



国防科技图书出版基金



“十二五”国家重点出版规划丛书

无线通信前沿技术丛书

李少谦 周亮 主编

该书由国家自然科学基金NSAF联合基金(U1530154)、
国家自然科学基金优秀青年基金(61522104)、国家自然
科学基金海外及港澳学者合作研究基金(61428103)
等项目联合资助

无线传感器 网络信号处理

● 方俊 李少谦 ◎ 著

Signal Processing
in Wireless Sensor Networks



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

该书由国家自然科学基金 NSAF 联合基金(U1530154)、
国家自然科学基金优秀青年基金(61522104)、国家自
然科学基金海外及港澳学者合作研究基金(61428103)
等项目联合自助

无线传感器网络信号处理

Signal Processing in Wireless Sensor Networks

方俊 李少谦 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络信号处理/方俊,李少谦著. —北京:国防工业出版社,2016.1

(无线通信前沿技术丛书)

ISBN 978-7-118-10711-1

I. ①无… II. ①方… ②李… III. ①无线电通信—传感器—计算机网络—信号处理 IV. ①TP212
②TN915.05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 048409 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 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 8 $\frac{5}{8}$ 字数 256 千字

2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 98.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

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选出版。

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 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	赵伯桥	
秘书长	赵伯桥			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

序 言

在信息科学领域中,无线传感器网络是一个全新的发展方向。无线传感器网络作为新兴学科与传统学科交叉发展的结果,是物联网的重要支撑技术,也是物联网感知层的主要实现形式之一。在国际上,无线传感器网络被认为是继互联网之后的第二大网络,在工业、交通、军事、环境探测上已广泛应用。在许多新兴领域(如交通、保健等领域)无线传感器网络体现出了其无可比拟的优越性。同时,无线传感器网络应用的领域也不断扩展,并涉及、融入人类日常生活和社会生产活动的所有领域。

本书作者方俊教授长期从事无线传感器网络信号处理理论研究,是我国早期从事这一领域研究并取得大量有影响力理论成果的学者之一。在美国杜克大学和斯蒂文斯理工学院学习和工作期间,方俊教授对无线传感器网络信号处理理论进行了大量研究,并取得了大量优秀的理论研究成果。作者经过十年的不断深入研究,取得了大量有影响力的研究成果,其中部分研究填补了该领域的空白。在对大量成果梳理和总结基础上,作者把这些研究成果编撰成书。本书详尽阐述了先进的无线传感器信号处理理论和技术,为无线传感器网络低功耗信号处理提供了理论基础和方法。无线传感器网络中的一些关键技术研究成果,如分布式检测,分布式估计与 1bit 量化,无融合中心的分布式检测技术等是本书的几大关键性研究。

这是国内第一部以信号处理角度全面论述无线传感器网络信号处理理论与技术的专著。

本书层次清晰、图文并茂、体系完整,为后续学者进行相关研究提供示例。本书具有很强系统性、学术性和可读性。本书的出版,将不

断推动我国无线传感器网络信号处理技术的研究和应用,并进一步促进我国无线传感器网络的持续高速发展。

李少谦

2015 年 10 月

前 言

无线传感器逐步将逻辑上的信息世界与客观上的物理世界融合在一起,改变了人类与自然的交互方式,极大地拓展了网络的功能和提高了人类认知世界、改造世界的能力。无线传感器网络作为物联网感知层的主要实现形式之一,是物联网的重要支撑技术,在国际上被认为是继互联网之后的第二大网络,在环境、交通监测、目标追踪及其在其他各个领域感知应用中具有十分重要的价值。无线传感器网络的设计需要融合几个学科的理念,其中分布式信号处理技术特别关键。传统的信号处理理论在无线传感器网络中有了新的发展,基于分布式检测、分布式估计、量化、降维估计等技术的无线传感器网络信号处理理论是本书的重点。

本书从信号处理角度来阐述传感器网络的检测、估计问题,特别是分布式的信号处理和通信算法。旨在系统讨论无线传感器网络信号处理理论,为无线传感器网络低功耗信号处理提供了理论基础和方法,因此要求读者具有一定的统计信号处理基础知识背景。全书分为七个部分:分布式检测、无融合中心的分布式检测、估计理论基础、1bit量化、分布式降维估计、分布式一致估计和定位技术,着重于讨论传感器网络分布式信号处理问题。

本书由通信抗干扰国家级重点实验室博士生导师方俊教授和李少谦教授统一策划,方俊教授执笔,全书由方俊教授、李少谦教授审阅。在本书写作过程中,通信抗干扰国家级重点实验室研究生肖航、崔星星、包恒耀、杨林晓、张立造、卢会芳、赵洪星、张丹、吴彦伦、李行健、郑耀等同学参加了部分章节材料的搜集和整理。哈尔滨工业大学深圳研究生院的黄磊教授、南京邮电大学通信与信息工程学院的邹玉龙教授对书稿进行了认真审阅并提出宝贵意见,为本书的最终定稿起了很大帮助。此外,本书还参考了其他同行的工作成果,在此一并表

示诚挚的谢意。

本专著内容获得了国家自然科学基金 NSAF 联合基金(U1530154)、国家自然科学基金优秀青年基金(61522104)、国家自然科学基金海外及港澳学者合作研究基金(61428103)等项目自助。

本书理论严谨又不失较高的可读性,对于从事无线传感器网络信号处理的研究人员,比较系统地掌握无线传感器网络信号处理的基本理论技术具有一定价值的参考作用。由于编写时间仓促,加之作者水平有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,恳请专家和读者批评指正。

作者

2015 年 10 月于成都

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 无线传感器网络的特点	1
1.1.1 无线传感器网络的检测	4
1.1.2 无线传感器网络的估计	6
1.1.3 无线传感器网络的定位	7
1.2 无线传感器网络的应用	8
1.2.1 大鸭岛实验	9
1.2.2 狙击手侦测系统	10
1.2.3 冰川监测	11
1.2.4 俄勒冈州葡萄园	11
1.3 无线传感器网络的主要挑战	12
1.4 本书章节安排	14
参考文献	16
第 2 章 无线传感器网络的分布式检测	21
2.1 二元假设检验理论	22
2.1.1 纽曼 - 皮尔逊准则	23
2.1.2 贝叶斯准则	26
2.2 分布式信号检测局部最优化	30
2.2.1 两个传感器的局部最优随机信号检测	31
2.2.2 窄带信号	36
2.3 非参数分布式检测	38
2.4 CFAR 分布式检测	40
2.4.1 分布式单元平均恒虚警率(CA - CFAR)检测	41

2.4.2	分布式有序统计量恒虚警率 (OS - CFAR) 检测	44
2.4.3	分布式 CFAR 检测应用举例	45
2.5	鲁棒性分布式检测	46
2.6	分布式序贯检测	48
2.6.1	集中式序贯检测	49
2.6.2	融合中心的分布式序贯检测	50
2.6.3	快速分布式检测	52
	参考文献	54
第 3 章	无融合中心的分布式检测	55
3.1	分布式检测与网络拓扑设计	55
3.1.1	分布式贝叶斯检测	55
3.1.2	全局最优检测性能	56
3.1.3	拓扑最优化	58
3.2	分布式置信传播检测	61
3.2.1	MAP 检测基础	62
3.2.2	置信传播	62
3.2.3	一致收敛性	65
3.2.4	特殊拓扑	67
3.2.5	修正的 BP 算法	68
3.3	连续一致性检测	71
3.3.1	集中式检测	71
3.3.2	分布式检测	73
3.3.3	渐进最优检测	74
3.3.4	实验结果	75
3.4	扩散式检测	77
3.4.1	信号模型	77
3.4.2	集中式检测	79
3.4.3	分布式检测	80
3.4.4	分布式 RLS 与 LMS 估计	82

3.4.5 分布式 RLS 与 LMS 检测	84
参考文献	89
第 4 章 传感器网络估计理论基础	91
4.1 估计理论基础	91
4.1.1 点估计	91
4.1.2 无偏估计量、最小方差估计量	92
4.1.3 最大似然估计量(MLE)	93
4.1.4 充分性	95
4.2 估计量的评优准则	97
4.2.1 无偏性	98
4.2.2 有效性	98
4.2.3 一致性	98
4.3 无线传感器网络的估计	99
4.3.1 无中心节点的观测和估计	101
4.3.2 在高斯噪声下的分布式极大似然估计	102
4.3.3 在稀疏性约束下的分布式 回归最小平方估计	103
4.3.4 在空间相关的观测下的分布式的参数估计	104
参考文献	105
第 5 章 分布式估计与 1bit 量化	107
5.1 带限无线传感器网络的通用分布式估计	107
5.1.1 已知噪声分布的分布式估计器设计	110
5.1.2 未知噪声分布的分布式估计器	112
5.2 带限信号的自适应分布式估计	119
5.2.1 固定量化的分布式估计	120
5.2.2 自适应分布式估计	121
5.2.3 能量检测与估计中的自适应量化方案	124
5.2.4 基于 GLRT 检测器的融合中心	128
5.3 非均匀感知环境下的分布式估计	130

5.4 基于超平面向量量化的分布式估计	131
参考文献	137
第6章 分布式降维估计	138
6.1 分布式降维估计概述与最佳 线性无偏估计方法	138
6.2 理想信道条件下的分布式降维估计	142
6.2.1 问题描述	142
6.2.2 最优压缩矩阵设计	144
6.3 非理想信道条件下的分布式降维估计	150
6.3.1 降维维度已知情况	150
6.3.2 降维估计与降维维度优化	156
参考文献	176
第7章 分布式一致估计	178
7.1 介绍	178
7.2 基本原理	179
7.2.1 平均一致性更新	179
7.2.2 收敛率	179
7.2.3 拉普拉斯矩阵	181
7.3 常见一致性算法	181
7.3.1 快速线性迭代一致性估计	181
7.3.2 最小均方差一致性估计 SLEM	185
7.4 优化后的分布式一致性算法	187
7.4.1 多项式滤波器运用于分布式一致性算法	187
7.4.2 时序平均分布式一致性估计	192
7.4.3 考虑连接中断和信道噪声的 分布式一致性估计	196
参考文献	205

第 8 章 无线传感器网络中的定位算法.....	206
8.1 定位算法简介	206
8.2 基于能量的定位算法	210
8.2.1 最大似然估计源定位算法	210
8.2.2 基于凸集投影的源定位算法	218
8.3 其他定位算法	224
8.3.1 基于距离的定位算法	224
8.3.2 非基于测距的定位算法	231
8.4 高效无线定位算法	235
8.4.1 基于量化数据的无线传感器 网络的源定位算法	235
8.4.2 基于二值量化数据的无线传感器 网络的源定位算法	243
参考文献	251

Contents

Chapter 1	Outline	1
1.1	Characteristics of Wireless Sensor Networks	1
1.1.1	Detection in Wireless Sensor Networks	4
1.1.2	Estimation in Wireless Sensor Networks	6
1.1.3	Localization in Wireless Sensor Networks	7
1.2	Applications of Wireless Sensor Networks	8
1.2.1	Experiment on Great Duck Island	9
1.2.2	Sniper Detection System	10
1.2.3	Glacier Monitoring	11
1.2.4	Oregon Vineyard	11
1.3	Challenges of Wireless Sensor Networks	12
1.4	Organization of This Book	14
	References	16
Chapter 2	Distributed Detection of Wireless Sensor Networks	21
2.1	Binary Hypothesis Detection	22
2.1.1	Neyman – Pearson Hypothesis	23
2.1.2	Bayesian Hypothesis	26
2.2	Local Optimization of Distributed Signal Detection	30
2.2.1	Local Optimum of Random Signal Detection of Two Sensors	31
2.2.2	Narrowband Signal	36
2.3	Nonparametric Distributed Detection	38

2.4	Distributed CFAR Detection	40
2.4.1	Distributed Cell – Averaging CFAR (CA – CFAR) Detection	41
2.4.2	Distributed Order – Statistics CFAR (OS – CFAR) Detection	44
2.4.3	Applications of Distributed CFAR Detection	45
2.5	Robust Distributed Detection	46
2.6	Distributed Sequential Detection	48
2.6.1	Centralized Sequential Detection	49
2.6.2	Center – Fused Distributed Sequential Detection	50
2.6.3	Fast Distributed Detection	52
	References	54

Chapter 3 Distributed Detection Without Fusion Center 55

3.1	Distributed Detection and Network Topology Design	55
3.1.1	Distributed Bayesian Detection	55
3.1.2	Performance of Global Optimum Detection	56
3.1.3	Topology Optimization	58
3.2	Distributed Belief Propagation Detection	61
3.2.1	Detection Basics of MAP	62
3.2.2	Belief Propagation	62
3.2.3	Uniform Convergence	65
3.2.4	Special Topology	67
3.2.5	Modified BP Algorithm	68
3.3	Continuous Consensus Detection	71
3.3.1	Centralized Detection	71
3.3.2	Distributed Detection	73
3.3.3	Asymptotical Optimal Detection	74
3.3.4	Experiment Results	75
3.4	Diffused Detection	77