



装备科技译著出版基金

IMAA Advances in Statistical
Multisource-Multitarget
Information Fusion

多源多目标
统计信息融合进展

【美】罗纳德·马勒 (Ronald P. S. Mahler) 著
范红旗 卢大威 蔡飞 译
付强 审

 ARTECH HOUSE
BOSTON | LONDON



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

多源多目标统计信息融合进展

Advances in Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion

[美] 罗纳德·马勒(Ronald P. S. Mahler) 著

范红旗 卢大威 蔡飞 译

付强 审

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2015-209 号

图书在版编目(CIP)数据

多源多目标统计信息融合进展 / (美) 罗纳德·马勒(Ronald P. S. Mahler) 著; 范红旗, 卢大威, 蔡飞译.
—北京: 国防工业出版社, 2017.12

书名原文: Advances in Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion

ISBN 978-7-118-11496-6

I. ①多… II. ①罗… ②范… ③卢… ④蔡… III. ①统计数据—信息融合 IV. ①0212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 309479 号

2014 Artech House, Inc.

Translation from the English language edition: Advances in Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion by Ronald P. S. Mahler

All rights reserved. This translation published under Artech House, Inc.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书简体中文版由 Artech House, Inc. 授权国防工业出版社独家出版发行。
版权所有, 侵权必究。

※

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)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 49¼ 字数 1125 千字

2017 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 218.00 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

Preface for the Chinese Edition

The book *Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion* was published in 2007. It inspired a tremendous amount of research, conducted by many dozens of researchers in at least 20 nations. This included many universities in China, and a Chinese translation appeared in 2013. However, advancements in the field since 2007 were so fast-paced and extensive that I felt it was necessary to aggregate and systematize them into a coherent, integrated, and detailed picture. The result was a second book, *Advances in Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion*, published in 2014. Given the continuing interest of Chinese researchers in the subject, the appearance of a Chinese translation of the new book, by the same publisher, continues to be welcome, timely, and valuable.

Once again, I wish to express my gratitude to the indefatigable translator of both books, Fan Hongqi. I am humbled by the great interest in my work, in China and elsewhere. The appearance of both translations has been a great honor, of which I continue to hope that I am worthy.

Ronald Mahler

June 2017

序

“感觉只解决现象问题，理论才解决本质问题。”当多数人跟着感觉，执着于线性最小均方误差估计统计理论的应用之时，不曾想却偏离贝叶斯理论的本源越来越远。Mahler 博士构建了有限集合统计学及其应用的理论大厦，使古老的贝叶斯理论在解决群目标跟踪、多种测量不确定性融合等实际问题方面展现了广阔的前景。10 年来，有限集统计学的应用甚至远超出作者的预料，充分说明了一个有价值的理论力量之强大。本专著囊括了近年来随机集理论的最新应用成果，而且对业内学者的主要误解进行了详实的说明，在理论阐释方面更加系统精练。Mahler 博士的著作是高深的理论与前沿实践结合的范本，但理论和语言的双重门槛让国内众多从业者望而却步。因此，将这样的学术精品译成中文降低认知门槛，可以普遍提升该领域从业者的理论素养，比模仿某种实用技术或产品具有更大的影响力。

当大量吃瓜群众忙于有形事物的模仿与增长的时候，智者已放眼于影响未来的无形世界的思考上；能工巧匠的杰作固然雄浑，创造和传播知识却可以孕育更大的能量。相比于上次 Mahler 博士的译著《多源多目标统计信息融合》，这次翻译工作的付出更加艰辛曲折。因为在我们这样一个应用任务驱动型的工科院校，从理论上钻研前沿学术既缺乏氛围，也少有交流的同道者。范红旗博士既面临着显性业绩考评的压力，更受制于催产士般行政干预的无奈。加上成书的两年半时间里，院校改革的浪潮搅动得人心浮动，能够旁若无物、凝神静气地坚持完成如此大部头的译著，可谓是不小的壮举。须知，在如此功利浮躁的环境下，光有水平是不够的，只有超越“吃喝拉撒之上的那丝欲念，那点渴望，那缕求索”，才可能支撑与瘦弱的身躯不相称的、孕育巨大能量的成果的转化。范红旗博士不仅理论水平高，而且是驾驭文字的好手，全书文笔流畅，艰涩的专业术语翻译得简练而准确，是不可多得的高品质译著。希望有更多的国内同行品尝这份理论“大餐”并从中受益，也期盼读者能够感受到这份付出所承载的精神力量。

胡卫东

2017 年 5 月 长沙

前 言

本书是 2007 年 *Statistical Multisource–Multitarget Information Fusion* 一书的姊妹篇。前一部作品是有限集统计学(也称随机集信息融合)的一本教科书式的导论,它采用一种全新且无缝统一的全概率方法来诠释多源多目标的检测、跟踪、分类与信息融合。

这部新作将全面介绍 2007 年后随机集信息融合的研究成果——这在其他地方很难看到,主要面向的读者对象为信号处理专业的研究生、一般研究人员和工程师,同时也包括那些对跟踪、信息融合、机器人及其他相关课题感兴趣的数学家和统计学家。

有限集统计学包括下面五个要素:

- 一种通用的观测理论——基于随机集理论的随机几何表示;
- 一种通用的随机多目标系统理论——基于点过程(或随机集)理论的随机几何表示;
- 一种通用的多源多目标建模方法——基于多目标微积分;
- 一种通用的多源多目标最优处理方法——基于一般模型和贝叶斯滤波理论;
- 一种通用的多源多目标算法近似方法——同样基于多目标微积分。

有关这方面的一些入门性导论可参见文献 [181, 198, 311], 文献 [177, 311] 部分章节中则提供了一些扩展性的概述。另外, *Statistical Multisource–Multitarget Information Fusion* 一书的授权中文版^[180] 也已出版。读者还可从下述网站获取相关的信息:

- “随机有限集滤波”网站, 包含英国站和澳大利亚镜像站:
 - <http://randomsets.eps.hw.ac.UK/index.html>.
 - <http://randomsets.ee.unimelb.edu.au/index.html>.
- B. T. Vo 教授的个人主页:
 - <http://ba-tuong-vo-au.com>.
 - <http://ba-tuong-vo-au.com/codes/html>.
 - 第 2 个网址下提供许多 MATLAB 代码下载, 包括概率假设密度 (PHD) 滤波器、集势概率假设密度 (CPHD) 滤波器、势均衡多伯努利 (CBMeMBer) 滤波器、文献 [309] 中的单目标随机集滤波器、 λ -CPHD 滤波器(见第 18 章)和多伯努利检测前跟踪滤波器(见第 20 章)。

自 2007 年以来,有限集统计学吸引了十几个国家的众多研究者,有数以百计的论著出版,推动着随机集信息融合飞速发展。许多天才般的新想法促使该方向日趋多样化,甚至出现了一些未曾预期的研究方向。实际上,这种深入迅猛的发展势头多少也超出了我的预期,如在 *Statistical Multisource–Multitarget Information Fusion*^[179] 一书第 536 页中我曾有这样一则善意的免责声明:

“……初步研究表明 PHD 和 CPHD 滤波器在处理一些传统多目标检测跟踪问题时比多假设关联 (MHC) 型滤波器更为有效, 这种结论是否成立尚待进一步的研究确认。但这里要强调的是, PHD 和 CPHD 滤波器的设计初衷是为了解决前面所述的那些非传统跟踪问题的 (如群目标跟踪)。”

1.2 节将给出该领域的进展概况。那些研究主线上的进展可大致概括为: 从 PHD 滤波器到 CPHD 滤波器; 从 CPHD 滤波器到多伯努利滤波器, 特别是 CBMeMber 滤波器; 及至最新发展出的“背景未知的” CPHD 和 CBMeMber 滤波器, 以及 Vo-Vo 精确闭式多目标检测跟踪滤波器。一些辅助的进展则和联合跟踪与传感器配准、叠加式传感器与检测前跟踪、分布式融合、传感器管理以及机器人有关。

随着时间的推移, 我越来越认为有必要对这些最新研究进行汇总和系统化, 使之呈现出一幅连贯而紧凑的图景, 这正是本书的初衷所在。因此, 勾勒一幅能够深入反映该领域前沿的全貌图就成为本书的主要目标之一。

但这种全貌图不能追求面面俱到。比如, 本书就忽略了 PHD 和 CPHD 滤波器的许多相当散乱的实现策略, 同时将更多的重点放在精确闭式实现而非粒子实现上。对于那些无法确认真实性的研究结果, 本书也避而不谈。除了极个别例外, 本书排除了那些有着明显数学错误或者我本人不能理解的研究。由于本书于 2013 年末定稿, 自然也未能包括此后的一些突破性进展。

对于那些已经以整书或者章节形式出版过的研究进展, 这里不做介绍, 或者只给出一般的概念性描述。有兴趣的读者可以参考下列出版物:

- B. Ristic, *Particle Filters for Random Set Models* ^[250]
 - 如题目所示, 该书重点介绍随机有限集 (RFS) 多目标检测跟踪滤波器的序贯蒙特卡罗 (SMC) 实现;
 - 该书的特别之处是它将粒子 RFS 滤波器用于自然语言陈述和推理规则等非常规观测。
 - J. Mullane, B. N. Vo, M. Adams, and B. T. Vo, *Random Finite Sets in Robotic Map Building and SLAM* ^[210]
 - 该书是机器人即时定位与构图 (SLAM) 领域中随机集新方法的一部简明的导论性著作, 内容包括 RFS 导论、基于 RFS 的估计、SLAM 问题的强力 PHD 滤波器以及 RB-PHD 滤波器;
 - 该书报道的 RFS-SLAM 技术是 SLAM 问题的首个可证明的贝叶斯最优方法;
 - 在强杂波环境下, 该书中基于 PHD 滤波器的 SLAM 算法性能远超过传统 EKF-SLAM 和 MH-FastSLAM 算法;
 - 有关该方法的导论性综述可参见文献 [1];
 - 另一个信息来源即 Martin Adams 教授的个人网站:
- * http://www.cec.uchile.cl/~martin/Martin_research_18_8_11.html.

- Lee、Clark 和 Salvi 的 RFS-SLAM 论文^[141] 也是这方面一篇很不错的文献，发表在 2014 年 6 月 *IEEE Robotics & Automation Magazine* 的“随机几何应用”专刊上。
- R. Mahler, *Toward a Theoretical Foundation for Distributed Fusion* ^[183]
 - 它基本上是在介绍和解释 D. Clark 及其同事的工作，这些工作 (见 Uney、Clark 和 Julier 的论文^[294]) 对推广文献 [172] 中的多目标协方差交错概念 (对未知的重复计数观测免疫) 起到了积极作用；
 - Battistelli、Chisci、Fantacci、Farina 以及 Graziano 颇具突破性的论文 [15] 是这方面尤其需要关注的；
 - 其他需关注的论文如文献 [10, 242]。

对于想用本书作为大学教材的朋友，建议遵照下述原则。按照专业化程度及面向研究课题的深度，全书共分为五篇。第 I 篇以相当紧凑的方式介绍有限集统计学初步，当与 *Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion* 配套使用时，适合将其作为一学期导论课程的第一部分。第 II 篇主要致力于介绍有限集统计学中已经标准化的那些专题 (PHD、CPHD、伯努利以及多伯努利滤波器)，适合将其作为一学期导论课程的第二部分。对于那些更强调专家系统与高层信息融合的课程，第 22 章非常适合。第 II 篇其余章节以及第 III、IV、V 篇介绍一些更专业的主题与前沿研究。当选定一个特定的研究点后，便可将这些章节的部分内容作为研究生研讨课或者一学期高级课程的基础材料，重点面向那些即将进入课题研究的优秀生。为了方便教学和参考之用，本书也包括了一些熟悉的概念，如 UKF、马尔可夫跳变滤波器、复高斯分布、 β 分布、Wishart 及逆 Wishart 分布。

与 *Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion* 一样，我真心地希望这本书能够增进读者的知识，为大家提供一些有价值的信息和启发，偶尔也能带来一丝刺激，甚至是一点兴奋。

致 谢

本书内容不涉及洛克希德·马丁公司的立场或政策，不应从中推断任何官方意图。

在此，我诚挚地感谢下列人员一直以来的原创性研究以及同他们的通信交流：B. N. Vo 教授和 B. T. Vo 教授 (Curtin 大学，珀斯，澳大利亚)；Daniel Clark 教授 (Heriot-Watt 大学，爱丁堡，英国)；Branko Ristic 博士 (国防科技司 DESTO，墨尔本，澳大利亚)。另外，读者很快便能发现下列学者及其学生们研究工作的重要性：Thia Kirubarajan 教授 (McMaster 大学，哈密尔顿，安大略省，加拿大)；Peter Willett 教授 (Connecticut 大学，斯托尔斯，康涅狄格州，美国)；Lennart Sveensson 教授 (Chalmers 理工大学，哥德堡，瑞典)；Mark Coats 教授 (McGill 大学，蒙特利尔，加拿大)。

我还要感谢 Scientific Systems 公司合作者们的长期支持与研究工作，尤其是 Adel El-Fallah 博士和 Aleksander Zatezalo 博士。对 Adel El-Fallah 在本书影印稿定稿过程中给予的帮助，在此致以特别的感谢。

本书涉及数十位研究者的工作，介绍过程中力求准确。在认为必要的时候，我会就不同技术问题的归类与作者直接联系，在此感谢他们所付出的时间、支持与耐心。

最后，如我在 *Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion* 一书致谢中所述，Goodman I. R. 博士 (美国海军 SPAWAR 系统中心，已退休) 奠基性的研究工作对我影响颇深。正是 Goodman 博士的引导，才使我明白了随机集技术对于信息融合的潜在革命性意义。

本书手稿采用 MacKichan 软件公司的 *Scientific WorkPlace 5.50* 编写，离开该软件，本书的写作将面临巨大的困难。书中的图片采用 *Scientific WorkPlace* 和 *Microsoft Powerpoint* 制作而成。

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	有限集统计学概览	2
1.1.1	FISST 的理念	2
1.1.2	关于 FISST 的一些误解	6
1.1.3	观测-航迹关联方法	10
1.1.4	随机有限集方法	11
1.1.5	扩展至非常规观测	15
1.2	有限集统计学最新进展	16
1.2.1	经典 PHD 和 CPHD 滤波器进展	16
1.2.2	多目标平滑器	17
1.2.3	未知背景下的 PHD 和 CPHD 滤波器	17
1.2.4	非点目标 PHD 滤波器	18
1.2.5	经典多伯努利滤波器的进展	18
1.2.6	面向“原始数据”的 RFS 滤波器	19
1.2.7	理论进展	19
1.2.8	非常规观测融合方面的进展	20
1.2.9	迈向大一统	21
1.3	本书结构	22

第 I 篇 有限集统计学初步

第 2 章	随机有限集	26
2.1	简介	26
2.2	单传感器单目标统计学	26
2.2.1	基本符号	26
2.2.2	状态空间和观测空间	27
2.2.3	随机状态 / 观测、概率质量函数与概率密度	28
2.2.4	目标运动模型与马尔可夫密度	28
2.2.5	观测模型与似然函数	29
2.2.6	非常规观测	29
2.2.7	单传感器单目标贝叶斯滤波器	29

2.3	随机有限集	30
2.3.1	RFS 与点过程	31
2.3.2	RFS 的例子	33
2.3.3	RFS 的代数性质	33
2.4	多目标统计学梗概	34
第 3 章	多目标微积分	37
3.1	简介	37
3.2	基本概念	37
3.2.1	集函数	37
3.2.2	泛函	38
3.2.3	泛函变换	38
3.2.4	多目标密度函数	39
3.3	集积分	39
3.4	多目标微分	40
3.4.1	Gâteaux 方向导数	41
3.4.2	Volterra 泛函导数	41
3.4.3	集导数	42
3.5	多目标微积分的重要公式	43
3.5.1	多目标微积分基本定理	44
3.5.2	集积分变量替换公式	44
3.5.3	联合空间上的集积分	45
3.5.4	常数法则	46
3.5.5	求和法则	46
3.5.6	线性法则	46
3.5.7	单项式法则	47
3.5.8	幂法则	47
3.5.9	乘积法则	47
3.5.10	第一链式法则	48
3.5.11	第二链式法则	48
3.5.12	第三链式法则	49
3.5.13	第四链式法则	49
3.5.14	Clark 通用链式法则	50

第 4 章	多目标统计学	52
4.1	简介	52
4.2	基本的多目标统计描述符	52
4.2.1	信任质量函数	53
4.2.2	多目标概率密度函数	53
4.2.3	卷积与解卷积	54
4.2.4	概率生成泛函	55
4.2.5	多变量 p.g.fl.	57
4.2.6	势分布	59
4.2.7	概率生成函数	59
4.2.8	概率假设密度	60
4.2.9	阶乘矩密度	61
4.2.10	基本描述符的等价性	62
4.2.11	Radon-Nikodým 公式	62
4.2.12	Campbell 定理	62
4.3	重要的多目标过程	63
4.3.1	泊松 RFS	63
4.3.2	独立同分布群 (i.i.d.c.) RFS	64
4.3.3	伯努利 RFS	65
4.3.4	多伯努利 RFS	66
4.4	基本的派生 RFS	67
4.4.1	钳位 RFS	67
4.4.2	簇群 RFS	68
第 5 章	多目标建模与滤波	70
5.1	简介	70
5.2	多传感器多目标贝叶斯滤波器	70
5.3	多目标贝叶斯最优性	72
5.4	RFS 多目标运动模型	73
5.5	RFS 多目标观测模型	74
5.6	多目标马尔可夫密度	77
5.7	多传感器多目标似然函数	78
5.8	多目标贝叶斯滤波器的 p.g.fl. 形式	79
5.8.1	p.g.fl. 时间更新方程	79
5.8.2	p.g.fl. 观测更新方程	80

5.9	可分解的多目标贝叶斯滤波器	81
5.10	多目标近似滤波器	83
5.10.1	独立目标的 p.g.fl. 时间更新	83
5.10.2	独立观测的 p.g.fl. 观测更新	84
5.10.3	原则近似方法	86
5.10.4	泊松近似: PHD 滤波器	86
5.10.5	i.i.d.c. 近似: CPHD 滤波器	88
5.10.6	多伯努利近似: 多伯努利滤波器	89
5.10.7	伯努利近似: 伯努利滤波器	90
第 6 章	多目标度量	92
6.1	简介	92
6.2	多目标错误距离	93
6.2.1	多目标错误距离: 历史	93
6.2.2	最优子模式分配度量	95
6.2.3	扩展至协方差 OSPA (COSPA)	97
6.2.4	标记航迹的 OSPA (LOSPA)	99
6.2.5	时域 OSPA (TOSPA)	101
6.3	多目标信息泛函	102
6.3.1	Csiszár 信息泛函	102
6.3.2	泊松过程的 Csiszár 信息泛函	104
6.3.3	i.i.d.c. 过程的 Csiszár 信息泛函	105

第 II 篇 标准观测模型中的 RFS 滤波器

第 7 章	本篇导论	108
7.1	要点概述	108
7.2	标准多目标观测模型	109
7.2.1	标准多目标观测模型: 子模型	109
7.2.2	标准多目标观测模型: p.g.fl. 与似然	110
7.2.3	标准多目标观测模型: 特殊情形	111
7.2.4	观测-航迹关联	112
7.2.5	MTA 与 RFS 方法的关系	114
7.3	一种近似的标准似然函数	115
7.4	标准多目标运动模型	115
7.5	含衍生的标准运动模型	118
7.6	本篇结构	118

第 8 章	经典 PHD/CPHD 滤波器	119
8.1	简介	119
8.1.1	要点概述	119
8.1.2	本章结构	120
8.2	泛 PHD 滤波器	120
8.2.1	泛 PHD 滤波器: 运动建模	121
8.2.2	泛 PHD 滤波器: 预测器	122
8.2.3	泛 PHD 滤波器: 观测建模	123
8.2.4	泛 PHD 滤波器: 校正器	123
8.3	任意杂波 PHD 滤波器	124
8.3.1	任意杂波 PHD 滤波器: 时间更新方程	124
8.3.2	任意杂波 PHD 滤波器: 观测建模	124
8.3.3	任意杂波 PHD 滤波器: 校正器	124
8.4	经典 PHD 滤波器	125
8.4.1	经典 PHD 滤波器: 预测器	126
8.4.2	经典 PHD 滤波器: 观测建模	126
8.4.3	经典 PHD 滤波器: 校正器	126
8.4.4	经典 PHD 滤波器: 状态估计	127
8.4.5	经典 PHD 滤波器: 不确定性估计	128
8.4.6	经典 PHD 滤波器: 主要特性	128
8.5	经典集势 PHD (CPHD) 滤波器	132
8.5.1	经典 CPHD 滤波器: 运动建模	132
8.5.2	经典 CPHD 滤波器: 预测器	133
8.5.3	经典 CPHD 滤波器: 观测建模	134
8.5.4	经典 CPHD 滤波器: 校正器	135
8.5.5	经典 CPHD 滤波器: 状态估计	136
8.5.6	经典 CPHD 滤波器: 基本特性	137
8.5.7	经典 CPHD 滤波器的近似	138
8.6	零虚警 (ZFA) CPHD 滤波器	139
8.6.1	PHD 滤波器与 ZFA-CPHD 滤波器的对比	140
8.7	状态相关泊松杂波下的 PHD 滤波器	141
第 9 章	经典 PHD/CPHD 滤波器实现	143
9.1	简介	143
9.1.1	要点概述	143
9.1.2	本章结构	143

9.2	“远距离幽灵作用”	144
9.3	PHD 滤波器的合并与切分	145
9.3.1	PHD 滤波器的合并	146
9.3.2	PHD 滤波器的切分	146
9.4	CPHD 滤波器的合并与切分	146
9.4.1	CPHD 滤波器的合并	146
9.4.2	CPHD 滤波器的切分	147
9.5	高斯混合实现	149
9.5.1	标准 GM 实现	150
9.5.2	高斯分量修剪	150
9.5.3	高斯分量合并	151
9.5.4	GM-PHD 滤波器	152
9.5.5	GM-CPHD 滤波器	161
9.5.6	非定常 p_D 下的实现	166
9.5.7	部分均匀新生下的实现	166
9.5.8	集成目标身份的实现	170
9.6	序贯蒙特卡罗实现	173
9.6.1	SMC 近似	174
9.6.2	SMC-PHD 滤波器	174
9.6.3	SMC-CPHD 滤波器	177
9.6.4	基于观测的新生粒子选择	178
9.6.5	集成目标身份的实现	182
第 10 章	多传感器 PHD/CPHD 滤波器	183
10.1	简介	183
10.1.1	要点概述	183
10.1.2	本章结构	183
10.2	多传感器多目标贝叶斯滤波器	184
10.3	多传感器泛 PHD 滤波器	185
10.3.1	多传感器泛 PHD 滤波器: 建模	185
10.3.2	多传感器泛 PHD 滤波器: 更新	186
10.4	多传感器经典 PHD 滤波器	187
10.4.1	精确多传感器经典 PHD 滤波器的实现	190
10.5	迭代校正式多传感器 PHD/CPHD 滤波器	190
10.5.1	迭代校正方法的局限性	191

10.6	平行组合式多传感器 PHD/CPHD 滤波器	191
10.6.1	平行组合式多传感器 CPHD 滤波器	194
10.6.2	平行组合式多传感器 PHD 滤波器	197
10.6.3	SPCAM-PHD 滤波器	198
10.7	一种错误的平均式多传感器 PHD 滤波器	199
10.8	性能比较	203
第 11 章	马尔可夫跳变 PHD/CPHD 滤波器	206
11.1	简介	206
11.1.1	要点概述	207
11.1.2	本章结构	208
11.2	马尔可夫跳变滤波器回顾	208
11.2.1	马尔可夫跳变贝叶斯递归滤波器	209
11.2.2	马尔可夫跳变滤波器的状态估计	209
11.3	多目标马尔可夫跳变系统	210
11.3.1	多目标马尔可夫跳变系统的定义	210
11.3.2	多目标马尔可夫跳变滤波器	211
11.4	马尔可夫跳变 PHD 滤波器	212
11.4.1	马尔可夫跳变 PHD 滤波器: 模型	212
11.4.2	马尔可夫跳变 PHD 滤波器: 时间更新	213
11.4.3	马尔可夫跳变 PHD 滤波器: 观测更新	214
11.4.4	马尔可夫跳变 PHD 滤波器: 状态估计	214
11.5	马尔可夫跳变 CPHD 滤波器	214
11.5.1	马尔可夫跳变 CPHD 滤波器: 建模	215
11.5.2	马尔可夫跳变 CPHD 滤波器: 时间更新	215
11.5.3	马尔可夫跳变 CPHD 滤波器: 观测更新	216
11.5.4	马尔可夫跳变 CPHD 滤波器: 状态估计	217
11.6	变空间马尔可夫跳变 CPHD 滤波器	217
11.6.1	变空间 CPHD 滤波器: 建模	219
11.6.2	变空间 CPHD 滤波器: 时间更新	220
11.6.3	变空间 CPHD 滤波器: 观测更新	221
11.6.4	变空间 CPHD 滤波器: 状态估计	223
11.7	马尔可夫跳变 PHD/CPHD 滤波器的实现	225
11.7.1	高斯混合马尔可夫跳变 PHD/CPHD 滤波器	225
11.7.2	马尔可夫跳变 PHD/CPHD 滤波器的粒子实现	229

11.8	已实现的马尔可夫跳变 PHD/CPHD 滤波器	229
11.8.1	Pasha 等人的马尔可夫跳变 PHD 滤波器	230
11.8.2	Punithakumar 等人的 IMM 型 JM-PHD 滤波器	230
11.8.3	Li 和 Jia 等人的最优高斯拟合 PHD 滤波器	231
11.8.4	Georgescu 等人的 JM-CPHD 滤波器	231
11.8.5	Jin 等人的当前统计模型 (CSM) PHD 滤波器	231
11.8.6	Chen 等人的变空间 CPHD 滤波器	232
第 12 章	联合跟踪与传感器偏置估计	233
12.1	简介	233
12.1.1	例子: 传感器平台的“网格同步”	233
12.1.2	一般的网格同步问题	236
12.1.3	要点概述	236
12.1.4	本章结构	237
12.2	传感器偏置建模	237
12.3	最优的联合跟踪配准	239
12.3.1	最优 BURT 滤波器: 单滤波器版	239
12.3.2	最优 BURT 滤波器: 双滤波器版	240
12.3.3	最优 BURT 流程	242
12.4	BURT-PHD 滤波器	242
12.4.1	BURT-PHD 滤波器: 单传感器情形	243
12.4.2	BURT-PHD 滤波器: 多传感器迭代校正	246
12.4.3	BURT-PHD 滤波器: 多传感器平行组合	247
12.5	单滤波器版 BURT-PHD 滤波器	247
12.5.1	静态偏置下的单滤波器版 BURT-PHD 滤波器	247
12.5.2	一种启发式的单滤波器版 BURT-PHD 滤波器	249
12.6	已实现的 BURT-PHD 滤波器	249
12.6.1	Ristic 和 Clark 的 BURT-PHD 滤波器	250
12.6.2	Lian 等人的 BURT-PHD 滤波器	250
第 13 章	多伯努利滤波器	251
13.1	简介	251
13.1.1	要点概述	252
13.1.2	本章结构	252