



Information Fusion Engineering Practice

—Technology and Method

信息融合工程实践 ——技术与方法

赵宗贵 刁联旺 李君灵 翟海涛 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

信息融合工程实践 ——技术与方法

Information Fusion Engineering Practice
——Technology and Method

赵宗贵 刁联旺 李君灵 翟海涛 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

信息融合工程实践:技术与方法 / 赵宗贵等著.

—北京:国防工业出版社,2015.7

ISBN 978-7-118-10112-6

I. ①信… II. ①赵… III. ①信息融合—研究

IV. ①G202

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 168491 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 29 $\frac{3}{4}$ 字数 548 千字

2015 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3500 册 定价 98.00 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 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

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

作者简介

赵宗贵,男,1943年2月12日生,黑龙江铁力市人,1965年7月毕业于哈尔滨工业大学计算数学专业,研究员,博士生导师。曾任电子工业部第二十八研究所科技委主任、副总工程师,总装备部电子信息系统综合技术专业组专家,中国电子学会会士,江苏省系统工程学会副理事长。长期从事 C⁴ISR 系统论证、设计和研制工作,曾任空军、海军、陆军多项大型电子系统工程主师、副总师、总师。获国家科技进步一等奖和电子部科技进步特等奖1项,部委科技进步一等奖2项、二等奖3项,以及光华科技基金奖。1998年被授予国家中青年有突出贡献专家称号,1993年享受国务院特殊津贴。指导信息融合等领域博士10名、博士后20余名。参加撰写专著2部,主笔撰写《信息融合概念、方法与应用》、《信息融合工程实践——技术与方法》等专著。发表学术论文80余篇。

刁联旺,男,1965年10月生,安徽五河县人,工学博士,研究员,硕士生导师。中国航空学会信息融合专业委员会委员。2004年于南京理工大学人工智能与模式识别专业获工学博士学位,主要从事作战指挥决策、信息融合理论等方面的教学与科研工作,主持多项军队军事理论课题和总装国防装备预研项目,获军队科技进步奖共9项。发表学术论文40余篇,其中10余篇被EI检索,出版学术专著4部。

序

目前,我们已步入信息时代,信息时代的主要特征是以各种信息形式表达人类对客观世界的察觉、理解和预测等认知活动,为人类改造世界提供支撑。信息融合是基于信息应用出现的跨多学科门类、多专业领域、多应用技术的边缘学科,随着信息获取手段的增加,日益展现出强大的生命力和广阔的应用前景。自1998年开始,国际信息融合学会(ISIF)每年举办一次国际信息融合大会(ICIF)(第1届在洛杉矶、2014年第17届在马德里),我国信息融合分会(隶属航空学会)自2009年成立以来已举办6届全国信息融合学术年会,会议集中了我国信息融合学界精英,展现了我国信息融合理论、技术发展状况和在各领域的应用成果。

本书主要著作者赵宗贵研究员是我国信息融合领域著名专家,在国内率先编译出版了美国国防部实验室联合理事会(JDL)数学融合信息组(DFIG)专家E. L. Waltz和J. Llinas的专著《多传感器数据融合》,对促进我国信息融合学科和应用领域的发展起到了重要作用。军事应用是信息融合发展不懈的动力,作为我国C⁴ISR领域的著名专家,赵宗贵研究员近50年一直从事战场感知信息处理工作,在理论和技术上有重要创新,曾获国家科技进步一等奖,国务院部委科技进步特等奖、一等奖、二等奖十余项,在我国信息融合历届学术年会上曾四次作大会报告,并在工信部培训班和多所军事、地方院校讲授信息融合课程,培养信息融合领域博士和博士后20余名,为我国信息融合学科发展和人才培养作出了突出贡献。

本书是继2012年《信息融合概念、方法和应用》一书出版后,作者的又一部信息融合专著,内容取自作者及其团队近30年信息融合理论和应用研究中的创新成果和应用案例。本书的第一个特点是理论上的创新性,如作者提出了第三代信息融合结构,明确了第三代信息融合结构的功能模式和人在战场感知观测、判断、决策与行动(OODA)环中的作用;对常速系统和变速系统的充分统计量估计和系统参数辨识公式,是作者尚未发表过的创新性研究成果;多站纯方位误差的贝叶斯点估计和区间估计方法在理论上尚未见诸于文献。本书的第二个特点是注重实践性和应用性,书中的主要内容取自作者及其团队的研究和应用成果,其主要内容均带有仿真验证或工程应用案例,这对应用工程师们显然具有重要参考价值。本书第三个特点是前瞻性,书中介绍了对弱信号和隐身目标的检测前跟踪(TBD)技术,融合图像质量评估方法,以及当前信息融合的6个挑战性问题,展示了信息融合研究和未来应用前景。本书第四个特点是可读性好,该书所描述的学

科沿革动态,以及信息融合中一些值得玩味的问题,结合应用进行的原理性描述,易于读者阅读理解。书中许多概念和观点是基于应用理解产生的,如判定级融合、共用作战图,以及对感知主体(人、传感器和计算机)的分析等,对于科技人员深入认识信息融合学科的概念具有指导意义。

本书的出版发行对提升信息融合学科的地位,促进国内外信息融合理论、方法与技术的发展,推动信息融合的应用将发挥重要作用。期望赵宗贵研究员及其所在团队为我国信息融合学科理论与应用发展做出新贡献。

中国工程院院士
中国信息融合分会主任

何友

2014年11月

前 言

自 1973 年建立信息融合概念以来,国际信息融合领域得到了飞速发展,特别是应用领域的扩展,现在已经发展到信息化作战和反恐领域应用,并扩展到医学、地质、航空、商贸、经济和金融等民用领域,特别在突发事件处置和态势感知与分析中,发挥了重要作用,取得大量应用成果。

本书作者及其所在信息融合团队在近 50 年的数据处理理论、方法与技术研究和工程应用实践中,深刻体会到信息融合不是一个独立的理论学科,而是跨越多学科理论,涵盖多门类技术、面向多领域应用的综合学科,试图建立一个独树一帜的学科理论和方法的思想是不可取的。

信息融合学科分为功能和方法两个层次。功能实现层次,如探测信号(原始信息)的目标检测(发现)、关联/相关、目标状态融合估计与识别、态势/场景估计等功能。所采用的技术和方法层次,如计算机技术、传感器技术、网络通信,以及数学模型和方法,其中数学方法包括统计估计方法(最小二乘、极大似然、极大后验)、不确定性处理方法(D-S 证据理论、模糊集理论、贝叶斯推理)、基于知识的人工智能方法(专家系统、模式识别、黑板模型)等。不难看出,信息融合的功能层次与各应用领域密切相关,而采用方法和技术则与相关学科和技术领域有关。这些方法和技术并不是信息融合学科特有的,而是从其他学科和技术领域的“拿来主义”的应用。信息融合学科并不是从理论上研究这些技术和方法,而是要解决它们在融合应用中所出现的技术难点。由于每个学科的发展都需要借鉴与其有关系(Contextual)的其他学科的原理、方法和技术,因此,信息融合这种跨越多学科的边缘特性使其能促进多学科融合发展进程。

由上述分析不难看出,信息融合学科产生的动因在于应用,其发展和创新也来自多领域应用,脱离应用的信息融合理论和方法没有生命力,脱离其他学科和技术领域支持的信息融合应用没有发展前途。应用是信息融合的灵魂,其他学科和技术领域的支持是信息融合学科发展的源泉。

本书是继 2012 年《信息融合概念、方法与应用》一书在国防工业出版社出版后,作者的又一部信息融合应用专著。与国内出版的信息融合领域著作不同,本书以应用为主旨,几乎所有章节都带有应用案例,涵盖了作者及其所在团队近 50 年在预先研究和工程应用中的信息融合技术创新成果,包括没有发表过的研究成果。本书中没有脱离应用的纯理论和方法描述,一些较详细的概念描述和公式推

导是相关创新应用成果,从方便读者理解和应用出发设置的。本书内容还包括作者指导博士和博士后发表的论文和毕业论文中具有创新性的信息融合理论、方法和(仿真)应用案例。

本书共分10章,第1章描述了作者提出的信息融合发展三个阶段和当前关注的8项研究内容,所介绍的第三代信息融化模型和作者创新的人在感知环中的4类融合模式,突出了基于应用的用户参与和主导作用;第2章向读者介绍了工程应用中的信息关联/相关参数度量和判定方法;第3章介绍了目标检测前跟踪(TBD)技术和三种实现方法及融合 TBD 技术设想,这是该领域的最新研究和应用成果;第4章介绍了贯穿作战全过程的识别概念和体系结构,突出了基于信息熵的信息一致性和差异性度量方法和应用识别案例;第5章创新建立了一阶和二阶运动目标跟踪的充分统计量模型,提出并证明了工程中应用的两种目标参数辨识方法;第6章给出了单平台和多平台(静止和运动平台)纯方位目标跟踪系统的可观测性条件;第7章介绍了纯方位跟踪平台的最优轨迹模型和求解方法;第8章系统描述了多站纯方位目标定位的多种方法,导出了多站纯方位贝叶斯定位的点估计和区间估计公式,为纯方位测量目标定位精度分析提供了有效的技术途径;第9章介绍了基于任务关注内容和人的视觉感知特征的图像融合方法的最新研究成果,包括融合图像质量指标、计算方法和红外弱小目标增强仿真案例;第10章向读者描述了用户对信息融合的主导作用,介绍了当前信息融合高级学派所提出的数据融合信息组模型和用户—融合模型,其关乎信息融合的未来发展方向。

本书第1、2、4、5章由赵宗贵研究员撰写,第3章由翟海涛、顾晶高工和赵玉丽、萨出拉工程师撰写,第6、7、8章由刁联旺博士撰写,第9章由王晓文博士和赵宗贵研究员撰写,第10章由李君灵博士撰写;张武博士为第6、7章提供了素材并参加撰写,许阳博士为第10章提供了素材并参加撰写;刁联旺、李君灵、许阳博士做了大量文字整理工作,赵宗贵研究员对所有章节进行了多次修改、补充,并最终定稿。吴蔚高工、郭志强工程师等参与了本书的录入工作。感谢潘建群、毛少杰、吴振锋、戚志刚、沈伟平、杨志海、王志刚等研究员和陈图强教授,他们在人员、资料和技术上对本书的撰写提供了支持。

本书出版发行旨在对国内外信息融合研究人员和工程技术人员有所启发和帮助,不足之处请读者指正。

赵宗贵

2014年10月 于南京

目 录

第 1 章 多源信息融合综述	1
1.1 信息融合学科发展简述	1
1.2 信息融合技术研究动态	2
1.3 信息融合模式	7
1.3.1 JDL 信息融合过程顶层模型	7
1.3.2 第三代信息融合模型	8
1.4 信息融合的优势	13
1.4.1 范围扩展优势	13
1.4.2 统计优势	14
1.4.3 互补优势	15
1.4.4 识别和判定优势	16
1.4.5 应用支持优势	16
1.5 信息融合面临的挑战性问题	17
1.6 信息融合中的奥秘	21
参考文献	24
第 2 章 信息关联/相关的概念与实现技术	28
2.1 感知领域中的信息关联/相关概念	28
2.2 信息关联/相关的内涵	29
2.2.1 信号级融合结构中的信息关联	29
2.2.2 点迹(数据和特征)级融合结构中的信息关联	30
2.2.3 判定级融合结构中的信息相关	31
2.2.4 关联与相关概念的差异	31
2.3 关联/相关中的不确定性	33
2.3.1 关联/相关中的不确定性概念	33
2.3.2 目标定位与跟踪中的不确定性表现	33
2.3.3 不确定性对关联/相关效果的影响	37
2.4 关联/相关度量参数及其计算	41

2.4.1	状态差异的直接度量计算	41
2.4.2	状态差异的综合度量	43
2.4.3	属性差异度量	45
2.4.4	差异信息识别应用原理	52
2.5	关联/相关的判定方法	53
2.5.1	基于状态偏差的关联/相关硬判定	53
2.5.2	基于一阶状态偏差似然函数的关联/相关判定	55
2.5.3	基于二阶状态偏差似然函数的相关判定	58
2.6	有源雷达与 ESM 传感器目标关联判定方法	60
2.6.1	问题描述	60
2.6.2	两假设单/双门限关联判定方法	62
2.6.3	三门限关联判定公式	64
2.7	关联/相关应用案例	65
2.7.1	基于状态偏差的点迹—航迹统计关联算法	65
2.7.2	考虑信号辐射角度的 ESM 探测与多雷达目标关联	68
2.7.3	基于 GAM 模型的 ESM 测量与雷达目标关联	71
	参考文献	75
第 3 章	目标检测前跟踪技术	76
3.1	检测前跟踪技术概述	76
3.1.1	检测后跟踪与检测前跟踪	76
3.1.2	检测前跟踪技术现状	78
3.1.3	检测前跟踪技术的典型方法	78
3.1.4	检测前跟踪技术的主要性能评价指标	80
3.2	DP-TBD 技术	81
3.2.1	动态规划(DP)	81
3.2.2	DP-TBD 技术原理	83
3.2.3	DP-TBD 设计实现方法	88
3.2.4	DP-TBD 检测性能分析	99
3.2.5	DP-TBD 检测性能和效果仿真	101
3.3	基于 Hough 变换的检测前跟踪技术	106
3.3.1	Hough 变换概念及其在信号检测中的作用	106
3.3.2	基于 Hough 变换的检测前跟踪方法	107
3.3.3	基于 Hough 变换检测前跟踪仿真案例	113
3.3.4	基于 Hough 变换的目标检测应用分析	119
3.4	基于粒子滤波的检测前跟踪	121

3.4.1	粒子滤波原理和实现方法	121
3.4.2	PF-TBD 目标与传感器观测模型	129
3.4.3	基于贝叶斯估计的 PF-TBD 算法	130
3.4.4	PF-TBD 仿真案例	135
3.5	多雷达融合检测前跟踪设想	142
3.5.1	多雷达检测前跟踪的优势	142
3.5.2	信号配准	143
3.5.3	多雷达检测前跟踪策略	147
3.6	小结	149
	参考文献	149
第4章	作战识别融合结构、方法与应用	153
4.1	作战识别的基本概念	153
4.2	作战识别的体系结构	155
4.2.1	基于 JDL 信息融合模型的 CID 功能描述	156
4.2.2	CID 的多假设关系结构	157
4.3	识别信息获取与度量	164
4.3.1	传感器目标信号获取过程	164
4.3.2	目标特征测量方程	165
4.3.3	目标识别信息的度量	166
4.4	识别信息的一致性与冲突性	167
4.4.1	基于 D-S 证据理论的识别信息的一致性	168
4.4.2	识别信息的冲突性	171
4.5	CID 融合中的不确定性变换	175
4.5.1	CID 融合中的不确定性概念	175
4.5.2	CID 中的不确定性融合方法	177
4.6	CID 融合方法	181
4.6.1	CID 融合方法分类描述	181
4.6.2	CID 融合识别流程	188
4.7	CID 融合识别实现案例	191
4.7.1	基于一维距离像的弹道目标识别方法	191
4.7.2	基于贝叶斯推理的目标识别	198
4.7.3	基于修正 D-S 证据合成的地面目标识别	201
4.7.4	基于多分类器的空中目标融合识别	205
4.7.5	基于对抗效果的防空威胁识别	211
4.7.6	空情识别专家系统	219

参考文献	224
第 5 章 目标跟踪优化算法与应用	227
5.1 引言	227
5.2 基于跟踪传感器测量的高阶运动目标状态估计	228
5.2.1 高阶运动目标状态数学模型与求解	228
5.2.2 一阶目标状态估计模型的求解	230
5.2.3 二阶目标状态估计模型的求解	231
5.3 充分统计量及其应用	234
5.3.1 充分统计量概念与判定	234
5.3.2 充分统计量在两假设判决中的应用	235
5.4 线性系统状态测量的充分统计量与二次最优滤波	237
5.4.1 线性系统状态测量的充分统计量	237
5.4.2 基于充分统计量的线性系统二次滤波流程	239
5.5 常变速系统的充分统计量与二次最优滤波	240
5.5.1 常变速系统状态测量的充分统计量	240
5.5.2 基于充分统计量的常变速系统的二次最优滤波	243
5.6 系统参数辨识的优化方法	244
5.6.1 问题的提出	244
5.6.2 基于测量样本的动态系统参数辨识方法	245
5.6.3 两个动态系统状态参数异同辨识方法	248
5.7 目标速度机动的最优判决	251
5.7.1 目标速度变化状态和测量模型	251
5.7.2 基于复合假设的速度机动判决	252
5.7.3 目标速度机动判定实现公式	253
5.7.4 应用案例	255
5.8 目标航向机动的最优判决	256
5.8.1 复合假设似然比判决问题	257
5.8.2 目标转弯的机动判决模型	258
5.8.3 目标转弯机动判决工程实现公式	259
5.8.4 目标转弯机动判决应用案例	263
参考文献	264
第 6 章 纯方位目标跟踪系统的可观测性分析	265
6.1 引言	265
6.2 线性系统可观测性的基本理论	266

6.2.1	离散线性系统可观测性	266
6.2.2	连续线性系统可观测性	267
6.3	单静止站纯方位跟踪系统的可观测性	269
6.3.1	问题描述	270
6.3.2	可观测性分析	271
6.3.3	部分可观测性	272
6.3.4	目标参数估计算法分析	274
6.3.5	仿真实例分析	274
6.4	单运动平台纯方位跟踪系统的可观测性分析	277
6.4.1	单平台纯方位跟踪系统可观测性问题的描述	277
6.4.2	单平台纯方位跟踪系统对常速运动目标的 可观测性分析	278
6.4.3	单平台纯方位跟踪系统对常加速运动目标的 可观测性分析	285
6.4.4	单平台纯方位跟踪对 N 阶运动目标的可观测性分析	287
6.5	多固定基站纯方位跟踪系统的可观测性	291
6.5.1	问题描述	291
6.5.2	可观测性判定	292
6.5.3	仿真实例分析	293
6.6	多运动平台纯方位跟踪系统的可观测性分析	294
6.6.1	多运动平台角度测量变换	294
6.6.2	基于多运动平台纯方位跟踪的目标伪线性测量方程	296
6.6.3	可观测性分析	297
6.7	小结	299
	参考文献	299
第7章	纯方位跟踪平台的最优运动轨迹	301
7.1	引言	301
7.2	基础理论概述	302
7.2.1	最优控制理论与应用	302
7.2.2	极大值原理	306
7.2.3	目标跟踪误差的 Cramer - Rao 下界	310
7.3	全局精度准则下纯方位跟踪平台最优运动轨迹	313
7.3.1	单平台纯方位目标跟踪问题描述	313
7.3.2	纯方位跟踪平台轨迹的约束方程	315
7.3.3	全局精度准则下跟踪平台最优轨迹模型	317

7.3.4	跟踪平台最优轨迹模型的数值解法	321
7.3.5	仿真实验及分析	323
7.4	距离精度准则下纯方位跟踪平台最优运动轨迹	326
7.4.1	基于距离精度的指标函数	326
7.4.2	距离精度准则下跟踪平台的最优轨迹模型	326
7.4.3	仿真实验及分析	327
7.5	小结	331
	参考文献	332
第8章	多站纯方位目标定位	334
8.1	多站纯方位三角定位法	334
8.1.1	二站纯方位三角定位法	334
8.1.2	三站纯方位三角定位法	335
8.1.3	多站纯方位三角定位法	341
8.2	多站纯方位最小二乘定位方法	341
8.2.1	多站纯方位线性最小二乘定位法	341
8.2.2	多站纯方位加权线性最小二乘定位法	342
8.2.3	多站纯方位非线性最小二乘定位方法	345
8.3	多站纯方位定位的贝叶斯方法	348
8.3.1	二站纯方位目标定位的贝叶斯估计方法	348
8.3.2	三站纯方位目标定位的贝叶斯估计方法	354
8.3.3	多站纯方位目标定位的贝叶斯估计方法	362
8.4	小结	366
	参考文献	366
第9章	基于视觉感知的图像融合及融合质量评价	368
9.1	常用融合图像质量定量评价指标	369
9.2	基于视觉感知的图像融合	372
9.2.1	源图像视觉显著图提取	373
9.2.2	基于视觉显著图的多尺度图像融合	374
9.2.3	实验结果与分析	376
9.3	基于结构相似度的融合图像质量评价	380
9.3.1	结构相似度基本概念和计算模型	380
9.3.2	视觉注意加权的融合图像结构相似度	383
9.3.3	实验结果与分析	385
9.4	基于区域信息相似度的融合图像质量评价	388