



分布式检测、跟踪及异类传感器 数据关联与引导研究

Study on Distributed Detection, Tracking,
and Heterogeneous Sensor Association and Cueing

王国宏

2



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS



分布检测、跟踪及异类传感器 数据关联与引导研究

Study on Distributed Decection, Traking,
and Heterogeneous Sensor Association and Cueing

王国宏



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

分布式检测、跟踪及异类传感器数据关联与引导研究 /

王国防. —北京:高等教育出版社,2006

ISBN 7-04-018409-5

I. 分... II. 王... III. ①信号系统-研究②数字信号-
信号处理-研究 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 141098 号

策划编辑	林琳	责任编辑	陈思宇	封面设计	张楠
责任绘图	朱静	版式设计	史新薇	责任校对	张颖
责任印制	韩刚				

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
			http://www.landaco.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
排 版	高等教育出版社照排中心		
印 刷	高等教育出版社印刷厂		
开 本	850×1168 1/32		
印 张	6.625	版 次	2006年1月第1版
字 数	160 000	印 次	2006年1月第1次印刷
插 页	2	定 价	14.60元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 18409-00

内 容 提 要

信息融合是高层次的共性关键技术,在军事和国民经济领域有着广泛的应用前景。本书研究了检测和位置层信息融合中的一些关键技术以及传感器管理问题,提出了多种新的便于工程实现的信息融合模型和算法。主要内容有:(1) 提出了模糊环境下的分布式检测融合思想,并在先验概率和代价函数均为梯形模糊数的情况下,基于贝叶斯(Bayesian)最小风险准则设计了四种最优分布式检测融合模型;(2) 提出了统计特性完全未知时的分布式检测融合算法,在各局部检测器仅能提供决策信息情况下,分别得到了代价函数为清晰值和模糊数时的分布式检测融合规则;(3) 解决了在 Bhattacharyya 距离最大意义下的决策空间划分问题;(4) 基于先验门限优化准则分别得到了 2D 和 3D 传感器在瑞利起伏环境下使跟踪性能最优且便于实时计算的信号检测门限,实现了检测与跟踪联合优化;(5) 研究了多种坐标系下的等样本容量异类传感器数据关联,得到了定量评估关联性能的解析表示式;(6) 对不等样本容量下的自备式异类传感器系统,分别基于统计理论和模糊综合分析理论研究了数据关联的多门限决策逻辑,推导了各门限的解析表示式和近似求解公式;(7) 分析了自备式异类传感器系统中被动传感器对主动传感器的静态引导性能,并提出了动态引导方法;(8) 提出了用模糊数排序准则实现去模糊的思想,并基于模糊数排序的 TDC 准则和 URI 准则提出了“TDC 去模糊法”和“URI 去模糊法”。

ABSTRACT

Multisensor data fusion is a common key technique and has great potentials in both military and civilian applications. This book studies the key techniques in detection, tracking and sensor management, and presents several kinds of practical methods and algorithms in multisensor data fusion. The main results can be summarized as follows: (1) In the sense of minimum Bayesian risk criterion, four kinds of optimal distributed detection fusion schemes are designed for fuzzy priori probabilities and fuzzy risk functions with trapezoidal membership degree functions. (2) The distributed detection fusion with unknown statistics is proposed for crisp risks and fuzzy risks, respectively. (3) The local decision space partitioning is solved in the sense of maximum Bhattacharyya distance criterion. (4) Based on the priori threshold optimization criterion, the joint optimization of both detection and tracking in clutter is obtained for 2D and 3D sensors, respectively, and the detection thresholds which optimize the tracking performance in Rayleigh fluctuating background are derived for 2D and 3D sensors, respectively. (5) The active-and-passive sensor data association in the co-located multisensor system is studied in various coordinates, and the analytic expressions for performance evaluation are also obtained. (6) Based on the statistical theory and the theory of fuzzy synthetic function, the autonomous multi-threshold active-and-passive-sensor-association methods with unequal numbers of measurements are proposed, and the analytic and the approximate solutions to the decision thresholds are derived. (7) The static cueing problem in autonomous heterogeneous sensor

systems is discussed and the dynamic cueing schemes are also presented. (8) The idea of using fuzzy ordering criterion to defuzzify the fuzzy numbers into crisp numbers is proposed, and two new defuzzifying methods, namely "TDC defuzzifying method" and "URI defuzzifying method", are derived based on TDC and URI fuzzy ordering criteria, respectively.

前 言

随着计算机技术、通信技术和微电子技术的发展以及现代战争的复杂性日益提高,各种面向复杂应用背景的多传感器数据系统大量出现,迫使人们要对多种传感器和不同的信息源进行更有效的集成,以提高数据处理的自动化程度。信息融合作为新近崛起的一个前沿性的、前景十分广阔的研究领域,广泛应用于多传感器信息处理过程,它综合利用了多种类型传感器的不同特点,可以多方位全面获取目标不同属性信息,提高了 C3I 系统在时间上和空间上的覆盖范围,提高了情报信息的使用效率并增加了情报信息的可信度,改进了对目标的检测和识别能力,可对战场态势和敌方威胁作出实时评估。由于多传感器信息融合能带来巨大的效益,因而得到了世界各国的高度重视,1988 年,美国国防部把信息融合列为重点研究开发的 20 项关键技术中最优先发展的 A 类。

然而,由于在多传感器系统中各传感器提供信息的多样性、互补性、冗余性,信息数量的海量性,信息包含的不确定性,信息关联的复杂性,以及对信息处理要求的实时性,使得信息融合系统还面临许多有待克服的关键技术,如数据关联、传感器管理、态势评估和威胁估计、高速并行检索和推理机制、信息融合系统的工程化设计以及对信息融合系统性能的度量和评估等。本书主要研究了检

测和位置级以及传感器管理中的信息融合关键技术,包括分布式检测融合、检测与跟踪的联合优化、异类传感器的数据关联以及传感器引导等,提出了多种新的便于工程实现的信息融合模型和算法,主要包括:(1)提出了模糊环境下的分布式检测融合思想,并在先验概率和代价函数均为梯形模糊数的情况下,基于贝叶斯最小风险准则设计了四种最优分布式检测融合模型;(2)提出了统计特性完全未知时的分布式检测融合算法,在各局部检测器仅提供决策信息情况下,分别得到了代价函数为清晰值和模糊数时的分布式检测融合规则;(3)解决了在 Bhattacharyya 距离最大意义下的决策空间划分问题;(4)基于先验门限优化准则分别得到了 2D 和 3D 传感器在瑞利起伏环境下使跟踪性能最优且便于实时计算的信号检测门限,实现了检测与跟踪联合优化;(5)研究了多种坐标系下的等样本容量异类传感器数据关联,得到了定量评估关联性能的解析表示式;(6)对不等样本容量下的自备式异类传感器系统,分别基于统计理论和模糊综合分析理论研究了数据关联的多门限决策逻辑,推导了各门限的解析表示式和近似求解公式;(7)分析了自备式异类传感器系统中被动传感器对主动传感器的静态引导性能,并提出了动态引导方法;(8)提出了用模糊数排序准则实现去模糊的思想,并基于模糊数排序的 TDC 准则和 URI 准则提出了“TDC 去模糊法”和“URI 去模糊法”。

本书的内容来自作者在北京航空航天大学攻读博士学位期间所做的研究工作,研究工作得到了北京航空航天大学“首届优秀博士学位论文研究奖学金”和军队院校“2110 工程”专著建设基金的资助。在本书出版之际,作者要感谢对此书出版做出贡献的人。首先要特别感谢的是毛士艺教授和何友教授,是他们将作者引入信息融合研究领域,且该书中的许多研究结果也得益于他们的启迪。其次,要衷心感谢国内著名电子学专家焦李成教授、彭应宁教授、陆大铨教授等所给予过的指导和鼓励。最后,要感谢我的妻子

李学君女士在成书过程中所给予的理解与全力支持。同时,还要感谢林琳老师所给予的帮助。

作 者

2005 年 11 月

目 录

第 1 章	绪论	1
§ 1.1	引言	1
§ 1.2	信息融合中的一些关键技术	6
§ 1.3	本书的主要内容及安排	11
第 2 章	分布式检测融合研究	14
§ 2.1	先验概率和代价函数均模糊时的分布式检测融合	16
§ 2.2	统计特性完全未知时的分布式检测融合	32
§ 2.3	分布式检测融合系统中的决策空间优化划分	37
§ 2.4	本章小结	53
第 3 章	检测与跟踪的联合优化	55
§ 3.1	2D 传感器检测与跟踪的联合优化	56
§ 3.2	3D 传感器检测与跟踪的联合优化	61
§ 3.3	本章小结	67
第 4 章	等样本容量下的异类传感器数据关联	68
§ 4.1	利用角度信息的主被动传感器数据关联	70
§ 4.2	利用位置和速度信息的主被动传感器数据关联	74
§ 4.3	利用角度、角度变化率和 ITG 信息的主被动传感器数据 关联	86
§ 4.4	主被动传感器异地配置情况下的数据关联	98
§ 4.5	本章小结	103
第 5 章	不等样本容量下的异类传感器数据关联	106

§ 5.1 基于统计理论的雷达与 ESM 数据关联	108
§ 5.2 基于模糊综合分析的雷达与 ESM 数据关联方法(一)	124
§ 5.3 基于模糊综合分析的雷达与 ESM 数据关联方法(二)	141
§ 5.4 本章小结	145
第 6 章 被动传感器对主动传感器的引导	147
§ 6.1 ESM 对 2D 雷达的引导	148
§ 6.2 ESM 对 3D 雷达的引导	157
§ 6.3 IRST 对 3D 雷达的引导	160
§ 6.4 本章小结	166
第 7 章 结论	168
§ 7.1 本书取得的主要结果	168
§ 7.2 尚待研究的问题	171
附录 A TDC 和 URI 去模糊方法	173
附录 B 卡方分布的近似分位数	175
参考文献	177

第 1 章 绪 论

§ 1.1 引 言

§ 1.1.1 信息融合的定义及意义

随着科学技术的飞速发展和武器性能的提高,现代战争范围已扩展到陆、海、空、天、电磁五维空间中,为了获得最佳的作战效果,在新一代作战系统中广泛采用了多传感器系统。在多传感器系统中,由于各传感器提供信息的多样性、互补性、冗余性,信息数量的海量性,信息包含的不确定性,信息关联的复杂性,以及对信息处理要求的实时性,都远远超出了人脑的信息综合处理能力,因而自 20 世纪 70 年代起,一门新兴的学科——多传感器信息融合迅速地发展起来,并得到了广泛的研究和应用^[1~230]。多传感器信息融合有多种定义方式,对军事多传感器信息融合,文献[1]给出的定义是:“对来自多源的信息和数据进行检测、关联、估计和综合等多级多方面的处理,以得到精确的状态和身份估计,以及完整、及时的态势评估和威胁估计”。信息融合的定义表明:信息融合是

在多个级别或层次上对多源信息处理的过程,每个级别或层次反映了对原始信息不同程度的抽象,包括在较低层次上对状态和身份的估计,以及在较高层次上对态势和威胁的估计。在现代战争中采用多传感器信息融合,可以带来许多特殊效益,主要表现在以下方面^[1~15]:

- 扩大了空间覆盖范围。
- 扩展了时间覆盖范围。
- 提高了系统的生存能力。
- 提高了系统的可靠性。
- 减少了信息的不确定性,提高了信息的可信度。
- 改善了空间分辨力。
- 增加了信息维数。
- 增加了电磁频谱的覆盖范围,可在“全景”电磁环境中执行有源和无源探测任务,等等。

§ 1.1.2 信息融合的国内外现状

由于多传感器信息融合能带来巨大的效益,因而得到了世界各国、特别是美国的高度重视,1988年,美国国防部把信息融合列为重点研究开发的20项关键技术之一,并且列为最优先发展的A类(A类共有6项,不分先后次序),美国国防部下设的JDL委员会专门成立了信息融合专家组来组织和指导有关信息融合的研究,美国等军事强国目前已有上百个军事多传感器信息融合系统投入实际应用,如全源分析系统(ASAS)、自动多传感器部队识别系统(AMSVI)、海洋监视信息融合专家系统(OSIF)、海军指挥控制系统(NCCS)和舰艇编队多传感器信息融合系统(IKBS)等^[1,2,5,6]。在举世瞩目的海湾战争、科索沃战争以及北约对南联盟的战争中,北约和美国的实时军事多传感器信息融合系统对取得战争的胜利发挥了重要的作用。在学术方面,从1987年起,美国三军每年召开一次信息融合会议,SPIE每年出版与信息融合有

关的几部论文集。1998 年成立了国际信息融合学会 (ISIF), 每年举行一次信息融合国际学术会议, 有关信息融合方面的论文也大量出现在很多刊物上, 并出版了一定数量的专著, 内容涉及分布式检测融合^[16~45]、目标跟踪^[46~114]、双/多基地雷达系统^[115]、航迹关联^[116~118]、微弱信号的检测与跟踪^[119~124]、检测与跟踪的联合优化^[125~130]、被动跟踪^[131~150]、异类传感器数据融合^[151~184]、目标识别融合^[185~203]、传感器管理^[204~224]、态势评估与威胁估计^[224~230]等。

与美国相比, 我国在信息融合领域的研究起步较晚。海湾战争结束以后, 一大批院校、研究所的许多学者对信息融合的理论、技术与应用进行了深入研究, 在检测、跟踪、目标识别、态势评估与威胁估计等方面取得了许多理论研究成果, 但在工程应用方面仍有较大的差距。信息融合作为高层次的共性关键技术, 在已得到深入研究的基础上, 将在关键技术及向工程化、实用化发展方面取得重要突破, 新一代防空雷达网、舰载电子系统、机载电子系统以及军事 C³I 系统也正向多传感器信息融合方向发展。

§ 1.1.3 信息融合的种类

根据传感器种类和传感器平台的不同, 常见的信息融合分类方法有两种。

第一种分类方法依据传感器的种类将信息融合系统分为同类传感器的信息融合和异类传感器的信息融合两类^[1,6]。由于同类传感器可以提供相同性质、相同维数的信息, 因而对其的研究相对比较容易, 典型的同类传感器信息融合系统有集中式多雷达系统、分布式多雷达系统等。由于在异类传感器系统中, 各传感器提供信息的层次、维数存在差异, 使异类传感器信息融合面临很大的不确定性, 典型的异类传感器信息融合系统有雷达与 ESM 信息融合系统、雷达与红外信息融合系统等。

第二种分类方法也将多传感器信息融合系统分为两类, 即局

部或自备式信息融合系统和全局或区域式信息融合系统^[5,6]。局部或自备式信息融合系统收集来自单个平台上的多传感器数据,它实际上是单平台多传感器信息融合,可以形成有关诸如舰艇或战斗机的信息显示。全局或区域式信息融合系统融合来自空间和时间上各不相同的多个平台上的各传感器数据,它实际上是多平台多传感器的信息融合。

§ 1.1.4 信息融合的级别

为了推动多传感器信息融合的深入发展,以及加强信息融合界的交流,许多学者和组织对多传感器信息融合的功能模型进行了卓有成效的研究,根据对输入信息的抽象或融合输出结果的不同,对信息融合模型的分级有多种不同的方法。

第一种广为采用的信息融合模型分级方法依据输入信息的抽象层次将信息融合分为三级^[1,5,6]:

- 第一级——数据级(或称像素级)融合。它是直接在采集到的原始数据层上进行的融合,是最低层次上的融合。它的主要优点是能保持尽可能多的现场数据,提供其他层次所不能提供的信息,主要缺点是数据通信容量大、处理代价高、处理时间长、实时性差、抗干扰能力差。像素级融合主要用于多源图像融合、图像分析和理解等。

- 第二级——特征级融合。它是先对来自传感器的原始数据进行特征提取,然后再对特征进行融合,它是中间层次上的融合。特征级融合的最大优点在于对原始数据进行了一定的压缩,有利于实时处理,一般情况下,融合结果能给出决策分析所需要的特征信息。在信息融合领域,特征级融合主要用于多传感器目标跟踪和目标识别领域。

- 第三级——决策级融合。它是一种高层次的融合,输入到融合中心的是各局部传感器依据一定准则得出的决策信息,例如目标是否存在或某一事件是否发生的决策信息。决策级信息融合

的优点是对信息传输带宽的要求比较低、通信容量小、抗干扰能力比较强、融合中心处理代价低,缺点是预处理代价高、信息损失比较大。决策级融合通常用于分布式检测融合、目标识别的决策融合等。

第二种分级方法是美国 JDL/DFS 根据信息融合输出结果所进行的分类,它也将信息融合分为三级^[1]:

- 第一级——位置估计与目标身份识别;
- 第二级——态势评估;
- 第三级——威胁估计。

JDL/DFS 提出的上述军事多传感器信息融合分级方法为信息融合技术的研究提供了一种较为通用的框架,得到了广泛的认可和采用。

为了进一步使信息融合分类模型对实际研究具有指导性,文献[14]在 JDL/DFS 分级模型的基础上提出了信息融合的第三种分级模型,它按信息抽象的不同层次将信息融合进一步分为五级,包括了从检测到威胁判断的完整过程:

- 第一级——检测级融合;
- 第二级——位置级融合;
- 第三级——目标识别级融合;
- 第四级——态势评估;
- 第五级——威胁估计。

在对这些模型的研究中,由于态势评估、威胁估计与特定的国际政治、经济、军事形势、指挥员和领导人的心理素质、行为意图、知识结构等有密切的联系,因而具有很大的不确定性^[9],这方面的研究还有很大的差距,需要综合采用多方面的知识和途径、特别是人工智能的方法和非线性科学理论;在对目标识别级融合的研究中,由于目标识别包含了比位置级融合更大的不确定性,因而目前还未达到实用的程度;在对检测级和位置级的研究中,虽然已有许多研究成果,但仍有许多与实际应用密切相关的问题尚未得到解决。

§ 1.2 信息融合中的一些关键技术

信息融合中有许多有待解决的关键技术,包括数据关联、信息融合用的数据库和知识库、高速并行检索和推理机制、传感器管理、态势关联和评估、威胁估计、信息融合系统的工程化设计以及对信息融合系统性能的度量和评估等。本节主要结合本书后续内容对部分关键技术予以介绍。

§ 1.2.1 分布式检测融合

分布式检测融合用于判断目标是否存在,它属于检测级融合的范畴,但当各局部检测器向融合中心提供的是局部检验统计量时,它属于特征级融合,当各局部检测器提供的是关于目标是否存在的局部决策信息时,分布式检测融合又属于决策级融合的范畴。多传感器分布式检测融合由于具有高的可靠性、生存能力和短的决策时间而引起人们的广泛关注,得到了广泛的研究^[16~45],在双/多基地雷达系统和反隐身方面具有重要的应用。常见的分布式检测融合结构包括并行结构^[42,43]、串行结构^[44]和树状结构^[45]等。

在对分布式检测融合的研究中,Tenney 和 Sandel^[17]首先研究了分布式检测问题;Sadjadi^[18]则把文献[17]的工作推广到有 n 个检测器和 m 个假设的场合;在先验概率未知时,Thomopolous 等^[19]基于奈曼-皮尔逊准则(简称 N-P 准则)研究了二元假设系统中的决策融合问题,给出了检测器级和系统融合级的决策规则;而在先验概率和代价函数确切已知时,文献[20~25]基于贝叶斯最小风险准则对分布式检测系统进行了研究;在各检测器的检测概率是时变的情况下,文献[26, 27]提出了用于分布式检测融合的自适应学习算法;文献[28, 37]研究了分布式检测的次优融合方法;文献[33, 38]研究了把神经网络用于分布式决策融合的问题。虽然已对分布式检测融合进行了深入研究,但还有许多与实