

目标跟踪 新理论与技术

Target Tracking:
Advanced Theory and Techniques

© 权太范 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

目标跟踪 新理论与技术

Target Tracking: Advanced Theory and Techniques

权太范 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

目标跟踪新理论与技术/权太范著. —北京:国防工业出版社,2009.8

ISBN 978-7-118-06183-8

I. 目... II. 权... III. 雷达目标-雷达跟踪-研究
IV. TN953

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 012831 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 25½ 字数 437 千字

2009 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 78.00 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

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 第五届评审委员会组成人员

主任委员	刘成海			
副主任委员	王峰	张涵信	程洪彬	
秘书长	程洪彬			
副秘书长	彭华良	蔡镭		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	刘世参
(按姓氏笔画排序)	李德毅	杨星豪	吴有生	何新贵
	佟玉民	宋家树	张立同	张鸿元
	陈冀胜	周一宇	赵凤起	侯正明
	常显奇	崔尔杰	韩祖南	傅惠民
	舒长胜			
本书主审委员	周一宇			

前 言

1948年,美国麻省理工学院研制的“雷达自动跟踪”和“火炮指挥仪”问世以来,目标跟踪理论和技术经历了辉煌的历程,形成了经典的维纳滤波(频域法)和近代卡尔曼滤波(状态空间法)两大理论体系。前者是20世纪40年代维纳创建的控制理论,后者是20世纪60年代卡尔曼创建的线性系统最优控制理论。通常人们把这两大理论体系的形成看作是目标跟踪理论走向发展和成熟的标志。目前,卡尔曼滤波理论基本替代了维纳滤波理论,经典的维纳滤波方法不再适应于现代目标跟踪系统的需求。这一演变(变化和发展)完全符合达尔文进化论的规律。因为一种理论可以进化、发展,也可以退化、衰亡。然而对于目标跟踪理论体系来说,维纳提出的滤波思想仍然具有重要的理论意义和指导意义。卡尔曼是在维纳滤波理论基础上创建了状态空间线性系统理论。这一理论的创建为最优控制、最优估计、最优跟踪、最优制导律等理论的构造提供了坚实的理论基础和基本框架。卡尔曼滤波理论诞生近半个世纪以来,在国内外相继出版了很多有关目标跟踪方面的专著。这些专著可分为两大类:一类是以卡尔曼滤波理论为主导的多目标单传感器跟踪理论和技术;另一类是以数据融合为主导的多目标多传感器跟踪理论和技术。但是近10多年来,随着交叉学科的蓬勃发展,尤其是随着目标跟踪理论和智能信号处理理论(包括软计算)相结合以及网络化概念和网络平台(如网络中心战)技术的发展,目标跟踪理论和技术研究面临新的挑战,并且促使人们开展目标跟踪新理论、新方法的研究。这是一种正反馈,它推动着新的研究领域发展和新技术形成,演变出新的理论,而关注和掌握这一新思路、新理论、新发展是每一位研究人员的追求,也是掌握科学发展制高点的关键。从20世纪80年代初开始,作者一直在从事两院院士刘永坦教授主持的新体制雷达系统研制工作。20多年来,我所研究人员在新体制雷达研究和研制过程中做了大量的工作,并取得了很多成果。这一新体制雷达的研制成功使我国在国际上占有一席之地。在新体制雷达研究期间,作者一直在探索如何通过目标跟踪理论和智能信号处理理论相结合解决在复杂干扰背景下多目标跟踪问题。在此期间,作者作为项目负责人主持完成目标跟踪方面的国家自然科学基金(批准号:60172036、60572038、69672024)、国防科技预研基金、省科

学研究基金、高等学校博士学科专项科研基金等各类基金 10 余项。本书的部分内容还得到了国家自然科学基金项目(批准号:60872101)的支持。目前,新体制雷达研制工程项目接近尾声,作者有机会对 20 多年来的研究工作加以总结,汇集已发表的研究结果,总结本领域新理论和成果。希望在前人的专著基础上,写出一本能够反映最新研究成果和研究方向的实用性较强的书,以推动多目标跟踪新理论的发展和应用。本书是作者在哈尔滨工业大学电子与通信工程系 20 多年来讲授的“现代控制理论”、“最优估计与目标跟踪”、“神经网络与混沌信号处理”、“多传感器信息融合”以及“小波信号处理”等课程基础上,结合国内外最新成果撰写而成的。

本书以目标跟踪系统关联、跟踪、融合为主线,力图求新、求精,内容以专题性讨论为主。本书撰写的专题有:目标跟踪快速算法(第 6 章)、鲁棒跟踪技术(第 7 章)、多传感器融合跟踪系统(第 8 章)、神经网络目标跟踪技术(第 9 章)、弹道导弹跟踪与预测(第 10 章)、干扰机环境下多目标多传感器关联与定位技术(第 11 章)、无源定位系统数据融合定位技术(第 12 章)、网络中心战航迹合成技术(第 13 章)、雷达数据处理技术(工程应用)(第 14 章)以及多目标多传感器跟踪技术展望(第 15 章)。本书读者对象是从事最优估计与多目标跟踪系统研究工作的工程技术人员、研究生、博士生以及部队技术人员,也包括想了解最优控制、神经网络、数据融合、非线性滤波、鲁棒估计、无源定位、网络中心战等技术应用现状的读者。本书要求读者对动态系统理论(主要是状态空间理论)、雷达原理、最优估计理论、概率和随机过程方面具有初步的知识。目标跟踪理论日新月异,尚在不断发展和完善之中,因此作者特别注意内容的新颖性,进行了几次较大的修改和更新。然而新的研究成果不断出现,使作者难以跟踪最新理论和技术,甚至无法追踪其细节。特别是因为本书涉及的专题范围较广,而且作者水平有限,难免有欠当和偏漏之处,恳请读者予以批评和指正。

在本书编写的过程中参阅、摘引了国内外许多前人的著作和论文,在此谨致谢意。特别指出的是本书部分内容直接引用了我的历届博士生、研究生的研究成果(参考文献中特意列出了他们的学位论文)。他们的研究成果为本书增添了新的亮点,在此对他们的聪明才智和辛勤劳动以及无私的奉献表示感谢。

本书出版之际,特别感谢我的现代控制理论的启蒙老师、导师,中国工程院院士王子才教授。20 世纪 80 年代初,王教授指引我进入现代控制这一宽阔的研究领域,并制定我的硕士研究生课题方向为某海防导弹时间最优控制,使我遨游在现代控制理论这一新天地;同时感谢两院院士刘永坦教授 20 多年来在雷达信号与数据处理研究过程中给予的热情关怀和悉心指导。1983 年,毕业留校后,是刘教授带领作者首次进入新体制雷达数据处理研究领域,制定研究课题和

方向,还将他的文献笔记提供给我,使我少走弯路,较快进入雷达目标跟踪理论和应用研究的新领域。在本书问世之际,再次感谢精心引导和悉心指导我的研究工作的两位院士。

最后,20多年来一起从事教学和科研工作的哈尔滨工业大学电子与信息技术研究院电子工程技术研究所同事们对本书的支持和鼓励表示感谢。为了研制我国第一部某新体制雷达,我们从四面八方来到一起,风雨同舟,并肩作战。无论前面路程多么坎坷,我们一直在坚持不懈地向前走,走过了方案论证、关键技术攻关、系统研制、外场系统试验以及工程实施等艰难岁月;共同走过了20多年的研究历程,这是何等艰难和值得留念的历程。为了这一部新体制雷达的研制,我们这一代人付出了整个青春的年华。同事们的支持,激发了作者的热情,促成了这本书的出版。尤其是在理论联系实际和工程化内容方面,这本书里凝聚着课题组每一位同事的心血。若没有集体的协作和无偿的支持,没有同事们的理解和热情帮助,没有这一重大课题的背景,这本书不可能问世。为此,再次感谢做出无私奉献的全体同事们,包括现已退休的老先生。还要感谢10多年来和我们一起参加雷达研制工作的航天科工集团二院23所、203所,电子科技集团22所等单位的课题组同志们。

航天科工集团黄培康院士和海军航空工程学院康锡章老教授在百忙中为本书申报国防科技出版基金写了推荐意见,在此向两位先生表示衷心的感谢。

感谢国防科技图书出版基金的支持和责任编辑王华同志对本书编辑出版付出的辛勤劳动。

将本书献给哈尔滨工业大学电子与信息技术研究院电子工程技术研究所全体教师。

谨以本书向祖国60华诞献礼!

权太范

2008年9月于哈尔滨工业大学新技术楼

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 多目标跟踪系统基本原理	2
1.3 多目标跟踪系统基本问题	8
1.4 典型的多目标跟踪系统	11
1.4.1 边扫描边跟踪雷达目标跟踪系统	11
1.4.2 相控阵雷达目标跟踪系统	12
1.4.3 双基地雷达目标跟踪系统	12
1.4.4 多目标多传感器跟踪系统	13
1.5 本书概貌	13
小结	15
第2章 最优估计理论	17
2.1 估计基本概念	17
2.1.1 估计定义	17
2.1.2 估计的三个指标	20
2.1.3 线性最小方差估计	20
2.2 卡尔曼滤波及其特性	21
2.2.1 问题的提出	21
2.2.2 离散卡尔曼滤波方程	23
2.2.3 卡尔曼滤波器特性	24
2.2.4 应用	26
2.3 自适应卡尔曼滤波	28
2.3.1 问题的提出	28
2.3.2 自适应滤波概念	28

2.3.3	自适应滤波算法	29
2.3.4	Mehra 自适应卡尔曼滤波	31
小结		34
第3章	机动目标模型	36
3.1	引言	36
3.2	机动目标数学模型	38
3.2.1	增量机动估值模型	38
3.2.2	强机动目标模型	41
3.3	机动加速度的估计	44
3.3.1	输入估值法	44
3.3.2	自适应滤波方法	47
3.3.3	机动加速度的探测器—目标拦截几何图估计方法	50
小结		53
第4章	多目标跟踪系统数据关联	55
4.1	引言	55
4.2	跟踪波门的设计	57
4.3	“最近邻”法	58
4.4	点迹—航迹配对方法	60
4.5	联合概率数据关联法	62
4.5.1	引言	62
4.5.2	最优联合概率数据关联算法	63
4.5.3	最优联合概率数据关联经验公式	66
4.6	数据关联的模糊推理方法	68
4.6.1	模糊推理关联处理的基本思路	68
4.6.2	基本原理	69
4.6.3	系统实现	70
小结		72
第5章	多目标跟踪算法	74
5.1	引言	74

5.2	“最近邻”贝叶斯方法	75
5.3	多模型跟踪算法	76
5.3.1	引言	76
5.3.2	变维卡尔曼滤波	77
5.3.3	自适应多模型估计器	78
5.4	多假设跟踪算法	79
5.4.1	引言	79
5.4.2	算法	79
5.5	目标编队跟踪算法	81
5.5.1	目标编队跟踪的基本过程	81
5.5.2	目标编队划分和关联处理	82
5.5.3	目标编队分裂和合并的检测	84
5.6	自适应模糊滤波	85
5.6.1	递归的最小二乘自适应模糊滤波	86
5.6.2	混合推理模糊跟踪	86
	小结	87
第6章	目标跟踪快速算法	89
6.1	引言	89
6.2	准最优快速跟踪滤波	91
6.2.1	改进型 α - β 滤波	91
6.2.2	降阶滤波	94
6.2.3	常增益滤波	95
6.3	增益矩阵快速算法	97
6.3.1	增益矩阵快速计算方法	98
6.3.2	AR 模型系数的快速估计	100
6.4	并行卡尔曼滤波的心动阵列算法	101
6.4.1	心动阵列的矩阵运算	101
6.4.2	标准卡尔曼滤波的心动阵列实现	105
6.4.3	平方根协方差卡尔曼滤波的心动阵列实现	107
6.4.4	平方根信息卡尔曼滤波的心动阵列实现	107
6.5	基于 Lyapunov 函数的快速算法	108

6.5.1	稳定性与 Lyapunov 函数	108
6.5.2	等时面概念及其性质	110
6.5.3	准快速滤波跟踪	111
6.5.4	Lyapunov 矩阵方程的快速解法	113
6.5.5	结论	114
小结		115
第 7 章	鲁棒跟踪技术	117
7.1	引言.....	117
7.2	鲁棒跟踪基本概念.....	120
7.2.1	鲁棒跟踪定义	120
7.2.2	影响函数	121
7.2.3	定量鲁棒性测度指标	122
7.3	鲁棒估计的基本方法.....	124
7.3.1	M 估计(广义极大似然估计)	124
7.3.2	L 估计(排序统计量线性组合估计)	126
7.4	野值的判别及剔除方法.....	127
7.4.1	野值的分类	127
7.4.2	野值的递推判别方法	128
7.5	鲁棒卡尔曼滤波.....	129
7.5.1	鲁棒最小二乘递推估计	129
7.5.2	离散系统 M 估计的鲁棒卡尔曼估计	131
7.5.3	极大极小 SA 估计的鲁棒卡尔曼滤波器	134
7.6	变结构鲁棒跟踪.....	138
7.6.1	变结构系统性质	138
7.6.2	变结构鲁棒跟踪器结构	140
7.7	仅有角测量的机动目标鲁棒跟踪.....	141
7.7.1	仅有角测量系统的一般问题	141
7.7.2	机动目标鲁棒跟踪算法	144
7.7.3	仅有角测量系统的鲁棒制导规律	148
小结		151

第 8 章 多传感器融合跟踪系统	153
8.1 引言	153
8.2 数据融合的基本原理	155
8.2.1 数据融合基本概念	155
8.2.2 多目标多传感器跟踪基本模型	156
8.2.3 数据融合基本算法——卡尔曼加权算法	157
8.3 红外—毫米波融合跟踪算法	158
8.3.1 引言	158
8.3.2 融合跟踪系统	158
8.3.3 基于红外图像的机动检测	159
8.3.4 雷达与红外数据的融合	160
8.4 基于多级神经网络的类型融合	161
8.4.1 引言	161
8.4.2 多级神经网络结构	162
8.4.3 基于专家规则的传感器子网设计	163
8.4.4 网络的学习算法	165
8.5 超视距探测不确定信息融合	168
8.5.1 多站地波超视距雷达系统信息融合特殊问题	168
8.5.2 多站地波超视距雷达信息融合混合模型	170
8.5.3 多站高频地波超视距雷达目标高度估计	171
8.5.4 试验数据分析	172
小结	175
第 9 章 神经网络目标跟踪技术	179
9.1 引言	179
9.2 基于 M 估计的鲁棒神经网络	181
9.2.1 问题的提法	181
9.2.2 鲁棒 BP 网络定义	182
9.2.3 RBP 算法	182
9.3 神经网络—模糊推理跟踪器	183
9.3.1 神经网络跟踪器和模糊推理跟踪器	184

9.3.2	神经网络—模糊推理跟踪器的特点	188
9.3.3	学习型模糊推理跟踪器结构	189
9.3.4	学习算法	190
9.4	机动目标增量式神经模糊网络跟踪方法	191
9.4.1	引言	191
9.4.2	机动目标雷达—红外跟踪系统	192
9.4.3	基于增量神经模糊网络融合方法	194
9.4.4	增量式神经模糊网络机动目标跟踪仿真	196
小结		198
第 10 章	弹道导弹跟踪与预测	199
10.1	引言	199
10.2	弹道导弹目标跟踪算法研究现状	200
10.3	弹道导弹航迹快速起始的 Hough 变换方法	202
10.3.1	引言	202
10.3.2	AMHT 航迹起始	202
10.3.3	极坐标系下 MHT 方法	205
10.4	弹道导弹目标扩展卡尔曼滤波	206
10.4.1	引言	206
10.4.2	弹道导弹运动模型及观测方程	207
10.4.3	扩展状态向量弹道导弹目标模型	209
10.4.4	弹道导弹的推广卡尔曼滤波器	210
10.4.5	仿真实验	212
10.5	弹道导弹目标粒子滤波	213
10.5.1	引言	213
10.5.2	基本粒子滤波算法	213
10.5.3	初始化粒子的选取	217
10.5.4	近似最优重要性密度函数粒子滤波算法(OIPF)	220
10.5.5	进化粒子滤波算法(EPF)	222
10.5.6	基于新的采样方法的一种改进型粒子滤波	224
10.5.7	仿真实验	224
10.6	弹道导弹目标的落点估计	227

10.6.1	引言	227
10.6.2	椭圆弹道法	227
10.6.3	微分方程组算法	228
10.6.4	仿真实验	229
小结		231
附录 A	克拉美罗下限(CRLB;Cramer - Rao Lower Bound)	232
第 11 章	干扰机环境下多目标多传感器关联与定位技术	235
11.1	引言	235
11.2	干扰机的多传感器快速关联方法	236
11.2.1	传感器间的关联张角及候选观测集	236
11.2.2	单个观测的关联张角及有效观测集	238
11.3	干扰机定位组合法	240
11.3.1	改进型三角定位法	240
11.3.2	投影定位法	250
11.3.3	组合定位法	255
11.4	干扰机环境下多目标关联的复合弹性神经网络方法	256
11.4.1	引言	256
11.4.2	问题的描述	257
11.4.3	复合弹性神经网络模型	257
11.4.4	基于聚类的复合弹性神经网络干扰机关联算法	261
11.4.5	动态去“重影”方法	262
11.4.6	仿真结果与分析	263
小结		265
第 12 章	无源定位系统数据融合定位技术	267
12.1	引言	267
12.2	基于无源定位系统观测特性的数据融合	268
12.2.1	无源定位系统误差的空间分布特性	268
12.2.2	无源定位系统多模型航迹融合算法	268
12.2.3	仿真实验	271
12.3	多无源定位系统的非均匀数据同步化	274

12.3.1	无源定位系统的非均匀数据	274
12.3.2	多无源定位系统非均匀数据同步化算法	275
12.4	复杂环境下的多无源定位系统数据融合	276
12.4.1	复杂环境下的多传感器系统	276
12.4.2	复杂环境下的 RANFIFS 融合	277
12.4.3	RANFIFS 算法	278
小结		279
第 13 章	网络中心战航迹合成技术	281
13.1	引言	281
13.2	研究现状	282
13.2.1	网络中心战	282
13.2.2	航迹合成算法	283
13.3	航迹合成算法	285
13.3.1	引言	285
13.3.2	航迹合成算法原理	286
13.3.3	航迹合成算法框架	287
13.4	自适应点迹合成	287
13.4.1	自适应点迹合成算法原理	288
13.4.2	自适应点迹合成算法	288
13.5	机动目标多假设航迹合成算法	289
13.5.1	算法基本框架	290
13.5.2	多假设航迹外推算法	291
13.6	仿真实验	293
小结		296
第 14 章	雷达数据处理技术	297
14.1	雷达数据处理器基本原理	297
14.1.1	数据处理器基本概念	297
14.1.2	数据处理器结构及技术指标	299
14.2	雷达目标跟踪算法的设计	301
14.2.1	快速、最优、鲁棒跟踪综合指标	301