



国防科技图书出版基金

Target Tracking Technology for
Moving Sensors

运动传感器

目标跟踪技术

江 晶 吴卫华 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

运动传感器目标 跟踪技术

Target Tracking Technology for
Moving Sensors

江 晶 吴卫华 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

运动传感器目标跟踪技术/江晶等著. —北京:国防工业出版社, 2017.4

ISBN 978-7-118-11032-6

I. ①运… II. ①江… III. ①传感器—目标跟踪 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第040000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 17¼ 字数 312 千字

2017年4月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 89.00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

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,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。这是一项具有深远意义的创举。

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中央军委装备发展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,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展应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。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,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	潘银喜			
副 主 任 委 员	吴有生	傅兴男	赵伯桥	
秘 书 长	赵伯桥			
副 秘 书 长	邢海鹰	谢晓阳		
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	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	陆 军
	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		

序

运动传感器目标跟踪技术在军事和民用领域已得到广泛应用,随着科学技术的发展和军事、民用领域的需求增长,该技术正逐渐向智能化、自主性的更高层次发展。

本书作者多年从事雷达系统、信号处理、数据处理、信息融合等方面的教学和研究,在目标跟踪和数据融合方面积累了丰富的研究成果。本书基于作者所在团队 20 余年来对运动传感器目标跟踪技术的研究总结而成,内容系统、条理清晰。本书具有以下几大特色:一是创新性,书中各章节几乎都来自作者自身研究成果,自成体系,具有自主知识产权,与已有相关著作内容基本无重复,实属难得;二是实用性,作者倡导学以致用,一直致力于研究成果工程化,书中内容无一例外地面向工程实践上面临的突出问题;三是前瞻性,本书不仅着眼于工程应用问题,也注意跟踪最新发展动向,吸收国内外最新研究成果,如新兴的随机有限集理论在目标跟踪领域的应用,此外,通过对民用科学技术的发展、军事上作战样式改变的思考,指出了多运动传感器目标跟踪技术的未来发展方向。

作者旨在为国内同行在多运动平台多传感器目标跟踪上提供有益的思考和借鉴,致力于与各位专家、研究员、工程师等一起推动该领域在实际应用方面的工程化。相信本书的出版,将为有志于从事数据处理和信息融合的读者开阔视野,必将进一步推动国内该领域在工程应用方面的发展,也衷心期望作者及其团队在随机有限集方面有新的著作问世,填补国内该领域空白。



2016 年 5 月

前 言

科学技术,特别是通信、计算机、网络、信息融合、人工智能、传感器等技术的发展,推动了多平台多传感器多维度感知技术的进步,在军事和民用领域有着广泛的应用;尤其是在军事上,催生了“网络中心战”“信息战”“空海一体战”等新型作战概念和样式,确立了“陆海空天网”一体化的发展方向,其中,空基、海基、天基等多运动平台多传感器的定位与目标跟踪是其一项重要的支撑技术。

本书以空中、海上等编队情报自主保障为研究目标,针对多运动平台多传感器组网探测、定位和跟踪方法展开研究,建立完整的坐标体系,进行误差分析,提出一系列贴近工程背景的方法,如多运动传感器的最大似然配准方法、无源定位与跟踪方法、有源无源传感器的协同探测和目标跟踪方法、量测“断续”和“乱序”处理方法等,以实现复杂电磁环境下辐射源快速定位、机动目标跟踪以及大空域的统一态势的生成。

不同于地面雷达,空基、海基、天基等平台载传感器的一个明显特点是其运动性,传感器的位置和姿态随平台一起变化,其观测量的“相对性”尤其突出,融合前必须进行坐标变换等数据预处理;而且,运动平台上可能搭载有雷达、红外、电子支援量测(ESM)等多种异质传感器,传感器的异质虽然扩展了观测维度,但同时也给融合处理带来了麻烦。此外,观测环境和目标机动等因素,使运动传感器的目标跟踪面临更大挑战。为此,我们展开了多运动传感器目标跟踪技术的相关研究,并撰写了本书。

全书共分8章。

第1章是概论,为读者提供全书的概貌认识。

第2章系统介绍运动传感器目标跟踪基础,包括坐标系定义、坐标变换及其误差传递分析、运动平台状态与姿态的关系。其中,坐标变换误差协方差的推导结果是目前国内外专著中的空白点,却是实际工程应用中的目标跟踪算法不可或缺的要害。另外,平台姿态问题是生成切合实际的仿真数据的关键。

第3章为运动传感器目标跟踪算法,重点介绍了目前主流的单目标滤波器,如Kalman滤波器(KF)、扩展KF(EKF)、不敏KF(UKF)、高斯和滤波(GSF)、粒子滤波(PF)等以及多目标跟踪算法。考虑到传统的多目标算法,如联合概率数据关联(Joint Probabilistic Data Association, JPDA)、多假设跟踪(Multiple

Hypothesis Tracking, MHT)、联合一体化概率数据关联 (Joint Integrated Probabilistic Data Association Filter, JIPDA)、一体化航迹分裂 (Integrated Track Splitting, ITS) 等已在较多著作中有所介绍, 这里仅着重论述新兴的基于随机有限集的多目标跟踪算法, 如概率假设密度 (Probability Hypothesis Density, PHD) 滤波器、带势 PHD (Cardinalized PHD, CPHD) 以及广义标签化多伯努利 (GLMB) 滤波器等。

第 4 章研究多运动传感器最大似然配准, 其可适用于任意数量的异质传感器的配准, 以有效补偿多运动传感器的系统误差。

第 5 章考虑到运动传感器 (如空基传感器) 实际操作中通常静默侦察, 研究基于联合相位差变化率和多普勒变化率的单站无源定位与跟踪方法以及基于纯角度交叉的无源定位与跟踪的方法, 它们均是基于实际的三维模型空间, 可快速实现固定或运动辐射源的无源定位与跟踪。

第 6 章研究多普勒量测在运动多普勒脉冲雷达中的目标跟踪问题, 依次研究其在滤波与多目标跟踪中的作用, 最后落脚于多普勒盲区条件下多目标跟踪这一难点问题。

第 7 章的多传感器协同跟踪问题, 立足于杂波条件下的机动目标实际条件, 从有源无源协同、传感器量测异步以及乱序等工程应用角度展开论述, 探讨跟踪难题。

第 8 章结合上述研究和工程实现需要, 探讨多运动传感器目标跟踪系统的设计和应用问题。

最后, 为方便工程设计人员的使用, 特在附录中提供了坐标变换误差协方差传递以及基本的高斯混合 PHD (GM-PHD) 的 Matlab 程序。

拙作得到了空军装备部和国防工业出版社的大力支持, 在撰写过程中, 武汉大学孙洪教授、空军预警学院马晓岩教授、国防科学技术大学罗鹏飞教授、国防工业出版社牛旭东编辑等专家学者对样稿进行了审阅, 提出了宝贵的修改意见和大力帮助, 在此, 向为本书做过贡献的既有课题组成员和帮助本书写作和出版的人们表示衷心的感谢。

本书对空海多运动平台多传感器协同探测、定位以及目标跟踪的体系框架和重要问题进行了一定探索, 但无疑还有很多的难题有待解决, 衷心希望在此驻留的读者能有所收获, 共同推动运动传感器目标跟踪技术发展到一个新高度。

此外, 由于作者水平有限, 书中难免存在不妥之处, 恳请读者批评指正, 请将宝贵建议反馈至 Email: weihuawu1987@163.com。

作者

2016 年 10 月于武汉

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 运动传感器目标跟踪概念	1
1.2 多平台多运动传感器组网	4
1.2.1 组网方式	4
1.2.2 信息处理	5
1.2.3 主要问题	6
1.3 目标跟踪技术进展	10
1.3.1 目标跟踪	10
1.3.2 多传感器目标跟踪	18
1.4 内容组织与章节安排	25
第 2 章 运动传感器目标跟踪基础	28
2.1 引言	28
2.2 坐标体系	28
2.2.1 经纬高坐标系	28
2.2.2 ECEF 坐标系	29
2.2.3 地理坐标系	29
2.2.4 平台坐标系	30
2.2.5 观测坐标系	30
2.2.6 坐标系之间关系	31
2.3 坐标变换	32
2.3.1 经纬高坐标与 ECEF 坐标的变换关系	33
2.3.2 ECEF 坐标与 NED 坐标的变换关系	34
2.3.3 NED 坐标与 HRD 坐标的变换关系	36
2.3.4 HRD 坐标与 HRD 极坐标的变换关系	38
2.4 坐标变换误差分析	38
2.4.1 一阶泰勒展开的误差传递分析方法	38
2.4.2 经纬高坐标到 ECEF 坐标变换误差传递	40
2.4.3 HRD 极坐标与 HRD 直角坐标变换误差传递	41

2.4.4	HRD 直角坐标与 NED 变换误差传递	42
2.4.5	NED 与 ECEF 坐标变换误差传递	45
2.5	运动平台航迹与姿态模型	49
2.5.1	平台航迹模型	50
2.5.2	平台姿态模型	56
2.5.3	仿真分析	57
2.5.4	实测数据验证	60
2.6	小结	62
第 3 章	运动传感器目标跟踪算法	63
3.1	引言	63
3.2	单目标跟踪	63
3.2.1	贝叶斯递归	63
3.2.2	卡尔曼滤波	64
3.2.3	扩展卡尔曼滤波	65
3.2.4	不敏卡尔曼滤波	66
3.2.5	高斯和滤波	68
3.2.6	粒子滤波	69
3.3	基于随机有限集的多目标跟踪	71
3.3.1	随机有限集的背景知识	71
3.3.2	多目标状态与多目标观测模型	73
3.3.3	多目标贝叶斯递归	73
3.3.4	基于概率假设密度滤波器的目标跟踪	74
3.3.5	基于带势概率假设密度滤波器的目标跟踪	75
3.3.6	基于广义标签化多伯努利滤波器的目标跟踪	78
3.4	小结	80
第 4 章	多运动传感器最大似然配准	81
4.1	引言	81
4.2	ECEF 坐标系下有偏观测模型	81
4.3	最大似然配准算法	83
4.3.1	目标状态估计	84
4.3.2	传感器偏差估计	84
4.3.3	最大似然配性算法流程	85
4.4	基于 ECEF 坐标系的多运动平台多传感器最大似然配准	87
4.4.1	雅可比矩阵的推导	87

4.4.2	无源传感器的斜距估计	89
4.5	仿真分析	90
4.5.1	有源传感器最大似然配准	90
4.5.2	异质传感器最大似然配准	94
4.5.3	无源传感器最大似然配准	97
4.6	基于实际数据的最大似然配准验证	100
4.7	小结	103
第 5 章	运动传感器无源定位及跟踪	104
5.1	引言	104
5.2	运动单站无源定位及跟踪	104
5.2.1	ECEF 坐标系下运动单站单次无源定位	105
5.2.2	单机多次无源定位跟踪算法	108
5.2.3	仿真分析	112
5.3	运动双站纯角度无源定位及跟踪	119
5.3.1	双机纯角度无源定位及误差分析	120
5.3.2	双机多次无源定位与跟踪	123
5.3.3	仿真分析	124
5.4	小结	129
第 6 章	运动多普勒雷达传感器目标跟踪	130
6.1	引言	130
6.2	ECEF 坐标系下带多普勒的序贯转换量测卡尔曼滤波	130
6.2.1	基于 ECEF 坐标系的量测模型	130
6.2.2	带多普勒量测的序贯转换量测卡尔曼滤波	132
6.2.3	仿真分析	136
6.3	杂波条件下基于 GM-CPHD 的多普勒雷达多目标跟踪	141
6.3.1	多目标滤波问题的随机有限集描述	141
6.3.2	带多普勒量测的序贯 GM-CPHD 算法	143
6.3.3	仿真分析	146
6.4	多普勒盲区下基于 GM-PHD 的多目标跟踪	149
6.4.1	并入 MDV 的检测概率模型	149
6.4.2	多普勒盲区下并入 MDV 和多普勒 信息的 GM-PHD 滤波器	151
6.4.3	仿真分析	157
6.5	小结	164

第7章 多运动传感器融合跟踪	165
7.1 引言	165
7.2 杂波环境下异质异步传感器机动目标协同跟踪	165
7.2.1 ECEF 坐标系下系统模型	166
7.2.2 ECEF 坐标系下多传感器交互多模型概率数据关联滤波器	168
7.2.3 雷达辐射控制	172
7.2.4 仿真分析	173
7.3 多传感器量测“乱序”时杂波条件下机动目标跟踪	178
7.3.1 OoSM 问题	179
7.3.2 带 OoSM 的交互多模型概率数据关联算法	179
7.3.3 仿真分析	183
7.4 带配准误差的多普勒雷达增广状态 GM-PHD 多目标跟踪	185
7.4.1 问题描述	186
7.4.2 带配准误差的增广状态 GM-PHD 滤波器	189
7.4.3 仿真分析	195
7.5 小结	200
第8章 多运动传感器目标跟踪系统	201
8.1 引言	201
8.2 系统功能与组成	201
8.2.1 功能	201
8.2.2 组成	203
8.3 系统主要软件模块	203
8.3.1 数据库	203
8.3.2 平台动态组网软件	204
8.3.3 传感器信息收集软件	206
8.3.4 情报分发软件	206
8.3.5 系统误差监测与配准软件	207
8.3.6 传感器管理与控制软件	208
8.3.7 信息融合处理软件	210
8.3.8 综合态势形成与显示软件	211
8.4 系统应用	212
8.4.1 单平台单运动传感器目标跟踪系统	212
8.4.2 单平台多运动传感器目标跟踪系统	212
8.4.3 多平台多运动传感器目标跟踪系统	213

8.5 小结	214
附录	215
A. 直角坐标系之间坐标变换	215
B. 极坐标对无源观测量的雅可比矩阵	218
C. 双机纯角度定位误差分析时雅可比矩阵的推导	219
D. 协方差矩阵的推导	226
E. 缩略语表	227
F. 符号规定	229
G. Kalman 滤波 Matlab 程序	230
H. GM-PHD 滤波 Matlab 程序	231
参考文献	237

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Concepts of Target Tracking for Moving Sensors	1
1.2 Networking with Multiple Moving Sensors on Multiple Platforms	4
1.2.1 Networking Ways	4
1.2.2 Information Processing	5
1.2.3 Main Problems	6
1.3 Technological Progress of Target Tracking	10
1.3.1 Target Tracking	10
1.3.2 Target Tracking with multiple sensors	18
1.4 Content Organization and Chapter Arrangement	25
Chapter 2 Foundation of Target Tracking for Moving Sensors	28
2.1 Introduction	28
2.2 Coordinate Systems	28
2.2.1 Geodetic Coordinates	28
2.2.2 Earth-Centered Earth-Fixed Coordinates	29
2.2.3 Geographic Coordinates	29
2.2.4 Platform's Coordinates	30
2.2.5 Measuring Coordinates	30
2.2.6 Coordinate Relationship	31
2.3 Coordinate Transformation	32
2.3.1 Transformation Between Geodetic Coordinates and ECEF Coordinates	33
2.3.2 Transformation Between ECEF Coordinates and NED Coordinates	34
2.3.3 Transformation Between NED Coordinates and HRD Coordinates	36
2.3.4 Transformation Between HRD Coordinates and HRD Polar Coordinates	38

2.4	Error Analysis for Coordinate Transformation	38
2.4.1	Analysis for Error Propagation Based on the First Order Taylor Expansion	38
2.4.2	Error Propagation From Geodetic Coordinates to ECEF Coordinates	40
2.4.3	Error Propagation Between HRD Polar Coordinates and HRD Coordinates	41
2.4.4	Error Propagation Between HRD Coordinates and NED Coordinates	42
2.4.5	Error Propagation Between NED Coordinates and ECEF Coordinates	45
2.5	Trajectory and Attitude Models of Moving Platforms	49
2.5.1	A Platform's Trajectory Model	50
2.5.2	A Platform's Attitude Model	56
2.5.3	Simulation Analysis	57
2.5.4	The Real Data Validation	60
2.6	Summary	62
Chapter 3	Target Tracking Algorithms for Moving Sensors	63
3.1	Introduction	63
3.2	Single Target Tracking	63
3.2.1	Bayesian Recursion	63
3.2.2	Kalman Filter	64
3.2.3	Extended Kalman Filter	65
3.2.4	Unscented Kalman Filter	66
3.2.5	Gaussian Sum Filter	68
3.2.6	Particle Filter	69
3.3	Multi-target Tracking Based on Random Finite Sets	71
3.3.1	Basic Knowledge about Random Finite Sets	71
3.3.2	Multi-target State and Multi-target Measurement Models	73
3.3.3	Multi-target Bayes Recursion	73
3.3.4	Target Tracking Based on the Probability Hypothesis Density (PHD) Filter	74
3.3.5	Target Tracking Based on the Cardinalized PHD Filter	75
3.3.6	Target Tracking Based on the Generalized Labeled Multi- Bernoulli Filter	78

3.4	Summary	80
Chapter 4	Maximum Likelihood Registration for Multiple Moving Sensors	81
4.1	Introduction	81
4.2	Biased Measurement Models Based on ECEF Coordinates	81
4.3	The Maximum Likelihood Registration Algorithm	83
4.3.1	Target State Estimation	84
4.3.2	Sensor Biases Estimation	84
4.3.3	Implementation of the MLR algorithm	85
4.4	The MLR Sensor Registration on Multiple Moving Platforms Based on ECEF Coordinates	87
4.4.1	The Derivation of Jacobian Matrice	87
4.4.2	Slant Range Estimation for Passive Sensors	89
4.5	Simulation Analysis	90
4.5.1	Maximum Likelihood Registration for Active Sensors	90
4.5.2	Maximum Likelihood Registration for Heterogeneous Sensors	94
4.5.3	Maximum Likelihood Registration for Passive Sensors	97
4.6	Maximum Likelihood Registration Validation Based on the Real Data	100
4.7	Summary	103
Chapter 5	Passive Location and Tracking for Multiple Moving Sensors	104
5.1	Introduction	104
5.2	Passive Location and Tracking for Single Moving Sensor	104
5.2.1	Passive Location for Single Moving Sensor Based on ECEF Coordinates	105
5.2.2	Passive Location and Tracking with Multiple Measurements From Single Moving Sensor	108
5.2.3	Simulation Analysis	112
5.3	Passive Location and Tracking with Angle Measurements for Two Moving Sensors	119
5.3.1	Passive Location with Angle Measurements and Error Analysis for Two Moving Sensors	120
5.3.2	Passive Location and Tracking with Multiple Measurements From Two Moving Sensor	123
5.3.3	Simulation Analysis	124