

“十一五”国家重点图书出版规划项目



海军新军事变革丛书

总策划：魏刚 主编：马伟明

无线传感器网络：体系结构与协议

Wireless Sensor Networks Architectures and Protocols

[美] Edgar H. Callaway, Jr. 著

王永斌 屈晓旭 主译

李敬辉 郑龙根 主审



AUERBACH



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

“十一五”国家重点图书出版规划项目

总策划：魏 刚

主 编：马伟明

海军新军事变革丛书

Wireless Sensor Networks Architectures and Protocols

无线传感器网络： 体系结构与协议

[美] Edgar H. Callaway, Jr. 著

王永斌 屈晓旭 主译

李敬辉 郑龙根 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING



Copyright © 2004 by CRC Press LLC. Auerbach is an imprint of CRC Press LLC. Neither this book nor any part may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, microfilming, and recording, or by any information storage or retrieval system, without prior permission in writing from the publisher.

All rights reserved. Authorized translation from English language edition published by Auerbach, part of Taylor & Francis Group LLC.

本书英文版由 Auerbach 公司出版, Auerbach 公司已将简体中文版独家版权授予中国电子工业出版社及北京美迪亚电子信息有限公司。未经许可, 不得以任何形式和手段复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2005-5936

图书在版编目 (CIP) 数据

无线传感器网络: 体系结构与协议 / (美) 卡拉维 (Callaway, E. H., Jr.) 著; 王永斌等译. —北京: 电子工业出版社, 2007. 1

(海军新军事变革丛书)

书名原文: Wireless Sensor Networks Architectures and Protocols

ISBN 7-121-03343-7

I. 无… II. ①卡…②王… III. 无线电通信—传感器 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 126228 号

责任编辑: 吴源 王军花

印刷: 北京天竺颖华印刷厂

装订: 三河市金马印装有限公司

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

北京市海淀区翠微东里甲 2 号 邮编: 100036

开本: 850×1168 1/32 印张: 13.25 字数: 340 千字

印次: 2007 年 1 月第 1 次印刷

定价: 40.00 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, 联系电话: (010) 68279077。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。

《海军新军事变革丛书》总序

进入21世纪，一场世界性的新军事变革以前所未有的深度和广度迅猛发展。这场变革以信息技术的飞速发展作为直接动力，以军事技术的变革、军事理论的创新和军队体制结构的调整改革为核心内容，目标是把工业时代的机械化军队建设成为信息时代的信息化军队，使战争形态加速向信息化演变。因此，新军事变革是军事领域一次新的历史性飞跃，在世界军事史上具有划时代的意义。

党的十六大报告明确指出，国防和军队建设要“适应世界军事变革的趋势”，“努力完成机械化和信息化建设的双重历史任务”。新军事变革的深入发展，已经深刻改变了世界军事领域的面貌。认真研究它的内在规律，探索信息化战争的制胜之道，实现我军现代化建设的跨越式发展，是我们面临的现实而紧迫的历史性任务。面对新军事变革的浪潮，我们必须更新思想观念，开阔视野，时刻关注世界军事领域发生的深刻变化，准确预测世界军事发展的趋势，从我国的国情军情出发，牢牢把握军事变革的方向，加速推进中国特色的军事变革，不断提高人民海军现代化作战能力。

古人云：兵者，国之大事。死生之地，存亡之道，不可不察。中国是濒海大国，海上方向的防御是国防的重要组成部分。建设一个强大的国防，建设一支强大的海军，关系到民族的荣辱和国家的兴衰。中国近代屡遭列强来自海上的侵略，几乎所有的重要港口、岛屿和沿海地区，都曾受到外敌蹂躏。惨痛的历史告诫我们，军事上落后必然使国家遭受耻辱，没有海上安全就没有国家安全。海军

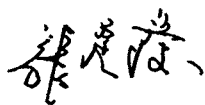
是一个国际性战略军种，担负着维护国家海洋权益、保卫国家海上安全的重要使命。我们必须看到，在世界性新军事变革中，战争形态已经发生了深刻变化，海军的作战和建设也出现了一系列新的特点。对此，我们应在密切关注的同时，深入研究信息化条件下的海军作战思想、武器装备、体制编制、教育训练和后勤保障，发展和创新海军作战理论，在推进中国特色的军事变革过程中完成机械化和信息化建设的双重历史任务。

江主席指出，在当今世界，任何一支军队，如果关起门来搞建设，拒绝学习国外先进的东西，是不可能实现现代化的。世界新军事变革的大潮来势猛、发展快。各军事强国纷纷加快军队的信息化建设，抢占战略制高点，虽然从总体上看，目前新军事变革还处在初级阶段，但外军在新军事变革中积累了一些有益的经验。同时，现代科学技术在国际间的迅速转移和相互渗透，为我们准确把握世界科技发展前沿、吸收最新科研成果提供了有利条件，也为我们最大限度地发挥后发优势、在自力更生的基础上跨越某些技术上的发展阶段、加快人民海军的现代化建设提供了机遇和可能。海军是技术与知识高度密集的军种，海军建设有其内在规律。我们在推进海军的军事变革时，必须坚持自主创新，同时大胆借鉴和吸收国外最新军事科研成果和先进经验，在借鉴和创新中实现“跨越式”发展。

发展与创新中很重要的方面是了解世界，面向未来。信息化战争从一定意义上来说，既是武器装备等物质条件的对抗，更是知识与观念等精神力量的较量。美国著名思想库兰德公司的军事研究专家马歇尔曾提出，未来“我们面临的首要挑战是知识的挑战”。夺取未来战争的战略主动权，必须依靠先进的科学技术和先进的军事理论。近年来，国外出版了许多研究新军事变革的著作和技术文献。把这些新的研究成果介绍给国内读者，有益于我们学习和借鉴外军的先进经验。海军装备部与海军工程大学组织专家编著翻译出版的

这套海军新军事变革丛书，以翻译国外海军先进技术和理论著作为主，出版海军军内自编教材和专著为辅，对世界海军在新军事变革中推出的研究成果进行了系统介绍。这是一项很有意义的工作。在此我谨对参与这项工作的各位专家表示感谢。同时对各位译、著者在笔耕之劳中付出的心血表示敬意。希望这套丛书能够对推进中国特色的军事变革，加快人民海军的信息化建设发挥积极的借鉴与参考作用。

中央军委委员
海军司令员

Handwritten signature in black ink, reading '张定德' (Zhang Dingde).

二〇〇四年七月十八日

致 谢

本书是在我的博士论文基础上编写完成的^[1]。我的论文经 Ravi Shankar 博士指导于 2002 年在佛罗里达 Atlantic 大学(Boca Raton)完成。牛顿曾说过“没有压力就没有动力”，正是这句话激励着我返回学校完成我的学业，对此我感激万分。同时感谢本书的编委成员 Valentine Aalo 博士、Raymond Barrett 博士、Borko Furht 博士、Sam Hsu 博士和 Fred Martin 博士，感谢他们参与本书的大量工作以及对我的工作提出的建设性意见。

书中的大量工作是我在佛罗里达通信研究实验室工作时完成的，该实验室位于普兰塔寻，是摩托罗拉实验室的一个分部。在这里谨对实验室的主管 Larry Dworsky 博士和 Chip Shanley 博士，以及我的直接领导 Bob O’Dea 博士表示衷心的感谢，他们给予我的支持远远超出一般的工作范围。和同事们在技术方面的探讨也使我受益匪浅，他们是 Anthony Allen、Monique Bourgeois、Priscilla Chen、Neiyer Correal 博士、Lance Hester 博士、Jian Huang 博士、Yan Huang 博士、Masahiro Maeda、Qicai Shi 和 Bob Stengel，尤其是 Paul Gorday、Sumit Talwalkar 和 David Taubenheim，他们在信号处理软件系统 (SPW) 方面给了我非常多的帮助。

感谢佛罗里达 Boynton Beach 摩托罗拉半导体产品部门的 Gary Pace，第 7 章中的差分放大电路部分得益于他的指导，同时他的谆谆教诲使我认识到低电压、低功率设计的重要性。另外，Dan Brueske、Barbara Doutre、Antonio Faraone 博士、Latonia Gordon 和 Kai Siwiak 博士参与了本书初稿的前期修订工作，当然本书中任何错误和纰漏仍都是我的过失。

特别感谢 Joan Lange、Kim Searer、Martha Mitchell 以及公司

的图书管理员,他们做了大量工作,发现了书中被我遗漏的参考文献。

我的父母 Pat 和 Ed,当我年少无知为一些无所谓的事情耗费精力时,是他们教导我受教育的重要性。同时,感谢我的妻子 Jan,没有她的支持和理解,这本书就无法顺利完成。

Edgar H. Callaway, Jr.

[1] Edgar H. Callaway, Jr., 无线传感器网络通信协议, 博士论文, 佛罗里达 Atlantic 大学, Boca Raton, FL, 2002 年 8 月

译者序

随着半导体技术、通信技术和计算机技术的发展,上世纪90年代末在美国开始了无线传感器网络的研究,并首先在军方应用和推广。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、农业等很多领域,在工业控制和监视、家庭自动化和电子消费产品、安全与军事感知、资产跟踪与供应链管理、智能农业和健康监测等方面具有广泛的应用前景。

本书从通信协议的分层和网络节点的设计两个方面详细介绍了如何构建无线传感器网络,还介绍了无线器件本身的设计规范。全书共12章,包括:无线传感器网络概述、无线传感器网络的发展、物理层、数据链路层、网络层、具体实现中的有关问题、功率管理、天线和射频性能的定义、电磁兼容、静电放电、无线传感器网络协议、总结和未来发展机遇展望。

本书的特点是紧密联系实际,重在解决无线传感器网络设计中的实际问题。本书分析了无线传感器网络的需求;讲述了低功耗和低成本的物理层设计;详细讲解了仲裁设备协议在低成本设备、低工作占空比下的工作原理,并就设备设计方面的能源收集技术、低功耗设计技术、电磁兼容和静电防护技术进行了论述。

本书内容丰富,覆盖面广,叙述深入浅出,是不可多得的无线传感器网络设计的指导手册,也可作为无线通信、网络技术和传感器技术等专业的教学参考书。

本书的翻译和出版工作得到了丛书编委会及电子工业出版社的大力支持和帮助,借此机会谨向他们表示诚挚的谢意。

因学识水平所限,翻译中难免有理解与表述方面的错误,望读者给予指正。

关于作者

Edgar H. Callaway, Jr. 于 1979 年获得佛罗里达 Gainesville 大学数学学士学位, 1983 年获得电机工程学硕士学位, 1987 年在位于佛罗里达 Davia 的 Nova 大学(现在的 Nova-Southeastern 大学)获得工商管理硕士学位, 2002 年在佛罗里达 Boca Raton 的 Atlantic 大学获得计算机工程博士学位。

Callaway 博士于 1984 年加入摩托罗拉公司移动分部, 作为一名射频工程师, 他主要从事 800MHz 和 900MHz(这是后来的事情)无线产品的研发工作。1990 年, 他调入位于 Boynton Beach 的摩托罗拉无线电寻呼产品工作组, 为日本市场设计无线寻呼接收机。

1992 年到 2000 年期间, Callaway 博士主要从事无线寻呼接收和发射系统的设计工作, 主持摩托罗拉无线寻呼平台接收机的设计工作。2000 年, 他加入了位于佛罗里达普兰塔寻的摩托罗拉实验室, 其主要研究方向为低功率无线传感器网络的设计。他是佛罗里达州的注册职业工程师, 发表了多篇论文, 拥有 20 余项美国专利。

目 录

第 1 章 无线传感器网络概述	1
1.1 应用和目标	1
1.1.1 工业控制与监测	2
1.1.2 家庭自动化与消费电子	5
1.1.3 传感器在安全与军事上的应用	7
1.1.4 物资跟踪和供应链管理	8
1.1.5 智能农业与环境感知	9
1.1.6 健康监测	11
1.2 网络性能指标	12
1.2.1 低功耗	12
1.2.2 低成本	13
1.2.3 世界范围通用性.....	14
1.2.4 网络类型	14
1.2.5 安全性	15
1.2.6 数据吞吐量	17
1.2.7 消息延迟	17
1.2.8 机动性	18
1.3 本书的贡献.....	18
1.4 本书内容的组织.....	19
参考文献	19
第 2 章 无线传感器网络的发展	23
2.1 早期无线网	23
2.2 无线数据网	32
2.2.1 ALOHA 系统	32

2.2.2	PRNET 系统	33
2.2.3	业余分组无线网络	33
2.2.4	无线局域网(WLAN)	35
2.2.5	无线个域网(WPAN)	35
2.3	无线传感器及相关网络	37
2.3.1	无线综合网络传感器(Wireless Integrated Network Sensor; WINS)	37
2.3.2	PicoRadio	38
2.3.3	μ AMPS	38
2.3.4	Terminodes、MANET 及其他移动 ad hoc 网络	39
2.3.5	水声网络和深空网络	39
2.4	结论	40
	参考文献	40
第 3 章	物理层	46
3.1	引言	46
3.2	物理层实例	47
3.2.1	蓝牙	47
3.2.2	IEEE 802.11b	48
3.2.3	无线传感器网络	49
3.3	一种实用的无线传感器网络物理层设计	50
3.3.1	成本	51
3.3.2	功率	54
3.4	仿真及结果	59
3.4.1	仿真	59
3.4.2	结果	61
3.5	结论	66
	参考文献	67
第 4 章	数据链路层	71
4.1	引言	71

4.2	介质访问控制技术	73
4.2.1	ALOHA	73
4.2.2	载波侦听多路访问协议(CSMA)	74
4.2.3	轮询(Polling)	76
4.2.4	无线传感器网络的信道访问控制技术	79
4.3	仲裁设备(MD)	80
4.3.1	MD协议	80
4.3.2	分布式仲裁设备协议	83
4.3.3	“紧急”模式	87
4.3.4	信道访问	87
4.4	系统分析与仿真	89
4.4.1	占空比	89
4.4.2	延迟	90
4.5	结论	92
	参考文献	93
第5章	网络层	96
5.1	引言	96
5.2	一些网络设计的例子	96
5.2.1	结构	97
5.2.2	路由	99
5.3	基于簇树结构的无线传感器网络设计	104
5.3.1	网络设计	104
5.3.2	网络关联	107
5.3.3	网络维护	109
5.3.4	路由	111
5.4	仿真	113
5.5	结果	117
5.5.1	吞吐量(消息到达 DD 的累积百分比与时间的关系)	117
5.5.2	吞吐量(消息到达 DD 的累积百分比与节点所在	

层次间的关系)	118
5.5.3 消息平均传输时间	118
5.5.4 消息的平均延迟与节点层次间的关系	118
5.5.5 包冲突与时间的关系	120
5.5.6 占空比	120
5.5.7 占空比与节点层次的关系	121
5.5.8 消息延迟与 MD 周期的关系	122
5.5.9 最大网络吞吐量与 MD 周期的关系	123
5.5.10 最大网络吞吐量与节点密度的关系	123
5.6 结论	124
参考文献	125
第 6 章 具体实现中的有关问题	129
6.1 引言	129
6.2 系统分解方案的确定	130
6.3 换能器接口	142
6.3.1 集成传感器	142
6.3.2 外部接口	144
6.4 时基准确度和平均功耗	147
6.5 结论	152
参考文献	153
第 7 章 功率管理	154
7.1 引言	154
7.2 电源	155
7.2.1 电力网	156
7.2.2 电池	157
7.2.3 能量收集	169
7.3 负载	182
7.3.1 模拟电路的功率消耗	183
7.3.2 数字逻辑电路的功耗	186

7.3.3	其他负载上的功耗	194
7.4	电压转换器和稳压器	197
7.4.1	电压转换器的类型	197
7.4.2	电压转换的策略	204
7.5	功率管理策略	208
7.6	结论	210
	参考文献	210
第8章	天线和射频性能的定义	216
8.1	引言	216
8.2	天线	216
8.2.1	天线特性	216
8.2.2	效率和天线放置	218
8.2.3	带宽	224
8.2.4	天线设计选择	225
8.3	射频性能定义及测量	227
8.3.1	定义和测量	227
8.3.2	生产问题	237
8.4	结论	241
	参考文献	241
第9章	电磁兼容	243
9.1	引言	243
9.2	电磁兼容问题	243
9.3	自扰例子	244
9.4	电磁兼容问题物理分析	247
9.4.1	宽带频谱	248
9.4.2	窄带频谱	256
9.4.3	接收机中的“受害”电路	258
9.4.4	问题的范围	260
9.4.5	耦合机制	261

9.4.6	避免耦合问题	270
9.5	正确布局的原则	281
9.5.1	没有接地	281
9.5.2	只有返回电流	281
9.6	布局过程	282
9.6.1	原理图完成后布线开始前需查找的问题	282
9.6.2	兼顾电磁兼容的布局设计过程	288
9.7	检测和纠正技术	290
9.7.1	“木桶”原理	291
9.7.2	替换法	291
9.7.3	控制特定 MCU 功能的软件	291
9.7.4	物理隔离	292
9.7.5	屏蔽的谬论	292
9.7.6	与芯片设计者的沟通	292
9.7.7	仿真	293
9.8	结论	293
	参考文献	294
第 10 章	静电放电	296
10.1	引言	296
10.2	问题分析	296
10.2.1	实例	296
10.2.2	故障模式	298
10.3	静电放电的物理特性	300
10.3.1	摩擦起电效应	300
10.3.2	空气击穿	301
10.3.3	电荷的重新分布	302
10.4	静电放电对集成电路的影响	303
10.5	建模和测试标准	305
10.5.1	双指数脉冲模型	305

10.5.2	人体模型、机器模型和充电设备模型·····	305
10.5.3	ESD 标准的详细要求·····	307
10.5.4	性能标准·····	308
10.6	最小化静电放电问题的产品设计·····	308
10.6.1	阻止静电放电进出外壳·····	308
10.6.2	如果无法避免静电进入,应合理设计 静电放电的路径·····	311
10.6.3	集成电路的静电防护·····	314
10.6.4	一旦发生静电放电,使其影响最小化·····	318
10.7	结论·····	321
	参考文献·····	321
第 11 章	无线传感器网络协议 ·····	324
11.1	引言·····	324
11.2	IEEE 802.15.4 低速率无线个域网标准·····	324
11.3	ZigBee 联盟·····	329
11.4	IEEE 1451.5 智能无线传感器接口标准·····	330
	参考文献·····	331
第 12 章	总结和未来发展机遇展望 ·····	333
12.1	总结·····	333
12.2	未来的发展机遇·····	337
	参考文献·····	340
附录 A	信号处理工作室(SPW) ·····	341
附录 B	WinneurRFon ·····	342
B.1	引言·····	342
B.2	研究背景·····	342
B.3	系统需求·····	343
B.4	软件所支持的特性·····	345
B.5	当前的情况以及完成的工作·····	345
B.6	仿真方法和其他潜在功能·····	348