



国防科技图书出版基金

# Airborne Radar Multi-Target Tracking Technology

# 机载雷达 多目标跟踪技术

朱自谦 胡士强 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 机载雷达多目标跟踪技术

Airborne Radar Multi - Target Tracking Technology

朱自谦 胡士强 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

机载雷达多目标跟踪技术/朱自谦,胡士强著. —北京:国防工业出版社,2013.6

ISBN 978-7-118-08831-1

I. ①机... II. ①朱... ②胡... III. ①机载雷达—多目标跟踪—研究 IV. ①TN959.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 113332 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 14 字数 250 千字

2013 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 65.00 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

## 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 第七届评审委员会组成人员

主任委员	王 峰				
副主任委员	吴有生	蔡 镛	杨崇新		
秘 书 长	杨崇新				
副 秘 书 长	邢海鹰	贺 明			
委 员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书	
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利	
	刘泽金	孙秀冬	陆 军	芮筱亭	
	李言荣	李德仁	李德毅	杨 伟	
	肖志力	吴宏鑫	张文栋	张信威	
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起	
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南	
	傅惠民	魏炳波			

# 前 言

多目标跟踪(MTT)技术发展至今已有五十多年的历史,其研究成果在美国、俄罗斯、英国和法国等国的军事领域得到了广泛的应用。目前此项技术在民用领域也得到了广泛的应用。

本书在分析国内外大量资料的基础上,以工程实现为背景,针对机载雷达应用环境,对 MTT 系统航迹起始、数据关联、跟踪模型和性能评估等技术进行了系统的研究,并提出了一些有价值的方法,如:通用航迹起始模型、并行联合概率航迹起始逻辑、无迹卡尔曼滤波、加权“当前”模型自适应卡尔曼滤波和随机有限集多目标跟踪等。

本书第一章首先回顾了现代机载雷达多目标跟踪技术的发展历史,分析和指出了国内外 MTT 技术的现状和发展趋势;然后对其组成和相关的应用进行了介绍;接着对 MTT 系统中存在的问题和关键技术进行了综合分析;并概述了本书内容。

第二章对 MTT 系统在工程中经常采用的几种坐标系进行了介绍和讨论。同时,给出了相应坐标系的卡尔曼滤波状态变量和观测变量的选取方法。

第三章在研究现有大量航迹起始方法的基础上,在机载脉冲多普勒雷达环境下,从工程实现背景出发,针对空空、空面(包括:空海和空地)目标的特点,重点对航迹起始方法的结构(模型)和航迹起始逻辑进行了研究。本书提出了一种通用航迹起始模型和并行联合概率航迹起始逻辑,并对涉及的概念给出了说明。通用航迹起始模型,对普通航迹起始模型进行了重构,将普通航迹起始模型中源生航迹、临时航迹和可靠航迹三个航迹起始阶段,分成源生航迹、临时航迹、中间航迹和可靠航迹四个起始阶段。特别是在临时航迹后增加一级中间航迹之后,使整个航迹起始过程物理概念更明确,层次更清晰,门限设置更合理,文件管理更方便,增加了设计的灵活性,规范了航迹起始设计方法。并行联合概率航迹起始逻辑,将滑窗检测航迹起始逻辑和贝叶斯概率航迹起始逻辑合成一种新的航迹起始逻辑,形成了一种新的航迹起始方法,解决了机动目标和非机动目标快速航迹起始问题,同时降低了航迹起始平均时间,改善了航迹起始正确概率。

第四章在“当前”模型的概念下,从工程实现背景出发,提出了一种用于机

动目标跟踪的新自适应卡尔曼滤波算法——加权“当前”模型自适应卡尔曼滤波算法。算法的基本思想是通过引入加速度项的加权因子来进一步突出“当前”信息的作用,为“当前”模型提供更加准确的“当前”信息。加权“当前”模型自适应卡尔曼滤波算法较好地解决了“当前”模型自适应卡尔曼滤波算法在目标非机动情况下跟踪精度差的问题,使跟踪性能得到了很大的提高。加权因子的引入,为设计者提供了一个设计参数,使得设计更具有灵活性。

第五章在分析“当前”统计模型的不足基础上,提出了另一种适用于大范围机动目标跟踪的新算法——基于模糊系统的 UKF 机动目标跟踪方法。该算法利用模糊逻辑对加速度项进行动态调节,使得“当前”模型能更准确地描述目标的“当前”机动状态。基于模糊系统的 UKF 机动目标跟踪方法,采用模糊推理实时调整“当前”模型最大加速度值,使其依据模糊 IF - THEN 规则自适应调整系统方差,对外界的输入信息快速做出反应,以适应各种机动情况,提高了跟踪系统跟踪机动目标的能力和鲁棒性。

第六章在 MTT 系统中首次提出了瞬时动态误差和瞬态特性的概念。本章导出了一种新的复合机动模型,新模型沟通了两种不需机动检测实现机动目标跟踪模型之间的关系,具有良好的瞬态特性和稳态特性,进一步改善了理论模型与实际目标动力学特征的匹配程度,使这类方法得到了发展和完善。

第七章较为系统地介绍了目前最常见的几种数据关联方法。在分析多目标跟踪技术中数据关联产生的机理的基础上,将目前的数据关联方法归纳为以观测序列的似然比为基础的目标时间累积信息方法和采用贝叶斯方法的空间累积信息方法,并依次给出了全局最近邻、概率数据关联、联合概率数据关联、多元假设跟踪、概率多假设跟踪和多维 S - D 分配等几种典型数据关联方法。

第八章将现有的几种概率数据关联方法等效成相应的网络。在此基础上,将多目标数据关联问题看成与 Kohonen 自组织特征映射神经网络类似,由此导出了一种快速、有效的迭代数据关联方法。迭代数据关联对落入关联域内的点迹进行了分类,并提出了模糊聚概率矩阵的概念。不仅在计算速度上而且在性能上均优于现有的关联方法,较好地解决了多目标数据关联问题。

第九章介绍了一种随机有限集多目标跟踪方法。在随机有限集 GM - CPHD 多目标跟踪滤波器中引入椭圆门限,有效地降低了 GM - CPHD 滤波器的计算量,而性能不受影响。简化的高斯分量修剪方法在新出现目标的强度未知时,检测出新目标出现的性能与已知新出现目标强度函数的 GM - PHD 滤波器相当。

第十章针对多目标贝叶斯滤波器不能起始未知位置新目标的问题,提出了一种带有新生目标检测的贝叶斯多目标跟踪方法,通过在多目标跟踪中应用航



迹起始技术进行新生目标的检测,一旦有新生目标被检测,则由其位置信息构建新生目标的强度函数;然后由此构建的强度函数作为 PHD 和 CPHD 滤波器的起始条件以起始滤波器。

第十一章在分析现有国内外资料的基础上,针对 MTT 技术特点提出了一套完整的性能评估方法。本章详细地介绍了 MTT 性能评估系统各功能模块的定义和计算方法,并对模型中的评估方法进行了验证和开发,最终研制了一套 MTT 评估系统。MTT 性能评估系统完善了 MTT 性能评估方法和准则,用于对 MTT 系统的性能进行评定,给出系统辅助设计依据;也可对提供的两种 MTT 系统进行对比,为多目标跟踪系统的综合性能做出评价,给出选择依据。MTT 性能评估系统,无论对工程应用还是理论分析都具有较高的实用价值。

结束语对全文工作进行了总结。

上述研究成果较好地解决了 MTT 技术的体系构成、顶层设计、评估准则和工程化等问题,为 MTT 系统设计提供了技术支持,进一步完善了 MTT 系统基础理论。

作者  
2013 年 1 月

# 目 录

第一章 概论 .....	1
1.1 多目标跟踪技术的发展 .....	1
1.2 多目标跟踪技术的应用 .....	2
1.2.1 军用领域 .....	2
1.2.2 民用领域 .....	3
1.3 MTT 技术的主要问题和关键技术 .....	4
1.3.1 坐标系的选择 .....	6
1.3.2 点迹录取与预处理 .....	8
1.3.3 航迹起始、确定和消除 .....	9
1.3.4 数据关联 .....	11
1.3.5 经典跟踪算法 .....	15
1.3.6 基于随机有限集的多目标跟踪算法 .....	21
1.3.7 性能评估 .....	22
1.4 本书主要章节安排 .....	23
参考文献 .....	25
第二章 多目标跟踪中经常使用的几种坐标系 .....	30
2.1 引言 .....	30
2.2 坐标系的定义 .....	30
2.2.1 惯性坐标系 .....	30
2.2.2 机体坐标系 .....	30
2.2.3 天线坐标系 .....	31
2.2.4 雷达坐标系 .....	31
2.2.5 世界大地坐标系(WGS-84) .....	32
2.3 坐标系变换 .....	32
2.3.1 机体坐标系到雷达坐标系的变换 .....	32
2.3.2 雷达坐标系到天线坐标系的变换 .....	32
2.3.3 直角坐标与极坐标的变换 .....	33

2.3.4	惯性坐标系到机体坐标系的变换 .....	34
2.3.5	WGS-84 坐标系到惯性坐标系的变换 .....	40
2.3.6	雷达天线两种安装方式 .....	42
2.4	滤波模型 .....	43
2.4.1	直角坐标系 .....	44
2.4.2	修改的直角坐标系 .....	45
2.4.3	球坐标系 .....	47
2.4.4	修改的球坐标 .....	49
2.5	小结 .....	51
	参考文献 .....	51
<b>第三章</b>	<b>一种通用航迹起始模型和并行联合概率航迹起始逻辑 .....</b>	<b>52</b>
3.1	引言 .....	52
3.2	航迹起始问题的形成 .....	53
3.3	通用航迹起始模型的建立 .....	54
3.3.1	航迹起始阶段划分 .....	57
3.3.2	航迹起始步骤 .....	57
3.4	并行联合概率航迹起始逻辑的形成 .....	58
3.4.1	滑窗检测航迹起始逻辑 .....	59
3.4.2	贝叶斯概率航迹起始逻辑 .....	59
3.4.3	并行联合概率航迹起始逻辑 .....	61
3.5	航迹起始门限选择 .....	62
3.5.1	源生航迹起始门限 .....	62
3.5.2	临时航迹起始门限 .....	63
3.5.3	中间航迹起始门限 .....	64
3.5.4	可靠航迹起始门限 .....	64
3.6	航迹起始仿真分析 .....	65
3.6.1	通用航迹起始模型 .....	65
3.6.2	并行联合概率航迹起始 .....	72
3.7	小结 .....	81
	参考文献 .....	81
<b>第四章</b>	<b>一种用于机动目标跟踪的加权自适应卡尔曼滤波算法 .....</b>	<b>83</b>
4.1	引言 .....	83
4.2	Singer 模型与“当前”模型的基本理论和统计特性 .....	84

4.2.1	Singer 模型的基本理论和统计特性 .....	84
4.2.2	“当前”模型基本理论和统计特性 .....	85
4.3	三维球坐标目标离散状态方程的建立 .....	85
4.3.1	三维直角坐标下的目标离散方程 .....	85
4.3.2	三维球坐标下的目标离散状态方程 .....	86
4.4	球坐标下三维自适应卡尔曼滤波算法 .....	88
4.5	加权“当前”模型自适应卡尔曼滤波算法 .....	89
4.6	计算机仿真结果 .....	90
4.7	小结 .....	96
	参考文献 .....	96
<b>第五章</b>	<b>基于模糊系统的 UKF 机动目标跟踪方法 .....</b>	<b>98</b>
5.1	引言 .....	98
5.1.1	Unscented 变换 .....	98
5.1.2	UKF 算法实现 .....	99
5.2	改进的“当前”统计模型跟踪算法 .....	100
5.2.1	“当前”统计模型的不足 .....	100
5.2.2	基于模糊系统的最大机动加速度调节 .....	100
5.2.3	基于 UKF 的模糊控制的当前统计模型自适应滤波方法 .....	103
5.3	计算机仿真 .....	106
5.4	小结 .....	106
	参考文献 .....	107
<b>第六章</b>	<b>用于机动目标跟踪的复合机动模型及其应用 .....</b>	<b>108</b>
6.1	引言 .....	108
6.2	跟踪系统误差分析 .....	108
6.3	复合机动模型的建立 .....	111
6.4	计算机仿真 .....	112
6.4.1	复合机动模型与加权“当前”模型比较 .....	112
6.4.2	复合机动模型取不同 $\Delta a_{ri}(k)$ 值的比较 .....	112
6.5	小结 .....	114
	参考文献 .....	115

<b>第七章 几种典型多目标数据关联方法</b>	116
7.1 引言	116
7.2 全局最近邻方法	117
7.3 概率数据关联	117
7.4 联合概率数据关联	119
7.5 多假设跟踪	124
7.5.1 假设的产生	124
7.5.2 假设概率计算	125
7.6 概率多假设跟踪算法	126
7.7 多维 S-D 分配	128
7.7.1 测量的形成	129
7.7.2 测量集合的分割	129
7.7.3 S-D 分配问题	132
7.8 小结	133
参考文献	134
<b>第八章 自组织特征映射神经网络概率数据关联</b>	136
8.1 引言	136
8.2 多目标数据关联	137
8.2.1 问题的形成	137
8.2.2 几种概率数据关联方法的分析	138
8.3 新的数据关联方法	139
8.3.1 聚概率矩阵的分类	139
8.3.2 迭代联合概率数据关联方法	142
8.4 计算机仿真	145
8.4.1 IJPDA 关联效果的仿真	145
8.4.2 MTT 算法仿真	147
8.5 小结	149
参考文献	150
<b>第九章 应用椭球门限的随机有限集 GM-CPHD 多目标跟踪滤波器</b>	151
9.1 引言	151
9.2 GM-CPHD 滤波器	151

9.3	算法描述 .....	154
9.4	简化的高斯分量修剪方法 .....	156
9.5	新出现目标强度函数未知 GM - PHD 滤波器的高斯 分量修剪方法 .....	157
9.6	计算机仿真 .....	158
9.6.1	线性 GM - CPHD 滤波器仿真 .....	159
9.6.2	非线性 GM - CPHD 滤波器仿真 .....	165
9.6.3	高斯修剪算法仿真 .....	167
9.7	小结 .....	173
	参考文献 .....	174
<b>第十章</b>	<b>基于目标检测的贝叶斯多目标跟踪方法 .....</b>	<b>175</b>
10.1	引言 .....	175
10.2	新生目标检测方法 .....	176
10.3	基于新生目标检测的 GM - CPHD 方法 .....	177
10.3.1	方法流程图 .....	177
10.3.2	算法步骤 .....	177
10.3.3	算法复杂度分析与比较 .....	181
10.4	计算机仿真与结果分析 .....	183
10.4.1	多目标模型 .....	183
10.4.2	多目标跟踪场景 .....	183
10.4.3	仿真结果与分析 .....	184
10.5	小结 .....	187
	参考文献 .....	188
<b>第十一章</b>	<b>多目标跟踪性能评估系统 .....</b>	<b>189</b>
11.1	引言 .....	189
11.2	多目标跟踪系统的性能评估方法 .....	190
11.3	MTT 性能评估系统 .....	194
11.4	小结 .....	199
	参考文献 .....	199
<b>结束语</b>	.....	<b>200</b>
<b>注释表</b>	.....	<b>202</b>

# Contents

<b>Chapter 1</b>	<b>Introduction</b>	1
1.1	A Historical Perspective on MTT	1
1.2	Application of MTT	2
1.2.1	Military Applications	2
1.2.2	Civil Applications	3
1.3	Problem Formulation and Objectives	4
1.3.1	Selection of Coordinate Systems	6
1.3.2	Track Logging and Pre – Processing	8
1.3.3	Track Initiation, Confirmation and Elimination	9
1.3.4	Data Association	11
1.3.5	Classic Tracking Algorithms	15
1.3.6	Mtt Algorithm Based on Random Finite Sets	21
1.3.7	Performance Evaluation	22
1.4	Outline of the Book	23
	Reperences	25
<b>Chapter 2</b>	<b>Coordinate Systems Used in MTT</b>	30
2.1	Introduction	30
2.2	Definition of Coordinate Systems	30
2.2.1	Inertial Coordinate Systems	30
2.2.2	Aircraft Coordinate Systems	30
2.2.3	Antenna Coordinate Systems	31
2.2.4	Radar Coordinate Systems	31
2.2.5	Global Ground Coordinate Systems	32
2.3	Transformation of Coordinate Systems	32
2.3.1	Transformation from Aircraft Coordinate Systems to Radar Coordinate Systems	32
2.3.2	Transformation from Radar Coordinate Systems to Antenna Coordinate	

Systems .....	32
2.3.3 Transformation from Cartesian Coordinate System to Polar Coordinate Systems .....	33
2.3.4 Transformation from Inertial Coordinate Systems to Aircraft Coordinate Systems .....	34
2.3.5 Transformation from Wgs – 84 Coordinate Systems to Inertial Coordinate Systems .....	40
2.3.6 Two Mounting Methods of Antenna .....	42
2.4 Filtering Model .....	43
2.4.1 Cartesian Coordinate Systems .....	44
2.4.2 Modified Cartesian Coordinate Systems .....	45
2.4.3 Spherical Coordinate Systems .....	47
2.4.4 Modified Spherical Coordinate Systems .....	49
2.5 Summary .....	51
References .....	51

## **Chapter 3 Universal Track Initiation Model, Parallel Joint Probability**

<b>Track Initiation Logic</b> .....	52
3.1 Introduction .....	52
3.2 Track Initiation Problem .....	53
3.3 Preliminary of Universal Track Initiation Model .....	54
3.3.1 Definition of Track Initiation Stage .....	57
3.3.2 Procedure of Track Initiation .....	57
3.4 Parallel Joint Probability Track Initiation Logic .....	58
3.4.1 Sliding Window Detection Track Initiation Logic .....	59
3.4.2 Bayesian Probability Track Initiation Logic .....	59
3.4.3 Parallel Joint Probability Track Initiation Logic .....	61
3.5 Selection of Track Initiation Threshold .....	62
3.5.1 Origin Track Initiation Threshold .....	62
3.5.2 Temporary Track Initiation Threshold .....	63
3.5.3 Middle Track Initiation Threshold .....	64
3.5.4 Reliable Track Initiation Threshold .....	64
3.6 Simulation Analysis of Track Initiation .....	65



3.6.1 Universal Track Initiation Model .....	65
3.6.2 Parallel Joint Probability Track Initiation .....	72
3.7 Summary .....	81
References .....	81

<b>Chapter 4 A Novel Weighted Adaptive Kalman Filtering Algorithm for Maneuvering Target Tracking .....</b>	<b>83</b>
4.1 Introduction .....	83
4.2 Preliminary and Statistical Characteristic of Singer Model and “Current” Model .....	84
4.2.1 Preliminary and Statistical Characteristic of Singer Model .....	84
4.2.2 Preliminary and Statistical Characteristic of “Current” Model .....	85
4.3 Target Discrete – Time State Equations for 3D Spherical Coordinates .....	85
4.3.1 Target Discrete – Time State Equations For 3D Cartesian Coordinates .....	85
4.3.2 Target Discrete – Time State Equations For 3D Spherical Coordinates .....	86
4.4 3D Spherical Coordinates Adaptive Kalman Filtering Algorithm .....	88
4.5 Weighted “Current” Model Adaptive Kalman Filtering Algorithm .....	89
4.6 Computer Simulation Results .....	90
4.7 Summary .....	96
References .....	96

<b>Chapter 5 Novel Unscented Kalman Filter (Ukf) Aided Target Tracking Algorithm Based on Fuzzy System .....</b>	<b>98</b>
5.1 Introduction .....	98
5.1.1 Unscented Transformation .....	98
5.1.2 Ukf Algorithm .....	99
5.2 Modified “Current” Statistical Model Tracking Algorithm .....	100
5.2.1 Limitation of “Current” Statistical Model .....	100