

无线传感器网络

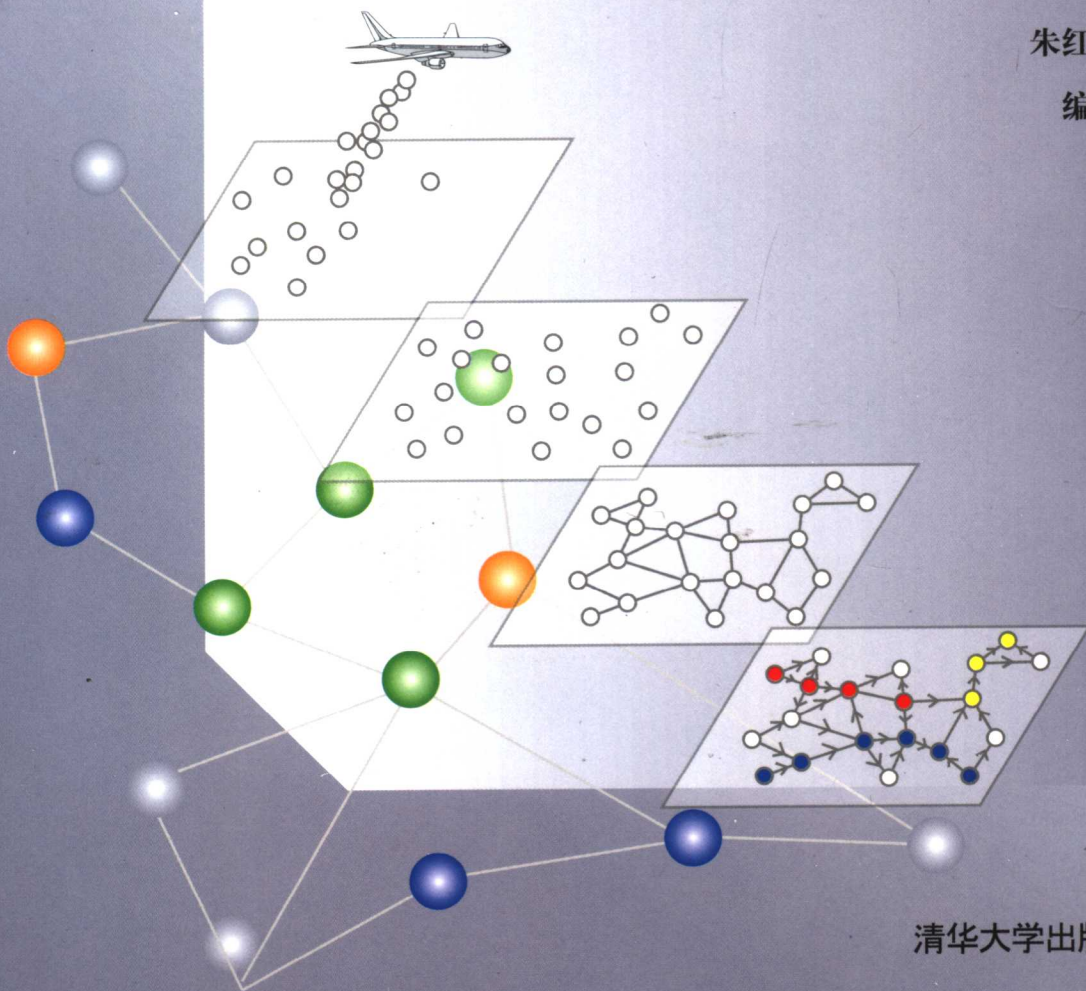
孙利民

李建中

陈渝

朱红松

编著



清华大学出版社



无线传感器网络

孙利民

李建中

陈 渝

朱红松

编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书介绍了无线传感器网络研究领域中的研究成果和应用技术。全书共分为三篇。第1篇是无线传感器网络的通信协议,包括网络拓扑控制、路由协议、介质访问协议和短距离低功耗无线通信标准;第2篇是无线传感器网络的支撑技术,包括定位机制、时间同步、网络安全、数据管理和数据融合;第3篇是无线传感器网络的应用技术,包括传感器节点的硬件平台、编程语言 nesC、操作系统 TinyOS、跟踪系统和环境监测系统。全书基本上反映了近几年来无线传感器网络相关方面的最新研究成果,并提供了详尽的参考文献。

本书内容丰富,覆盖面广,叙述深入浅出,既可以作为网络通信、传感器技术等专业的研究生教材,也可以供广大对传感器网络技术感兴趣的工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

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。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂沫清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络/孙利民等编著. —北京:清华大学出版社,2005.5

ISBN 7-302-10693-2

I. 无… II. 孙… III. 传感器—无线电通信 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 023540 号

出 版 者:清华大学出版社

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

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

组稿编辑:薛 慧

文稿编辑:薛 慧 赵彤伟

封面设计:常雪影

版式设计:肖 米

印 刷 者:北京嘉实印刷有限公司

装 订 者:三河市金元装订厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印张:27.75 字数:568千字

版 次:2005年5月第1版 2005年5月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-10693-2/TP·7233

印 数:1~4000

定 价:42.00元

序 言

随着半导体技术、微系统技术、通信技术、计算机技术的飞速发展，20世纪90年代末在美国发端了现代意义的无线传感器网络技术。其后，该技术相继被一些重要机构预测为将改变世界的重要新技术，相关研究工作在世界各主要发达国家轰轰烈烈地开展起来。

我国现代意义的无线传感器网络及其应用研究几乎与发达国家同步启动，首次正式出现于1999年中国科学院《知识创新工程试点领域方向研究》的“信息与自动化领域研究报告”中，作为该领域提出的五个重大项目之一（当时的项目名称：重点地区灾害实时监测、预警和决策支持示范系统）。随着知识创新工程试点工作的深入，2001年中国科学院依托上海微系统所成立微系统研究与发展中心，旨在引领中国科学院内部的相关工作。微系统研究与发展中心在无线传感器网络方向上陆续部署了若干重大研究项目和方向性项目，参加单位包括上海微系统所、声学所、微电子所、半导体所、电子所、软件所以及中国科技大学等10余个研究所和高校。经过几年的努力，初步建立了传感器网络系统的研究平台，在无线智能传感器网络通信技术、微型传感器、传感器端机、移动基站和应用系统等方面取得了很大进展。2004年9月相关成果在北京进行了大规模外场演示，部分成果已在实际工程系统中使用。

无线传感器网络无论是在国家安全，还是国民经济诸方面均有着广泛的应用前景。未来，传感器网络将向天、空、海、陆、地下一体化综合传感器网络的方向发展，最终将成为现实世界和数字世界的接口，深入到人们生活的各个层面，像互联网一样改变人们的生活方式。微型、高可靠、多功能、集成化的传感器，低功耗、高性能的专用集成电

路,微型、大容量的能源,高效、高可靠的网络协议和操作系统,面向应用、低计算量的模式识别和数据融合算法,低功耗、自适应的网络结构,以及在现实环境的各种应用模式等课题是研究的重点。

无线传感器网络技术涉及计算机、半导体、网络、通信、光学、微机械、化学、生物、航天、医学、农业等众多领域。对该技术的深入研究将推动我国的信息化建设,并极大地带动相关产业和学科的发展,从而为国民经济带来新的增长点。由于无线传感器网络技术是应用性非常强的技术,国内在开展这方面的研究工作时一定要坚持需求牵引,面向具体应用,不要走到闭门研究的老路上去。

2005年新年伊始,中国科学院召开了信息口相关研究所关于无线传感器网络技术的研讨会,共商无线传感器网络下一步的发展大计。在会上与中国科学院软件所孙利民进行了交流,并有幸拜读了他们的专著《无线传感器网络》。该书系统地讨论了无线传感器网络技术的各个方面,不仅分析了国际上最新的理论进展,而且介绍了开发传感器节点和网络相关的软硬件技术,以及传感器网络典型的应用系统。作者近年一直在从事无线传感器网络的研发工作,这本书是他们对外大量研究成果的分析和整理,以及对自己研发经验的归纳和总结。这是我国第一本该领域的专著,相信此书作为该领域科研工作者和研究生的重要参考书,对推动我国无线传感器网络的研究将发挥重要作用。

封松林

2005年2月于上海

传感器技术、微机电系统、现代网络和无线通信等技术的进步，推动了具有现代意义的无线传感器网络的产生和发展。无线传感器网络涉及众多学科，成为目前 IT 领域中的研究热点之一。现在，互联网为人们提供了快捷的通信平台，极大地方便了人们的信息交流。无线传感器网络扩展了人们的信息获取能力，将客观世界的物理信息同传输网络连接在一起，在下一代互联网中将为人们提供最直接、最有效、最真实的信息。无线传感器网络能够获取客观物理信息，具有十分广阔的应用前景，能应用于军事国防、工农业控制、城市管理、生物医疗、环境监测、抢险救灾、反恐反恐、危险区域远程控制等诸多领域。美国在 20 世纪 90 年代就开始了传感器网络的研究工作，并首先在军方应用和推广。我国也非常重视无线传感器网络的发展，国家自然科学基金委员会已经审批了无线传感器网络相关的一个重点课题和多个面上课题，在国家发展改革委员会的下一代互联网示范工程中，也部署了无线传感器网络相关的课题。

2002 年初，我在网络上看到“wireless sensor networks”的概念，出于对新事物的特有敏感，开始关注这项新技术。2003 年初，美国的加州大学伯克利分校 (University of California, Berkeley)、加州大学洛杉矶分校 (University of California, Los Angeles) 和康奈尔大学 (Cornell University) 等 n 所大学开始有很丰富的研究成果。经过认真学习和积极准备，我负责撰写了国家自然科学基金面上课题“基于能量高效的传感器网络协议的研究”，并得到了批准。2003 年底，我应邀参加了国家自然科学基金委员会在西安组织的无线传感器网络研讨会，并与国内的研究所和高校进行了广泛的交流。2004 年初，发

现网上关于传感器网络的资料非常多,美国主流大学几乎都在研究无线传感器网络。同时,国内也开始掀起了传感器网络的研究热潮。同年3月份,与沈阳自动化所于海斌、浙江大学王智联合申请了国家自然科学基金的重点课题“面上传感器网络的分布自治系统关键技术及协调控制理论”,该课题获得批准。2004年底,在YOCSEF的传感器网络研讨会上做了“以数据为中心的无线传感器网络”的特邀报告。

在研究无线传感器网络技术的同时,我们成立了无线传感器网络研发组。在一年的时间内开发了多个版本的传感器节点,构建起了高效的网络研究硬件平台。同时,通过吸收国外大学和研究所的研究成果,开始尝试构建自己的协议栈和通信模块,并针对特定的应用展开通信协议、时间同步、服务质量等方面的开发和实践。通过建立小型的环境监测系统 and 车场车位管理系统的研发工作,我们对无线传感器网络从技术层面上有了更深入的了解,在算法设计和理论研究方面有了更明确的方向。传感器网络是应用相关的,不同应用的传感器网络技术差别可能很大。所以我们一直秉承的研究路线就是在特定的应用领域内研究特定的传感器网络技术。

连续两年对传感器网络的理论研究和一年多的技术实践经验总结构成了本书全部的内容。作为一类特定的网络形态,无线传感器网络一定拥有构筑网络架构的通信协议;作为一个完整的网络系统,它也一定要有辅佐核心结构的丰富的支撑技术;作为一种源于应用而又服务于应用的现实可行的网络技术,它还要有一套完善的软硬件设计原则、高效的开发平台,以及一系列别具特色的应用实例。根据这三方面内容不同的主题,本书划分为“通信协议”、“支撑技术”和“应用技术”三大部分。

核心技术部分涉及网络系统的基本网络协议的讨论,包括路由协议、MAC协议、拓扑控制协议以及目前非常看好的低功耗低速率的无线网络协议IEEE 802.15.4。支撑技术部分介绍了形成完整网络应用所需要的定位技术、时间同步技术、安全技术、数据管理技术以及数据融合技术,使传感器网络看起来更像一项有血有肉、呼之欲出的网络技术。应用技术从分析现实的软硬件研究平台出发,以跟踪系统和监测系统的实践过程为实例,让读者与传感器网络进行一次亲密接触,揭开传感器网络神秘的面纱,使每一个具有创新冲动的人都能够构建一个切实可行的属于自己的研发平台。

如果这本书能够把国际上在传感器网络方面的研究成果展示出来,能够把我们几年来的理论与实践的体会表现出来,能够缩短人们对传感器网络技术的了解和入门的时间,能够对推动国内无线传感器网络技术的发展有一点帮助,那么对每一位曾为这本书付出心血的人来说,都是一个最大的奖赏。

我想把前言的最后部分留给所有为本书的写作和出版付出辛勤劳动的老师和学生,没有他们的聪明才智和认真负责的态度,就不会有本书的出版。

作为本书的主编,我具体编写了第1章、第3章和第7章,哈尔滨工业大学的李建中编写了第9章,清华大学的陈渝编写了第12章和第13章,中科院软件所的朱红松编写了第8章和第11章。作为中科院软件所无线传感器网络课题组的中坚力量,颜庭莘编写了本书的第2章和第15章,杨贺编写了第4章,罗政军编写了第5章,王海东编写了第6章,毕艳忠编写了第10章,李延编写了第14章。我与这些章节的作者一起详细探讨了有关内容,并进行了多次修改。另外,感谢课题组的徐鹏、刘俊涛、孙玉砚、柯欣、乔元松、雷文、石志强和张焕强等,他们多次参与了技术讨论,提供了无线传感器网络的相关资料。

我还要感谢我的家人和朋友,特别是我的妻子和女儿,谨以此书献给他们。

由于水平有限,加之时间仓促,本书一定有不少缺点和错误,希望得到广大读者的指正。无线传感器网络正处在飞速发展的阶段,我们将在吸取大家意见和建议的基础上,不断修改和完善书中有关内容,为推动该领域的进步尽绵薄之力。

孙利民

2005年3月30日

于中科院软件园区

第 1 篇 传感器网络通信协议

第 1 章 无线传感器网络概述	3
1.1 传感器网络体系结构	4
1.1.1 传感器网络结构	4
1.1.2 传感器节点结构	5
1.1.3 传感器网络协议栈	5
1.2 传感器网络的特征	6
1.2.1 与现有无线网络的区别	6
1.2.2 传感器节点的限制	7
1.2.3 传感器网络的特点	9
1.3 传感器网络的应用	11
1.4 传感器网络的研究进展	14
1.5 传感器网络的关键技术	16
1.6 本书章节安排	23
参考文献	25
第 2 章 路由协议	27
2.1 概述	27
2.2 路由协议分类	28
2.3 能量感知路由	29
2.3.1 能量路由	29

2.3.2	能量多路径路由	31
2.4	基于查询的路由	32
2.4.1	定向扩散路由	32
2.4.2	谣传路由	34
2.5	地理位置路由	36
2.5.1	GEAR 路由	36
2.5.2	GEM 路由	38
2.5.3	边界定位的地理路由	42
2.6	可靠路由协议	45
2.6.1	基于不相交路径的多路径路由机制	45
2.6.2	ReInForM 路由	47
2.6.3	SPEED 协议	49
2.7	路由协议自主切换	52
2.8	小结	54
	参考文献	55

第3章 MAC 协议

3.1	概述	59
3.2	基于竞争的 MAC 协议	61
3.2.1	IEEE 802.11 MAC 层协议	61
3.2.2	S-MAC 协议	64
3.2.3	T-MAC 协议	67
3.2.4	Sift 协议	70
3.3	基于时分复用的 MAC 协议	73
3.3.1	基于分簇网络的 MAC 协议	74
3.3.2	DEANA 协议	75
3.3.3	基于周期性调度的 MAC 协议	75
3.3.4	TRAMA 协议	78
3.3.5	DMAC	81
3.4	其他类型的 MAC 协议	85
3.4.1	SMACS/EAR 协议	85
3.4.2	基于 CDMA 方式的信道分配协议	86
3.5	小结	87



参考文献	88
第 4 章 拓扑控制	89
4.1 概述	89
4.2 功率控制	90
4.2.1 基于节点度的算法	91
4.2.2 基于邻近图的算法	92
4.3 层次型拓扑结构控制	94
4.3.1 LEACH 算法	95
4.3.2 GAF 算法	97
4.3.3 GAF 改进算法	98
4.3.4 TopDisc 算法	100
4.4 启发机制	103
4.4.1 STEM 算法	103
4.4.2 ASCENT 算法	105
4.5 小结	106
参考文献	107
第 5 章 IEEE 802.15.4 标准	109
5.1 概述	109
5.2 IEEE 802.15.4 网络简介	110
5.2.1 IEEE 802.15.4 网络的拓扑结构	111
5.2.2 网络拓扑的形成过程	112
5.3 IEEE 802.15.4 网络协议栈	114
5.3.1 物理层	114
5.3.2 MAC 子层	117
5.3.3 鲁棒性	125
5.3.4 能量消耗	125
5.3.5 安全服务	125
5.4 CC2420 芯片	127
5.4.1 CC2420 内部结构	127
5.4.2 外围电路	128
5.4.3 处理器接口	129
5.4.4 RAM 区的读写	130



5.4.5	CC2420 内部寄存器	131
5.4.6	MAC 子层安全操作	132
5.5	小结	132
	参考文献	132

第 2 篇 传感器网络支撑技术

第 6 章	定位技术	135
6.1	定位技术简介	136
6.1.1	基本概念和算法	136
6.1.2	定位算法分类	140
6.2	基于距离的定位	140
6.2.1	基于 TOA 的定位	141
6.2.2	基于 TDOA 的定位	141
6.2.3	基于 AOA 的定位	143
6.2.4	基于 RSSI 的定位	146
6.3	距离无关的定位算法	148
6.3.1	质心算法	148
6.3.2	DV-Hop 算法	149
6.3.3	Amorphous 定位算法	151
6.3.4	APIT 算法	152
6.4	小结	154
	参考文献	155
第 7 章	时间同步	157
7.1	传感器网络时间同步的要求	157
7.2	网络时间同步机制	159
7.3	传感器网络时间同步机制	162
7.3.1	RBS 同步机制	163
7.3.2	TPSN 时间同步协议	165
7.3.3	mini-sync 和 tiny-sync 同步算法	168
7.3.4	DMTS 同步机制	171
7.3.5	LTS 机制	173

7.3.6 其他同步机制	174
7.4 小结	176
参考文献	177
第8章 安全技术	179
8.1 概述	179
8.2 符号说明	182
8.3 传感器网络的安全分析	182
8.3.1 物理层的攻击和防御	184
8.3.2 链路层的攻击和防御	185
8.3.3 网络层的攻击和防御	186
8.4 依赖基站的网络安全框架协议——SPINS	188
8.4.1 安全网络加密协议 SNEP	188
8.4.2 基于时间的高效的容忍丢包的流认证协议 μ TESLA	191
8.4.3 SPINS 协议的实现问题	199
8.4.4 美国加州大学伯克利分校的模型系统	202
8.5 安全管理	203
8.5.1 预共享密钥模型	205
8.5.2 随机密钥预分布模型	206
8.5.3 其他安全引导模型	213
8.6 小结	216
参考文献	217
第9章 数据管理	219
9.1 概述	219
9.2 系统结构	221
9.3 数据模型和查询语言	224
9.3.1 数据模型	224
9.3.2 查询语言	225
9.4 数据存储与索引技术	227
9.4.1 数据命名方法	228
9.4.2 以数据为中心的数据存储方法的性能	228
9.4.3 数据中心存储方法	229
9.4.4 层次检索结构	233

9.4.5	一维分布式索引	235
9.4.6	多维分布式索引	236
9.5	查询处理技术	238
9.5.1	集中与分布式查询处理方法	238
9.5.2	聚集操作的处理技术	240
9.5.3	连续查询处理技术	243
9.5.4	TinyDB 的查询处理技术	245
9.6	数据管理系统实例	250
9.6.1	传感器网络数据管理系统 TinyDB	250
9.6.2	Cougar 系统	254
9.7	小结	256
	参考文献	257
第 10 章	数据融合	259
10.1	引言	259
10.2	数据融合的作用	260
10.3	数据融合的分类	262
10.3.1	根据融合前后数据的信息含量划分	262
10.3.2	根据数据融合与应用层数据语义之间的关系划分	263
10.3.3	根据融合操作的级别划分	264
10.4	应用层中的数据融合	264
10.5	网络层中的数据融合	267
10.5.1	路由方式与数据融合	267
10.5.2	DC 路由中的数据融合	268
10.5.3	数据融合树的构造	270
10.6	独立的数据融合协议层	271
10.7	小结	273
	参考文献	273



第 3 篇 传感器网络应用技术

第 11 章	硬件平台	277
11.1	设计简介	277

11.2	核心部件的设计要求	279
11.2.1	处理器模块	279
11.2.2	无线通信模块	281
11.2.3	传感器模块	284
11.2.4	外围模块	286
11.3	传感器节点实例剖析	288
11.3.1	节点系列简介	288
11.3.2	Mica2 节点设计分析	293
11.3.3	Mica 系列传感器板设计分析	308
11.3.4	辅助工具介绍	314
11.4	小结	316
	参考文献	318
第 12 章	nesC 语言	319
12.1	nesC 语言简介	319
12.2	基于 nesC 语言的应用程序	320
12.3	nesC 语言的术语	325
12.4	接口	328
12.5	组件	329
12.6	模块及其组成	332
12.6.1	命令调用和事件通知	333
12.6.2	任务	334
12.7	配件及其组成	334
12.7.1	配件中的组件列表	335
12.7.2	连接	335
12.8	小结	340
	参考文献	340
第 13 章	TinyOS 操作系统	341
13.1	传感器网络对操作系统的需求	341
13.2	TinyOS 操作系统的设计思路	342
13.3	TinyOS 组件模型	343
13.3.1	TinyOS 的组件类型	345
13.3.2	硬件/软件边界	346

13.3.3	组件示例	346
13.3.4	组件组合	347
13.3.5	应用程序总体分析	349
13.4	TinyOS 通信模型	350
13.4.1	主动消息概述	350
13.4.2	主动消息的设计实现	351
13.4.3	主动通信的缓存管理机制	351
13.4.4	主动消息的显式确认消息机制	352
13.5	TinyOS 情境分析	352
13.5.1	Blink 配件文件分析	353
13.5.2	BlinkM 模块文件分析	354
13.5.3	ncc 编译 nesC 程序的作用域	356
13.5.4	Blink 应用程序剖析	358
13.5.5	TinyOS 调度机制的实现	371
13.5.6	TinyOS 的事件驱动机制	375
13.6	安装 TinyOS	382
13.6.1	安装/升级 TinyOS 的步骤	382
13.6.2	用模拟器开发组件	386
13.6.3	TinyViz; TOSSIM 图形用户调试接口	388
13.7	小结	390
	参考文献	390

第 14 章 跟踪系统

14.1	概述	391
14.2	协作跟踪过程实例	392
14.3	点目标跟踪	395
14.3.1	二元检测协作跟踪	395
14.3.2	信息驱动协作跟踪	396
14.3.3	传送树跟踪算法	399
14.4	面目标跟踪算法——对偶空间转换跟踪算法	402
14.5	小结	405
	参考文献	405

第 15 章 环境监测系统 407

 15.1 环境监测应用中的传感器网络体系结构 407

 15.2 传感器网络用于环境监测中的关键技术 409

 15.2.1 节点及节点部署 409

 15.2.2 能量管理 410

 15.2.3 远程任务控制 411

 15.2.4 数据采样和收集 412

 15.2.5 能量高效的通信机制 413

 15.3 传感器网络用于环境监测的实例 413

 15.3.1 生态环境监控需求 414

 15.3.2 大鸭岛生态环境监控实验 415

 15.3.3 监控实验分析 416

 15.4 小结 417

 参考文献 418

常用术语英汉对照 419