

无线传感器网络

理论、技术与实现

Wireless Sensor Networks Theory, Technique and Implementation

于宏毅 李鸥 张效义 等编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

无线传感器网络 理论、技术与实现

Wireless Sensor Networks Theory, Technique and Implementation

于宏毅 李鸥 张效义 等编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络理论、技术与实现/于宏毅
等编著. —北京:国防工业出版社,2008.9

ISBN 978-7-118-05559-7

I. 无... II. 于... III. 无线电通信—传感器
IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 006517 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 11 $\frac{1}{8}$ 字数 298 千字

2008 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 42.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

- 主任委员 刘成海
- 副主任委员 王峰 张涵信 程洪彬
- 秘书长 程洪彬
- 副秘书长 彭华良 蔡 镭
- 委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参
(按姓氏笔画排序)
- 李德毅 杨星豪 吴有生 何新贵
- 佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元
- 陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明
- 常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民
- 舒长胜
- 本书主审委员 周一宇

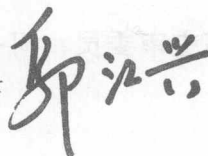
序 言

无线传感器网络技术是一门集信息采集、信息处理、信息传输、信息管理与应用等多种技术于一体的交叉学科技术,虽然其涉及的技术范畴要远比通信技术的范畴宽泛得多,但通信技术却是其中非常重要的一个组成部分。

作者团队多年来一直从事无线通信领域的研究与教学,并且是国内较早地开展无线自组织网络和无线传感器网络研究的学术团队之一,该书主要从通信的视角对无线传感器网络所涉及的相关问题进行了解读。在内容编排上,作者并不一味地求多求全,而是试图将作者最擅长、精华的部分奉献给读者,选材特色鲜明,重点突出;在论述风格上,并不是将现成的知识作简单地搬移,而是更多地突出作者自身对相关问题的理解与认识,启发性强;在语言组织上,作者力图用简单质朴的语言将深奥、细琐的专业技术问题讲清楚,行文流畅,通俗易懂。

本书是作者团队近年来在无线传感器网络研究方面的一个阶段性总结。国防工业出版社决定出版这部著作,我表示祝贺。相信本书的出版对于推动国内无线传感器网络方面的学术研究,培养无线传感器网络方面的专业技术人才,都会发挥应有的作用。

中国工程院院士



2007年9月6日于郑州

前 言

无线传感器网络是近年来信息技术领域的一个研究热点,它融合了传感器、计算机科学、信号与信息处理、通信等多个领域的技术,具有明显的多学科交叉特征。正是由于这一点,原来从事某些专业领域(如传感器、计算机、通信、信号处理、自动控制等)研究的工作者纷纷从不同的角度介入到这一领域,从不同的技术侧面对无线传感器网络展开研究。我们课题组从2001年开始从事无线移动自组织网络相关技术的研究,并于2003年初开始介入到无线传感器网络这一领域,先后承担了国家863、中国下一代互联网示范工程(CNGI)、国家自然科学基金、河南省自然科学基金等相关课题多项,在无线自组织通信与无线传感器网络方面具有较为坚实的技术基础,并取得了一定的研究成果,为此希望将我们在理论研究和工程实践方面的一些心得体会整理出来,与大家共同分享,进而希望能对推动我国无线传感器网络技术发展尽自己的一份绵薄之力,这正是我们编写本书的初衷。

由于无线传感器网络的多学科交叉特征,来自不同专业领域的研究者,对相关问题的理解与认识难免存在比较明显的学科印迹。在一项交叉学科技术发展的早期阶段,出现这种现象是正常的,也是有益的。不同学科之间通过相互碰撞、相互沟通、相互取长补短,最终才会在较深的技术层面上趋同,这一规律对于无线传感器网络技术而言同样适用。鉴于我们自身的特点,以及国内已有一些关于无线传感器网络的译著、论著已经出版,在本书的风格设计上坚持了以下几点原则:一是强调突出特色,在内容编排上不求多和全,而是重点介绍无线传感器网络与

通信相关的关键技术问题,力图将自己比较擅长的部分奉献给读者;二是强调论述的深刻性,在对具体概念、协议、方法的论述方式上,强调在深刻把握的基础上凝练提升,争取将内容讲透彻;三是强调论述的启发性,努力将我们在研发中所发现的一些问题以及对这些问题的理解与认识呈现出来。

本书主要讨论无线传感器网络的概念、原理、关键技术及应用。全书共分为13章。第1章为绪论,主要介绍了无线传感器网络的基本概念、技术特征与优势、发展历程及趋势等内容;第2章主要从原理功能、工程实现、网络运行与应用等角度介绍了无线传感器网络的整体技术体系;第3章主要介绍了面向上层协议设计的无线通信与无线通信能耗基础知识、假设以及存在的问题;第4章介绍了无线传感器网络设计和布设的传感器覆盖模型;第5、6两章分别介绍了无线传感器网络通信协议的两个重要部分:MAC协议和路由协议;第7章介绍了无线传感器网络中的数据聚合及其相关技术;第8章介绍了无线传感器网络广域互联尤其是与IP网络互联的技术;第9、10两章分别介绍了无线传感器网络中的节点定位和时间同步技术;第11、12两章分别介绍了无线传感器网络节点的硬件和软件实现技术;第13章介绍了无线传感器网络在现实生活中的典型应用。

本书是解放军信息工程大学信息工程学院无线传感器网络课题组共同努力的成果。全书由于宏毅、李鸥、张效义负责筹划书稿的内容及结构,组织各章节的编写、讨论、审校及定稿工作。具体内容方面,主要由侯惠峰、李林海、郭金淮、杨白薇、刘阿娜、张霞、李宏、皮兴宇、宋越明、张延军、王晓梅执笔撰写。在完成初稿后,经多次讨论、修改才最终定稿。在本书的成稿过程中黄丹、刘洋、刘湘雯、刘营、赵铮、顾小琪、王戈、卢武根、雷洋、熊生贤、韩波、武卉明、苑小平、秦仁军、代琨、刘广怡等同志也参与了部分章节的整理、讨论和审校等工作。

无线传感器网络是一个新兴的、正在发展的技术领域,业界对其研究也在不断深入。由于我们学识有限,加之时间比较仓促,书

中缺点错误在所难免,敬请读者不吝赐教。

最后,衷心感谢国防科技图书出版基金的资助,衷心感谢邬江兴院士在百忙之中为本书提出宝贵的意见并为之作序。

目 录

作者

2007年8月7日于郑州

第一章 绪论	1
1.1 本书的编写背景	1
1.2 本书的编写目的	1
1.3 本书的编写原则	1
1.4 本书的编写体例	1
1.5 本书的编写分工	1
1.6 本书的编写进度	1
1.7 本书的编写过程	1
1.8 本书的编写特点	1
1.9 本书的编写说明	1
1.10 本书的编写致谢	1
1.11 本书的编写附录	1
1.12 本书的编写参考文献	1
1.13 本书的编写索引	1
1.14 本书的编写后记	1
1.15 本书的编写前言	1
1.16 本书的编写后语	1
1.17 本书的编写结束语	1
1.18 本书的编写结束语	1
1.19 本书的编写结束语	1
1.20 本书的编写结束语	1
1.21 本书的编写结束语	1
1.22 本书的编写结束语	1
1.23 本书的编写结束语	1
1.24 本书的编写结束语	1
1.25 本书的编写结束语	1
1.26 本书的编写结束语	1
1.27 本书的编写结束语	1
1.28 本书的编写结束语	1
1.29 本书的编写结束语	1
1.30 本书的编写结束语	1
1.31 本书的编写结束语	1
1.32 本书的编写结束语	1
1.33 本书的编写结束语	1
1.34 本书的编写结束语	1
1.35 本书的编写结束语	1
1.36 本书的编写结束语	1
1.37 本书的编写结束语	1
1.38 本书的编写结束语	1
1.39 本书的编写结束语	1
1.40 本书的编写结束语	1
1.41 本书的编写结束语	1
1.42 本书的编写结束语	1
1.43 本书的编写结束语	1
1.44 本书的编写结束语	1
1.45 本书的编写结束语	1
1.46 本书的编写结束语	1
1.47 本书的编写结束语	1
1.48 本书的编写结束语	1
1.49 本书的编写结束语	1
1.50 本书的编写结束语	1
1.51 本书的编写结束语	1
1.52 本书的编写结束语	1
1.53 本书的编写结束语	1
1.54 本书的编写结束语	1
1.55 本书的编写结束语	1
1.56 本书的编写结束语	1
1.57 本书的编写结束语	1
1.58 本书的编写结束语	1
1.59 本书的编写结束语	1
1.60 本书的编写结束语	1
1.61 本书的编写结束语	1
1.62 本书的编写结束语	1
1.63 本书的编写结束语	1
1.64 本书的编写结束语	1
1.65 本书的编写结束语	1
1.66 本书的编写结束语	1
1.67 本书的编写结束语	1
1.68 本书的编写结束语	1
1.69 本书的编写结束语	1
1.70 本书的编写结束语	1
1.71 本书的编写结束语	1
1.72 本书的编写结束语	1
1.73 本书的编写结束语	1
1.74 本书的编写结束语	1
1.75 本书的编写结束语	1
1.76 本书的编写结束语	1
1.77 本书的编写结束语	1
1.78 本书的编写结束语	1
1.79 本书的编写结束语	1
1.80 本书的编写结束语	1
1.81 本书的编写结束语	1
1.82 本书的编写结束语	1
1.83 本书的编写结束语	1
1.84 本书的编写结束语	1
1.85 本书的编写结束语	1
1.86 本书的编写结束语	1
1.87 本书的编写结束语	1
1.88 本书的编写结束语	1
1.89 本书的编写结束语	1
1.90 本书的编写结束语	1
1.91 本书的编写结束语	1
1.92 本书的编写结束语	1
1.93 本书的编写结束语	1
1.94 本书的编写结束语	1
1.95 本书的编写结束语	1
1.96 本书的编写结束语	1
1.97 本书的编写结束语	1
1.98 本书的编写结束语	1
1.99 本书的编写结束语	1
1.100 本书的编写结束语	1

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 传感器、传感器网络与无线传感器网络	1
1.2 无线传感器网络的要素与结构	3
1.3 无线传感器网络的特征与优势	4
1.3.1 无线传感器网络的主要特征	5
1.3.2 无线传感器网络的主要优势	6
1.3.3 与无线自组织通信网络的比较	7
1.4 无线传感器网络的发展历程与趋势	9
1.4.1 无线传感器网络的早期研究	9
1.4.2 近年来无线传感器网络的发展	12
1.4.3 无线传感器网络的未来发展趋势	15
参考文献	17
第 2 章 无线传感器网络的技术体系	19
2.1 引言	19
2.2 从原理功能角度分类的技术	20
2.2.1 传感器技术	20
2.2.2 无线通信与组网技术	21
2.2.3 分布式数据融合/聚合技术	22
2.2.4 数据管理技术	22
2.2.5 节点定位技术	23
2.2.6 时间同步技术	24
2.3 从工程实现角度分类的技术	24
2.3.1 无线传感器网络节点硬件制造技术	24
2.3.2 嵌入式软件开发技术	25
2.3.3 节点供电技术	26

2.3.4	节点及网络的能量有效性设计技术	26
2.4	从网络运行与应用角度分类的技术	27
2.4.1	网络布设与休眠调度技术	27
2.4.2	无线传感器网络广域互联技术	28
2.4.3	结合具体行业的无线传感器网络应用技术	28
	参考文献	29
第3章	无线传感器网络的无线通信特点	32
3.1	概述	32
3.2	无线通信特点	32
3.2.1	无线信道特性	32
3.2.2	接收信号功率与距离的关系分析	33
3.2.3	接收信号强度分类	38
3.2.4	几点结论	43
3.2.5	一些问题探讨	43
3.3	无线通信的能耗	49
3.3.1	无线传感器网络单节点能耗特性	49
3.3.2	无线传感器网络能耗特性	60
3.4	小结	61
	参考文献	61
第4章	无线传感器网络覆盖及其相关问题	64
4.1	引言	64
4.1.1	覆盖问题	65
4.1.2	覆盖的度量指标	67
4.2	覆盖模型	68
4.3	基于覆盖模型的若干问题研究	71
4.3.1	网络布设问题的研究	71
4.3.2	节点休眠调度问题的研究	75
4.3.3	最小暴露路径问题的研究	79
4.4	小结	83
	参考文献	83
第5章	无线传感器网络的 MAC 协议	85

5.1	MAC 协议设计的影响因素	85
5.2	主要问题及策略	88
5.2.1	信道接入机制	88
5.2.2	MAC 层的节能策略	94
5.3	典型的 MAC 协议	102
5.3.1	S-MAC	102
5.3.2	Sift	104
5.3.3	TCS-MAC	106
5.3.4	SMACS	108
5.3.5	EMACs	112
5.3.6	TRAMA	115
5.3.7	BMA	119
5.3.8	Arisha	121
5.4	小结	124
	参考文献	125
第 6 章	无线传感器网络的路由协议	127
6.1	无线传感器网络特点及对路由协议设计的影响	127
6.2	路由协议设计的关键问题分析	131
6.2.1	能量有效性	131
6.2.2	可扩展性	134
6.2.3	数据传输可靠性	135
6.3	路由协议分类	137
6.3.1	已有路由协议分类标准的总结	137
6.3.2	基于设计思路的路由协议分类	139
6.4	简单的无结构路由协议	143
6.4.1	Flooding 和 Gossiping	143
6.4.2	SPIN	144
6.4.3	谣传路由	147
6.5	树或类树路由协议	149
6.5.1	定向扩散	149
6.5.2	高弹性多径路由	151
6.5.3	SAR	153

6.5.4	LEACH	155
6.5.5	PEGASIS 和 Hierarchical-PEGASIS	158
6.5.6	TEEN 和 APTEEN	160
6.6	地理路由协议	161
6.6.1	基于局部地理拓扑信息实现单播路由协议	161
6.6.2	利用地理位置信息改善地域多播的实现方式	170
6.6.3	基于地理栅格的分层网络结构及路由协议	176
6.7	无线传感器网络典型路由协议比较	181
6.7.1	协议特点	181
6.7.2	应用场合	182
6.8	小结	183
	参考文献	185
第7章	无线传感器网络的数据聚合技术	190
7.1	数据聚合概述	190
7.1.1	数据聚合的概念及意义	190
7.1.2	数据聚合面临的挑战	191
7.1.3	数据聚合与分层协议的关系	192
7.1.4	数据聚合与路由的关系	192
7.2	数据聚合结构	193
7.2.1	最优的数据聚合结构	193
7.2.2	近似优化的数据聚合树构造算法	195
7.2.3	不显式建立数据聚合结构的实例	197
7.3	数据聚合时机	198
7.3.1	周期性数据回传中数据聚合时机的确定	199
7.3.2	事件触发类数据回传中聚合时机的确定	202
7.4	数据压缩技术	203
7.4.1	分布式信源编码	203
7.4.2	使用数据压缩的最优群大小	204
7.4.3	SPT 与 SPT/TSP 结构	206
7.5	小结	207
	参考文献	208

第 8 章 无线传感器网络的广域互联	210
8.1 引言	210
8.2 无线传感器网络与 IP 网络互联的主要方式	211
8.2.1 协议转换方式	211
8.2.2 协议承载方式	213
8.2.3 全 IP 方式	215
8.3 全 IPv6 方式的优点及主要问题	218
8.3.1 全 IPv6 方式的优点	218
8.3.2 值得研究的问题	219
8.4 全 IPv6 无线传感器网络的组网、编址及路由问题	222
8.4.1 全 IPv6 无线传感器网络的网络结构	222
8.4.2 无线传感器网络中的 IPv6 编址问题分析	224
8.4.3 全 IPv6 无线传感器网络的编址、地址配置及路由	230
8.5 小结	233
参考文献	233
第 9 章 无线传感器网络时间同步技术	236
9.1 引言	236
9.2 时间同步模型	237
9.2.1 时钟模型	237
9.2.2 通信模型	238
9.2.3 时间同步的误差来源	240
9.2.4 信号级时间同步与消息级时间同步	240
9.2.5 小结	241
9.3 时间同步协议	242
9.3.1 时间同步的几种类别	242
9.3.2 时间同步协议	244
9.3.3 小结	253
参考文献	254
第 10 章 无线传感器网络节点定位技术	255
10.1 引言	255
10.2 节点定位技术简介	255

10.2.1	节点定位基本概念	255
10.2.2	节点定位技术特点	256
10.2.3	参数定义	257
10.3	基于测距的定位技术	257
10.3.1	测距/测角技术	258
10.3.2	定位方法	260
10.3.3	校正技术	263
10.4	免于测距的定位技术	264
10.5	小结	271
	参考文献	272
第 11 章	无线传感器网络硬件平台特点及其发展趋势	276
11.1	引言	276
11.2	硬件平台特点	277
11.3	节点硬件平台的组成	278
11.3.1	微控制器单元	278
11.3.2	通信模块	280
11.3.3	传感器	283
11.3.4	执行器	284
11.3.5	供电单元	284
11.3.6	其他	284
11.4	无线传感器网络硬件平台演进策略	285
11.4.1	无线传感器网络节点硬件发展面临的问题	285
11.4.2	MEMS 技术为无线传感器网络带来的其他 变化	286
11.4.3	无线传感器网络硬件平台进化过程	288
11.5	小结	290
	参考文献	291
第 12 章	无线传感器网络的软件技术	292
12.1	引言	292
12.2	TinyOS	295
12.2.1	基于组件的编程模型	295

12.2.2	基于事件触发的并发执行模型	298
12.2.3	通信模型	299
12.3	NesC 编程	301
12.3.1	模块与接口	302
12.3.2	配件与连接	309
12.3.3	参数化连接	312
12.4	典型应用分析	316
12.4.1	应用模块文件: BlinkTaskC.nc	317
12.4.2	系统初始化	318
12.4.3	任务调度	321
12.4.4	执行过程	324
12.5	安装、调试与编程提示	325
12.5.1	TinyOS 2.x 安装	325
12.5.2	GDB/ddd 调试	327
12.5.3	NesC 编程提示	331
12.6	小结	333
	参考文献	333
第 13 章	无线传感器网络的应用	334
13.1	引言	334
13.2	无线传感器网络的主要应用领域	334
13.3	典型的无线传感器网络应用系统	338
13.4	小结	346
	参考文献	346
	缩略语	348