

信息融合理论的基本方法与进展(II)

潘 泉, 王增福, 梁 彦, 杨 峰, 刘准钊

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 在军事技术、自动化、智能化等需求的牵引下, 信息融合受到学术界和工业界的广泛关注, 近年来取得了诸多新的理论与方法进展, 因此有必要予以综述. 本文首先分析了信息融合面临的问题与挑战, 包括系统融合框架、信息不确定、多模态、高冲突、强相关、网络化以及非线性等; 并以此为分类依据, 在信息融合模型与系统设计、不确定信息融合、多模态信息融合、高冲突信息融合、相关信息融合及网络化信息融合等方面对近10年来的进展进行了综述. 同时, 探讨了信息一体化融合处理、以人为中心的信息融合、信息获取与融合联合优化、复杂多传感器信息融合系统体系结构设计、信息融合系统仿真与性能评估、借助更多的数学理论方法等未来几个可能的研究发展方向.

关键词: 信息融合; 数据融合; 多传感器系统; 联合指挥实验室(JDL)模型

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Basic methods and progress of information fusion (II)

PAN Quan, WANG Zeng-fu, LIANG Yan, YANG Feng, LIU Zhun-ga

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

Abstract: Because of the demands from military technology, automation and intelligence, information fusion has been broadly concerned in academia and industry. Since a number of methods and algorithms have been emerging in recent years, it is necessary to analyze and review their recent developments. We start by analyzing the inherent problems and challenges in information fusion, including fusion architecture, uncertainty of information, multimodal information, conflict information, correlative information, networked information and nonlinearity of information; and then, we review various methods and algorithms developed in the past ten years for implementing the fusion of the above types of information. In addition, several future directions of research are highlighted and described, including the joint processing for information, human-centered information fusion, joint optimization for information gathering and fusion, architecture design for complex multisensor information fusion systems, simulation and performance evaluation for information fusion and the application of more mathematical theories.

Key words: information fusion; data fusion; multisensor system; Joint Director Laboratory (JDL) model

1 引言(Introduction)

信息融合在生物世界中广泛存在, 工程领域中的信息融合本质上是用数学和机器对生物体信息融合功能的模仿和抽象. 信息融合是恒古至今生物体所固有的一种本质特征, 是生物体环境感知和行为行动的基础, 其过程是生物体生存、进化和发展的基本能力要素^[1]. 为了满足军事C3I(command, control, communications and intelligence)系统建设的需求, 20世纪70年代初首先在军事领域产生了“数据融合”概念, 即把多种传感器获得的数据进行“融合处理”, 以得到比单一传感器更加准确和有用的信息. 之后, 基于多源信息综合意义的“融合”一词出现于各类技术文献中. 逐渐地这一概念不断扩展, 被处理的对象不仅包含多平台、多传感器、多源信

号和数据, 还包括符号、甚至知识和经验等多种信息. 目前信息融合的一般定义为: 利用计算机技术, 对按时序获得的若干传感器(含软传感)的观测信息在一定准则下加以自动分析、优化综合以完成所需的决策和估计任务而进行的信息处理过程. 从定义中看到, 各种传感器是信息融合的基础, 多源信息是信息融合加工的对象, 协调优化和综合处理是信息融合的核心.

信息融合是一种形式框架, 其过程是用数学方法和技术工具综合不同源信息, 目的是得到高品质的有用信息. 与单一信源独立处理相比, 信息融合的优势包括: 提高可探测性和可信度, 扩大时空感知范围; 降低推理模糊程度, 改进探测精度等性能; 增加目标特征维数, 提高空间分辨率; 增强系统容错能力

和自适应性,从而提高全系统性能.信息融合的研究对象和应用领域不仅已深入到国防、工业、农业、交通等传统行业,还拓展到气象预报、地球科学、社会、经济等新兴交叉行业,“信息融合”作为一种共识的概念逐渐被接受.具有信息融合功能的系统广泛服务于军事、遥感、交通、医疗、农业、经济等关系到国家安全和国计民生的众多领域中.

作者在文献[2]中对信息融合在军事和民用领域的应用分布情况、所采用的各种不同数学工具和研究方法所占的比例、融合系统建模方法、算法、发展动向以及存在的问题和解决思路等方面给出了系统性综述.近10年来,信息融合研究取得了一些关键性突破,原有理论发展的同时出现了一些新的理论,信息融合的应用被大大拓展.本文在文献[2]的基础上,首先提出了信息融合所面临的挑战与问题,而后针对这些挑战和问题总结了近10年来所取得的重要理论和方法进展,包括信息融合模型与系统设计、不确定信息融合、多模态信息融合、高冲突信息融合、相关信息融合及网络化信息融合;并给出了未来的研究方向,包括信息一体化融合处理、以人为中心的信息融合、信息获取与融合联合优化、复杂多传感器信息融合系统体系结构设计、信息融合系统仿真与性能评估以及借助更多的数学理论方法等.尽管信息融合技术已经成功应用于多个领域,但是随着需求的变化与提升,仍然存在大量问题有待解决.本文将信息融合的研究现状介绍给信息科学工作者,希望进一步推动并促进我国在这一领域的研究工作.

本文第2部分讨论了信息融合面临的挑战与问题.接下来给出了信息融合的最新理论与方法进展.文章最后讨论了信息融合的几个未来研究方向.

2 信息融合面临的问题与挑战(Problems and challenges of information fusion)

现代感知环境的日趋复杂多变、感知对象的日益丰富、感知手段与能力的显著提升、用户对感知要求的日益提高,使得信息融合成为一项非常具有挑战性的任务,呈现出不确定、多模态、高冲突、强相关、网络化等诸多特性.归纳如下:

1) 融合框架:随着越来越多的信源加入,许多信息融合系统成为复杂巨系统,表现为信源数量大、种类多,并且它们之间的关系以及层次结构复杂.因此需要系统建模,系统集成并整体优化;

2) 不确定:传感器的观测总会受到噪声影响,使得其不准确或者产生虚警等;同时,杂波、多目标的存在使得量测来源具有不确定性.信息融合算法需要利用冗余有效降低不确定性;

3) 多模态:在多传感器系统中,针对同一待观测现象,可能存在着声音、视频、文字等多模态量测,

系统须具备融合这些量测的能力,给出一致理解和高品质态势;

4) 高冲突^[3]:当多个专家对同一现象给出不同意见时,信息就产生了冲突.在基于证据置信推理和Dempster组合规则的融合算法中,融合带有冲突的数据很容易产生与直觉不一致的结果.因此,融合算法需要小心处理高冲突数据;

5) 强相关^[3]:该问题在分布式融合中尤为重要和普遍,例如,在无线传感器网络中,一些传感器节点很可能受相同噪声的影响,产生有偏量测.另外,在估计过程中使用近似滤波器也会造成局部节点估计之间相关.如果不考虑数据相关性,会产生有偏估计;

6) 网络化:在大尺度分布传感器网络中,会产生多采样率、网络延迟、丢包、错序、量化失真等现象.好的融合算法需要有能力处理这些问题,尤其是在精确、实时应用中,从而避免性能下降;

7) 非线性:目标运动建模与量测建模坐标系的非线性关系引起运动建模的非线性,分布式观测的信息在空间变换配准中引起非线性等.对非线性的处理不当会损失有用信息.

其他问题还包括高维数、大尺度等,不再赘述.

3 信息融合理论与算法(Methods and algorithms of information fusion)

信息融合的数学本质是多元变量的估计与决策,有时甚至需要联合优化估计与决策.本节以第2节提出的信息融合面临的问题与挑战为分类依据,总结了信息融合领域目前所取得的主要理论和方法进展.该分类方法有利于根据实际系统所面临的问题来选择合适的信息融合技术.诚然,实际系统可能会面临多个问题的耦合,而这些耦合也正在成为新的研究方向(见第4节).另外,《Information Fusion》杂志从2005年起,在方法和应用两个方面共出版了26期专刊,其中涉及信息融合体系结构、理论、方法的包括:基于逻辑的方法、基于进化算法的方法、并行学习和融合、集成方法、高层信息融合、仿生方法、基于Agent的信息融合等.国内信息融合领域著名学者韩崇昭^[1]、何友^[4-6]、敬忠良^[7]、潘泉^[8-12]等人近年来也出版了多部关于信息融合的专著.有兴趣的读者可参考相应文献.

3.1 信息融合模型与系统设计(Information fusion models and system design)

多年来,人们提出了大量的信息融合模型,包括:JDL(Joint Directors of Laboratories)模型、Dasarathy模型、Boyd控制环模型、瀑布模型、混合模型等,并不断对模型进行细化,以期更加符合实际应用.其中,JDL模型最受关注,其显著特征是边应用边改进.原

始JDL模型将信息融合分为4级: 目标优化、定位和识别(第1级); 态势评估(第2级), 根据第1级处理提供的信息构建态势图; 威胁估计(第3级), 根据可能采取的行动来解释第2级处理结果, 并分析采取各种行动的优缺点; 过程优化(第4级), 监控系统性能, 识别增加潜在的信息源, 最优部署传感器. 其他辅助支持系统包括数据管理系统和人机界面等. 利用JDL模型开发的实际应用系统包括美军LOCE(有限作战能力)与LENSCE(战术陆军与空军自动情报保障)、全源信息分析系统、空军敌态势关联, 以及汽车多传感器安全系统^[13]等.

Steinberg等人^[14]为了突出智能传感器在信息融合中的重要性, 首先对原始JDL模型进行了扩展, 增加了第0级, 用于处理基于像素、信号级的数据关联和图像处理、信号处理、时空配准等, 如检测前融合. Hall^[15]、Blasch^[16]等人将人机交互作为JDL模型的第5级, 用于控制信息融合相关的过程, 以优化信息融合系统与人/用户之间的交互. 典型功能包括先进的显示、搜索引擎、认知辅助、协作工具等. 除了利用传统的地理信息显示、数据显示、输入命令处理等人机接口, 还利用声音、触摸等非传统接口. 扩展后的JDL信息融合模型如图1所示. 虽然是否将人机交互正式作为第5级还存在一定争议, 但是随着信息技术的快速发展以及人在信息融合回路中的重要性日益增加, 人机交互将成为信息融合领域中的研究方向之一. 俄亥俄州立大学与Potomac Fusion公司共同建立了基于扩展后JDL模型的融合开发框架(fusion exploitation framework, FEF), 用于测试软硬信息融合算法^[17].

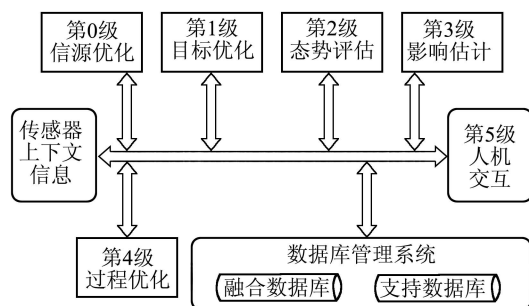


图 1 信息融合模型^[18]

Fig. 1 JDL information fusion model^[18]

限于篇幅, 关于实现信息融合系统的系统工程化方法以及COTS(商用货架产品)软件请读者参考文献[19].

3.2 不确定信息融合(Uncertain information fusion)

信息的不确定包含值不确定和属性不确定两个方面. 值代表着信息所代表状态的多少, 属性表征信息的来源. 产生值不确定的原因主要有: 传感器

有限精度以及复杂多变环境引起的信息观测误差, 非线性、多平台自定位、授时同步不精确引起的信息时空变换误差等. 产生属性不确定的原因主要有: 信息观测本身局限性引起的信息多义性, 目标运动、意图、环境等方面变化引起的信息随机性变化等. 一般来讲, 通过估计来确定状态的值, 通过系统辨识、分类与识别来确定属性. 鉴于线性高斯条件下的估计融合理论已经成熟, 因此本文重点综述非线性非高斯条件下的滤波估计进展, 同时结合来源不确定下的信息融合问题, 综述近年来广泛研究的随机集理论.

非线性非高斯滤波. 针对非线性非高斯条件下的滤波问题, 近年来人们提出了大量次优的近似方法. 这些次优滤波器可以分为4大类^[20]: 解析近似、数值逼近、高斯和滤波以及采样近似. 解析近似方法包括扩展卡尔曼滤波器(EKF)、高阶EKF、迭代EKF等, 其主要特征是通过线性化逼近状态和量测方程. 数值方法也称为基于网格的逼近方法, 通过沿离散变量求和代替积分. 为了得到连续状态空间比较好的逼近, 网格必须足够密集. 随着状态空间维数的增加, 计算量也急剧增加. 高斯和逼近(Gaussian sum approximation)通过选择适当的高斯混合个数, 得到要求的逼近精度, 当后验分布是多峰值时, 这种逼近是很合理的, 然而很难在线计算各个高斯分布权重, 并且混合个数可能随时间呈指数增加. 由于近似非线性函数的概率密度分布比近似非线性函数更容易, 使用采样方法近似非线性分布来解决非线性问题的途径在得到广泛关注. UKF^[21]、高斯厄米特滤波器(GHF)^[20]、中心差分滤波器(CDF)^[22]、分离差分滤波器(DDF)^[22-23]、粒子滤波器(particle filter, PF)及其各种变形等就属于此类非线性滤波器. 其共同点是对状态先验分布抽取样本, 通过对抽样点的独立处理和加权综合, 得到状态估计. 本文将此类采样近似滤波器称之为采样型非线性滤波器. 采样型非线性滤波器就是通过采样近似非线性函数的概率密度分布来处理非线性问题的滤波器.

由于PF在理论上能够近似任意的概率密度, 适用于强非线性非高斯问题, 在采样型非线性滤波器中最受关注. PF利用状态空间的一组带权随机样本(粒子)逼近状态变量的后验概率分布, 每个样本代表系统的一个可能状态, 是基于蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)仿真的方法. 在实现过程中, PF一般包括序贯重要性采样和重采样两个步骤. 由于存在退化问题, 在研究和发展过程中, PF算法得到许多改进, 这些改进主要围绕增加粒子的多样性和重要性分布函数的选择, 包括马尔可夫链蒙特卡罗(MCMC)改进策略、Unscented粒子滤波器、辅助粒子滤波器(APF)、Rao-Blackwellised粒子滤波器(RBPF)、正则化粒子

滤波器(RPF)等^[24].

高维状态空间时计算量过大是PF在应用过程中面临的一个难题. 针对该问题, MCMC算法是一种可选择的替代方法, 其基本思想是通过构造马尔可夫链产生来自目标分布的样本. 当迭代次数充分大时, 马尔可夫链趋于一个平稳密度. MCMC有许多方法, 常用的有Metropolis-Hastings算法^[25]和Gibbs采样器^[26]. Metropolis-Hastings算法对样本的初始化和切换分布较为敏感, 如果选择不当, 则收敛过程缓慢. 而Gibbs采样器可以作为Metropolis-Hastings的一个特例. 另外一个方法是Rao-Blackwellised化^[27], 也称为边缘化PF(marginalized particle filters), 其思想是对某些状态空间模型, 状态向量的一部分在其余部分条件下的后验分布可以用解析方法求得, 例如某些状态是条件线性高斯模型, 可用卡尔曼滤波器得到条件后验分布, 对另外部分状态用PF, 从而得到一种混合滤波器, 降低了PF采样空间的维数, 其应用及复杂性分析可分别参考文献[28–29]. 另外, 最近一些学者将粒子滤波用于解决扩展多目标跟踪问题^[18–21, 30–31].

随机集理论: Kendall^[32]在20世纪70年代提出了随机集理论. Goodman等人^[33]的工作展示了随机集理论的统一能力. Mahler^[34]在促进随机集理论作为统一的融合框架方面做出了重要贡献, 为构建信息融合问题的统一框架提供了可能. 文献[35]介绍了基于随机集理论的多源信息统一表示与建模方法. 目前, 随机集理论的不断完善及其在越来越多领域中的成功应用, 使其受到广泛关注. 在随机集理论中, 目标、量测被建模为一个有限大小的随机集, 进而建立先验分布和似然函数. 随机集具有泛化建模能力, 能够对目标消失/出现、扩展/无法分辨目标和系统动态性相关的现象, 以及检测丢失、虚警等与量测相关的现象进行建模. 随机集作为将贝叶斯滤波器从单目标扩展到多目标的理想框架从而使大量研究都集中在如何将随机集理论应用到多目标跟踪中. 其中假设多目标的一阶矩是概率假设密度(PHD), 在此基础上构建了PHD滤波器. 同时也有高阶扩展(CPHD)滤波器. 然而, 这两类滤波器均没有闭合形式, 需要利用高斯混合和序贯MC等方法进行近似计算. 关于(C)PHD滤波器的回顾, 建议读者参考文献[36]. PHD滤波器(族)的一个主要优点是回避了数据关联问题, 但这同样意味着保持航迹连续成为一项具有挑战性的任务.

随机集理论能够有效的应用于目标检测、跟踪、辨识、传感器管理、软/硬信息融合等与信息融合相关的任务中. 然而, 仍然需要通过大量更复杂的测试来验证其作为统一框架的性能. 随机集理论有待解决和完善的问题包括^[37]: 随机集理论的近似实

现, 随机集理论与粒子滤波的关系, 信息不确定性的随机集表示, 系统不确定性的随机集表示, 随机集合理论与条件/关系事件代数的关系、随机集理论的应用等.

对于不确定信息的融合方法还包括证据推理、模糊集理论、可能性理论以及粗糙集理论等, 不再赘述.

3.3 多模态信息融合(Multi-modal information fusion)

多模态信息融合也称为异类信息融合. 在一个多传感器系统中, 可能会包含电磁、热、文本、音频、视频、射频、网络资源等多种异类数据. 与同类数据相比, 异类数据提供的信息具有更强的多样性和互补性. 融合多种异类不完整信息, 能够形成对感知场景或态势的一致理解. 多模态信息之间可能是相关的, 同时由于传感器的采样率不同, 可能是异步的, 相关和异步多模态信息的融合分别在强相关信息融合以及网络化信息融合中论述.

按照信息抽象的功能层次, 将多模态信息融合分为特征级多模态信息融合与决策级多模态信息融合^[38]. 一些混合多模态信息融合方法虽然能够同时利用特征级和决策级融合的优点, 但在单个融合模块中仍然采用了特征级或决策级多模态信息融合. 特征级融合的输入是每个传感器获得的特征, 如视觉特征、文字特征、音频特征、运动特征、元数据特征等. 其优点是在早期阶段利用不同模态信息多特征之间的相关性, 损失的信息较少. 但是其缺点也非常明显: 其一, 由于需要在不同时刻从不同但耦合的模态中提取特征, 因此难以达到多模特征间的时间同步^[39]; 其二, 在融合之前, 这些特征需要表示成相同格式; 其三, 模态数的增加使得在异构特征间学习互相关更加困难. 决策级融合的输入变量是每个传感器基于本地特征提供的本地决策, 而后融合这些决策形成最终全局决策. 其优点包括: 表示相同, 比特征融合简单; 对模态具有更好的可扩展性; 对不同模态可以采用其最合适的分析方法, 如采用隐马尔可夫模型分析音频, 采用支持向量机分析图像. 其缺点是无法利用模态间特征级的相关性, 损失的信息增多. 同时, 由于每个局部决策都需要学习, 因此更加耗时.

按照方法的本质和问题空间来分, 多模态信息融合方法主要分为基于规则的方法、基于估计的方法和基于分类的方法^[38]. 基于规则的融合方法包括基于统计规则的方法, 如线性加权融合、投票法以及用户自定义规则. 其优点是简单、计算量小, 用于人脸检测^[40]、语音识别、身份识别等. 基于分类的融合方法包括: 支持向量机、贝叶斯推断、Dempster-Shafer理论(DS)、动态贝叶斯网络、神经网络等. 其

中,支持向量机和动态贝叶斯网络最为常用.基于估计的方法包括卡尔曼滤波、EKF以及PF等^[41],主要用于目标定位与跟踪.其他方法还包括0-1整数规划以及3-D分配方法等.

多模态信息融合的另外一个重要方向是软硬信息融合.其中,软信息是指人产生的信息.详细论述参考本文第4节.

3.4 高冲突信息融合(Conflict information fusion)

当多个专家对同一现象产生不同意见时,待融合信息之间就产生了冲突.对于高冲突信息的处理,经典Dempster融合规则会出现融合结果不合理的现象.针对该问题涌现出了很多改进方法,可分为改进组合规则^[42-46]和证据修正法^[47-51].改进规则主要通过改变矛盾信息的分配方法来得到较为合理的融合结果,但改进的规则一般较为复杂,并不符合结合律.证据修正法一般通过给各证据赋予权重,利用权重对证据进行折扣处理,与其他证据冲突大的权重小,反之亦然.证据冲突的度量^[52-54]是证据修正法的关键,一般通过证据间矛盾信息、证据距离两者相结合来衡量证据冲突程度^[47,55-56].不过,证据修正法计算量较大,主要用于对批量证据融合,不便于对序列证据的逐个融合.文献[57]研究了序列证据的自适应动态融合,根据证据间的冲突情况自适应选择使用改进规则或对证据修正后融合.当冲突信息是由于目标本质发生变化引起时,文献[58]给出了一种动态证据推理用于检测和识别目标变化.

DSmT(Dezert-Smarandache theory)^[42]对DS进行了系统的推广扩充,取消了DS中命题互斥和完备性的假设,引入了合取算子即用命题的交集表示相容命题的相似部分,将基本置信的分配空间由DS的幂集推广到了超幂集,提出了自由融合模型和混合融合模型及相应的一系列规则.在混合模型下,通过一些先验条件的限制, Jean Dezert等人提出的一系列组合规则如PCR1-PCR6^[42]等可以应用于Shafer模型下,并能够对高冲突证据进行合理融合.

同时,一些学者提出了基于贝叶斯概率框架下的冲突信息融合方法. Uhlmann^[59]提出了协方差取并(covariance union)法,能够同时融合相关信息和冲突信息. Maskell^[60]利用PF和MCMC等贝叶斯分析方法,提出了一个与DSmT具有相似性质的新的贝叶斯方法,能够融合不确定、不精确以及冲突信息.

在上述方法中,均对信息或者数据赋予了数值或者概率分布,因此都属于数值类方法.另外一类对冲突信息的处理方法是基于逻辑的方法,限于篇幅,不再赘述,感兴趣的读者请参考文献[61-62]等.

3.5 相关信息融合(Correlative information fusion)

在许多实际多传感器系统中,融合的数据之间存

在相关性.原因在于,一方面,影响物理系统的噪声本身是相关的;另一方面,虽然噪声是独立的,但是在估计过程中使用了近似滤波器.同时,在分布式系统中,量测可能被多次重复使用.如果对相关性的处理不当,则可能会产生有偏估计.如果已知相关性大小,则可在融合之前消除数据相关性;否则,在设计融合算法时需考虑相关性.在实际应用中,相关性往往是未知的,原因在于缺乏真实系统的知识.例如,在使用一组传感器对某一运动目标观测时,由于目标动态特性中的噪声项相同,因此量测可能是相关的,但是在融合之前,难以辨识相关性.未知相关性条件下的融合更加困难,是本文主要论述对象.

协方差交叉(covariance intersection, CI)融合方法是最常见的相关信息融合方法.它通过在逆协方差空间中寻找均值和方差的凸组合,可处理带未知互协方差系统的融合估计问题.在确定组合协方差上界的意义下,CI是最优的,它给出了与未知互协方差无关的融合估计实际方差的一个公共上界.并且从信息论的观点来看,CI可融合任何概率密度函数.但是,其缺点也显而易见,包括:引入了非线性优化过程使得其计算量大;由于CI确定的融合方差椭球比实际方差椭球大,因此估计结果过于保守;鉴于只能两两信源融合,当融合多信源时融合结果与融合顺序有关;难以扩展到除Kalman以外的融合框架,如PF.针对上述问题, Benaskeur^[63]寻找协方差阵交集的最大内接椭球来确定融合方差和融合估计,提出了最大椭球法以克服CI的性能保守性.周彦等人^[64]发现文献[63]中计算融合估值的方法存在问题,提出了内椭球逼近融合法.基于对广义CI算法的近似, Farrell等人^[65]提出了Chernoff融合方法,用于处理任意数量的相关概率密度融合问题. Barshalom等人^[66]建立了误差相关时多源航迹-航迹关联的似然函数,并以此作为代价函数,采用多维分配算法,解决多传感器航迹-航迹关联问题.

不仅同构信息可能存在相关性,多模态信息之间也可能存在相关性.其代表多模态信息是如何共同变化的.不同于对同构相关信息的处理,异构相关信息融合主要利用相关性来实现某种功能或者提高融合性能.例如,音频和视频数据间的互信息可以用来测量两者是否同步.目前存在多种计算多模态信息相关性的形式方法,如相关系数、互信息、潜在语义分析(latent semantic analysis)、典型相关分析(canonical correlation analysis)、跨模因子分析(cross-modal factor analysis)、因果逻辑分析(causal link analysis)、因果关系强度(causal strength)以及一致系数(agreement coefficient)等.其中,前5种用于特征级多模态信息间的相关度量,后3种用于计算决策级多模态信息间的相关性.不同方法所度量相关的含义不

同,如相关系数用来测量任意两模态间线性关系的大小和方向.而基于信息论的互信息则表示一个模态所包含的另一个模态信息量的大小.限于篇幅,本文不对这些形式方法的详细分析和应用进行阐述,感兴趣的读者请参考文献[38].另外,Sundaresan等人^[67]采用Copula理论,在仅已知传感器观测边缘似然函数的假设下,近似联合参数密度,能够表示更一般的(如非线性)多模态观测间的相关性.

3.6 网络化信息融合(Networked information fusion)

随着网络技术及传感器技术的快速发展,网络化信息融合(networked data fusion)是一个新的研究方向.通过网络,数据处理中心具有处理远程传感器测量数据的能力.特别是,基于网络的信息融合允许远程监控和故障诊断,使得信息融合有能力从世界上任何地点任何时间恢复和处理数据^[68].然而,网络化信息融合面临着新的问题:网络延迟(确定性时延、随机时延、时变时延)、丢包(网络链接中的传输错误和拥塞等都可能造成数据丢失)、错序(多源量测序列到达时间不一致)、多采样率、量化失真等^[69-72].鉴于错序问题在单、多速率信息融合中均存在,并且研究相对较多,因此本文将单独综述.

近年来,随机丢包下的滤波问题取得了重要进展.Fletcher等人^[73]考虑了有时变通道条件引起的量测丢失情况下的状态估计,引入了一个更一般的多状态马尔可夫链来对丢包和非丢包状态进行建模,分析了一个次优线性估计器的渐进均方估计误差,并用线性矩阵不等式方法进行了优化.Sinopoli等人^[74]研究了量测到达概率与滤波稳定性之间的关系,得到影响滤波稳定的关键丢包概率.Yue等人^[75]研究了网络诱导(由于网络特性引起的)时延和数据丢失下的不确定网络化系统的滤波.Gao等人^[76]同时考虑观测数据的时滞、丢失和量化效应,设计了连续时间凸多面体不确定系统鲁棒滤波器.Liang等人^[77]研究了在传感器-控制器和控制器-激励器通道中出现多个丢包时的最优线性估计问题,其中随机丢包被建模为独立贝努利分布,基于带有随机参数的线性丢包模型,利用正交原理给出了线性最小方差滤波器,同时给出了一个稳态线性最小方差滤波器收敛的充分条件.

针对复杂网络化系统的多采样率问题,多速率信息融合也得到了广泛关注.多速率信息融合带来的好处包括:多个观测过程在时间域的多样性得到准确描述;由于对不同数据率的量测通过多分辨率解与重构在各分辨率分别关联融合,因此算法实现具有天然的递归特性,不仅能够获得非常高的计算效率,而且可以根据估计精度和计算代价综合要求灵活选择算法分辨率,因此适合海量信息的估计

与融合.根据所采用技术手段的不同,多速率信息融合可分为基于多尺度系统理论的方法和基于滤波器设计的方法两大类^[78].虽然经过Benveniste, Willsky, Hong以及国内学者毛士艺、潘泉、周东华、文成林等的研究和发展,针对“不同传感器之间呈2的整数倍采样关系”这一假设下的多尺度系统估计理论已趋于成熟,但是仍然面临着形式复杂、计算量大等问题;同时,当假设传感器之间采样率呈任意整数倍甚至有理倍数时,采用多尺度估计理论难以解决.在基于滤波器设计的方法方面,Liang等人^[79]给出一类带有丢包的网络化多传感器融合系统的多速率滤波问题,在文献[80]中解决了包含模型状态更新速率、量测采样速率、估计更新速率和估计输出速率的四速率下的线性最小均方误差估计问题.

另外,由于网络带宽有限,量化对网络化系统影响很大,设计编码-估计策略成为网络化系统中状态估计的一个新方向.Shen等人^[81-82]对一般观测相关条件下的多传感器分布式检测融合系统,获得了同时搜索最优传感器律和最优融合律的高效算法.

无序量测信息融合.由于各种传感器具有不同的采样率、预处理时间和通信延迟,导致有序采样的局部量测到达融合中心时呈现无序现象,即先发量测可能后到,后发量测可能先到,称为无序量测(out-of-sequence measurements, OOSM).OOSM融合的主要问题是在考虑当前时间和延迟量测之间的过程噪声相关的条件下,如何利用延迟量测更新当前状态估计.一些简单的处理策略,如丢弃延迟量测或者存储全部的输入数据都是不可取的,前者损失了有用信息,后者需要大量的存储空间.因此,需要有针对性的研究处理OOSM的方法.

按照OOSM延迟步数,OOSM融合算法可分为OOSM单步融合算法、OOSM多步融合算法.OOSM单步融合算法包括Bar-Shalom提出的最优算法“A”及其次优实现“B”和算法“C”^[83],以及Zhou等人^[84]提出的在过程噪声直接离散化模型条件下的“A”算法.Zhang等人^[85]扩展了“A”算法,提出能处理多步OOSM问题的统一框架.Bar-Shalom^[86]随后针对许多算法计算量和存储量大的缺点,提出了算法“A”和“B”的扩展版本算法“A11”和“B11”,并且鉴于“B11”算法的高效率,建议在实际应用中使用.Oreshki等人^[87]采用PF,针对非线性目标状态空间模型,提出了可处理一种OOSM多步融合算法.Shen等人^[88-90]在发现各种“失序”或错误观测后,可以通过更新当前的“带错”估计实现“无错”的全局最优中心式估计融合,从而对失序观测、错误观测和异步观测实现统一处理;进一步,获得了适合于任意有限步失序观测、错误观测和异步观测的统一的航迹、全局最优估计融合公式和

算法, 具有算法内存小、计算量少和公式简洁等优点.

上述研究大部分属于单目标OOSM滤波算法, 只需要更新目标状态估计及其协方差矩阵, 没有考虑多目标以及杂波出现时的数据关联问题, 由于数据关联问题本身就是一个很复杂的难题, 所以使得多目标OOSM跟踪问题更加困难, 因此鲜有研究. Mallick等人^[91]首先给出了包括波门设计、似然计算和假设管理在内的多目标OOSM跟踪算法, 讨论了单步及两步OOSM问题. Maskell等人^[92]利用图模型, 给出了将单目标OOSM算法直接扩展到多目标OOSM跟踪问题下的一般框架. 由于多目标OOSM问题其更加符合实际应用, 需要引起重视. 另外, 多模OOSM信息融合、基于分布式框架的OOSM融合也是重要的研究方向.

4 前沿发展方向(Emerging and developing paradigms)

虽然信息融合近年来取得了很多进展, 单平台、低层融合理论与方法已日趋成熟. 但还远未达到人脑所能实现的融合能力, 仍存在很多挑战, 而这些也正是信息融合的发展方向. 本节试图讨论可能的研究方向与发展趋势.

4.1 信息一体化融合处理(Joint processing for information)

传统上, 受制于计算能力等限制, 包括检测、估计、识别等都是被作为子问题独立处理的, 在每个阶段采用最优策略, 例如, 在检测阶段采用Neyman-Pearson最优性检验, 在估计阶段采用最优贝叶斯估计器. 然而, 分阶段最优无法保证全局最优. 每个阶段的处理都可能会损失有用信息. 例如, 在检测与跟踪的过程中, 检测门限的设置使得低于其的微弱目标被漏检, 微弱目标有限的信噪比被损失, 从而使得后续目标跟踪航迹处理非常困难. 联合检测与跟踪或检测前跟踪提供了一种挽回信噪比损失的途径. 类似的, 有必要研究联合检测与估计、联合跟踪与识别等联合优化技术. 事实上, 已经有许多学者研究了检测前跟踪^[93-96]、联合检测与估计^[97-102]等技术并尝试了应用.

4.2 以人为中心的信息融合(Human centered information fusion)

传统上, 信息融合系统采用数据驱动的方式, 处理来自诸如雷达、红外、声学等物理传感器的输入数据, 进行自动化的信号和图像处理、状态估计、模式识别和有限的基于上下文的推理, 产生态势图, 用户以相对被动的方式观看显示结果. 然而, 信息技术的发展扩展了传统信息源(如网络中的图片、视频、文本、广播). 同时, 先进的接口技术可以使用户

在推理时更加主动, 人在融合系统中成为一个主动的合作者. 多个分布的用户可以进行协作分析和决策. 但是, 不能将人作为传统的传感器对待, 他们的精度、偏差和观测水平与传统的传感器有很大不同. 另一方面, 人可以提供传统传感器无法获得的有价值的推断和观测. 因此, 需要研究人和非人传感器组合框架下的信息融合^[18, 103-107]. 通过快速发展的可视化技术解决人与融合系统的深度交互, 将人作为“软传感器”为系统提供输入, 扩展传统的硬传感器系统; 以“软硬混合”形式, 通过语义推理和模式识别参与数据分析, 扩展自动推理能力; 为解决高层融合难题, 通过协作共识, 为态势分析提供分布式分析和决策的高智能指导. 最近的研究表明, 认知工程方法可能是解决以人为中心的信息融合中所面临问题的一种非常好的解决途径. 人机交互的研究可部分借鉴人因工程领域中的成果^[108].

4.3 信息获取与融合的联合优化(Joint optimization for information gathering and fusion)

目前, 大部分多传感器信息系统或处理方法均是将传感器信息获取与融合处理采用分离序贯结构, 鲜有有效的方法将融合结果用于复杂动态异构多传感器平台的联合优化管理. 这无法满足未来、尤其是以军事应用为代表的大尺度、复杂动态系统的感知需求. 未来的监视侦察系统将是一个网络化、强对抗、自动或者半自动的多平台多传感器系统. 因此需要研究以融合品质为目标的信息获取与融合联合优化. 系统感知资源的配置、调度等将以融合品质为目标, 对传感器信息获取前端(射频、天线、频谱等)进行联合优化设计, 难点在于优化目标函数的框架建立和实时有效的算法构建. 有部分学者对此进行了尝试^[109-112], 如结合目标跟踪性能的自适应波形设计, 但是这些研究或者仅考虑跟踪或者识别结果, 或者优化指标函数与融合需求不够直接. 为满足下一代感知系统需求, 美国已经开始进行信息获取与融合联合优化研究, 资助的项目包括: 信息收集和融合中的控制(control of information collection and fusion, 2010)以及分布式数据融合中的信息值理论(value of information for distributed data fusion, 2011).

4.4 复杂多传感器信息融合系统体系结构设计(Architecture design for complex multi-sensor information fusion systems)

以军事信息融合系统为例. 现代信息化战争正逐渐演变为双方系统-系统之间的对抗. 为夺取制信息权, 系统集成陆、海、空、天及赛博空间的军事力量, 实现全维度、全频谱、全天候、实时(近实时)的监视侦察, 并通过情报收集、处理、利用与传送, 为

各级指挥官提供全方位支持, 以在尽可能短的时间内获取敌方尽可能多的情报信息. 对此类具有大尺度复杂动态交互特性的系统, 需要科学的系统工程理论和方法指导进行开发和建设, 以确保满足军事需求. 因此体系结构设计方法研究势在必行. DoDAF(department of defense architecture framework)是美军为C4ISR(command, control, communications, computers, intelligence, surveillance and reconnaissance)设计研制开发的一套大型体系结构设计顶层框架和模型, 统一了美军C4ISR系统体系结构的描述方法, 以保证实现系统之间的集成与互操作, 现已成为美军研究和开发C4ISR系统所遵循的标准^[113], 可以为复杂多传感器信息融合系统体系结构设计方法提供参考. 目前, DoDAF体系结构产品大多是描述静态的体系结构信息, 无法说明体系结构的动态信息, 特别是随时间演进的系统动态特性. 大部分研究将UML, sysML, IDEF等体系结构建模得到的活动模型、数据模型及规则模型, 生成体系结构的可执行模型, 而后将可执行模型的仿真运行结果与动态模型比较, 从而对结构描述进行逻辑和行为验证^[114-116]. 但可执行体系结构理论和方法还不成熟, 某些定性的非功能需求的体系结构验证仍是一个难点. 如何利用现有的DoDAF等体系结构描述方法, 进行复杂多传感器信息融合系统的体系结构设计是一个重要研究方向.

4.5 信息融合系统仿真与性能评估(Simulation and performance evaluation for information fusion systems)

实际应用的信息融合系统大都为多个传感器或平台的集成, 对于这样的复杂系统仅靠解析方法很难进行全面的分析, 而实际运行则费用高昂, 因此借助于计算机仿真技术建立仿真系统, 成为研究信息融合这类复杂系统的主要方法. 国内外信息融合仿真验证平台在仿真支撑技术方面的特点和趋势包括: 仿真实体模型多粒度建模, 用于满足不同的仿真需求; 算法模块组件化开发, 支撑灵活替换; 建立独立的评估分析支持库, 对整个仿真过程的评估提供支撑. 虽然一些学者开发了多目标跟踪测试平台等, 但缺乏大尺度分布式信息融合仿真验证平台. 在性能评估方面, 包括对输入信息的评估以及对融合算法的评估两个方面. 无真实数据下的评估指标及方法、指标集的完备化和标准化等是重要的研究方向.

4.6 借助更多的数学理论方法(Leveraging more mathematical theories)

目前, 概率论、证据理论、统计推断、模糊数学、随机集等数学理论已经成为信息融合的数学基础, 部分解决了信息不准确、不可靠、不完备等条件下

的融合问题. 而运筹学、博弈论、组合优化、试验设计理论等在信息融合也有一些应用, 但需要在深刻理解数学原理的基础上进行更深入广泛的研究. 例如, 近年来, 建立在微分几何基础上的信息几何理论成为研究信息理论内在几何性质的新方向, 信息几何给出了一个在流形上处理统计问题的新方式. 信息几何认为, 概率论中的许多重要结构可以作为微分几何结构, 将概率空间做为嵌入黎曼测度的微分流形和仿射连接族^[117]. 通过分析各种概率密度函数的黎曼几何属性, 信息几何提供了关于统计和推断问题的新视角. 已经有学者研究了估计精度的内在克罗拉美-罗下界、方差矩阵和子空间估计下界^[118], 几何子空间估计和目标跟踪问题^[119-120]等.

其他方面还包括基于集合论等理论的信息融合统一框架、基于粗糙集理论的融合方法、自适应主动融合方法、Sensor-Rich传感网信息融合、面向任务域的信息融合性能在线评估技术、融合系统及评价指标体系与测试方法、基于分布式数据服务的面向信息优势信息融合仿真验证等, 不再一一赘述.

参考文献(References):

- [1] 韩崇昭, 朱洪艳, 段战胜. 多源信息融合 [M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2010.
(HAN Chongzhao, ZHU Hongyan, DUAN Zhansheng. *Multi-Source Information Fusion* [M]. 2nd Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.)
- [2] 潘泉, 于昕, 程咏梅, 等. 信息融合理论的基本方法与进展 [J]. 自动化学报, 2003, 29(4): 599 - 615.
(PAN Quan, YU Xin, CHENG Yongmei, et al. Essential methods and progress of information fusion theory [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(4): 599 - 615.)
- [3] KHALEGHI B, KHAMIS A, KARRAY F O, et al. Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art [J]. *Information Fusion*, 2013, 14(1): 28 - 44.
- [4] 何友. 信息融合理论及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
(HE You. *Information Fusion Theory with Applications* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.)
- [5] 何友. 雷达数据处理及应用 [M]. 第2版. 北京: 电子工业出版社, 2009.
(HE You. *Radar Data Processing with Applications* [M]. 2nd Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.)
- [6] 何友. 雷达目标检测与恒虚警处理 [M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2011.
(HE You. *Radar Target Detection and CFAR Processing* [M]. 2nd Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.)
- [7] 敬忠良, 肖刚, 李振华. 图像融合: 理论与应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
(JING Zhongliang, XIAO Gang, LI Zhenhua. *Image Fusion: Theory and Application* [M]. Beijing: China Higher Education Press, 2007.)
- [8] 潘泉, 梁彦, 杨峰, 等. 现代目标跟踪与信息融合 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
(PAN Quan, LIANG Yan, YANG Feng, et al. *Advanced Target Tracking and Information Fusion* [M]. Beijing: National Defence Industry Publisher, 2009.)
- [9] 潘泉, 张磊, 崔培玲, 等. 动态多尺度系统估计理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
(PAN Quan, ZHANG Lei, CUI Peiling, et al. *Dynamic Multiscale*

- System Estimation: Theory and Application* [M]. Beijing: Science Press, 2007.)
- [10] 梁彦, 潘泉, 杨峰, 等. 复杂系统现代估计理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
(LIANG Yan, PAN Quan, YANG Feng, et al. *Advanced Estimation for Complex Systems: Theory and Application* [M]. Beijing: Science Press, 2009.)
- [11] 潘泉, 程咏梅, 梁彦, 等. 信息融合理论与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
(PAN Quan, CHENG Yongmei, LIANG Yan, et al. *Information Fusion: Theory and Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.)
- [12] 赵春晖, 潘泉, 梁彦, 等. 视频图像运动目标分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
(ZHAO Chunhui, PAN Quan, LIANG Yan, et al. *Video Imagery Moving Target Analysis* [M]. Beijing: National Defence Industry Publisher, 2011.)
- [13] POLYCHRONOPOULOS A, AMDITIS A, SCHEUNERT U, et al. Revisiting JDL model for automotive safety applications: the PF2 functional model [C] // *Proceedings of the 9th International Conference on Information Fusion*. Florence, Italy: IEEE Computer Society, 2006: 1 – 7.
- [14] STEINBERG A N, BOWMAN C L, WHITE F E. Revisions to the JDL data fusion model [C] // *Sensor Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications III*. Florida, USA: The International Society for Optical Engineering, 1998: 430 – 441.
- [15] HALL M J, HALL S A, TATE T. Removing the HCI bottleneck: how the human computer interface (HCI) affects the performance of data fusion systems [C] // *Proceedings of the 2000 MSS National Symposium on Sensor and Data Fusion*. San Diego, California: Sensing Information Analysis Center, 2000: 89 – 104.
- [16] BLASCH E, PLANO S. DFIG Level 5 user refinement issues supporting situational assessment reasoning [C] // *Proceedings of the 8th International Conference on Information Fusion*. Pennsylvania, USA: IEEE, 2005: 9 – 16.
- [17] HALL D L, GRAHAM J, MORE L D, et al. Test and evaluation of soft/hard information fusion systems: a test environment, methodology and initial data sets [C] // *Proceedings of the 13th International Conference on Information Fusion*. Edinburgh, UK: IEEE Computer Society, 2010: 1 – 7.
- [18] HALL D L, JORDAN J M. *Human-Centered Information Fusion* [M]. Massachusetts: Artech House, 2010.
- [19] LIQQINS M E, HALL D L, LLINAS J. *Handbook of Multisensor Data Fusion: Theory and Practice* [M]. 2nd Edition. Florida: CRC Press, 2008.
- [20] RISTIC B, ARULAMPALAM S, GORDON N. *Beyond the Kalman Filter* [M]. Boston London: Artech House, 2004.
- [21] JULIER S J, UHLMANN J K. Unscented filtering and nonlinear estimation [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(3): 401 – 422.
- [22] ITO K, XIONG K. Gaussian filters for nonlinear filtering problems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(5): 910 – 927.
- [23] WANG X X, LIANG Y, PAN Q, et al. A Gaussian approximation recursive filter for nonlinear systems with correlated noises [J]. *Automatica*, 2012, 48(9): 2290 – 2297.
- [24] 杨小军, 潘泉, 王睿, 等. 粒子滤波进展与展望 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23(2): 261 – 267.
(YANG Xiaojun, PAN Quan, WANG Rui, et al. Development and prospect of particle filtering [J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(2): 261 – 267.)
- [25] HASTINGS W K. Monte Carlo sampling methods using markov chains and their applications [J]. *Biometrika*, 1970, 57(1): 97 – 109.
- [26] CASELLA G, GEORGE E I. Explaining the Gibbs sampler [J]. *The American Statistician*, 1992, 46(3): 167 – 174.
- [27] CASELLA G, ROBERT C P. Rao-Blackwellisation of sampling schemes [J]. *Biometrika*, 1996, 83(1): 81 – 94.
- [28] SCHON T, GUSTAFSSON F, NORDLUND P J. Marginalized particle filters for mixed linear nonlinear state-space models [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(7): 2279 – 2289.
- [29] KARLSSON R, SCHON T, GUSTAFSSON F. Complexity analysis of the marginalized particle filter [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(11): 4408 – 4411.
- [30] ZIA K, BALCH T, DELLAERT F. MCMC-based particle filtering for tracking a variable number of interacting targets [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(11): 1805 – 1819.
- [31] ZIA K, BALCH T, DELLAERT F. MCMC data association and sparse factorization updating for real time multitarget tracking with merged and multiple measurements [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(12): 1960 – 1972.
- [32] KENDALL D G. *Stochastic Geometry* [M]. New York: John Wiley, 1974.
- [33] GOODMAN I R, MAHLER R P, NQUYEN H T. *Mathematics of Data Fusion* [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2010.
- [34] MAHLER R P S. *Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion* [M]. Boston, Massachusetts: Artech House, 2007.
- [35] 徐晓滨, 文成林, 刘荣利. 基于随机集理论的多源信息统一表示与建模方法 [J]. 电子学报, 2008, 36(6): 1174 – 1181.
(XU Xiaobin, WEN Chenglin, LIU Rongli. The unified method of describing and modeling multisource information based on random set theory [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(6): 1174 – 1181.)
- [36] MAHLER R P S. A survey of PHD filter and CPHD filter implementations [C] // *Proceedings of the SPIE Conference on Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition*. Maryland, USA: The International Society for Optical Engineering, 2007: 1 – 12.
- [37] 彭冬亮, 文成林, 徐晓滨, 等. 随机集理论及其在信息融合中的应用 [J]. 电子与信息学报, 2006, 28(11): 2199 – 2204.
(PENG Dongliang, WEN Chenglin, XU Xiaobin, et al. Random set and its applications in information fusion [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(11): 2199 – 2204.)
- [38] ATREY P K, HOSSAIN M A, SADDIK A E, et al. Multimodal fusion for multimedia analysis: a survey [J]. *Springer Multimedia Systems Journal*, 2010, 16(6): 345 – 379.
- [39] WU Z, CAI L, MENG H. Multi-level fusion of audio and visual features for speaker identification [C] // *International Conference on Advances in Biometrics*. Hong Kong, China: Springer-Verlag, 2006: 493 – 499.
- [40] KANKANHALLI M S, JUN W, JAIN R. Experiential sampling in multimedia systems [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2006, 8(5): 937 – 946.
- [41] ZHOU H Y, TAJ M, CAVALLARO A. Target detection and tracking with heterogeneous sensors [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2008, 2(4): 503 – 513.
- [42] SMARANDACHE F, DEZERT J. *Advances and Applications of DSMT for Information Fusion (Collected Works)* [M]. Washington DC, USA: American Research Press, 2009.
- [43] YAGER R R. On the Dempster Shafer framework and new combination rules [J]. *Information System*, 1989, 41(2): 93 – 137.
- [44] 张山鹰, 潘泉, 张洪才. 一种新的证据推理组合规则 [J]. 控制与决策, 2000, 15(5): 540 – 544.
(ZHANG Shanying, PAN Quan, ZHANG Hongcai. A new kind of combination rule of evidence theory [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(5): 540 – 544.)

- [45] 张山鹰, 潘泉, 张洪才. 证据推理冲突问题研究 [J]. 航空学报, 2001, 22(4): 369 – 372.
(ZHANG Shanying, PAN Quan, ZHANG Hongcai. Conflict problem of Dempster-Shafer evidence theory [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2001, 22(4): 369 – 372.)
- [46] HAN D Q, DEZERT J, TACNET J M, et al. A fuzzy-cautious OWA approach with evidential reasoning [C] // *Proceedings of the 15th International Conference on Information Fusion*. Washington, USA: IEEE, 2012: 278 – 285.
- [47] LIU Z G, DEZERT J, PAN Q, et al. Combination of sources of evidence with different discounting factors based on a new dissimilarity measure [J]. *Decision Support Systems*, 2011, 52(1): 133 – 141.
- [48] 刘准钊, 程咏梅, 潘泉, 等. 基于矛盾因子和证据距离的加权证据合成法 [J]. 控制理论与应用, 2009, 26(12): 1439 – 1442.
(LIU Zhong, CHENG Yongmei, PAN Quan, et al. Combination of weighted belief functions based on evidence distance and conflicting belief [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(12): 1439 – 1442.)
- [49] HAN D Q, DENG Y, HAN C Z, et al. Weighted evidence combination based on distance of evidence and uncertainty measure [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, 30(5): 396 – 400.
- [50] 韩德强, 邓勇, 韩崇昭, 等. 利用不确定度的冲突证据组合 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(6): 788 – 792.
(HAN Deqiang, DENG Yong, HAN Chongzhao, et al. Conflicting evidence combination by using uncertainty degree [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(6): 788 – 792.)
- [51] 韩德强, 韩崇昭, 邓勇, 等. 基于证据方差的加权证据组合 [J]. 电子学报, 2011, 39(3): 153 – 157.
(HAN Deqiang, HAN Chongzhao, DENG Yong, et al. Weighted combination of conflicting evidence based on evidence variance [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(3): 153 – 157.)
- [52] 胡丽芳, 关欣, 邓勇, 等. 广义幂集空间中证据冲突的原因分析 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(12): 1717 – 1722.
(HU Lifang, GUAN Xin, DENG Yong, et al. Cause-analysis for conflicting evidences in the generalized power space [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(12): 1717 – 1722.)
- [53] 何友, 胡丽芳, 关欣, 等. 一种度量广义基本概率赋值冲突的方法 [J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(8): 989 – 997.
(HE You, HU Lifang, GUAN Xin, et al. A new method of measuring the degree of conflict among general basic probability assignments [J]. *Science China: Information Sciences*, 2011, 41(8): 989 – 997.)
- [54] HE Y, HU L F, GUAN X, et al. A new conflict representation model in the generalized power space [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2012, 23(1): 1 – 9.
- [55] JOUSSELME A L, GRENIER G, BOSSE E. A new distance between two bodies of evidence [J]. *Information Fusion*, 2001, 2(2): 91 – 101.
- [56] LIU W. Analyzing the degree of conflict among belief functions [J]. *Artificial Intelligence*, 2006, 170(11): 909 – 924.
- [57] 刘准钊, 程咏梅, 潘泉, 等. 证据冲突下自适应融合目标识别算法 [J]. 航空学报, 2010, 31(7): 1426 – 1432.
(LIU Zhong, CHENG Yongmei, PAN Quan, et al. Target identification by adaptive combination of conflicting evidence [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(7): 1426 – 1432.)
- [58] LIU Z G, DEZERT J, MERCIER G, et al. Dynamic evidential reasoning for change detection in remote sensing images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(5): 1955 – 1967.
- [59] UHLMANN J K. Covariance consistency methods for fault-tolerant distributed data fusion [J]. *Information Fusion*, 2003, 4(3): 201 – 215.
- [60] MASKELL S. A Bayesian approach to fusing uncertain, imprecise and conflicting information [J]. *Information Fusion*, 2008, 9(2): 259 – 277.
- [61] LANG J, MARQUIS P. Reasoning under inconsistency: a forgetting-based approach [J]. *Artificial Intelligence*, 2010, 174(12/13): 799 – 823.
- [62] SCHOCKAERT S, PRADE H. Solving conflicts in information merging by a flexible interpretation of atomic propositions [J]. *Artificial Intelligence*, 2011, 175(11): 1815 – 1855.
- [63] BENASKEUR A R. Consistent fusion of correlated data sources [C] // *The 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Sevilla, Spain: IEEE, 2002: 2652 – 2656.
- [64] 周彦, 李建勋, 王冬丽. 传感器网络中鲁棒状态信息融合抗差卡尔曼滤波器 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(3): 291 – 297.
(ZHOU Yan, LI Jianxun, WANG Dongli. Anti-outlier Kalman filter-based robust estimation fusion in wireless sensor networks [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(3): 291 – 297.)
- [65] FARRELL W J, GANESH C. Generalized chernoff fusion approximation for practical distributed data fusion [C] // *Proceedings of the 12th International Conference on Information Fusion*. WA, USA: IEEE, 2009: 555 – 562.
- [66] BAR-SHALOM Y, CHEN H. Multisensor track-to-track association for tracks with dependent errors [J]. *Journal of Advances in Information Fusion*, 2006, 1(1): 3 – 14.
- [67] SUNDARESAN A, VARSHNEY P K. Location estimation of a random signal source based on correlated sensor observations [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(2): 787 – 799.
- [68] MOYNE J R, TILBURY D M. The emergence of industrial control networks for manufacturing control, diagnostics, and safety data [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 29 – 47.
- [69] HESPANHA J P, NAGHSHTABRIZI P, XU Y G. A survey of recent results in networked control systems [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 138 – 162.
- [70] ANTSAKLIS P, BAILLIEUL J. Special issue on technology of networked control systems [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 5 – 8.
- [71] SCHENATO L, SINOPOLI B, FRANCESCHETTI M, et al. Foundations of control and estimation over lossy networks [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 163 – 187.
- [72] BAILLIEUL J, ANTSAKLIS P J. Control and communication challenges in networked real-time systems [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 9 – 28.
- [73] FLETCHER A K, RANGAN S, GOYAL V K. Estimation from lossy sensor data: jump linear modeling and Kalman filtering [C] // *The 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*. California, USA: Association for Computing Machinery, 2004: 251 – 258.
- [74] SINOPOLI B, SCHENATO L, FRANCESCHETTI M, et al. Kalman filtering with intermittent observations [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(9): 1453 – 1464.
- [75] YUE D, HAN Q L. Network-based robust H_∞ filtering for uncertain linear systems [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(11): 4293 – 4301.
- [76] GAO H J, CHEN T W. H estimation for uncertain systems with limited communication capacity [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(11): 2070 – 2084.
- [77] LIANG Y, CHEN T W, PAN Q. Optimal linear state estimator with multiple packet dropouts [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, 55(6): 1428 – 1433.
- [78] 闫莉萍. 多速率传感器状态融合估计及多分辨率图像融合算法研究 [D]. 北京: 清华大学, 2006.
(YAN Liping. *Study on multirate sensor based state fusion estimation and multiresolution image fusion algorithms* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.)

- [79] LIANG Y, CHEN T W, PAN Q. Multi-rate stochastic H filtering for networked multi-sensor fusion [J]. *Automatica*, 2010, 46(2): 437 – 444.
- [80] LIANG Y, CHEN T W, PAN Q. Multi-rate optimal state estimation [J]. *International Journal of Control*, 2009, 82(11): 2059 – 2076.
- [81] SHEN X J, ZHU Y M, HE L M, et al. A near-optimal iterative algorithm via alternately optimizing sensor and fusion rules in distributed decision systems [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(4): 2514 – 2529.
- [82] SHEN X J, ZHU Y M, YOU Z S. An efficient sensor quantization algorithm for decentralized estimation fusion [J]. *Automatica*, 2011, 47(5): 1053 – 1059.
- [83] BAR-SHALOM Y. Update with out-of-sequence measurements in tracking: exact solution [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(3): 769 – 777.
- [84] ZHOU W, LI L, CHEN G. Optimality analysis of one-step OOSM filtering algorithms in target tracking [J]. *Science in China, Series F: Information Sciences*, 2007, 50(2): 170 – 187.
- [85] ZHANG K S, LI X R, ZHU Y M. Optimal update with out-of-sequence measurements [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(6): 1992 – 2004.
- [86] BAR-SHALOM Y, CHEN H M, MALLICK M. One-step solution for the multistep out-of-sequence-measurement problem in tracking [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40(1): 27 – 37.
- [87] ORESHKIN B N, XUAN L, COATES M J. Efficient delay-tolerant particle filtering [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(7): 3369 – 3381.
- [88] SHEN X J, SONG E B, ZHU Y M, et al. Globally optimal distributed Kalman fusion with local out-of-sequence-measurement updates [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(8): 1928 – 1934.
- [89] SHEN X J, ZHU Y M, SONG E B, et al. Optimal centralized update with multiple local out-of-sequence measurements [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(4): 1551 – 1562.
- [90] SHEN X J, LUO Y T, ZHU Y M, et al. Globally optimal flight path update with adding or removing out-of-sequence measurements [J]. *Automatica*, 2010, 46(9): 1437 – 1442.
- [91] MALLICK M, KRANT J, BAR-SHALOM Y. Multi-sensor multi-target tracking using out-of-sequence measurements [C] // *Proceedings of the 5th International Conference on Information Fusion*. Maryland, USA: International Society of Information Fusion, 2002: 135 – 142.
- [92] MASKELL S R, EVERITT R G, WRIGHT R, et al. Multi-target out-of-sequence data association: tracking using graphical models [J]. *Information Fusion*, 2006, 7(4): 434 – 447.
- [93] KIRUBARAJAN T, BAR-SHALOM Y. Low observable target motion analysis using amplitude information [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(2): 1367 – 1384.
- [94] BUZZI S, LOPS M, VENTURINO L, et al. Track-before-detect procedures in a multi-target environment [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(3): 1135 – 1150.
- [95] DENG X, PI Y, MORELANDE M, et al. Track-before-detect procedures for low pulse repetition frequency surveillance radars [J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2009, 5(1): 65 – 73.
- [96] WANG Z, ZHANG M, LIANG Y, et al. A multi-model track-before-detect algorithm for manoeuvring target detection for over-the-horizon radar [C] // *The 7th European Radar Conference*. Paris, France: IEEE Computer Society, 2010: 463 – 466.
- [97] KULATUNGA H, KADIRKAMANATHAN V. Adaptive joint detection and estimation in MIMO systems: a hybrid systems approach [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(5): 1629 – 1644.
- [98] REZAEIAN M, BA-NGU V. Error bounds for joint detection and estimation of a single object with random finite set observation [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(3): 1493 – 1506.
- [99] BA-NGU V, BA-TUONG V, NAM-TRUNG P, et al. Joint detection and estimation of multiple objects from image observations [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(10): 5129 – 5141.
- [100] GALY J, CHAUMETTE E, LARZABAL P. Joint detection estimation problem of monopulse angle measurement [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(1): 397 – 413.
- [101] TAJER A, JAJAMOVICH G H, WANG X D, et al. Optimal joint target detection and parameter estimation by MIMO radar [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2010, 4(1): 127 – 145.
- [102] MOUSTAKIDES G V, JAJAMOVICH G H, TAJER A, et al. Joint detection and estimation: optimum tests and applications [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(7): 4215 – 4229.
- [103] POSSE C, WHITE A, BEAGLEY N. Human-centered fusion framework [C] // *The 2007 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security*. Woburn, Massachusetts, USA: IEEE, 2007: 111 – 116.
- [104] HALL D L, MCNEESE M D, HELLAR D B, et al. A cyber infrastructure for evaluating the performance of human centered fusion [C] // *Proceedings of the 12th International Conference on Information Fusion*. Washington, USA: IEEE, 2009: 1257 – 1264.
- [105] RIMLAND J. JDL level 0 and 1 algorithms for processing and fusion of hard sensor data [C] // *Proceedings of the International Society for Optical Engineering*. Florida, USA: The International Society for Optical Engineering, 2011: 80620G–80620G–16.
- [106] RIMLAND J. A multi-agent infrastructure for hard and soft information fusion [C] // *Proceedings of the International Society for Optical Engineering*. Florida, USA: The International Society for Optical Engineering, 2011: 80620D–80620D–12.
- [107] GRAHAM J L, HALL D L, RIMLAND J. A synthetic dataset for evaluating soft and hard fusion algorithms [C] // *The 2011 Defense Transformation and Net-Centric Systems*. Florida, USA: The International Society for Optical Engineering, 2011: 80620F – 80620F-13.
- [108] SALAS E, MAURINO D. *Human Factors in Aviation (2nd Ed)* [M]. London, UK: Academic Press, 2010.
- [109] KERSHAW D J, EVANS R J. Optimal waveform selection for tracking systems [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1994, 40(5): 1536 – 1550.
- [110] KREUCHER C M, HERO A O, KASTELLA K, et al. Efficient methods of non-myopic sensor management for multitarget tracking [C] // *The 43rd IEEE Conference on Decision and Control*. Nassau, Bahamas: IEEE, 2004: 722 – 727.
- [111] WILLIAMS J L. *Information theoretic sensor management* [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [112] KOLBA M P, SCOTT W R, COLLINS L M. A framework for information-based sensor management for the detection of static targets [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2011, 41(1): 105 – 120.
- [113] 中国电子科技集团公司电子科学研究院. 美国国防部体系结构框架(v1.5) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. (Academy of Electronics and Information Technology, China Electronics Technology Group Corporation. *Department of Defense Architecture Framework (v1.5)* [M]. Beijing: National Defence Industry Publisher, 2007.)
- [114] BAUMGARTEN E, SILVERMAN S J. Dynamic DoDAF and executable architectures [C] // *The 2007 Military Communications Conference*. Florida, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2007: 1 – 5.

- [115] WAGENHALS L W, LEVIS A H. Service oriented architectures, the DoD architecture framework 1.5, and executable architectures [J]. *Systems Engineering*, 2008, 12(4): 1 – 32.
- [116] 姜军. 可执行体系结构及DoDAF的可执行化方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
(JIANG Jun. *Research on executable architecture and the executable method of DoDAF* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.)
- [117] AMARI S, NAGAOKA H. *Methods of Information Geometry* [M]. New York: American Mathematical Society and Oxford University Press, 2000.
- [118] SMITH S T. Covariance, subspace, and intrinsic Cramer-Rao bounds [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(5): 1610 – 1630.
- [119] SRIVASTAVA A. A Bayesian approach to geometric subspace estimation [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, 48(5): 1390 – 1400.
- [120] SRIVASATAVA A, KLASSEN E. Bayesian and geometric subspace tracking [J]. *Advances in Applied Probability*, 2004, 36(1): 43 – 56.

作者简介:

潘泉 (1961–), 男, 教授, 主要研究方向为估计与控制、信息融合, E-mail: quanpan@nwpu.edu.cn;

王增福 (1982–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为信息融合、目标跟踪, E-mail: wangzengfu@gmail.com;

梁彦 (1971–), 男, 教授, 主要研究方向为多源信息融合, 复杂系统建模、估计与控制, E-mail: liangyan@nwpu.edu.cn;

杨峰 (1977–), 男, 副教授, 主要研究方向为信息融合、目标跟踪、复杂系统仿真, E-mail: yangfeng@nwpu.edu.cn;

刘准钊 (1984–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为证据推理, 模式识别, E-mail: liuzhonga@gmail.com.