



国防科技著作精品译丛

Bayesian Multiple Target Tracking,
Second Edition

贝叶斯多目标跟踪 (第2版)

【美】Lawrence D. Stone, Roy L. Streit
Thomas L. Corwin, Kristine L. Bell 著
鄂群 门金柱 姚科明 译



ARTECH HOUSE
BOSTON | LONDON



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国防科技著作精品译丛

贝叶斯多目标跟踪 (第2版)

Bayesian Multiple Target Tracking (Second Edition)

[美] Lawrence D. Stone Roy L. Streit 著
Thomas L. Corwin Kristine L. Bell
鄂 群 门金柱 姚科明 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字: 军 -2014 -171 号

图书在版编目 (CIP) 数据

贝叶斯多目标跟踪/ (美) 劳伦斯·D. 斯通 (Lawrence D. Stone) 等著; 鄂群, 门金柱, 姚科明译. — 北京: 国防工业出版社, 2016. 6

(国防科技著作精品译丛)

书名原文: Bayesian Multiple Target Tracking (Second Edition)

ISBN 978-7-118-10758-6

I. ①贝… II. ①劳… ②鄂… ③门… ④姚… III. ①贝叶斯推断—应用—多目标跟踪—研究 IV. ①E87②O212

中国版本图书馆CIP数据核字 (2016) 第 166613 号

Translation from the English Language edition: *Bayesian Multiple Target Tracking, Second Edition* Copyright © 2014 Artech House All rights reserved. Printed and bound in the United States of America. No part of this book may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

All terms mentioned in this book that are known to be trademarks or service marks have been appropriately capitalized. Artech House cannot attest to the accuracy of this information.

Use of a term in this book should not be regarded as affecting the validity of any trademark or service

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, 翻版必究

贝叶斯多目标跟踪 (第 2 版)

Bayesian Multiple Target Tracking (Second Edition)

[美] Lawrence D. Stone Roy L. Streit

Thomas L. Corwin Kristine L. Bell 著

鄂 群 门金柱 姚科明 译

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

开 本 700 × 1000 1/16

印 张 17½

字 数 268 千字

版 印 次 2016 年 6 月第 2 版第 1 次印刷

印 数 1—1500 册

定 价 95.00 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

译者序

多年以来,多目标跟踪问题一直是许多军事和民用技术应用领域中的热点问题,也是难点问题。围绕多目标跟踪问题的核心,本书的鲜明特点是,书中提供的主要例子都以反潜战为背景,应用指向性明显。同时,本书非常强调概念和原理的阐述,不以数学推导为重心,在不失严格的基础上强调了方法的实际应用。本书采用贝叶斯的视角,把多目标跟踪问题视为贝叶斯推断问题。在这个框架下,建立单目标跟踪和多目标跟踪理论,以及似然比检测和跟踪。除给出贝叶斯单目标递归的基本粒子滤波实现外,还提供若干粒子滤波的例子来说明有关概念、算法和方法。本书可以帮助从事跟踪问题研究的工程师和研究人员,对以下几个方面的理论和方法有更深入的理解:

- (1) 观测为目标状态的非线性函数;
- (2) 目标状态分布或测量误差分布是非高斯的;
- (3) 数据率和信噪比较低的情况;
- (4) 多目标情况下,接触和数据关联融为一体,难以分辨。

本书的作者都在美国著名咨询公司米特伦 (Metron) 工作。

劳伦斯·斯通 (Lawrence D. Stone) 是该公司首席研究员,自 1986 年以来一直在米特伦公司工作。他曾参与多项水下搜索行动,包括参与搜索 1968 年失事的美国核潜艇“蝎子” (Scorpion)、1857 年在南卡罗来纳沿海沉没的“SS Central America”沉船以及 2009 年坠毁在大西洋的法航飞机 447 号等重大行动。他也是美国海岸警卫队最优搜救方案系统的设计者之一。他的专著 *Theory of Optimal Research*, 曾获美国

运筹学会 (Operational Research Society of America) 颁发的兰彻斯特奖 (Lanchester Prize)。该书的中文版于 1990 年由海潮出版社出版 (《最优搜索理论》), 在国内军事运筹界产生巨大影响。斯通博士也是美国国家工程院 (National Academy of Engineering) 的成员, 运筹学与管理学研究员, 军事运筹杰出贡献奖 J. Steinhardt Prize 获得者。

罗伊·斯特利特 (Roy L. Streit) 是米特伦公司的高级研究员。在 2005 年加入米特伦公司之前, 他是美国海军水下作战研究中心 (Naval Undersea Warfare Center) 的高级研究员, 主要致力于潜艇声纳和作战控制系统的数据融合算法研究。他曾获得 American Society of Naval Engineering 颁发的 Solberg 奖, Department of navy 颁发的 Superior Civilian Award 奖, 是 2012 年国际信息融合会 (International Society for Information Fusion) 的主席, 拥有 9 项美国专利, 也是马萨诸塞大学 (University of Massachusetts) 的电子和计算机学院的教授。2012 年由 Springer 出版社出版了专著 *Poisson Point Processes: Imaging, Tracking, and Sensing*, 该书中文版于 2013 年由科学出版社出版 (《泊松点过程: 成像, 跟踪及感知》)。

托马斯·科尔文 (Thomas L. Corwin) 是公司的董事长, 首席运营官, 1982 年创建了米特伦公司。科尔文博士曾参与了包括军事作战搜索、失事飞机搜索、Yom Kippur war 后的苏伊士运河未爆炸武器搜排等行动。在美国太平洋舰队的 Commander Submarine Forces 工作期间, 设计了搜索跟踪潜艇的计算机系统, 并为此获得了 Secretary of Navy 的 Distinguished Public Service Award。他的近期主要研究活动包括大规模多单体间干涉的自适应统计物理方法。

克里斯汀·贝尔 (Kristine L. Bell) 是公司高级研究员。1996—2009 年担任乔治马森大学 (George Mason University) 统计系和 C⁴I 中心的 associate/assistant professor, 期间, 曾是陆军研究实验室 (Army Research Laboratory) 和海军研究实验室 (Naval Research Laboratory) 的访问学者, 2009 年加入米特伦公司。他是 2013 年出版的 *Detection, Estimation, and Modulation* (第 2 版) 的作者之一 (另一作者为 Harry Van Trees), 2007 年由电子工业出版社出版了中文版《检测, 估计和调制理论》, 该书被公认为关于检测、参数估计和调制理论的权威著作。贝尔也是 2007 年出版的 *Bayesian Bounds for Parameter Estimation and Nonlinear Filtering/Tracking* 的作者之一 (另一作者仍为 Harry Van Trees)。她的主要研究领域为统计信号处理, 以及雷达、声纳、卫星通信等应用中的源

定位和跟踪。

参加翻译工作的有鄂群(第1章,第6、7章,附录等)、姚科明(第2、3章)、门金柱(第4、5章)。孙心丰也在翻译过程中做了大量工作,在此表示谢意。鄂群负责全书译文的审定。

感谢国防工业出版社对本书翻译出版的支持,也感谢责任编辑在整个译著出版过程中所付出的辛勤劳动。

受译者水平所限,书中难免存在疏漏和不当之处,敬请读者批评指正。

译者

2015年12月

原著第 2 版前言

与第 1 版相比, 本版的内容和章节经过了很大的修改。许多正文内容、讨论和例子都是新的。由此可以看出, 自 1999 年本书第 1 版出版以来, 在多目标跟踪领域已经发生了很多的变化。

最引人注目的变化之一是粒子滤波广泛应用在实现非线性、非高斯贝叶斯跟踪器上。为反映这个变化, 我们提供了关于基本滤波器的详细描述, 该滤波器实现了第 3 章中的贝叶斯单目标递归。也描述了许多本书推导出的跟踪算法的粒子滤波实现, 并给出若干涉及粒子滤波使用的例子。

有关多目标跟踪的第 4 章的内容也经过了重新组织, 展现了三个算法, 它们为多目标跟踪问题, 即多目标假设跟踪 (MHT)、联合概率数据关联 (JPDA) 和概率多假设跟踪 (PMHT), 并给出了近似解。此外, 也描述了 JDPA 的一粒子滤波实现。

在第 5 章和第 6 章, 涵盖了可用于多目标跟踪的多目标强度滤波 (iFilter) 和最大后验罚函数 (MAP-PF) 技术的新话题。强度滤波是概率假设密度 (PHD) 滤波的一般化。

第 1 版中的两章 (第 6 章、第 7 章) 有关似然比检测和跟踪 (LRDT) 内容已浓缩为新的第 7 章。在第 7 章中给出 LRDT 的一个格网实现, 并描述了作为多目标探测器跟踪器的 LRDT 的使用。增加一些例子来说明 LRDT 的使用。本章以 iLRT 的描述为收尾, 它是 iLRT 和 LRDT 的组合, 可以用于确定存在目标的数量以及估计目标的航迹。很久以来, 这些问题一直困扰着 iFilter 和 PHD 滤波器。

与第 1 版相比, 本版的内容更广泛、更易读, 增加了许多新的例子与方法可应用在多目标检测和跟踪问题之中。

内容简介

本书从标准的贝叶斯论者的视角逐步建立了多目标跟踪的数学理论。多目标跟踪问题的目的, 是为了估计在感兴趣区域内的目标数量以及每个目标的状态。

本书把多目标跟踪视为贝叶斯推断问题。在这个框架内, 建立了单目标跟踪、多目标跟踪及似然比检测和跟踪 (LRDT) 理论。在建立过程中, 强调了使用似然函数来表示信息。似然函数替代并拓展了接触的概念, 可为来自不同传感器信息的估值和联合使用提供通用的手段, 尤其是当这些传感器具有不同的测量空间时。许多应用, 特别是在国防领域中, 都涉及多目标、多传感器和多平台跟踪的问题。本书为处理这些问题建立了统一的、在数学上合理的方法。

在仔细、严格呈现内容的同时, 我们也尽力使之简单明了、触手易得。我们感觉到, 标准的贝叶斯方法内容丰富、功能强大, 足以处理多数的多目标跟踪问题。有了这些认识, 我们尽力避免如随机集、有限集统计和非精确概率等概念, 因为它们会给理解多目标跟踪过程增加不必要的复杂性和困难。

在理解贝叶斯方法和使用似然函数表示测量与信息的基础上, 读者将能明确表达和解决单目标或多目标跟踪问题。本书逐步引导读者学习解决基本的单目标、多目标和检测前跟踪问题, 并提供例子以说明解决这些问题的实际方法。

贝叶斯推断

从贝叶斯的视角看待跟踪的含义, 它意味着在针对的问题上施加了

以下的结构: 第一, 为目标的数量、目标的状态以及目标改变状态的方式(目标如何在状态空间中运动) 指定了先验分布。第二, 当信息以传感器响应的形式被接收时, 它被转换为定义在目标状态空间上的似然函数。第三, 使用贝叶斯原理把似然函数和先验分布结合起来计算目标状态的后验分布。后验分布是贝叶斯推断的主要输出结果。有时候, 把该分布总结为一个数或点估计是很方便和合理的, 但多数情况不是这样的。

所有疑问都是在这个贝叶斯框架下得到回答的。例如, 概率和期望值是通过使用标准的概率积分来计算的, 但假定似然函数包含观测数据中的相关信息(见第 2 章)。我们提倡使用贝叶斯方法, 因为它经受了时间的考验, 并可以得出一致的、合理的结果。

下面给出本书各章内容的简短概括。

第 1 章 跟踪问题

第 1 章对基本的跟踪问题进行了描述, 并给出了四个跟踪问题的例子。这些例子在本书所要处理的问题中具有代表性。第一个例子涉及了使用卡尔曼滤波的单目标跟踪; 第二个例子是纯方位跟踪问题, 它是通过使用粒子滤波器来解决的; 第三个例子说明了 LRDT 在应用到信噪比较低以及海杂波或虚警率较高问题时的效力; 第四个是多目标跟踪的例子。

第 2 章 贝叶斯推断和似然函数

本章主要说明使用贝叶斯推断解决多目标检测和跟踪问题的合理性。本章强调似然函数的使用, 并通过若干例子说明如何能用它来表示对诸如位置估计、检测/非检测事件、未经过阈值判断的传感器数据等完全不同类型的观测数据进行表示和融合。

第 3 章 单目标跟踪

本章对目标运动模型为马尔可夫时的单目标跟踪的一般贝叶斯递归进行推导。该递归可以得出在给定直到时间 t 的测量下, 目标状态在时间 t 的后验分布。递归运算方式: 通过使用在时间 t 的后验, 以及在时间 $t' > t$ 接收的测量, 计算在时间 t' 的后验。本章把卡尔曼滤波视为贝叶斯递归的特例, 并给出了一般贝叶斯递归的粒子滤波实现。

第 4 章 经典多目标跟踪

在第 4 章中, 首先得出了多目标跟踪的一般贝叶斯递归, 之后把主要内容聚焦在以扫描形式接收接触的情形。接触是伴以诸如目标位置估计测量的检测。在每次扫描中, 都包含来自若干个目标的接触和虚假的检测结果。然而, 每个目标最多只有一个接触, 每个接触只能源于一个目标或虚假检测。当接触以扫描的形式接收时, 能够成功实现跟踪的主要障

碍在于把接触与目标进行关联。本章给出了解决此难题的三种方法。

第一种方法是把相关问题分解为数据关联假设。数据关联假设,把跟踪器接收到的接触集中的每个接触,分配到特定的目标或虚假检测上。然后,使用该关联假设对目标状态后验分布进行计算。通过计算每个数据关联假设正确性的概率,就可以辨别出哪一个具有最大概率,并显示出作为结果的目标状态分布。这种方法称为多假设跟踪(MHT)。在一定的独立假设下,本章给出了独立的MHT递归。当目标运动模型为高斯型以及接触为具有高斯型误差的目标状态线性函数的情况下,可以得出特殊的线性高斯MHT递归。

在实现MHT时,需要进行近似。特别地,必须对假设的数量进行限制,以免计算量随着接触数量的增加而以指数方式增加。

在MHT中,数据关联假设要求对每个目标都以概率 p 为1或0分配接触或虚假检测。作为第二种方法的联合概率数据关联(JPDA)把这个“硬性”分配假设放宽为相关概率 $0 < p < 1$ 。它要求计算的目标在时间 t 的概率分布,是根据在时间 t 后获得的接触而计算的目标状态分布的充分统计量。在这些假设条件下,本章推导出多目标跟踪的JPDA递归。该递归避免了由于MHT算法而导致的计算负载的指数增加问题,并且对假设的数量没有限制。本章也给出了JPDA的粒子滤波实现。

第三种方法为概率多假设跟踪(PMHT),它采用了另一种近似用于计算多目标跟踪解。它对在每个时间段内每个目标最多只能产生一个接触的假设不做限制。这就导致了多目标跟踪算法的计算量仅随接触和目标的数量增大而线性增长的情况。

第5章 多目标强度滤波

对于多目标跟踪问题,强度滤波采用了与第4章不同的解决方法。强度滤波并不显式地考虑接触与目标的关联,作为替代,它们计算估计目标空间密度的强度函数,强度函数的峰值表示了目标的位置。这就极大地简化了多目标跟踪所涉及的计算,其代价仅是不能显式给出目标状态估计或目标航迹。本章中推导出一个称为iFilter的强度滤波,对于该滤波器,标准的目标状态空间被扩大,包含了杂波目标状态,可以产生杂波或虚假检测。对多目标分布的建模,是通过泊松点过程(PPP)而进行的。iFilter提供了一种递归方法以计算在给定时间 t 内接收的接触条件下时间 t 时的后验点过程的强度函数。递归是从对贝叶斯后验点过程的近似开始,该近似是通过利用iFilter计算出强度函数的PPP来实现的。增加的杂波目标状态使得iFilter能够动态估计出虚假检测率,

它是接收接触的函数。概率假设密度滤波 (PHD) 是严格限制在标准的目标状态空间之上, 并且使用虚假检测率的固定的先验估计, 仅作为 iFilter 的特例而推导得出。

第 6 章 使用跟踪器生成测量的多目标跟踪

第 6 章抛弃了把观测以接触的形式提供给跟踪器的假设, 取代的假设是为要处理的是未经过阈值处理的传感器数据。本章建立了最大后验概率罚函数 (MAP-PF) 技术的多目标跟踪方法。MAP-PF 方法把目标状态估计和信号处理结合在一起以获取测量结果。通过对每个目标的目标状态进行估计, MAP-PF 对每个扫描的每个目标都产生一个测量结果。这种方法就意味着多数的多目标跟踪必须要解决相关问题这个难点。测量结果用于更新目标状态分布, 并提供下次扫描时的状态估计。MAP-PF 需要外部机制, 以对存在的目标数量进行估计, 一种可能的方法是使用第 7 章描述的 LRDT。

第 7 章 似然比检测和跟踪

本章研究只有一个目标存在时的检测和跟踪问题。本章建立的 LRDT 方法是对第 3 章中介绍的单目标跟踪方法的一种拓展。然而, 该方法对于某些特定的多目标检测和跟踪问题也适用。本章给出 LRDT 的理论和递归方法, 并提供例子说明如何在低 SNR 和高杂波率情况下得出较高的检测概率和较低的虚警率。本章中给出一种基于格网的 LRDT 实现方法。

本章以 iLRT 方法的描述作为收尾, 它是一种第 5 章给出的多目标强度滤波和本章中介绍的 LRDT 方法的组合。这种组合方法可以解决强度或 PHD 滤波所要面对的问题, 即对存在的目标数量的估计和已辨别目标航迹的估计。

目录

第 1 章 跟踪问题	1
1.1 跟踪问题描述	1
1.1.1 观测和运动模型	2
1.1.2 估计	2
1.1.3 滤波	3
1.2 例 1: 跟踪一艘水面舰艇	5
1.2.1 目标状态的先验分布	6
1.2.2 运动模型	7
1.2.3 测量模型	7
1.2.4 跟踪输出	8
1.3 例 2: 纯方位跟踪	12
1.3.1 例子描述	13
1.3.2 先验分布	13
1.3.3 运动模型	14
1.3.4 测量模型	15
1.3.5 粒子滤波描述	17
1.3.6 评述	19
1.3.7 跟踪输出	19
1.4 例 3: 潜望镜探测和跟踪	22
1.4.1 目标跟踪	23

1.4.2 例子	24
1.5 例 4: 多目标跟踪	27
1.5.1 软相关	28
1.6 小结	35
参考文献	35

第 2 章 贝叶斯推断和似然函数

2.1 贝叶斯推断的情形	38
2.1.1 频率论者的观点	38
2.1.2 条件论者的观点	39
2.1.3 贝叶斯论者的观点	39
2.2 似然函数和贝叶斯原理	42
2.2.1 似然函数	42
2.2.2 贝叶斯原理	43
2.2.3 贝叶斯原理的序贯性质	44
2.3 似然函数的例子	44
2.3.1 高斯接触模型	44
2.3.2 高斯型方位误差模型	45
2.3.3 混合方位和接触的测量	47
2.3.4 目标否定的信息	50
2.3.5 确定的信息	53
2.3.6 雷达和红外检测	54
2.3.7 信号 - 加 - 噪声模型	55
2.3.8 小结	59
参考文献	60

第 3 章 单目标跟踪

3.1 贝叶斯滤波	61
3.1.1 递归贝叶斯滤波	62
3.1.2 预测和平滑	68
3.1.3 递归预测	68
3.1.4 递归平滑	69
3.1.5 批处理平滑	71

3.1.6 陆地规避.....	71
3.2 卡尔曼滤波.....	74
3.2.1 离散卡尔曼滤波.....	74
3.2.2 连续-离散卡尔曼滤波.....	79
3.2.3 卡尔曼平滑.....	85
3.3 非线性滤波的粒子滤波实现.....	89
3.3.1 粒子生成.....	90
3.3.2 粒子滤波递归.....	91
3.3.3 再采样.....	91
3.3.4 扰动目标状态.....	92
3.3.5 收敛性.....	94
3.3.6 奇异子.....	94
3.3.7 多运动模型.....	95
3.3.8 高维状态空间.....	96
3.4 小结.....	96
参考文献.....	96
 第 4 章 经典多目标跟踪.....	 99
4.1 多目标跟踪.....	101
4.1.1 多目标运动模型.....	101
4.1.2 多目标似然函数.....	102
4.1.3 多目标贝叶斯递归.....	103
4.2 多假设跟踪.....	104
4.2.1 接触.....	105
4.2.2 扫描.....	106
4.2.3 数据关联假设.....	106
4.2.4 扫描和扫描关联假设.....	108
4.2.5 多假设跟踪分解.....	110
4.3 独立多假设跟踪.....	112
4.3.1 条件独立关联似然函数.....	113
4.3.2 扫描关联似然函数例子.....	114
4.3.3 独立定理.....	115
4.3.4 独立 MHT 递归.....	118

4.4	线性 - 高斯多假设跟踪	120
4.4.1	线性 - 高斯情况下的 MHT 递归	120
4.4.2	后验分布和关联概率	121
4.5	非线性联合概率数据关联	125
4.5.1	扫描关联假设	125
4.5.2	扫描关联概率	126
4.5.3	JPDA 后验	128
4.5.4	允许新目标出现和删除存在目标	128
4.5.5	粒子滤波实现	129
4.5.6	例子	130
4.6	概率多假设跟踪	131
4.6.1	PMHT 假设	132
4.6.2	关联上的后验分布	134
4.6.3	期望的最大化	136
4.6.4	非线性 PMHT	138
4.6.5	线性 - 高斯 PMHT	140
4.6.6	式 (4.81) 的证明	141
4.7	小结	143
4.8	说明	145
	参考文献	147
第 5 章 多目标强度滤波		149
5.1	多目标状态的点过程模型	151
5.1.1	PPP 的基本属性	152
5.1.2	PPP 的概率分布函数	154
5.1.3	点过程的叠加	154
5.1.4	目标运动过程	154
5.1.5	传感器测量过程	155
5.1.6	过程稀释	155
5.1.7	扩展空间	156
5.2	iFilter	156
5.2.1	扩展状态空间建模	157
5.2.2	预测的检测和未检测目标过程	158

5.2.3	测量过程.....	158
5.2.4	贝叶斯后验点过程 (信息更新).....	159
5.2.5	PPP 近似.....	160
5.2.6	PPP 近似中的相关损失	161
5.2.7	iFilter 滤波	161
5.2.8	PPP 的变换仍为 PPP.....	162
5.3	PHD 滤波.....	164
5.4	iFilter 的 PGF 方法	167
5.4.1	PGF 概述	167
5.4.2	有限格网上的 iFilter	171
5.4.3	格网状态和直方数据的联合 PGF	171
5.4.4	小单元极限	180
5.5	扩展目标滤波.....	182
5.6	小结.....	183
5.7	注记.....	184
5.7.1	其他话题.....	184
5.7.2	背景	185
	参考文献.....	185
 第 6 章 使用跟踪生成测量的多目标跟踪		188
6.1	最大后验罚函数跟踪.....	189
6.1.1	MAP-PF 方程.....	190
6.1.2	迭代优化.....	193
6.1.3	算法	196
6.1.4	变形	197
6.2	粒子滤波实现.....	198
6.3	线性 - 高斯实现	199
6.4	例子.....	200
6.4.1	模型	200
6.4.2	MAP-PF 实现.....	203
6.4.3	JDPA 实现	207
6.4.4	例子总结.....	209
6.5	小结.....	209