

梁彦 潘泉 杨峰 张磊 著

复杂系统的现代估计 理论及应用



科学出版社

www.sciencep.com

复杂系统的现代估计 理论及应用

梁彦 潘泉 杨峰 张磊 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

估计理论是自动控制、信号处理等学科的基础,在航空航天等工程领域有着广泛的应用。本书从自适应与鲁棒滤波、多模型估计、多尺度估计、非线性采样滤波等方面介绍了估计理论的部分进展,特别是作者在该领域近十年的理论研究成果,以及在非合作目标跟踪的重要应用。

本书可供从事最优估计、复杂系统建模、信息处理论及应用领域的研究生和科研人员参考阅读,对从事控制理论研究、系统设计、开发和应用的工程技术人员也具有一定的参考价值。

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年4月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009年4月第一次印刷 印张:26 3/4

印数:1—2 500 字数:524 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(路通))

前 言

由于探测模型的不准确、探测环境的复杂多变、非合作环境下人为对抗干扰的不可预知等因素,传感器的测量信号不可避免地被测量噪声所污染。从被噪声污染的观测中提取感兴趣的量,洞察动态系统的演化规律,为进一步施加正确的决策和控制提供支撑,是估计理论永恒的主题。近半个世纪以来,以 Kalman 滤波为代表的动态系统估计理论自诞生之日起,就在航空航天、信号处理、工业过程等领域展现出强大的生命力,越来越成为信息获取、控制、处理、传输、融合的基本手段。随着感知手段的日益丰富,感知任务的日益复杂精细,感知对象的日益多样,被估计系统越来越呈现出不确定、多模态、多尺度、高维数、非线性、网络化等复杂系统特征。关于 Kalman 滤波的研究正朝向多模型估计、多尺度估计、采样型非线性估计、自适应估计与鲁棒估计等方向深入发展,然而,关于复杂系统的估计理论及应用的研究多散布于最新的学术文献,目前国内外鲜有系统、全面介绍复杂系统的现代估计理论与应用的著作。对于广大对估计理论与应用有浓厚兴趣的研究生和青年学者来说,拥有一部反映估计理论学术研究发展及应用的工具书,将使他们的努力取得事半功倍的效果;对于长期在工程第一线、从事繁重而琐碎具体工作的工程技术人员,往往也需要一本反映研究发展动态的参考书,以便为更新知识而“充电”。本书的初衷正是试图为他们尽微薄之力,希望对他们有所帮助。

作者在近十年的复杂系统的滤波研究工作基础上完成本书。本书较为系统地总结了国内外在本领域的最新研究进展,特别是作者在多模型估计、多尺度估计、非线性估计以及目标跟踪、时滞估计等应用方面的研究成果。本书共分 17 章,内容分为三个部分。第一部分为基础理论介绍,主要涉及复杂动态系统的估计发展概述、经典的估计方法、Kalman 滤波;第二部分为理论篇,主要涉及单模型的自适应和鲁棒滤波、多模型估计、多尺度估计、非线性采样滤波 4 类估计理论与方法;第三部分为应用篇,主要以目标自动跟踪为应用背景,总结了估计理论在基于粒子滤波的检测跟踪一体化、基于图像增强的机动目标跟踪、基于地理信息的扩展对地跟踪等方面的应用。相信本书的出版对于推动估计理论的研究与工程应用会有所裨益。

实际上,除了以 Kalman 滤波为代表的最优滤波研究之外,以应对系统参数、系统输入不确定性为目标的鲁棒滤波也取得了很大的进展,在控制领域产生了深远的影响,不过,算法在工程应用的深度和广度上还有待提升。由于章节篇

幅和连贯性所限,本书不得不舍弃了对很多鲁棒滤波重要算法的详述,在此只是试图突出其研究思想及其部分应用。

本书的工作得到了国家自然科学基金重点项目“具有复杂系统特征的运动目标多模多尺度自适应估计与辨识”(项目编号:60634030)、面上项目“混合估计理论及应用研究”(项目编号:69772031)、面上项目“针对多种异类信息的混合估计与融合理论及其应用研究”(项目编号:60274059)、面上项目“多尺度动态估计理论及其应用研究”(项目编号:60172037)、青年项目“网络化混合系统多源信息估计与融合的关键问题研究”(项目编号:60404011)、青年项目“自适应采样型非线性滤波器研究”(项目编号:60702066)、中国博士后科学基金“非线性多模态混合系统的自适应估计理论及其应用研究”以及教育部“新世纪优秀人才支持计划”(项目编号:NCET-06-0878)项目的资助。在此,对以上单位表示衷心的感谢。

感谢把我们带入估计理论及其应用领域的前辈,包括王培德教授、周宏仁教授、张洪才教授等。正是前辈们的开拓与培养,才奠定了研究组目前的基础。

感谢活跃在复杂系统估计与应用领域的许多学者,包括 Bar-Shalom、Li、Blom、Julier、Gordon 等。正是他们出色的工作坚定了我们长期从事估计理论与应用研究的信念,我们的很多研究成果和他们的工作息息相关。我们将这些学者部分重要的研究进展收录在本书中,不仅是为了保证著作的完整性,而且借以表达对他们的敬意。

感谢清华大学自动化系的周东华教授。本书关于鲁棒滤波的研究成果正是第一作者在清华大学从事博士后研究期间完成的。周东华教授的悉心指导和严格锤炼,对作者来说是终生受益,在此深表谢意。

感谢和我们朝夕相处共同研究、共同成长的研究生,本书的许多成果凝聚着研究生们的创新与奉献。本书第 15 章收录了杨小军博士的研究工作,第 10 章和第 12 章收录了贾宇岗硕士的研究工作,第 16 章收录了魏莉莉硕士的研究工作。张共愿、王增福博士和谷丛硕士负责全书的文字整理和核对工作。胡振涛博士和王凯、吴坤峰、郎林、李文辉、任勇勇、李静、刘准轶、张媚、刘璐、朱英、沈贺、于盈、吴燕茹、陈丽平等硕士均参与了本书部分章节的整理工作。

由于作者水平有限,不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2009 年 1 月于西安

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 运动目标的估计	3
1.3 运动目标估计的进展	5
1.4 预备知识	10
1.5 附注	10
参考文献	10
第 2 章 概率统计及随机过程基础知识	16
2.1 概述	16
2.2 最小二乘估计	17
2.3 多项式拟合	25
2.4 参数估计的拟合优度与统计显著性	32
2.5 极大似然估计和极大后验估计	37
2.6 最小均方误差估计	41
2.7 估计的性质	45
2.8 本章小结	55
参考文献	55
第 3 章 Kalman 估计	56
3.1 Kalman 滤波	56
3.2 Kalman 平滑	63
3.3 滤波的基本定理	74
3.4 本章小结	77
参考文献	78
第 4 章 单模型自适应估计	79
4.1 引言	79
4.2 模型方差自适应调节的估计器	79
4.3 两级 Kalman 滤波器	80
4.4 区间估计器	81
4.5 Singer 模型	81

4.6	当前统计模型	84
4.7	输入估计	86
4.8	变维滤波	88
4.9	强跟踪滤波器	90
4.10	本章小结	92
	参考文献	93
第5章	具有广义未知干扰输入的随机系统鲁棒滤波	94
5.1	引言	94
5.2	具有 GUDI 的随机系统建模	95
5.3	上界滤波器设计	98
5.4	最小上界滤波器设计	99
5.5	仿真分析	101
5.6	本章小结	112
	参考文献	113
第6章	一种用于具有未知噪声线性系统的自适应 Kalman 滤波器	115
6.1	引言	115
6.2	问题描述	116
6.3	自适应 Kalman 滤波器的设计	118
6.4	时滞和参数估计的计算机仿真	122
6.5	本章小结	127
	参考文献	127
第7章	鲁棒 IMM 滤波	130
7.1	引言	130
7.2	算法推导	132
7.3	时滞和参数的联合估计	134
7.4	本章小结	145
	参考文献	145
第8章	Gauss 近似非线性滤波	147
8.1	EKF 滤波	147
8.2	UT 变换	153
8.3	UKF 算法	157
8.4	仿真实验	163
8.5	本章小结	165
	参考文献	166

第 9 章 粒子滤波器	170
9.1 引言	170
9.2 基本思想	170
9.3 PF 实现	177
9.4 仿真分析	183
9.5 本章小结	187
参考文献	187
第 10 章 IMM 算法	190
10.1 引言	190
10.2 IMM 算法	191
10.3 IMM 算法参数分析	192
10.4 IMM 算法过渡过程仿真分析	197
10.5 IMM 算法的收敛性	200
10.6 多模型估计与贝叶斯因果网	201
10.7 本章小结	205
参考文献	206
第 11 章 自适应 IMM 算法	207
11.1 引言	207
11.2 SIMM 算法	207
11.3 具有参数的 AIMM 算法	214
11.4 两级 IMM 算法	225
11.5 本章小结	235
参考文献	235
第 12 章 混合估计平滑	237
12.1 引言	237
12.2 固定区间平滑算法	237
12.3 一步固定滞后平滑算法	240
12.4 基于状态扩维的任意步固定滞后平滑算法	244
12.5 两种固定滞后平滑算法仿真比较	249
12.6 本章小结	253
参考文献	253
第 13 章 基于一般紧支撑小波的动态多尺度系统 (DMS) 集中式最优估计	254
13.1 引言	254
13.2 离散 DMS 一般紧支撑小波实现	254
13.3 离散定常 DMS 的一般紧支撑小波实现形式	260

13.4	系统的随机可控性·····	262
13.5	系统的随机可测性·····	264
13.6	Kalman 滤波系统的稳定性 ·····	267
13.7	基于一般紧支撑小波的集中式最优估计算法仿真·····	271
13.8	本章小结·····	275
	参考文献·····	275
第 14 章	基于 Haar 小波的 DMS 序贯式最优估计 ·····	276
14.1	引言·····	276
14.2	序贯式 Kalman 滤波 ·····	277
14.3	基于 Haar 小波的 DMS 序贯式估计 ·····	281
14.4	基于 Haar 小波的序贯式最优估计算法仿真 ·····	289
14.5	本章小结·····	291
	参考文献·····	292
第 15 章	基于 PF 的检测跟踪一体化技术 ·····	293
15.1	引言·····	293
15.2	算法推导·····	294
15.3	序列图像运动目标的检测和跟踪·····	297
15.4	算法性能分析·····	301
15.5	本章小结·····	304
	参考文献·····	304
第 16 章	基于图像增强的机动目标跟踪 ·····	306
16.1	引言·····	306
16.2	基于图像增强的 IMM 估计 ·····	311
16.3	模式观测一步滞后的 IMM 方法 ·····	314
16.4	仿真分析·····	322
16.5	本章小结·····	329
	参考文献·····	329
第 17 章	基于地理信息的扩展对地跟踪 ·····	332
17.1	引言·····	332
17.2	利用地理信息的 EGTT ·····	332
17.3	基于 EGTT 的 EMTV ·····	333
17.4	基于 EGTT 的 C-IMMTV 算法 ·····	341
17.5	本章小结·····	347
	参考文献·····	348

附录 A 线性代数与线性系统简要回顾	349
附录 B 概率论与随机过程的简单回顾	358
附录 C 假设检验与统计推断的简单回顾	392
附录 D 第 5 章定理证明	403
附录 E 第 6 章定理证明	408

第 1 章 绪 论

1.1 背 景

在自动控制、信号处理、跟踪导航及工业生产等领域中,越来越多地遇到“估计”问题。例如,实验分析常常把实验结果用曲线的形式表示,以便揭示实验数据所服从的某种规律,这就需要根据观测数据来估计描述该曲线的某些参数。又如,在飞行器导航中,要从带有随机干扰的观测数据中估计出飞行器的位置、速度和加速度等运动状态变量。因此,估计的任务就是从带有随机误差的观测数据按照某个最优准则重构出感兴趣的量。估计分为参数估计和状态估计,其中,把对确定性参数(非随机量)的估计称为参数估计,把对遵循动力学模型的状态(随机量)的估计称为状态估计。

1.1.1 估计概述

一个物理系统常常受到两个输入变量集的作用:一个是控制输入,通常是确定性的;另一个是干扰输入,它是系统内部和外部的不能控制的随机干扰,例如,通信系统中的天电干扰,电子线路中的噪声,惯性导航系统中的陀螺仪随机漂移等。一个物理系统的状态可以通过某些传感器观测得到,通常称这类传感器为观测器。由于观测器同样受到随机干扰的影响,所以使观测值产生误差。一个受控制作用的物理系统和用观测系统得到系统状态的观测输出的过程如图 1.1.1 所示。所谓估计,就是用间接、不准确及不确切的观测值构造感兴趣量的过程。



图 1.1.1 物理系统和观测系统

如果引入一个性能指标来评价估计的好坏,当估计值使性能指标取极值(极大或极小)时,该估计称为最优估计。所谓最优估计,就是指在某一准则条件下(对于随机变量,准则通常带有统计意义),估计达到最优。很明显,最优估计不是唯一的,它随估计准则的不同而不同。因此,最优估计实质上是测量数据的处理或者融

合算法。

根据获得的状态估计值与观测值在时间上的不同关系,估计问题可以分为如下三种。

(1) 当希望得到的状态估计值的时间 τ 与最后观测时间 T 相重合时,称为滤波问题。

(2) 当希望得到的状态估计值的时间 τ 处于所得到的观测数据时间间隔 $0 \sim T$ 之间时,称为平滑问题。

(3) 当希望得到的状态估计值的时间 τ 在最后观测时间 T 之后时,称为预测问题。

最优估计的优点是使数据、系统知识以及干扰信息得到很好的利用。而正如任何最优性技术一样,其缺点是很可能对建模的不合理性非常敏感,并且有可能耗费很大的计算资源。鉴于此,明确理解使得一个算法最优性所依赖的假设以及这些假设与真实世界之间的关系是非常重要的。

1.1.2 估计/滤波回顾

估计就是推算某些参数取值的过程。这里的参数可以是刻画天体的运动(按照可预测方式演化的行星运动 6 个参数——3 个位置和 3 个速度)或者是一个物体(如按照不完全可预测方式演化的飞行器)的状态。

针对物理观测(可能是来自于行星运动),Gauss 得出了以下的哲学上的观察。

(1) 如果观测值完全正确,从最少观测值(n 个参数需要至少 n 个观测值)中就可以精确地确定出待定参数。

(2) 后续的观测值只是确认所得的参数值,而不用修正。

(3) 但是,因为观测值仅仅是对真实的近似,所以应该结合更多的观测,而不是最少的观测来更加准确地确定未知量。

(4) 从近似知识开始,可以使用后续的观测值来不断修正参数的取值,使得参数值尽可能精确地与所有的观测值一致。

从上述哲学观察可以得到以下一些启发。

(1) 存在对“系统”的一个基本描述(模型),其中具有未知的待估计参数。

(2) 需要冗余数据,以减小量测误差的影响。

(3) 为了尽可能精确地与所有观测值一致,“残差(residual)”(观测值和由估计而来的观测预测值之差)应该尽可能小。

(4) 观测值的不精确性需要概率建模。

(5) 先验知识和后续观测的组合引出了递推算法的概念。

估计一般分为参数估计和状态估计,其中,参数表示时不变量(标量值或者向量值,随机或非随机),而状态是指根据系统动态方程演化的随机过程,通常具有在

时间上的快变和突变特性。参数估计可以看作是一个静态估计问题,往往和系统辨识、模式识别相联系。对于时变参数估计,可以采用状态估计的方法处理。而状态估计可以看作是一个动态过程,往往和反馈控制、信息融合相联系。本书主要围绕运动目标的估计问题,重点介绍状态估计的理论与方法。

1.2 运动目标的估计

运动目标的估计是人们借助现代观测和计算手段,实现对目标运动特性做连续、可靠、精确估计的过程。在军事领域,利用这一技术可以及时对陆、海、空、天的运动目标进行预警或跟踪,发现并锁定可疑目标,估计并分析其运动状态和属性特征,为火力控制、威胁估计、态势评估,直至各级指挥控制系统的决策提供基本信息;在民用领域,从空中交通管制(air traffic control, ATC)系统、机器人系统、视频监控系統,到各类生产过程的工件定位等,运动物体特性的估计遍及生产和生活的各个方面。前者在英文中一般用“target tracking”来表示,后者则一般用“object tracking”来表示。伴随着现代估计理论的诞生与发展,运动目标的估计已经在理论与应用中取得了众多的成效,并推动着估计理论的深入研究。但无论是军事还是民用研究,运动目标的估计又是一个常做常新的领域,特别是近年来信息学、电子学、电磁学、材料学、空气动力学及能动力学等的迅速发展与交叉融合,使得运动目标跟踪问题正在发生着前所未有的深刻变化。这些变化在针对非合作目标的军事领域显得尤为突出,主要体现在如下方面。

(1) 现代战场的环境和目标特性日趋复杂多变。

运动目标涵盖了在海、陆、空、天运动着的各类运动与属性特征各异的形形色色的目标;季节、天气、大气、光照、时间、地形、视角等环境的变化对运动目标信息获取的质量和-content产生了极大影响;目标的机动、欺骗、干扰、隐身、伪装技术发生了革命性的变化,使得目标运动类型日趋多样化,常规机动在原有的基础上继续发展,目标的速度、加速度与过去相比均有较大不同。高转弯率、超强加减速能力在众多打击和防御武器中已经出现。例如,安装在铠甲-C3I系统上的导弹,其飞行速度可达1100m/s;S-400反导导弹在5km的高空机动过载的加速度可达到20g。同时,非常规机动也迅速发展起来,目标能够完成更为复杂的机动运动,很多目标具有主动改变运动模式的能力,在不同的运动模式之间进行瞬时切换,F-22战斗机已经完成了0空速试飞。在机动性发展的基础上,敏捷性(或机敏性)也随着现代战斗机及其机载雷达、火控系统和导弹武器的迅速发展而提了出来,在四代战机中,敏捷性较之三代时期获得了明显的重视。F-22战斗机在60°迎角下还能以30°/s的速率滚转,从而迅速改变机头指向。其次,通过在表面涂某种特殊的材料,可以减小某个波段的有效回波面积,从而使探测装置无能为力,F-22战斗机的

雷达横截面仅相当于金属弹球大小。另外,模型诱饵、特征多样的诱饵、反模拟诱饵等多种多样的诱饵目标可欺骗、干扰跟踪系统,数目众多的诱饵目标及其与真实目标令人咋舌的相似程度,使得现有的跟踪技术很难有效;类似分身术的多弹头技术可以沿不同轨道飞向目标,也使得防御系统面临重大挑战。俄罗斯计划将 SS-N-23 型潜射弹道导弹上的多弹头从 4 个增加到 10 个。现代战场的环境和目标特性日趋复杂多变使得信息内容存在高度不确定性、冲突性、可变性。

(2) 目标被感知的手段与能力显著提升。

传感器从主动到被动,从局部观测到全球准同步观测,从可见光到红外、远红外乃至微波、超长波,遥感光谱波段已发展到 200 多个,甚至更多。目前,先进的对地、对空感知系统每小时采集的数据量已经达到 TB 量级。同时,感知系统正朝着多平台、多传感器、网络化、分布式的方向发展。除了雷达网、声呐网、传感器网络等各类局域性质的网络外,令人关注的还有美国国防部建设的全球信息栅格(GIG)。GIG 是美军天基、空基、地基和海基的所有信息系统集成的一个陆、海、空军共用全球网,将世界各地的美军指战员连接起来,以实时方式和真实图像为指战员提供联合作战所必需的数据、应用软件和通信能力,实现“在恰当的时间,将适当的信息,以恰当的方式传送给恰当的使用者”,以获取信息优势、决策优势和作战行动优势,支持网络中心战。

探测技术的发展带来了如下的全新特点:①传感器在时间、空间、频谱分辨率的多样性引起了量测信息的多尺度;②投入目标感知的传感器数量和质量的提高带来了量测信息的高维数特征;③传感器类型的多样性带来了信息类型的多样性;④信息处理必须面对像素级、特征级、决策级、知识型各类多源信息;⑤网络化的目标探测引发了量测信息的随机时滞性;⑥各种传感器(如雷达、红外、激光、声呐、视觉/图像等)的观测方程和目标本身运动方程的非线性特征日益显现,简单的线性化处理带来的误差已难以忽略。

(3) 作为最终用户的各类系统,对目标感知需求的内容与质量要求大大提高。

在现代侦察预警与精确打击系统中,对目标感知提出了远程、快速、精确、协同、综合的性能指标。对于远程预警,气候、大气、光照等诸多环境因素的影响非常显著,目标信号呈现出典型的“低测量精度、低检测概率、低数据率、低信杂比”的特性,从而给信号的检测带来极大的困难。例如,天波超视距雷达在监视 700~3500km 远的目标时存在测量误差高达十几甚至几十千米,检测概率小于 0.5,数据率低达几分钟甚至十几分钟,此外,还存在复杂的多径传播效应,这给常规的目标跟踪带来了严峻的挑战。对于目标精确打击,对目标跟踪定位精度的要求也越来越高,IV 型战斧导弹的圆概率误差小于 5m,以美国 PAC-3 为代表的“hit-to-kill”的动能武器对精确度的要求更高,甚至要求接近零误差。根据任务的不同,运动目标的处理具有了如下的新特点:①不同层次的任务,要求处理精度具有多尺度特

征;②多任务的综合,要求信息的估计与辨识进行一体化处理;③不同级别的任务,要求在像素级、特征级、决策级、知识型等各种级别估计辨识目标的各类特性;④任务的多样性,要求考虑的评价准则多样性(精确估计、准确识别、鲁棒推理、有效决策)。

上述三个方面的显著变化使得运动目标动态模型的估计问题越来越呈现出复杂系统的多层次、不确定、非线性、高维数、网络化等诸多特性。从一定程度上说,现代运动目标估计问题已经发展成为具有显著复杂性特征的系统建模与处理问题,主要可以归纳如下。

(1) 系统的多模式、多层次。由于目标具有运动多模式,目标属性识别具有多模式,以及目标环境参数具有多模式,系统在动态运动建模、属性识别、量测建模方面展现出广泛的多模式特性;由于观测在时间、空间、频谱的多尺度,信息处理的多尺度,观测内容的多类型,观测信息本身呈现出多尺度特性;由于感知任务的跟踪识别一体化、任务的多元化、指标的体系化,系统要求呈现出多层次。

(2) 信息的不确定。目标机动、欺骗、干扰、隐身、伪装、遮挡引起了信息内容冲突;多平台自定位、授时同步不精确引起了信息时空变换误差;信息观测本身局限性引起了信息多义性;传感器有限精度以及复杂多变探测环境引起了信息观测误差;目标运动、意图、环境等方面变化引起了信息随机性变化。

(3) 模型的非线性。目标运动建模与量测建模的坐标系的非线性关系引起了运动建模的非线性;分布式观测的信息在空间变换配准中引起了非线性。

(4) 量测的高维数。传感器时间、空间、频谱高分辨率引起了信息高维数;多平台、多传感器的利用引起了信息高维数;目标相互靠近或协同对抗引起处理关联而导致了信息高维数。

(5) 探测的分布式与网络化。多目标在空间中表现为分布式运动;多传感器在空间中表现为分布式网络化观测;多信息中心在空间中表现为分布式网络化处理。

对于上述具有显著复杂性特征的系统,目前的研究可以从5个方面开展:①混合系统(hybrid system)及Markov切换系统的建模、估计与融合;②采样型非线性估计与融合;③多尺度的建模、估计与融合;④自适应估计与融合;⑤鲁棒估计与融合。

1.3 运动目标估计的进展

混合系统及Markov切换系统的建模、估计与融合能够实现多模式建模、随机性不确定的去除、多源信息的融合;采样型非线性估计与融合能够在概率框架下解决系统的非线性特性、随机性不确定的去除、多源信息的融合;多尺度的建模、估计

与融合适于系统的多尺度构建、随机性不确定的去除、多源信息的融合、高维信息的快速处理。复杂系统的分布式网络化主要是通过时滞、误码等通信指标体现,可以在上述几类研究中予以考虑。

1. 混合系统及 Markov 切换系统的建模、估计与融合

随着微电子技术和控制技术的发展和现代战场环境中,目标运动过程中,包括速度、高度和方向的改变能力在内的常规机动都有了很大的改变,例如,战斗机中就包括水平加减速、水平盘旋、俯冲、跃升、筋斗等。同时,包括高转弯率、高加减速能力的瞬时机动能力也迅速发展。这样的复杂运动系统可以随时在各工作模式间切换,单纯地采用单模型已经无法满足要求,混合系统得到越来越多的关注。对于混合估计,从某种意义上说,就是传统估计与决策的统一或推广。用一个整数取值的系统模式因子表征系统当前的结构/模式。基本状态是传统估计中的状态,系统模式是对系统某个行为或结构的数学表征,不同模式通常用不同的方程描述。对于连续取值的快变不确定参数,系统模式集可以看作是对参数空间的离散近似,每个模式对应于一个参数空间的离散点或子空间。混合估计器主要包括静态多模型滤波器和动态多模型滤波器,而动态多模型滤波器又可分为广义伪贝叶斯算法、Viterbi 算法、交互式多模型(interacting multiple model, IMM)算法等,其中,IMM 算法是机动目标跟踪中应用最为广泛的一种方法。

在 IMM 系统中,JMS(jump/switch Markov system)是一类典型的混合系统,它表征了自然界和工程中的一大类系统。在 JMS 中,同时存在连续和离散两类刻画系统演化规律的特性量,其中,表征系统结构的模式状态在有限离散集合中随机跳变/切换,而定义在实数向量空间的基本状态根据模式所规定的演化律随机演化。由于基本状态的精确估计依赖于模式状态的快速、准确辨识,因此,JMS 估计可以看作是对状态估计和模式辨识的综合过程。随机系统估计领域的多数学者习惯上将 JMS 估计称为混合系统估计或混合估计。一般,根据模式或模式序列建立一组并行工作的子滤波器,通过模型概率加权实现子滤波器的综合。在 1995 年的 IEEE 决策与控制会议上,混合系统估计,特别是 JMS 估计曾作为自适应估计研究的重要方向得到了专门的讨论,十年来,许多重要的研究和应用结果在 IEEE/IEE 的会刊和会议上发表。以 Bar-Shalom 和 Li 为代表的一大批国内外学者对 JMS 估计展开了广泛的研究,在平滑估计、变结构多模型估计以及机动目标跟踪、故障诊断与容错控制、语音信号识别等应用领域取得了一系列重要成果。除了变结构多模型估计能够在模型选择的假设检验中引入模式信息外,量测一般限定为基本状态量测。近年来,JMS 估计与融合正在朝非线性估计、多源信息融合等方面发展。

Challa 等(2001)在混合系统框架下提出了基于 IMM 的目标跟踪识别一体化

算法。Evans 等(2001)、Boyd 等(2000)、Sworder 等(2000)在模式状态与基本状态两类量测信源下研究了 Markov 切换系统融合问题,实现对成像与非成像传感器协同探测的信息融合建模,提出了目标跟踪识别一体化算法、成像传感器与非成像传感器协同算法以及态势评估的 PME 算法,其部分研究成果已经应用于新一代美国“爱国者”导弹的跟踪系统中。Boers 等(2002)进一步将模式量测的离散随机分布推广到任意随机分布,将 Markov 切换系统推广到非线性,直接采用粒子滤波(particle filter, PF)实现。上述 Markov 切换系统的融合结果是基于单一时标的,即各类传感器精确时钟同步。

2. 采样型非线性估计与融合

由于对复杂系统认识的不断深化,以及估计乃至控制任务要求的日益提高,使得对复杂系统的估计越来越不能回避非线性和非 Gauss 情况。传统的扩展 Kalman 滤波器(extended Kalman filter, EKF)、高阶 EKF、迭代 EKF 等方法只能处理弱非线性系统及 Gauss 噪声下的估计问题。为此,人们又提出了一系列数值逼近、Gauss 和滤波以及采样近似等方法。数值方法也称为基于网格的逼近方法,通过沿离散变量求和代替积分。为了得到连续状态空间比较好的逼近,网格必须足够密集,随着状态空间维数的增加,计算量也急剧增加。Gauss 和逼近即通过选择适当的 Gauss 混合个数得到要求的逼近精度。当后验分布是多峰值时,这种逼近是很合理的,然而,很难在线计算各个 Gauss 分布权重,并且混合的个数可能随时间呈指数增加。

由于近似非线性函数的概率密度分布比近似非线性函数更容易,使用采样方法近似非线性分布来解决非线性问题的途径在最近得到人们的广泛关注。无迹 Kalman 滤波器(unscented Kalman filter, UKF)、Gauss 埃尔米特滤波器(GHF)、中心差分滤波器(CDF)、分离差分滤波器(DDF)、PF 及其各种变形就属于此类非线性滤波器。上述滤波器的共同点是对状态先验分布抽取样本,通过对抽样点的独立处理和加权综合得到状态估计。将此类采样近似滤波器称为采样型非线性滤波器,即是通过采样近似非线性函数的概率密度分布来处理非线性问题的滤波器。目前,采样型非线性滤波器的稳定性、复杂度和性能分析的理论尚不完善,对于采样策略,特别是针对采样策略的自适应的研究也刚刚起步。

3. 多尺度的建模、估计与融合

自然界许许多多的现象或过程都具有多尺度特征或多尺度效应,尺度和层次的概念反映了许多物理现象的基本特征;而无论现象或过程是否具有多尺度特性,观测信号都是在不同分辨级或尺度上得到的;分析和辨识这些自然现象或过程在不同尺度或分辨级上的不同特性是人们对自然界更深入了解的需要。