极值搜索 25

3.2.2 传感器分组与轮廓点搜寻 25

3.2.3 轮廓线的创建 26

3.3 应用的类型 26

3.3.1 环境应用 26

3.3.2 医疗应用 26

3.3.3 生产过程控制 27

3.3.4 智能家居 27

3.3.5 国土安全 27

3.3.6 水下应用 27

3.3.7 农业 31

3.3.8 军事应用 31

3.4 总结 31

参考文献 31

**第 4 章 无线传感器网络中的介质
访问** 34

4.1 无线网络中的介质访问控制 34

4.1.1 S-MAC：节能协议 35

4.1.2 L-MAC：轻量级 MAC 协议 38

4.1.3 动态调度 MAC 协议 40

4.1.4 节能 QoS 感知 MAC 协议 42

4.1.5 节能应用感知 MAC 协议 43

4.1.6 位置感知 MAC 协议 43

4.1.7 移动无线传感器网络的节能
MAC 协议 444.1.8 O-MAC：以接收端为中心的
能量管理协议 44

4.1.9 PMAC: 无线传感器网络的
自适应节能 MAC 协议 45

4.1.10 T-MAC 协议 46

4.1.11 B-MAC 协议 47

4.2 无线传感器网络的 MAC 问题 48

4.3 总结 49

参考文献 49

第 5 章 无线传感器网络中的路由 53

5.1 无线传感器网络中的路由基础与
挑战 53

5.2 基于网络架构的路由协议 56

5.2.1 多跳平面路由 56

5.2.2 分层 / 分簇路由机制 59

5.2.3 基于位置的路由机制 64

5.3 基于操作特点的路由协议 66

5.3.1 基于查询的路由方法 66

5.3.2 多径路由机制 66

5.3.3 协作与非协作处理 67

5.3.4 基于服务质量的路由机制 67

5.3.5 基于协商的路由机制 68

5.4 总结 68

参考文献 69

第 6 章 无线传感器网络的传输
协议 73

6.1 无线传感器网络的传输协议需求 73

6.2 因特网传输协议及其在无线
传感器网络中的适用性 74

6.3 现有的无线传感器网络传输协议 75

6.3.1 协议分类 75

6.3.2 以拥塞控制和流量控制为中心
的协议 75

6.3.3 以可靠性为中心的协议 82

6.3.4 其他协议 89

6.4 总结 90

参考文献 91

第 7 章 定位与追踪 93

7.1 定位 93

7.1.1 测距技术 94

7.1.2 到达时差 95

7.1.3 到达角和数字罗盘 96

7.1.4 定位算法 96

7.2 目标追踪 109

7.2.1 单目标追踪 109

7.2.2 多目标追踪 114

7.3 总结 116

参考文献 116

第 8 章 拓扑管理与控制 119

8.1 拓扑管理 119

8.2 拓扑管理的分类 119

8.2.1 拓扑发现 119

8.2.2 休眠周期管理 122

8.2.3 集群 125

8.3 拓扑控制 130

8.3.1 网络覆盖 130

8.3.2 网络连通性 132

8.4 总结 134

参考文献 134

第 9 章 无线传感器网络的性能
评估 138

9.1 背景信息 138

9.2 无线传感器网络建模 139

9.3 仿真模型 142

9.4 对传感器行为和传感器网络建模 144

9.4.1 自组织 144

9.4.2 协同算法 145

9.4.3 安全机制 145

9.4.4 能量感知要求 145

9.5 无线传感器网络的仿真工具 146

9.6 性能指标 148

9.7 基本模型 149

9.7.1 流量模型 149

9.7.2 能量模型 150

9.8 总结 150

参考文献 150

第 10 章 无线传感器网络中的安全

问题	153
10.1 背景	153
10.2 无线传感器网络的限制	156
10.3 无线传感器网络的安全需求	156
10.4 无线传感器网络特有的漏洞和 相应攻击方法	158
10.5 无线传感器网络的物理攻击	159
10.6 无线传感器网络近期的安全 问题	161
10.7 无线传感器网络的安全协议	162
10.7.1 SPINS	162
10.7.2 TinySec	162
10.7.3 LEAP	162
10.8 无线传感器网络中的拒绝服务 攻击和相关防御措施	163
10.9 总结	166
参考文献	166

第 11 章 无线移动传感器网络

11.1 覆盖与移动传感器	172
11.1.1 Voronoi 图方法	172
11.1.2 基于虚拟力的方法	175
11.1.3 基于网格的方法	176
11.1.4 事件覆盖	178
11.2 网络寿命延长	181
11.2.1 可预测且可控的移动汇聚 节点	181
11.2.2 可预测但不可控的移动汇聚 节点	182
11.2.3 不可预测且不可控的汇聚 节点	183
11.2.4 移动中继与数据骡子	188
11.3 总结	190
参考文献	190

第 12 章 无线多媒体传感器网络

12.1 网络应用	193
12.1.1 多媒体监控	193
12.1.2 交通管理	193

12.1.3 先进的医疗服务	193
12.1.4 环境监测	194
12.1.5 工业过程控制	194
12.1.6 虚拟现实	194
12.2 无线多媒体传感器网络面临的 挑战	194
12.2.1 资源限制	194
12.2.2 变化的信道容量	195
12.2.3 多媒体编码技术	195
12.2.4 冗余移除	195
12.2.5 QoS 要求	195
12.3 无线多媒体传感器网络的不同 架构	196
12.3.1 传统架构	196
12.3.2 同构、单层、集群式架构	196
12.3.3 同构、多层架构	197
12.3.4 集成架构	198
12.4 不同架构的对比	198
12.5 多媒体传感器节点架构	198
12.6 现有的传感器节点平台	199
12.6.1 Panoptes	199
12.6.2 Cyclops	200
12.6.3 SensEye	201
12.7 通信层	201
12.7.1 物理层	201
12.7.2 链路层	203
12.7.3 网络层	207
12.7.4 传输层	209
12.7.5 应用层	211
12.7.6 跨层问题	213
12.8 总结	214
参考文献	214

第 13 章 水下无线传感器网络

13.1 水下无线传感器网络的特征、 属性和应用	219
13.2 水下物理学和动力学	220
13.3 水下无线传感器网络设计: 通信模型和网络协议	224
13.3.1 水下无线传感器网络组件	224

13.3.2	水下无线传感器网络架构	225	14.3.2	部署在矿井和隧道中的 WUGSN 拓扑	242
13.3.3	定位服务	226	14.4	通信架构	242
13.3.4	水下无线传感器网络协议 设计	228	14.4.1	物理层	243
13.4	总结	233	14.4.2	数据链路层	243
参考文献		233	14.4.3	网络层	244
第 14 章	无线地下传感器网络	237	14.4.4	传输层	244
14.1	应用	237	14.4.5	跨层设计	245
14.1.1	土壤属性监测	238	14.4.6	极端机会路由	245
14.1.2	环境监测	238	14.4.7	地下机会路由协议	246
14.1.3	边界监视	238	14.5	无线地下信道	246
14.1.4	采矿安全警戒	238	14.6	土壤属性对无线地下信道的 影响	248
14.1.5	基础设施监测	238	14.7	地下信道模型	249
14.1.6	定位	239	14.7.1	埋在地下的 WUGSN 通信 信道	249
14.2	无线地下传感器网络设计中的 挑战	239	14.7.2	部署在矿井和隧道中的 WUGSN 通信信道	249
14.2.1	地下通信信道设计	239	14.8	总结	250
14.2.2	拓扑设计	239	参考文献		250
14.2.3	能量消耗	240	索引		252
14.2.4	天线设计	240	参考文献 [⊖]		
14.2.5	环境风险	240			
14.3	网络架构	241			
14.3.1	埋在地下的 WUGSN 拓扑	241			

⊖ 参考文献为在线资源，请访问华章网站 www.hzbook.com 下载。

无线传感器网络概述

无线传感器网络 (WSN) 是近年来逐渐流行的一类无线网络, 广泛应用于民用与军事方面。无线传感器网络是由用来检测物理或环境情况的独立的分布式传感器设备组成的无线网络。无线传感器网络由一系列相连接的微型传感器节点构成, 它们之间互相通信以进行信息和数据交换。这些节点从环境中获得信息 (如温度、压力、湿度、污染情况), 然后把这些信息发送到基站。之后, 基站根据检测数据的类型与数值将这些信息发送到一个有线网络, 触发警报或采取其他的举措 [1-24]。

无线传感器网络的典型应用包括天气与森林监测、战场侦察、物理环境监测 (如压力、温度、震动、污染)、森林和边境上人或动物的移动追踪 [1-23]。它们使用与无线局域网 (WLAN) 相同的传播介质 (即空间) 进行无线通信。为了局域网络中节点的正常通信, 可以考虑采用标准的介质访问协议, 如 IEEE 802.11 协议。然而, 这类协议无法直接应用到无线传感器网络中。原因在于, 与局域网中的设备不同, 传感器通常只具有非常有限的能量供应 (通常为块电池) 且容易被很快消耗。因此, 产生了对新型节能 MAC 协议的需求。由于无线传感器网络自身资源有限, 所以它与传统的 WLAN 必然有显著的区别。

本章将主要介绍无线传感器网络中的基本技术、应用、分类与挑战。

1.1 背景

无线传感器网络由成百上千的小型廉价传感器节点构成, 它们可以有固定的位置, 也可以动态地部署来完成环境监测任务。由于尺寸小, 这些节点存在着很多限制。无线传感器网络的基本功能是监测。目前主要有三类无线传感器网络可以执行监测任务: 实体监测, 即监测一些拥有实体结构的物体, 如桥梁、隧道、高速公路、建筑或人体 (例如人体器官的监测); 区域监测, 包括监测环境区域的异常情况; 区域-实体检测, 包括监测高速公路上行驶的机动车、移动的物体等 [1-15,23,24]。

无线传感器网络的优势并不来源于单个传感器节点, 而是得益于所有相连传感器节点的整体排布。因此, 为了实现高稳定性, 无线传感器网络通常应该有尽可能多的节点, 且具备自我配置功能。由于单个传感器节点的成本往往比较低廉, 所以在无线传感器网络中配备大量的节点通常是可行的。

通常情况下, 传感器节点通过多跳机制来实现互相通信。信息流或数据流停驻的节点称为基站或汇聚节点 (sink)。传感器网络通过汇聚节点或基站连接到一个固定网络来保存采集到的数据, 以便进行进一步处理。一般而言, 与常规节点相比, 基站拥有更强大的处理能力, 因为它们需要执行一些复杂的处理操作。这一点解释了为什么汇聚节点通常由具备更强的处理器、更大 RAM 内存、更大二级存储空间、更强大电池与计算能力的个人计算机 (PC) 或笔记本电脑担当, 它们往往需要执行比常规传感器节点更多的任务。值得注意的是, 传感器网络的最大弊端之一就是它们的电源使用, 而节点之间的通信又会影响电源使用。为了解决这一问题, 我们在网络中加入了汇聚节点来减少节点之间的整体通信量并达到节省能

量目的。汇聚节点属于普通节点，但它们从附近节点中收集数据，执行一些处理动作，然后将处理完的数据发送到下一跳节点。传感器节点会被分簇，每一簇节点有一个“簇首”作为领导者。同一簇内节点的通信都应该经过簇首，然后前进到相邻的簇首，直至目的地，即汇聚节点或基站。另一种不同的节能机制是，当不需要某些节点时允许它们进入休眠模式，需要时再唤醒它们。

无线传感器网络最开始应用于军事领域，而现在已广泛应用于民用领域，比如环境监测、工业过程监测、医疗、道路交通控制、智能家居与智能城市以及办公自动化。在医疗应用方面，无线设备通过降低对病人的侵略性改善了医疗现状。在实用工具方面，无线传感器提供了一种低成本的系统健康数据收集机制，从而降低了能量消耗且增强了资源管理。在远程监控方面，通过降低布线成本并允许新的测量应用种类，无线网络可以与固定网络和系统结合起来应用在很多方面。主要的远程监控应用包括：监测环境中的空气、土壤和水；建筑监测，如桥梁、地铁和建筑物；过程监测；机器监测；居住地监测；智能运输系统；航空运输控制；交通监控；视频监控；热带雨林中的碳循环监测 [1-24]。无线传感器网络中的每个节点通常配有无线电收发器、微控制器以及能源（通常为电池）。传感器节点的成本从几百美元到几十美分不等，这取决于网络的规模以及每个节点的功能与复杂性。传感器尺寸和价格的限制带来了能源、存储、计算资源与吞吐率等方面的限制。通常，传感器网络形成了无线自组织计算机网络，即每个传感器都支持多跳路由机制。

2

无线传感器网络的主要组成部分有：传感器、信号转换器（如模拟-数字（A/D）与数字-模拟（D/A）转换器）、处理器、通信设备与电源。这些组件都变得越来越便宜，越来越小。对于能量消耗必须有严格的要求，因为传感器节点需要足够可靠，且可以执行很长一段时间无人值守的任务，这种任务甚至可能达数年之久。在无线传感器网络的能源设计中，需要考虑的因素包括：能源存储机制或电池类型的选择；小型电力电子设计机制的选择。生产这些设备的公司目前正在发展小型传感器节点与网络。此外，现有的掌上电脑（PDA）或微型计算机都拥有强大的计算能力，这些设备都可以作为强大的传感器节点使用。以常用的 IEEE 802.11 标准为代表的无线局域网协议现在也能提供近似于有线网络的数据传输性能。除此以外，现在还有 IEEE 802.15 标准来提供个人局域网络（PAN）方面的规范，这一标准同样也适用于无线传感器网络。

此外，半导体技术的发展为我们提供了更大的芯片容量与处理器能力。这一进步使得计算和通信系统的能源/比特需求降低。未来，微机电系统（MEMS）技术将创造出更强大、多功能的传感器。MEMO 技术通过微加工方法在同一块硅板上集成了机械元件、传感器、驱动器与电子器件，其中电子器件是由二极管和 CMOS 晶体管等集成电路（IC）技术生产的。这些微型机械元件由适合的微型机械技术制造，此技术专门用来加入新的结构层以制造机械与电子设备 [1-14]。

1.2 无线传感器节点的组成

传感器节点是无线传感器网络的核心组件。它是一种能够感知周围环境并匹配或存储信息的小型设备。随着半导体技术的进步，这些设备的成本一直在降低。这些小型的设备包括以下几个主要组件 [8,9]：

- 微控制器。这是一种单片计算机。虽然它的尺寸很小，但它能执行许多强大的任务，包括控制其他与其相连设备的运转。总的来说，微控制器由微处理器、RAM 内存和

3

相关的外部设备组成。在现今的市场上也存在其他的设备，它们可以用来替代微控制器实现相同的功能。例如，现场可编程门阵列（FPGA）、专用集成电路（ASIC）以及数字信号处理器（DSP）。这些设备各有利弊，但由于较低的能量消耗与较强的计算能力，微处理器仍然是小规模乃至微小规模嵌入式系统的最佳选择。

- 收发器。这是用于在通信中发送、接收数据和指令的发送-接收器。无线传感器网络通过无线电信号进行通信。这些传感器节点一般使用工业、科学与医疗（ISM）频段。ISM 频段在表 1-1 中列出 [15]。
- 外存储器。闪存凭借其较小的尺寸与逐渐增强的存储能力，已经成为无线传感器节点通常使用的外存储器 [8-14]。基于节点的要求，我们可以拥有用户内存与程序内存。外存储器的大小取决于具体应用。
- 能源。节点的能量消耗指的是节点编程、感知与数据采集、数据处理和数据通信方面的功耗。通常情况下，大部分的能量都用于传输数据。能量以电池的形式存储在传感器节点内。电池的成本最近大幅下降 [7-9]，尤其是一次性电池。

表 1-1 工业、科学与医疗频段

频段	频率范围
UHF ISM 频段	902 ~ 928 MHz
S 频段 ISM	2.4 ~ 2.5 GHz
C 频段 ISM	5.725 ~ 5.875 GHz

一般来说，电源分为初级电源和二级电源。初级电源不能充电，而二级电源需要定期充电。初级电源和二级电源的主要考虑因素为：范围、容量、温度、当前损耗程度与自放电特性。人们希望使用燃料电池作为无线传感器网络中传感器的电源 [9-14]。在使用二级电源的地方，电能可以从电池的工作环境收集而来，常见的例子是收集太阳能来为电池充电。然而，也存在其他可行的能量收集方法，比如风能、热能与振动能量。在机械驱动的环境下，由于获取电能的过程是连续不断的，所以收集为电池可能并没有必要，比如在流水线作业中。一种流行的方法是使用太阳能系统，在这种系统中，需要调整安装的角度以保证最好的方向，尤其是在斜坡地段。即使在最好的太阳能硅电池系统中，我们也仅能获得大约 25% 的效率。振动能量收集现在也已经用于工业应用和输油管中。

4

- 传感器。传感器可以根据工作原理分为以下几类：物理传感器；温度传感器；化学传感器；生物传感器；电磁、光学以及声音传感器。

传感器是用来从监控区域中采集数据并产生自然界中某种可测的响应的典型硬件设备。模拟-数字（A/D）传感器可以用来将采集的模拟信号转换为数字形式，以便被微控制器进一步处理。无线传感器节点中的传感器通常为小型电磁感应装置，且仅有有限的能量供应。商用传感器包括 BTnode、BEAN、COTS 和 DOT、MICA、KMote。传感器可以放置在任何类型的环境中工作数日，不需要任何人员照看。传感器面临的主要挑战是电池寿命有限的问题。电池寿命一般都很短，因此我们需要尽量使用节能机制。设想将此类设备放置在战场上，我们无法为这些设备的传感器电池充电或者更换电池。当然，在敌方区域中，我们可以使用飞行器或直升机来布设这些传感器，但却无法进入敌方区域更换电池。主要的功耗来源于节点之间的通信。为了某些特定的任务，节点之间需要互相配合 [1-24]。

1.3 传感器网络的分类

随着无线传感器网络的迅速发展，不同需求的应用相继涌现。为了应对时刻变化的需

求,多种网络应运而生。对于网络的各个层,不同的设计实现了不同的协议。传感器网络有很多分类方式,在此我们只介绍不同传感器网络中的一些本质区别。

- 数据聚合节点。数据聚合节点是传感器网络最重要的特性之一。在传感器网络中,终端用户有时固定在传感器网络中,有时是定时采集数据的移动接入点。对于后者,分布式的高效数据存储方式尤为重要,这是一个显著的区分点。
- 传感器的移动性。另一种传感器网络的分类方式基于传感器的组织形式。一般来说,我们认为传感器是固定的。但是,最近一些传感器网络项目(如 ZebraNet)使用了移动传感器节点。此外,在军事应用中,部队通过放置在士兵身上或者无人机(UAV)上的传感器与有组织的传感器网络进行通信。这些传感器可以使用网络层协议,且能用于移动定位。
- 传感器资源。传感器节点的有效性与计算机资源不同。显然,内存和处理条件会影响协议的实现方式。
- 流量模式。另一个需要考虑的重要特性是网络产生的流量。在大多数事件驱动的应用中,传感器虽在大部分时间内正常工作,但只在检测到重要事件时才产生数据流量。而在环境监测等应用中,传感器需要持续产生数据。

无线传感器网络的分类主要基于以下几个方面 [3,8-13]。

- 空间分辨率。空间分辨率的单位包括厘米、米和毫米等。
- 延迟。根据网络的延迟,可以将其分为轻度延迟网络、中度延迟网络 and 高度延迟网络。
- 覆盖率。据此可将网络分为部分覆盖网络、全覆盖网络和冗余覆盖网络。
- 控制。按控制源的不同,可以将网络分为外部控制网络、中心控制网络和分布式控制网络。
- 时间分辨率。时间分辨率一般以秒度量。
- 用户类型。用户类型包括单端用户、竞争用户、互助用户和合作用户。
- 寿命。网络寿命可以由单一固定时段构成,或由多个不同阶段的固定时段组合而成。
- 带宽。带宽是网络的重要特征和评价标准。根据带宽,可将网络分为小型间断带宽网络、大型间断带宽网络、小型连续带宽网络、大型连续带宽网络四类。带宽的单位可以是字节/段或字节/秒。
- 事件感知能力。包括单离散目标感知网络、多离散目标感知网络、单一分布式事件感知网络 and 多重分布式事件感知网络 [1-24]。

无线传感器网络的其他分类方式基于以下两个概念:网络组织或结构;节点公平性和能力 [13]。

文献 [12] 中作者基于两类无线传感器网络应用(精准农业和野火监管)制定了一个分类系统。针对每个方面,他们列举了用于上述两个领域的无线传感器网络所属的类型。比如,精准农业中传感器网络是中心控制的,而野火监管中是分布式控制的;精准农业中网络用户是单个用户,而野火监管中是合作用户。

1.4 无线传感器网络的特点

无线传感器网络被视为 21 世纪最重要的技术之一。这种由带有许多片上传感器的智能设备组成的大规模网络在智能家居以及城市、工厂和环境的测量和控制领域拥有广阔的应用前景,它们通过无线链路和因特网相互连接。另外,网络传感器为监控和其他军事应用提供

了一种新的手段。尽管各种应用中的传感器网络千差万别，但是它们具备一些共同属性。

首先，传感器大多都是电气、电子或机电装置。总体来说，传感器是一种将某种输入信息转换为另一种信息（通常为电信号）的转换器。传感器可以是单独运行的或成对运行的。能直接读数的温度计和电表是单独运行的传感器的实例。成对运行的传感器使用模拟-数字转换器将模拟信号转换为数字信号。传感器也常应用于医疗、工业、环境、机器人和军事领域。随着材料技术的发展，越来越多的传感器融合了微机电系统（MEMS）技术。

良好的传感器/转换器应该具有以下几个主要特征 [16-24]：

- 对目标属性反应迅速。
- 不受其他非目标属性干扰。
- 产生的输出信号与所测量的输入值大致成正比。
- 具有较长的寿命。
- 具有较低的能耗。

无线传感器网络由成百上千个节点组成，它们利用传感装置（传感器）来监测不同地点的环境情况。这些环境情况包括移动、压力、温度、声音、震动、污染、氧气或二氧化碳浓度、交通拥挤程度和交通路线等。一般来说，这些装置体型小巧，造价低廉，可以批量生产和部署。传统 MANET（移动无线自组织网络）和无线传感器网络的一个主要区别是后者有严格的能量、内存、计算能力和带宽上的限制。传感器节点是包括一个无线电收发器、一个小型微控制器和一个电源（通常是电池）的独立单元。节点基于网络环境动态调整自己的配置。由于电池寿命有限，所以节点在设计时就融入了节能思想。它们大部分时间处于休眠模式或发送数据模式。因此，每个传感器具有无线通信、信号处理和网络化功能。所有无线传感器网络的主要功能都是感知、通信和计算 [1-15]。无线传感器的一种分类机制基于节点能否单独寻址，另一种机制基于网络中的数据是否被聚合。例如，停车场网络中的传感器节点应该能够单独寻址，以便找到空闲车位的具体位置。但是，如果要确定一间屋子内某一角落的温度或气压，单独寻址能力就没那么重要了。利用无线传感器网络收集聚合数据的能力可显著减小网络需要发送的信息量。在某些情况下，传感器发送信息的及时性非常重要，比如当有小偷试图潜入房屋或办公室时，需要及时报警。

7

1.5 无线传感器网络面临的挑战

无线传感器网络的发展进程中主要存在以下几个挑战 [1-15]。

- 可扩展性。智能传感器网络中的大多数传感器节点都是固定的。这类网络很有可能包含数以万计甚至更多的传感器节点。我们希望网络的性能随着其规模的增长而成比例提升，所以可扩展性是设计或者启用新型无线传感器网络时的重要问题。为无线传感器网络设计的算法和协议应该考虑到网络规模增长所带来的通信开销。
- 能量限制。由于无线传感器网络经常安装在沙漠、森林或军事区域这样的遥远地区，其中的节点经常由寿命有限的电池驱动。通常我们无法向这些电池中充电。在这种限制下，任何传感器节点的寿命都是由给它供电的电池寿命决定的。因此，减少其所消耗的能量非常重要。现在已经有一些关于控制无线传感器网络能量消耗的协议和机制，它们基于节能 MAC 协议、数据聚合、拓扑管理、数据压缩或者对于电池的智能使用。当然，使用耗电更少的电子设备和芯片也是设计的关键之一。
- 自组织。考虑到无线传感器网络可能安装在恶劣的环境中，将其设计为自组织的是

很关键的。传感器节点可能因为严酷的环境或者电池的耗尽而失效，因此传感器网络必须能够定期完成自身的重新配置，从而保证其继续正常工作并允许潜在的新节点的加入。个别传感器节点可能与整个网络中断连接，但是网络的主要部分必须能够继续正常工作。

- 最终目标。无线传感器网络的最终目标并不仅仅是通信，它还需要检测和测量一些相关事件。合并多个传感器的数据有助于提升无线传感器网络的检测和测量能力。这样的数据融合要求数据和控制信息的传输，但是这可能会限制网络的设计和结构。另外，辨别伪造的数据和反映真实紧急情况的数据也非常重要。比如，工厂中的高温可能表明火灾发生，也可能是传感器的感知或处理错误造成的。
- 查询能力。在无线传感器网络环境中，用户可能需要查询单个传感器节点或者特定传感器集群在某一区域内收集的信息。基于数据融合的程度，通过网络传送超大量的数据可能并不现实。一种可选择的方案是，不同邻接的汇聚节点可以收集一个区域内的数据，并生成摘要消息。最终，可以将查询发送到离目标位置最近的汇聚节点。
- 互操作性。随着感知与通信技术的快速发展，廉价的短波无线电和无线网络设备开始出现。当然，可以预料的是，无线传感器网络将会广泛地部署到各类应用中。可以给每个网络中的传感器节点装备不同的传感器，包括地震传感器、声音传感器、摄像头传感器、红外线传感器等。传感器节点可以成组配置，并和网络中的传感器节点同步，从而使本地发生的事件被多数甚至所有集群节点辨识。这些节点相互合作以便根据每个节点收集的数据做出局部决策。在这种安排下，一个节点可以作为主节点，其他节点作为从节点。
- 成本。无线微控制器成本中的一个重要问题就是其所需的内存大小。无线传感器网络的设计者希望得到大量具有最优内存大小的芯片或无线微控制器来满足不同应用的需求。例如，较大型应用的开发（例如网关设备）和第三方网络层的开发对内存空间有很大的需求，有时需要的内存甚至大于 250kB。
- 传输时间。发送数据包所需的时间有时会被忽视。传输时间影响性能、服务质量、能量消耗和干扰。因此无线传感器网络需要可靠的数据传输和较长的电池寿命。我们可以通过使用小且实用的数据包大小来提升数据传输的可靠性，因为这样可以最大化数据包在存在干扰的情况下传送到目的地的概率。延长电池寿命可以通过最小化无线电设备的启用时间来实现，因为大部分的能量消耗在这里。总的来说，较小的数据包大小和间歇性的传输可以达到节省能量的目的。
- 数据压缩。在传输前压缩传感器数据可以使传输时间显著减少。在瓦斯水平、温度、压力以及光感传感器节点中，用转移或异常情况传输数据来替代常规传输方式是优化网络通信流量的有效方法。另外，在传感器节点上进行数字化过滤或者数据压缩也是最小化数据规模和重传率的上佳选择。
- 干扰与环境。总的来说，附近的其他无线网络（如蓝牙或者 WLAN）所带来的干扰，都应该引起我们的重视。通常，这些只体现了对无线传感器网络干扰的一种暂态。例如，IEEE 802.15.4 或者 ZigBee 网络的自动重发能力可以使蓝牙的干扰被忽略。类似地，对于利用间歇性传输的无线传感器网络和利用频率跳变的蓝牙来说，帧冲突的概率是比较小的。通过冲突避免机制，WLAN 可以在发送数据之前监听无冲突的射频（RF）信道。但是在较为拥塞的 WLAN 中，由于连续的干扰，所以无线传感器