

现代目标跟踪 与信息融合

Modern Target Tracking
and Information Fusion

潘泉 梁彦 杨峰 程咏梅 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

现代目标跟踪与-20 信息融合

潘泉 梁彦 杨峰 程咏梅 著



国防工业出版社

·北京·

TN953
P195

图书在版编目(CIP)数据

现代目标跟踪与信息融合/潘泉等著. —北京:国防工业出版社, 2009. 10

ISBN 978-7-118-06586-2

I. 现... II. ①潘... III. ①军事侦察—目标—跟踪—研究 IV. ①E87

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 244733 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 13¼ 字数 344 千字

2009 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

目标跟踪是人们运用各种观测和计算手段,实现主体对被关注运动客体状态建模、估计、跟踪的过程。利用这一技术,可以及时对陆、海、空、天中的运动目标进行预警或跟踪,发现并锁定被跟踪目标,估计并分析其运动状态,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。目标跟踪是战场预警、精确打击、空中交通管制、智能监控等重要应用领域的关键技术之一。

信息融合技术是将不同来源、不同模式、不同媒质、不同时间、不同地点、不同表示形式的信息进行综合,最后得到对被感知对象的更精确描述,从而提高信息的可信度和目标的可探测性,扩大时间和空间搜索范围,降低推理模糊程度,增加目标特征矢量的维数,提高空间分辨率,增强系统的容错能力和自适应性,进而提高整个探测系统的感知性能。信息融合的出现,扩展了以状态估计与数据关联为核心的传统目标跟踪概念,使现代目标跟踪扩展到传感器管理调度、复杂大系统仿真、多传感器综合、弱小目标检测、成像目标跟踪等方面。

本书总结了作者多年来在目标跟踪与信息融合方面的研究成果,内容分为目标跟踪的建模与估计,概率数据关联,成像目标跟踪,系统的设计、评估与仿真等4部分。

本书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”(60634030),国家自然科学基金项目“针对多种异类信息的混合估计融合理论及其应用研究”(60274059)、“自适应采样型非线性滤波器研究”(60702066)、“教育部新世纪优秀人才支持计划项目”(NCET-06-

0878), 国防 863 和国防预研等项目资助。

感谢活跃在现代目标跟踪与信息融合领域的众多学者和工程技术专家,他们出色的工作给了我们很多启迪与帮助。感谢课题组王培德教授、周宏仁教授和张洪才教授等前辈,感谢参与本书工作的研究生。其中第 3 章以及第 11 章收录了刘刚博士的研究工作,第 7 章收录了叶西宁博士的研究工作,第 8 章以及第 9 章收录了左军毅博士的研究工作,第 10 章收录了王峰博士的研究工作。吴坤峰、郎林、陈伟、刘路、谷丛、张媚等硕士参与了本书部分章节的整理工作,胡振涛博士和李静硕士参与了全书的整理及核对工作,对他们的工作深表谢意。

感谢国防工业出版社的工作人员,正是他们的辛勤劳动才保证了本书的如期出版。

由于作者水平有限,书中疏漏和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

潘 泉

2009 年 8 月于西安

目 录

第 0 章 绪论	1
0.1 引言	1
0.2 现代目标跟踪技术	5
0.2.1 机动目标运动建模与估计	5
0.2.2 时空信息的数据关联	7
0.3 信息融合技术	9
0.3.1 定义、特点与性能优势	9
0.3.2 常用传感器	10
0.3.3 信息融合的功能模型	13
0.3.4 信息融合的系统结构	15
0.3.5 面向目标跟踪的信息融合	20
0.4 本书章节概述	25
参考文献	27

第 1 部分 目标跟踪的建模与估计

第 1 章 自适应加速度模型	32
1.1 引言	32
1.2 匀加速目标模型	33
1.3 时间相关模型	35
1.4 自适应加速度模型	39
1.5 自适应加速度模型性能分析 I	41
1.5.1 自适应加速度模型的稳态精度分析	41
1.5.2 自适应加速度模型的动态精度分析	44

1.6	自适应加速度模型性能分析Ⅱ	49
1.7	自适应加速度模型性能分析Ⅲ	54
1.8	小结	60
	参考文献	61
第2章	广义扰动输入下的随机系统自适应滤波	62
2.1	引言	62
2.2	问题描述	63
2.3	上限滤波器设计	64
2.4	仿真分析	68
2.5	小结	70
	参考文献	70

第2部分 概率数据关联

第3章	C-IMMPDA 算法	73
3.1	引言	73
3.2	C-IMMPDA 算法的提出	74
3.3	C-IMMPDA 算法的推导	76
3.4	C-IMMPDA 算法的仿真研究	79
3.4.1	对于三种不同航迹条件下两种算法的 仿真结果	79
3.4.2	对于三条交叉航迹情况下两种算法的 仿真结果	85
3.5	小结	86
	参考文献	88
第4章	单传感器广义概率数据关联算法	89
4.1	引言	89
4.2	数据关联算法简介	90
4.2.1	单目标数据关联	90

4.2.2	多目标数据关联	91
4.3	广义概率数据关联算法	92
4.3.1	算法思想	92
4.3.2	状态估计	93
4.3.3	互属概率计算	96
4.3.4	GPDA 算法流程	100
4.4	仿真分析	101
4.4.1	点目标交叉运动	102
4.4.2	小目标交叉运动	109
4.5	综合交互式广义数据关联算法	110
4.5.1	C-IMMJPDA 算法	110
4.5.2	C-IMMGPDA 算法	112
4.6	仿真分析	116
4.6.1	两机动目标仿真	116
4.6.2	四机动目标仿真	121
4.7	小结	122
	参考文献	123
第 5 章	多传感器广义概率数据关联与融合	125
5.1	引言	125
5.2	集中式多传感器广义概率数据关联算法	125
5.2.1	序贯多传感器广义概率数据关联	125
5.2.2	仿真分析	128
5.3	分布式多传感器广义数据关联与融合	132
5.3.1	基于 GPDA 的快速航迹关联与融合算法	132
5.3.2	仿真分析	134
5.4	小结	140
	参考文献	141
第 6 章	综合扩展概率数据关联算法	143
6.1	引言	143

6.2	综合扩展概率数据关联算法	144
6.2.1	算法思想	144
6.2.2	状态估计	145
6.2.3	关联概率的计算	147
6.2.4	IEPDA 算法流程	152
6.3	仿真分析	152
6.3.1	场景	154
6.3.2	评价指标	155
6.3.3	仿真结果	156
6.4	小结	167
	参考文献	167

第 3 部分 成像目标跟踪

第 7 章	基于图像的模糊多模型跟踪算法	170
7.1	引言	170
7.2	算法的结构论述	172
7.3	图像特征提取	173
7.3.1	图像分割	173
7.3.2	特征提取	174
7.4	混合量测的计算	174
7.4.1	异步数据融合	175
7.4.2	同步数据融合	177
7.5	模糊多模型跟踪算法	177
7.5.1	目标运动模型	177
7.5.2	模糊跟踪	181
7.6	模糊关联	186
7.7	小结	189
	参考文献	189

第 8 章 Mean Shift 跟踪算法中的尺度自适应策略	192
8.1 引言	192
8.2 基于 SPMSA 的 Mean Shift 跟踪算法	192
8.3 SPMSA 存在的问题	193
8.3.1 小尺度游荡问题	194
8.3.2 尺度跟踪滞后问题	197
8.4 改进的 SPMSA	199
8.4.1 小尺度游荡问题的解决方案	199
8.4.2 尺度跟踪滞后问题的解决方案	200
8.5 实验结果	202
8.5.1 实验结果比较	202
8.5.2 参数分析	207
8.5.3 尺度变化加旋转运动时的跟踪结果	209
8.6 小结	209
参考文献	210
第 9 章 基于多参考模型的 Camshift 跟踪算法	213
9.1 引言	213
9.2 概率图与 Camshift 跟踪算法	213
9.3 多颜色分布模型 Camshift 跟踪算法	217
9.3.1 算法方案	217
9.3.2 模型优化组合算法	219
9.4 多模型 Camshift 算法的工作机理	221
9.5 实验结果	223
9.6 小结	231
参考文献	231

第 4 部分 系统的设计、评估与仿真

第 10 章 基于信息类效能函数的传感器管理	233
10.1 引言	233

10.2	传感器管理的内容、功能和作用	233
10.2.1	传感器管理的内容	233
10.2.2	传感器管理的功能	235
10.2.3	传感器管理的作用	237
10.3	传感器管理的分类	237
10.3.1	单传感器管理	237
10.3.2	单平台多传感器管理	239
10.3.3	多平台多传感器管理	242
10.4	基于信息类效能函数的传感器管理	245
10.4.1	基于信息类效能函数的传感器管理 最优决策模型	246
10.4.2	基于多模型预测误差协方差的传感器 资源分配方法	248
10.4.3	以预测误差协方差为效能函数的决策 方案的最优性分析	249
10.4.4	基于传感器资源分配的多模型预测 误差协方差分析	252
10.4.5	仿真分析	254
10.5	基于几种信息类效能函数的传感器管理一致性 分析	259
10.5.1	一致性分析	259
10.5.2	仿真分析	264
10.6	小结	268
	参考文献	268
第 11 章	机载雷达目标跟踪数据处理技术	274
11.1	前言	274
11.2	系统可行性分析	275
11.2.1	机载雷达目标跟踪系统实现中的问题	275
11.2.2	航迹起始一些性能指标	277

11.2.3	数据精度	284
11.3	系统建模中用到的一些基本算法	286
11.3.1	坐标系选择	286
11.3.2	目标跟踪滤波器的滤波模型构造	288
11.3.3	一类简单模型在不同基下的变换	289
11.3.4	CV 模型平面极坐标系下的状态方程	291
11.3.5	概率数据关联算法	294
11.4	跟踪起始	300
11.5	跟踪系统设计及仿真	304
11.5.1	系统概述	304
11.5.2	对确认航迹的状态更新	310
11.5.3	对临时航迹的状态更新	312
11.5.4	对剩余回波进行两点外推算法	314
11.5.5	跟踪系统仿真	316
11.5.6	仿真分析	321
11.6	平滑算法	325
11.7	目标特征和电子地图的应用	327
11.8	全系统仿真	330
	参考文献	332
第 12 章	跟踪系统性能评估及指标体系	334
12.1	引言	334
12.2	单传感器系统的性能评估	335
12.2.1	航迹与目标的关联判断	335
12.2.2	性能评估指标及计算公式	337
12.3	多传感器系统的性能评估	349
12.3.1	集中式融合结构下的系统性能评估	349
12.3.2	分布式融合结构下的系统性能评估	351
12.4	典型场景下系统性能评估的测评	357
12.4.1	单传感器系统性能评估的测评分析	358

12.4.2	多传感器融合场景下的系统性能测评	367
12.5	小结	373
	参考文献	374
第 13 章	机载多传感器跟踪融合系统架构设计与仿真实现	376
13.1	引言	376
13.2	新一代战机的系统架构设计	377
13.2.1	新一代战机的特点分析	377
13.2.2	新一代战机加载的传感器信源	379
13.2.3	新一代战机各飞行阶段的传感器工作模式分析	380
13.2.4	系统架构设计	382
13.3	系统架构验证	392
13.3.1	不同传感器组合情况	392
13.3.2	不同传感器参数情况	394
13.3.3	不同仿真场景情况	397
13.3.4	不同算法参数情况	398
13.3.5	不同算法情况	399
13.4	小结	400
	参考文献	400
附录 1	第 2 章公式的推导	402
附录 2	第 3 章部分公式的推导	404

第0章 绪 论

0.1 引 言

目标跟踪是人们运用各种观测和计算手段,实现主体对被关注运动客体状态建模、估计、跟踪的过程。在军事领域,利用这一技术可以及时对陆、海、空、天中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,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(ATC)系统、机器人系统、视频监控系统到各类生产过程的工件定位等,目标跟踪遍及生产和生活的各个方面。伴随着估计理论的诞生与发展,特别是卡尔曼(Kalman)滤波技术的发展和广泛应用,目标跟踪已经在理论与应用中取得了众多的成效,可以说是一个历史悠久、技术成熟的领域。但无论是军事还是民用研究,目标跟踪又是一个常做常新的领域,特别是近年来信息、电子、材料、空气动力及能动等学科的迅速发展与交叉融合,使得目标跟踪问题正在发生着前所未有的深刻变化。现代目标跟踪与信息融合中影响因素如图 0-1 所示,其主要体现在如下方面:

1. 感知环境和感知对象更加复杂多变

运动目标涵盖了在天基、空中、地面、海面、水下运动着的各类运动与属性特征各异的形形色色目标,包括: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

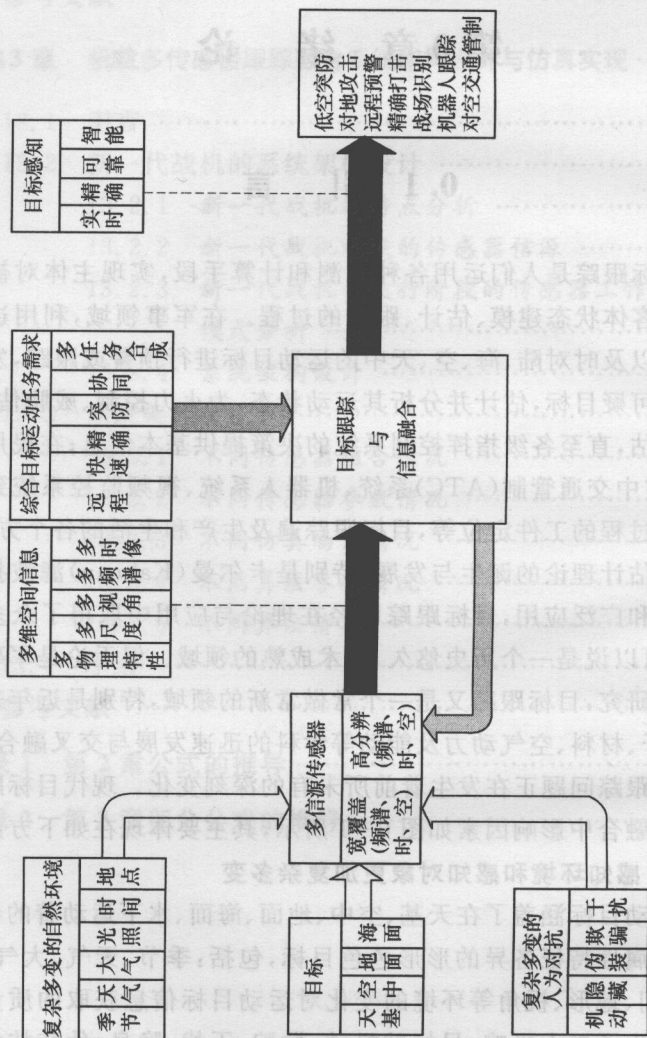


图 0-1 现代目标跟踪与信息融合中影响因素示意图

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飞机在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,通过对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。数目众多的模型诱饵、特征多样的诱饵、反模拟诱饵等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. 感知手段日趋丰富

传感设备从主动到被动,从单视角到多视角,从局部观测到区域观测,从单波段到多波段,从资源不可控到资源可控。感知系统正从单传感器到多传感器、单平台到多平台分布式发展,日益呈现网络化特征,同时,感知系统所获取的信息量也越来越庞大。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 10^{12} B量级。实际的感知系统除了雷达网、声呐网、传感器网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项目),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

须的数据、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。总之,感知手段的发展带来新的特点:投入目标感知的传感器数量和质量提高带来了量测信息的高维数特征;传感器类型的多样性带来了信息类型的多样性;网络化的目标探测引发了量测信息的随机时滞性;各种传感器(如雷达、红外、激光、声呐等)的观测方程和目标本身的运动方程非线性特征日益显现,线性化误差已难以忽略。

3. 感知需求日益提高

在现代侦察预警与精确打击系统中,对目标感知提出了实时、可靠、智能、远程、快速、精确、突防、协同、多任务合成的性能指标。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 $700\text{km}\sim 3500\text{km}$ 大范围监视预警中测量误差高达十几千米甚至几十千米,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,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如下的新特点:多任务的综合,要求信息的估计与辨识进行一体化处理;不同级别的任务,要求在像素级、特征级、决策级等各种级别估计辨识目标的各类特性;任务的多样化,要求考虑评价准则的多样性(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,使得目标跟踪问题越来越呈现出复杂系统的不确定、非线性、高维数、多层次等诸多特性。从一定程度上可以说,现代目标跟踪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。主要归纳如下:

1) 信息的不确定