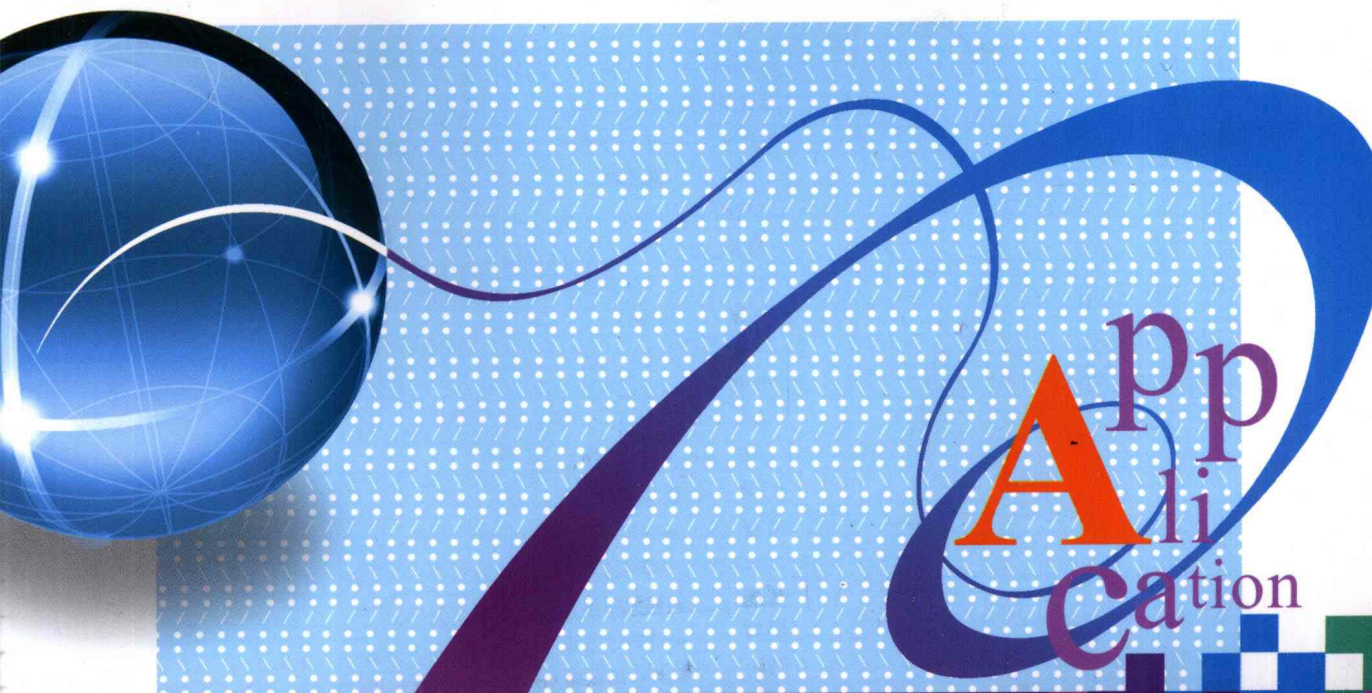


► 21世纪通信网络技术丛书



网络通信与工程应用系列

无线传感器 网络技术与应用

陈林星 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

21 世纪通信网络技术丛书
——网络通信与工程应用系列

无线传感器网络技术与应用

陈林星 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书介绍无线传感器网络技术，主要包括三个部分的内容：无线传感器网络概述，包括基本概念、发展历史、主要技术、网络设计主要影响因素；无线传感器网络技术，包括 MAC、路由、拥塞控制与可靠传输、数据融合、安全、定位、同步、中间件方面的技术；无线传感器网络应用与编程，包括应用设计原理、网络编程、分层编程技术、融合应用编程体系架构。

本书内容丰富、新颖，概念清楚，层次结构合理、明晰，涵盖了当前国际上无线传感器网络的主要研究成果及内容，可帮助读者尽快全面了解和掌握无线传感器网络技术。

本书可供从事无线传感器网络的科研人员、工程技术人员、院校师生，以及所有对此感兴趣的人士阅读和参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

无线传感器网络技术与应用 / 陈林星编著 .—北京：电子工业出版社，2009.3

（21 世纪通信网络技术丛书——网络通信与工程应用系列）

ISBN 978-7-121-08409-6

I. 无… II. 陈… III. 无线电通信—传感器 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 030090 号

责任编辑：王春宁 特约编辑：刘 涛

印 刷：北京智力达印刷有限公司

装 订：北京中新伟业印刷有限公司

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：787×1 092 1/16 印张：25.75 字数：640 千字

印 次：2009 年 3 月第 1 次印刷

印 数：3 500 册 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 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

出版说明

通信网络技术是当今发展最快、应用最广和最前沿的通信领域之一。通信技术发展到今天,已经不是传统意义上的充满神秘色彩的深奥技术了,它已经与日常的应用密不可分。可以说,网络的出现,使通信技术得以有了广阔的用武之地。正是由于有了固定电话网、移动通信网和 Internet,使通信技术的应用在这些平台上有了用武之地,渗透到了我们日常生活的方方面面。

为了促进和推动我国通信产业的发展,电子工业出版社通信分社特策划了一套《21 世纪通信网络技术丛书》。这套丛书根据不同的层面,又细分为三个系列: <移动通信前沿技术系列>、<3GPP LTE 无线通信新技术系列>和<网络通信与工程应用系列>。

<移动通信前沿技术系列>是从移动通信技术(3G 技术)的应用现状与发展情况出发,全面介绍当今移动通信领域涉及的关键技术与热点技术,例如,软件无线电;移动 IP 技术;移动数据通信; WCDMA; TD-SCDMA; cdma2000 移动通信系统网络规划与优化;智能天线技术;认知无线电技术; WiMAX, WiFi, ZigBee 宽带无线接入技术; UWB 技术; UMTS 技术; Ad Hoc 技术等。

<3GPP LTE 无线通信新技术系列>是以 3GPP 中 LTE 标准的关键技术在无线、宽带、高速、资源的有效管理和利用,以及在 B3G/4G 无线通信领域的应用为主。LTE 作为 3G 技术的一个重要的长期演进计划,代表了国际无线通信领域的最新发展需求和解决方案,例如:基于 OFDM 的上、下行(HSxPA)的多址接入技术、随机接入技术、多天线 MIMO 技术、多链路自适应技术、多播技术、功率控制技术、宽带无线网络的安全性、可移动性、可管理性;高效信源与信道编码和调制 MQAM 技术等。

<网络通信与工程应用系列>是以技术为先导,以构建网络的体系结构、标准、协议为目标所开展的对现代无线、移动、宽带通信网络的规划与优化,以及结合工程应用的方向所提出来的。例如,无线网状网、WLAN、无线传感器网络、B3G/4G 通信网工程设计与优化、卫星移动通信网、三网融合技术、网络新安全技术与策略、RFID 应用网络、下一代基于 SIP 的统一通信、光网络与光通信等。

本套丛书依托各高等院校在通信领域从事科研、教学、工程、管理的具有丰富的理论与实践经验的专家、教授;各科研院所的研究员;国内有一定规模和研发实力的科技公司的研发人员,以及国外知名研究实验室的专家、学者等组成编写和翻译队伍,力求实现内容的先进性、实用性和系统性;力求内容组织循序渐进、深入浅出、理论阐述概念清晰、层次分明、经典实例源于实践;力求很强的可读性和可操作性。

本套丛书的主要读者对象是广大从事通信网络技术工作的各科研院所和公司的广大工程技术人员;各高等院校的专业教师和研究生;刚走上工作岗位的大学毕业生;以及与此相关的其他学科的技术人员。

本套丛书从 2008 年上半年开始将陆续推出,希望广大读者能关注它,多对本套丛书提出宝贵意见与建议,欢迎通过电子邮箱 wchn@phei.com.cn 进行探讨、交流和指正,以便今后为广大读者奉献更多、更好的优秀通信技术类图书。

电子工业出版社
通信分社

前 言

传感器技术、低功率电子学以及低功率 RF 设计技术的发展和进步使人们已经能够开发微型、能够通过无线网络相互连接、相对价廉的低功率传感器，这种传感器也叫做微型传感器（Microsensor）。无线传感器网络（WSN）技术能够革新很多场合下的信息采集和处理，代表提取环境数据、各种环境可靠监视（包括监视、机器故障诊断、化学/生物检测等）的一种新方式。大规模无线传感器网络由数千个、甚至数万个微型传感器组成，各个微型传感器分散在一个巨大场中，用来获取纹理细密的高精度感知数据。微型传感器通常依靠电池供电，相互之间进行无线通信。

无线传感器网络可以布置在恶劣、苛刻、复杂、甚至敌方的物理环境中（比如遥远地理区域或者有毒的城市地点、自然灾害区、战场敌方区、战场火力打击区等），也可以布置在人不易接近的环境中（比如大工厂、飞机内部、机器内部，甚至人体内部等）进行低本地维护感知或者监视感知，更可以布置在人易于接近的环境中（比如人体表面各个部位、房间各个角落）进行各种状态监视。

无线传感器网络可以对大量感知信息（比如地震数据、声学数据、高分辨率图像等）进行分布式处理，提高感知数据的精确性。传感器组成网络后，能够累积感知数据，从而提供对环境的一个丰富的、多维的了解。此外，网络化传感器能够重点关注网络中其他传感器指出的关键事件（比如入侵者进入某个建筑物）。网络化传感器在面对各个传感器失效时也仍然能够继续发挥准确的作用。例如，假如网络中的一些传感器丢失某些关键信息，那么其他传感器就可以给这些传感器补充丢失的信息。

可以想象未来一组传感器节点构成 Ad Hoc 分布式处理网络，产生易于访问和高质量的有关真实世界的信息。每个传感器节点在网络中自动工作，不需要中央控制中心；每个传感器节点根据其承担的任务、当前拥有的信息以及所了解的计算资源、通信资源、能量资源、存储资源来做出决策。与孤立的各个传感器比较，网络化传感器有可能精确性更高，系统更加强壮和复杂。

无线传感器网络深入我们生活的每个环节、渗透社会的每个角落，有利帮助人类提高认识物理世界的深度、广度、精确性、及时性，加强和密切人类与物理世界的联系，大力提高人类对物理环境的远端监视和控制能力，所以无线传感器网络应用前景非常广阔。

无线传感器网络设计面临许多技术挑战，比如能量高效网络协议、网络拓扑控制、信号与信息的联合处理、任务分配、信息查询、安全、中间件、网络编程等，其中最重要的挑战是三个关键资源的高效综合利用：①能量，无线传感器节点主要依靠电池供电，电池不方便替换或者重复充电，且大多数情形下不可能替换或者重复充电，而且目前的电池供电能力也非常有限；②通信带宽，无线传感器网络的通信带宽相对于有线网络而言是非常有限的，一般只有几百千比特每秒；③计算能力，由于节能非常关键，所以一般情况下不会给传感器节点配置功能强大的微型处理器，而是采用低功耗、计算能力有限的微型处理器，因而不能运行复杂的网络协议。

无线传感器网络技术是一门跨学科的综合性的网络系统技术，除了涉及最基本的通信、计算机语言、编程知识和技术外，还涉及传感器网络所有应用领域的一些专门知识（比如医学、地震学、土壤学、农学等），这些特殊应用领域的专门知识对于设计高性能传感器网络应用是非常重要的。

本书系统地介绍了无线传感器网络技术，包括三个部分的内容：无线传感器网络概述、无线传感器网络技术、无线传感器网络应用与编程。其目的是为无线传感器网络设计者、研究人员、院校师生以及所有对此感兴趣的人士等全面、系统地理解和掌握无线传感器网络技术提供一些帮助。本书的编写安排如下：

第一部分“无线传感器网络概述”：包括1章（第1章）。介绍无线传感器网络的发展历史，阐述基本概念，分析无线传感器网络的主要技术及其网络设计影响因素，简单介绍了当前流行的传感器节点平台。

第二部分“无线传感器网络技术”：包括11章，其中WSN的MAC技术3章（第2、3、4章），WSN路由技术3章（第5、6、7章），WSN可靠传输技术2章（第8、9章），WSN数据融合技术1章（第10章），WSN安全技术1章（第11章），WSN中间件技术1章（第12章）。各章安排如下：

第2章是无线传感器网络竞争类MAC协议，详细描述了三个典型的WSN竞争类MAC协议：传感器媒介访问控制协议（S-MAC）、超时MAC协议（T-MAC）、伯克利媒介访问控制协议（B-MAC）。

第3章是无线传感器网络分配类MAC协议，详细描述三个典型的WSN分配类协议：流量自适应媒介访问协议（TRAMA）、分布式随机时隙安排协议（DRAND）、功率高效与时延意识媒介访问协议（PEDAMACS）。

第4章是无线传感器网络混合类MAC协议，详细描述WSN时间同步技术和两个典型的WSN混合类MAC协议：斑马-MAC协议（Z-MAC）、漏斗-MAC协议。

第5章是无线传感器网络数据中心路由协议，详细描述了两个典型的WSN数据中心路由协议：协商式传感器信息分发协议（SPIN）、定向扩散。

第6章是无线传感器网络分层路由协议，详细描述了两个典型的WSN分层路由协议：低能量自适应分群分层协议（LEACH）、两层数据分发协议（TTDD）。

第7章是无线传感器网络地理位置路由协议，详细描述了WSN定位技术以及两个典型的WSN地理位置路由协议：贪婪地理路由算法、位置辅助泛洪协议（LAF）。

第8章是无线传感器网络端到端可靠传输协议，详细描述了WSN拥塞检测与预防技术（CODA）和两个典型的WSN端到端可靠传输协议：事件到中心节点的可靠传输协议（ESRT）、基于多电台虚拟中心节点的过载流量管理协议（SIPHON）。

第9章是无线传感器网络逐跳可靠传输协议，详细描述了WSN合成拥塞控制技术（FUSION）和两个典型的WSN逐跳可靠传输协议：慢分发快提取可靠传输协议（PSFQ）、下行数据可靠交付可扩展体系结构（GARUDA）。

第10章是无线传感器网络数据融合协议，详细描述了树状结构累积技术、不受应用约束的自适应数据累积技术（AIDA）、无结构累积技术（DAA+DW）与半结构累积技术（ToD）。

第11章是无线传感器网络安全，详细分析了WSN安全面临的障碍、WSN安全要求，剖析WSN中的各种安全攻击，详细描述SPINS安全解决方案、LEAP+安全解决方案。

第12章是无线传感器网络中间件协议，分析了WSN中间件设计面临的挑战和困难，及

其功能要求，详细介绍 ZebraNet 系统中的中间件系统 (Impala)、无线传感器信息化体系结构与应用中间件体系结构 (SINA)，其间介绍了 SINA 在车辆跟踪中的应用。

第三部分“无线传感器网络应用及编程”：包括 1 章 (第 13 章)。概括了 WSN 在军事、环境、医疗卫生、家庭以及其他商业领域的应用；介绍了 WSN 应用设计原理；阐述了 WSN 网络编程问题，包括编程抽象、编程模型，比如 Kairos 编程模型、微型传感器网络虚拟机 (Mate)、采用属性状态机的无线传感器网络编程 (OSM)；详细描述了 WSN 分层编程技术、抽象任务图宏编程架构 (ATaG)。

本书的编写参阅了大量的研究文献和资料。在每章最后列出本章的主要参考文献。电子科技大学骆睿老师仔细审阅了本书第 2、3、4、7、12 章，并提出了许多改进之处。中国电子科技集团公司电子第 30 研究所高级工程师曾曦审阅了本书第 1、5、6、11、13 章；刘亮审阅了第 10 章；马蓉审阅了第 8 章；张虎审阅了第 9 章。此外作者还得到了谢青、刘英、陈曦、刘静、马先庆、刘伟、叶国宏、刘萍、李家国、王庆、王婷、曾令长、刘陶惠、罗永秀、曾晖、谢长富、周华等人的帮助。在本书的构思和写作过程中，以及本书的成功出版，作者一直得到了电子工业出版社、尤其是电子工业出版社通信分社王春宁博士的大力支持和帮助。作者在此一并表示由衷的感谢！

由于作者知识有限，本书难免会有缺陷，甚至错误。非常欢迎读者来文指出本书的缺点和错误。联系 E-mail: clx-clx-clx@163.com。

目 录

第 1 章 无线传感器网络概述	1
1.1 传感器网络的研究历史	1
1.1.1 早期的军用传感器网络研究	1
1.1.2 美军 DARPA 的分布式传感器网络研究计划	2
1.1.3 20 世纪 80 年代和 90 年代的军用传感器网络	3
1.1.4 21 世纪的传感器网络研究	4
1.2 WSN 基本概念	4
1.2.1 什么是 WSN	5
1.2.2 WSN 与 MANET 的异同	6
1.2.3 WSN 的通信体系结构	7
1.3 WSN 的主要技术	9
1.3.1 系统体系结构	9
1.3.2 网络与通信的控制	11
1.4 影响 WSN 设计的因素	18
1.4.1 容错	18
1.4.2 扩展性	19
1.4.3 价格	19
1.4.4 硬件限制	19
1.4.5 WSN 拓扑	20
1.4.6 WSN 工作环境	21
1.4.7 传输媒介	22
1.4.8 功耗	23
参考文献	25
第 2 章 无线传感器网络竞争类 MAC 协议	29
2.1 传感器媒介访问控制协议 (S-MAC)	29
2.1.1 能量浪费原因分析	29
2.1.2 S-MAC 协议概述	30
2.1.3 休眠的协调	32
2.1.4 避免旁听与消息分片传输	34
2.1.5 时延分析	36
2.1.6 S-MAC 协议实现	39
2.1.7 S-MAC 协议的性能	40
2.2 超时 MAC 协议 (T-MAC)	43
2.2.1 T-MAC 协议概述	43

2.2.2	T-MAC 基本协议	44
2.2.3	分群与同步	45
2.2.4	RTS 操作与 TA 选择	45
2.2.5	避免旁听	46
2.2.6	不对称通信	47
2.2.7	T-MAC 的性能	48
2.3	伯克利媒介访问控制协议 (B-MAC)	51
2.3.1	B-MAC 协议的设计与实现	51
2.3.2	寿命建模	53
2.3.3	参数	55
2.3.4	自适应控制	55
	参考文献	57
第 3 章	无线传感器网络分配类 MAC 协议	59
3.1	流量自适应媒介访问协议 (TRAMA)	59
3.1.1	TRAMA 协议概述	59
3.1.2	TRAMA 协议组成	60
3.1.3	访问方式与相邻节点协议	61
3.1.4	传输时间安排交换协议	62
3.1.5	自适应选举算法	64
3.1.6	TRAMA 的性能	66
3.2	分布式随机时隙安排协议 (DRAND)	69
3.2.1	TDMA 时隙分配问题定义	70
3.2.2	DRAND 算法详述	70
3.2.3	DRAND 正确性	72
3.2.4	DRAND 复杂性分析	73
3.2.5	DRAND 的性能	74
3.3	功率高效与时延意识媒介访问协议 (PEDAMACS)	79
3.3.1	PEDAMACS 协议概述	79
3.3.2	PEDAMACS 分组格式	80
3.3.3	本地拓扑建立阶段	80
3.3.4	AP 拓扑信息收集阶段	83
3.3.5	传输时间安排阶段	83
3.3.6	拓扑调整阶段	84
3.3.7	传输时间安排算法	84
	参考文献	88
第 4 章	无线传感器网络混合类 MAC 协议	91
4.1	斑马 MAC 协议 (Z-MAC)	91
4.1.1	时间同步协议 (TPSN)	92
4.1.2	Z-MAC 协议概述	94
4.1.3	相邻节点寻找与时隙分配	95

4.1.4	本地成帧	96
4.1.5	Z-MAC 协议的传输控制	97
4.1.6	发送规则	97
4.1.7	直接竞争通知	98
4.1.8	Z-MAC 传输时间安排的接收	100
4.1.9	本地时间同步	100
4.1.10	Z-MAC 协议的性能	101
4.1.11	Z-MAC 协议随机分析	103
4.2	漏斗-MAC 协议	105
4.2.1	漏斗问题	106
4.2.2	按需发送信标	107
4.2.3	面向中心节点的传输时间安排	109
4.2.4	定时与成帧	112
4.2.5	Meta-传输时间安排的广播	113
4.2.6	动态深度调整	113
4.2.7	漏斗-MAC 协议的测试床实验评估	116
	参考文献	120
第 5 章	无线传感器网络数据中心路由协议	122
5.1	协商式传感器信息分发协议 (SPIN)	122
5.1.1	SPIN 概述	123
5.1.2	Meta-Data	123
5.1.3	SPIN 消息	123
5.1.4	SPIN 资源管理	124
5.1.5	SPIN 实现	124
5.1.6	SPIN-1: 3 步握手协议	124
5.1.7	SPIN-2: 低能量门限的 SPIN-1	125
5.1.8	用于与 SPIN 比较的其他数据分发算法	126
5.1.9	SPIN 的性能评估	127
5.1.10	SPIN 小结	133
5.2	定向扩散	134
5.2.1	定向扩散的组成要素	134
5.2.2	命名	135
5.2.3	兴趣与梯度	135
5.2.4	数据传播	138
5.2.5	路径建立与路径裁剪的强化	139
5.2.6	定向扩散的分析评估	142
5.2.7	定向扩散的仿真评估	145
	参考文献	148
第 6 章	无线传感器网络分层路由协议	151
6.1	低能量自适应分群分层 (LEACH)	151

6.1.1	LEACH 协议体系结构	151
6.1.2	群首选择算法	152
6.1.3	分群算法	153
6.1.4	稳定状态阶段	154
6.1.5	LEACH-C: BS 建立分群	156
6.1.6	LEACH 的分析与仿真	156
6.2	两层数据分发协议 (TTDD)	160
6.2.1	两层数据分发	162
6.2.2	栅格结构	162
6.2.3	TTDD 转发	164
6.2.4	栅格维护	166
6.2.5	TTDD 开销分析	167
6.2.6	TTDD 的性能	170
6.2.7	TTDD 讨论	174
	参考文献	175
第 7 章	无线传感器网络地理位置路由协议	178
7.1	定位技术	178
7.1.1	距离测量与角度测量	178
7.1.2	位置计算	179
7.1.3	TPS 网络模型	179
7.1.4	TPS 定位方案	180
7.1.5	TPS 技术性能分析	183
7.2	贪婪地理路由算法	185
7.2.1	概述	186
7.2.2	基于 DT 的膨胀分析	188
7.2.3	贪婪转发 (GF)	190
7.2.4	有界 Voronoi 贪婪转发 (BVGF)	192
7.2.5	网络膨胀分析总结	196
7.2.6	基于概率通信模型的扩充	196
7.3	位置辅助泛洪协议 (LAF)	198
7.3.1	LAF 协议概述	198
7.3.2	采用 LAF 分发信息	201
7.3.3	LAF 中的资源管理	201
7.3.4	栅格维护开销	201
7.3.5	数据分发规程的完备性	202
7.3.6	LAF 节能分析	203
7.3.7	位置估计中的误差	204
7.3.8	LAF 的性能	204
	参考文献	206

第 8 章 无线传感器网络端到端可靠传输协议	210
8.1 事件到中心节点的可靠传输协议 (ESRT)	210
8.1.1 问题定义	210
8.1.2 评估环境	212
8.1.3 特性区域	214
8.1.4 ESRT 协议描述	215
8.1.5 拥塞检测	218
8.1.6 ESRT 协议对并发事件的处理	219
8.1.7 ESRT 协议的性能分析	222
8.1.8 ESRT 协议的仿真结果	223
8.1.9 ϵ 的正确选择	225
8.2 基于多电台虚拟中心节点的过载流量管理 (SIPHON)	225
8.2.1 拥塞检测与预防 (CODA)	226
8.2.2 虚拟中心节点寻找与可见度范围控制	232
8.2.3 SIPHON 拥塞检测	233
8.2.4 改变流量的传输路径	234
8.2.5 次网络中的拥塞	235
8.2.6 虚拟中心节点开销分析	235
参考文献	236
第 9 章 无线传感器网络逐跳可靠传输协议	239
9.1 合成拥塞控制技术 (FUSION)	239
9.1.1 拥塞崩溃的症状	239
9.1.2 逐跳流量控制	240
9.1.3 速率限制	241
9.1.4 MAC 层优先级化	241
9.1.5 应用自适应	242
9.2 慢分发、快提取可靠传输协议 (PSFQ)	242
9.2.1 PSFQ 协议概述	243
9.2.2 PSFQ 分发操作	245
9.2.3 PSFQ 提取操作	246
9.2.4 PSFQ 报告操作	248
9.2.5 单个分组消息的交付	249
9.2.6 PSFQ 的性能	249
9.3 下行数据可靠交付可扩展体系结构 (GARUDA)	252
9.3.1 面临的挑战	252
9.3.2 可靠性语义	253
9.3.3 GARUDA 的基本原理	254
9.3.4 单个分组或第一个分组的交付	257
9.3.5 即时构建 GARUDA 核	259
9.3.6 两阶段丢失恢复	260

9.3.7	其他可靠性语义的支持	261
9.3.8	GARUDA 的性能	263
	参考文献	265
第 10 章	无线传感器网络数据融合技术	268
10.1	树状结构累积	268
10.1.1	分布式生成树算法	268
10.1.2	E-Span 树	269
10.2	不受应用约束的自适应数据累积 (AIDA)	270
10.2.1	AIDA 协议概述	271
10.2.2	AIDA 体系结构	271
10.2.3	AIDA 控制单元中的累积方案	272
10.2.4	AIDA 累积功能单元	275
10.2.5	AIDA 分组格式	275
10.2.6	AIDA 分组头开销分析	277
10.2.7	AIDA 节省分析	277
10.2.8	AIDA 的性能	278
10.3	无结构累积法与半结构累积法	281
10.3.1	数据意识任意组播 (DAA)	282
10.3.2	ToD 上的动态转发	286
10.3.3	性能分析	292
10.3.4	ToD 和 DAA 的性能	295
	参考文献	298
第 11 章	无线传感器网络安全	300
11.1	WSN 安全概述	300
11.1.1	WSN 安全威胁模型	300
11.1.2	WSN 安全面临的障碍	300
11.1.3	WSN 安全要求	302
11.1.4	WSN 安全解决方案的评估	304
11.2	WSN 中的安全攻击	304
11.2.1	物理层安全攻击	305
11.2.2	链路层安全攻击	306
11.2.3	对 WSN 网络层 (路由) 的攻击	307
11.2.4	对传输层的攻击	310
11.3	SPINS 安全解决方案	310
11.3.1	符号	311
11.3.2	SNEP	311
11.3.3	μ TESLA	313
11.3.4	μ TESLA 详细描述	314
11.3.5	SPINS 实现	316
11.3.6	SPINS 性能评估	318

11.4	LEAP+安全解决方案	319
11.4.1	假设条件	319
11.4.2	LEAP+概述	319
11.4.3	单独密钥的建立	320
11.4.4	成对密钥的建立	321
11.4.5	分群密钥的建立	325
11.4.6	全网密钥的建立	325
11.4.7	本地广播认证	326
11.4.8	LEAP+安全分析	327
11.4.9	LEAP+性能评估	329
	参考文献	330
第 12 章	无线传感器网络中间件技术	334
12.1	WSN 中间件面临的挑战	334
12.2	WSN 中间件的功能要求	335
12.3	ZebraNet 系统中的中间件系统 (Impala)	335
12.3.1	ZebraNet 系统简介	336
12.3.2	ZebraNet 中间件体系结构	338
12.3.3	应用适配器	342
12.3.4	应用更新器	344
12.3.5	周期性操作调度	347
12.3.6	事件处理模型	348
12.3.7	Impala 网络接口	350
12.3.8	Impala 评估	353
12.4	传感器信息网络化体系结构 (SINA)	359
12.4.1	SINA 的功能组成	359
12.4.2	信息抽象	361
12.4.3	传感器查询与任务分配语言 (SQTL)	361
12.4.4	传感器执行环境 (SEE)	362
12.4.5	信息收集方法	362
12.4.6	应用举例	363
	参考文献	366
第 13 章	无线传感器网络应用及编程	368
13.1	传感器网络的应用	368
13.1.1	军事应用	368
13.1.2	环境应用	369
13.1.3	医疗卫生应用	370
13.1.4	家庭应用	371
13.1.5	其他商业应用	371
13.2	WSN 应用设计原理	373
13.2.1	设计方面	373

13.2.2 确定 WSN 操作坊式	376
13.3 WSN 网络编程	378
13.3.1 编程抽象	378
13.3.2 现有若干编程模型简介	379
13.4 分层编程与 ATaG 编程架构	381
13.4.1 WSN 的分层编程	381
13.4.2 抽象任务图编程架构 (ATaG)	383
13.4.3 采用 ATaG 的应用开发方法	389
13.4.4 一个 ATaG 应用例子	390
参考文献	391

第 1 章 无线传感器网络概述

许多领域需要监视和测量各种物理现象[比如温度、液位、振动、损伤(张力)、湿度、酸度、泵、生产线的发电机、航空、建筑物维护等],包括建筑工程、农林业、卫生、后勤、交通运输、军事应用等。有线传感器网络一直长期用于支持这种环境,直到最近也只是在有有线基础设施不可行的时候(比如偏僻区域、敌对环境)才使用无线传感器。有线传感器网络安装、停机、测试、维护、故障定位、升级的成本高,从而使得无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)很有吸引力。

最新技术发展已经使得人们能够生产智能、自治、能量高效并且可以大量使用的传感器,在地理区域中构成自组织和自愈 WSN。无线传感器技术成本大幅度下降,因而具有广泛的应用。随着 WSN 技术和其他相关技术的不断发展进步, WSN 将不断成熟,极有可能长期而显著地改变人类的日常生活。

WSN 技术是一门跨学科的新技术。下面首先介绍传感器网络的研究历史,然后介绍 WSN 的基本概念,比较 WSN 与 MANET 的异同,分析 WSN 网络设计的影响因素,简述 WSN 涉及的主要技术,最后详细描述 WSN 中的一个重要概念——覆盖范围。

1.1 传感器网络的研究历史

传感器网络的发展需要三个不同研究领域的技术:感知、通信和计算(包括硬件、软件、算法)。这三个领域的共同进步和其中某个领域的进步已经推动了传感器网络的研究和发展。初期的传感器网络包括空中交通控制使用的雷达网络。美国国家电网包含许多传感器,可以看做一种大型的传感器网络。这些系统具有专门的计算机和通信能力,并且在“传感器网络”术语流行之前就已经存在。

1.1.1 早期的军用传感器网络研究

就像很多技术那样,国防、军事应用是传感器网络研究和一个推动力。在冷战时期,美国就在战略区域布置了声学监视系统(Sound Surveillance System, SOSUS),用于检测和跟踪静默下的前苏联潜艇。SOSUS 是一种声学传感器(水下测声仪)系统,安装在海底。之后,美国开发了其他较复杂的声学网络,用于潜艇监视。现在美国国家海洋与大气管理局(National Oceanographic and Atmospheric Administration, NOAA)利用 SOSUS 来监视海洋事件,比如地震和海洋动物活动情况^[1]。在冷战时期,美国还开发和布置了防空雷达系统,用于保护美国大陆和加拿大。这种防空雷达系统已经经历了多年的发展,包括像传感器一样的航空器以及机载报警与控制系统(Airborne Warning and Control System, AWACS)飞机,现在还用于禁止毒品交易。

这些传感器网络一般采用分层处理结构,各层依次进行处理,直到有关感兴趣事件的信

息到达用户为止。在很多情况下，操作员在系统中起着关键作用。尽管早期军用传感器网络的研究重点是为了满足任务需求，比如声学信号处理和释义、跟踪、融合，但是早期军用传感器网络为现代传感器网络提供了一些关键处理技术。

1.1.2 美军 DARPA 的分布式传感器网络研究计划

传感器网络的现代研究起始于 1980 年左右美国国防高级研究计划署 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 的分布式传感器网络 (Distributed Sensor Networks, DSN) 研究计划。此时，美国的 ARPANET (互联网的前身) 也已经工作运行了好几年，具有 200 个综合性大学和研究机构的主机。TCP/IP 协议的发明者之一 R. Kahn 先生在互联网协议开发中发挥了关键作用，是 DARPA 信息处理技术办公室 (Information Processing Techniques Office, IPTO) 主任。R. Kahn 先生希望知道 ARPANET 通信技术是否能够延伸到传感器网络中。假定网络有很多分布在空间的低成本传感器节点组成，各个节点既相互协作，又各自独立工作，信息可以传递给任何需要的节点。

在当时的技术发展水平下，这是一个雄心勃勃的研究计划。这正好是个人计算机和工作站之前的事情，传感器的处理工作大都由小型机 (比如运行 Unix 和 VMS 的 PDP-11 机、VAX 机) 来完成，调制/解调器的速度为 300~9 600 baud/s，以太网也正好开始流行。

1978 年召开的分布式传感器网络专题研讨会^[2]确定了 DSN 的技术组成，包括传感器 (声学)、通信 (在资源共享网络公共应用上进行链路处理的高级协议)、处理技术和算法 (包括传感器自定位算法)、分布式软件 (动态可更改分布式系统和语言设计)。由于 DARPA 此时正在大力发起人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 的研究，所以专题研讨会还包括提到了各种分布式问题解决技术以及运用 AI 来理解信号和访问态势。由于可用的现成技术很少，所以最后的 DSN 研究计划不得不解决分布式计算支持、信号处理、跟踪以及测试床方面的问题，选择分布式声学跟踪作为示范的目标问题。

卡内基梅隆大学 (CMU) 在 DSN 研究项目中的研究重点是提供网络操作系统，以便灵活、透明地访问容错 DSN 所需要的分布式资源。CMU 的研究人员开发了一个称做 Accent 的面向通信的操作系统^[8]，其原型支持透明网络化、系统重组以及重新装订。Accent 进一步发展成 Mach 操作系统^[9]，后者获得了相当大的商业成功。CMU 的其他研究成果包括支持活动通信计算的动态重新装订的网络进程间通信协议、构建分布式系统软件的接口技术规范语言、DSN 软件的动态载荷平衡和故障重组系统。在室内测试床上，通过与以太网连接在一起的信号源、声学传感器、VAX 计算机，演示了所有这些研究成果。

麻省理工学院 (MIT) 在 DSN 研究项目中的研究重点是基于已知信息的信号处理技术^[10]，以便采用信号提取和匹配技术、通过运用分布式麦克风阵列来跟踪直升机。信号提取技术认为信号由多电平信号组成，抑制较低电平 (比如频谱) 中的详细信息，提取较高电平 (比如峰值) 中的信息。MIT 的研究人员提供了一个概念性框架体系，用于研究信号处理系统，该系统类似于人们在交互式处理和解释真实世界信号时的系统。通过综合人工试探法，将这种方法用于缺乏模型的高信噪比率场合。此外，MIT 还开发了信号处理语言和交互式计算环境 (Signal Processing Language and Interactive Computing Environment, SPLICE)，用于 DSN 数据分析和算法开发；开发了推销主管助理，借助该助理和使用活动范围信息进行交互式基本频率评估。