

面向海洋探测的多源信息融合技术研究及展望

李洪¹, 张大铭², 严晞隽², 梁晨光², 刘靖东³

1. 中国航天科技集团有限公司, 北京 100048;
2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;
3. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 多源信息融合技术包括数据级、特征级和决策级3个层级。在海洋探测应用中, 现有方法存在信息获取、融合质量及目标识别等难点问题, 提出了体系化探测、分布式融合和利用先验知识的解决思路。体系化探测能够全面获取原始信息, 分布式融合可以在降低计算复杂度的同时减少信息损失, 先验知识能够在决策级融合中提高目标识别的准确性。此外, 还提出了构建探测系统和先验知识库、优化智能算法和模型等未来信息融合技术发展方向。

关键词: 海洋探测; 多源信息融合; 体系化; 分布式; 先验知识

中图分类号: V243.4 文献标识码: A 文章编号: 2096-4080 (2021) 04-0001-06

Research and Prospect of Multi-Source Information Fusion Technology for Ocean Detection

LI Hong¹, ZHANG Daming², YAN Xijun², LIANG Chengguang², LIU Jingdong³

1. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China;
2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;
3. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: The multi-source information fusion technology contains three levels: the data level, the feature level and the decision level. In the application of ocean detection, current methods have some difficult problems of information acquisition, fusion quality and target recognition. This paper proposes the solution ideas of systematic detection, distributed fusion and using prior knowledge. The systematic detection can obtain the original information comprehensively. Distributed fusion reduces the computational complexity and information loss at the same time. Using prior knowledge improves the accuracy of target recognition in the decision-level fusion. In addition, This paper puts forward the development direction of information fusion technology in the future, such as the construction of detection systems and prior knowledge bases and the optimization of intelligent algorithms and models.

Key words: Ocean detection; Multi-source information fusion; Systematization; Distribution; Prior knowledge

收稿日期: 2021-05-06; 修订日期: 2021-06-30

基金项目: 中国航天科技集团有限公司自主研发项目 (2020004)

作者简介: 李洪 (1964-), 男, 研究员, 主要研究方向为航天总体技术、数据分析。

0 引言

随着电子通信行业的快速发展,信息获取技术更加多样(如红外、可见光、合成孔径雷达(SAR)、主被动声呐等),信息类型和容量急剧增长,信息处理呈现出分层级、复杂融合的发展趋势,形成了多源信息融合(multi-source information fusion)技术。它是指将传感器等设备获取的多种信息按照一定规则组合,减少或消除信息中的干扰及不确定性,进而对某些问题做出全方位准确可靠判断的一种信息处理技术^[1]。多源信息融合相对于同源数据融合具有明显的优势,因为对各种类型的特征数据进行综合,能够提高融合结果的准确性。因此,多源信息融合在科学探测、环境感知等方面发挥着重要作用^[2]。特别是在需要多数据源信息获取和目标判断的海洋科学探测领域应用前景广阔,例如船只搜索导航、水下生物辨识、洋流变化分析、海啸和台风预警、海底地质活动观测等。

当前,基于美国数据融合专家组发布的数据融合系统(DFS)功能模型^[3],多源信息融合技术发展自底向上可划分为3个层级:数据级、特征级、决策级。

1) 第一层级是数据级融合,主要为目标的所处方位、运动轨迹估计。该层级直接处理各种采集到的原始数值数据,一般以最优估计、卡尔曼滤波、参数匹配等技术为基础,包含了多数表决法、加权平均法、小波变换、主成分分析法等^[4]。这种融合在各种原始观测信息未经预处理之前就进行数据综合分析,是最低层级的融合。它的优点是能保持尽可能多的现场数据,提供其他融合层级所不能提供的细微信息。其局限性在于处理的信息种类单一,信息量较大,处理代价高,实时性差。

2) 第二层级是特征级融合,主要为目标的特征分析和辨识。该层级包括目标特征的提取和评估,利用多源信息之间的互补性剔除模态间的冗余性,基于贝叶斯、D-S证据推理等算法、支持向量机(SVM)模型、浅层及深度学习神经网络等模型方法^[5],学习到更好的特征表示,进行数据校准、目标识别、态势判断等。特征级融合的优点是实现了多类型、大容量信息的有效压缩,有利于实时处理,具有较大的灵活性,但缺点在于损失了部分原始信息,可能会导致融合质量有所下降。

3) 第三层级是决策级融合,主要为整体感知

和决策判断,属于一种高层次的融合。该层级针对探测研究的目标,采用二次特征提取和专用判决机制等多元化的方法,综合得出结论,为辨识和决策提供依据。相比特征级融合,决策级融合抽象层次更高、能够基于目标的一些关键性质,快速实现对其定性和辨识^[6],通信数据量和计算复杂度更小。但是如果对关键性质把握不准,可能会带来较大偏差的误判^[7]。

1 技术难点

通过上述分析可以看出,不同层级、多源数据融合的方法各有优势。但是,要应用到面向海洋的科学探测的具体领域,特别是研究目标的特征提取与分析识别,这些通用性的方法在信息融合的各环节上还面临着诸多难点和挑战,具体表现在以下几个方面。

1) 信息获取片面化。海洋范围广、深度大,海洋探测中的目标(如航行船只、海洋生物、局部冰川、海域洋流和海底地质环境等)灵活性强、运动轨迹复杂。当前的探测技术(如红外^[8]、SAR图像探测^[9]、声呐频率探测等^[10-11])性能受限,探测平台(如机载巡航、悬浮声呐等)相对被动,各类探测设备以“单打独斗”为主,缺乏面向广域、深海的监测系统,难以形成整体性、全面性和及时性的信息获取机制,使得获取到的信息质量低、碎片化严重。

2) 特征融合质量差。与陆地和空间探测不同,海洋探测受海潮杂质、海底地质等水下复杂情况的影响很大^[12]。例如,频繁变化的声速、温度和风浪等,都会直接影响到主被动声呐探测、水下信息通信传输^[13]的性能。此外,探测设备获取到的往往是目标运动变化产生的现象的数据,只能反映出目标的一些“间接”特征,如遥感卫星设备拍摄的浅水区波尾迹图像,悬浮声呐收集的水下声波振动频谱等。这些参数不能直接反映目标本身的特征,导致后续特征融合与辨识的质量难以保证。

3) 目标误判概率大。现有的海洋探测手段获取信息并处理得到的特征结果(如合成尾迹图、声波振动谱等),往往只能反映目标的局部特征而非关键性特征^[14]。因此,无法全面、准确地区分出海洋探测目标的差别(如航行器、海洋设施和生物体等),容易发生误判和虚警,降低对海洋环境探测感知的准确性,进而影响海洋活动计划的制定和实施。

2 解决思路

针对上述信息获取片面化、特征融合质量差、目标误判概率大等技术难点,本文从信息获取模式、特征提取方法以及目标判别策略等几个方面入手,有针对性地提出解决思路。

2.1 体系化探测:获取全面信息

海洋探测的信息获取虽然困难重重,但并非铁板一块,除传统的图像(如可见光、红外、合成孔径雷达等)和声学(如主被动声呐等)等获取技术外,引入多种先进探测手段(如磁异探测、水下固定网络探测、甚低频探测、重力梯度探测等),能够综合获取“形、迹、声、电、磁”与目标有关的全方位特征信息,为后续的特征融合提供更多可能。

针对当前海洋探测中信息获取不系统、碎片化等问题,可依据目标在海岸附近、大陆架、大

陆坡到深海的活动范围和时间规律展开分析,构建“天、空、地、海、网”全方位、立体式的海洋信息探测体系,如图1所示。利用卫星实现高、中、低轨道全覆盖,采用高效的推扫策略实现周期性的广域探测;对目标活动变化轨迹的红外、可见光和雷达图像信息进行同一时间分别捕获;利用磁异、重力梯度等探测设备搭载海上无人机进行跨介质海洋探测,获取相关的热力学、磁场强度分布信息;利用水面浮标、水下固定探测网对局域范围内目标的活动特征进行收集。此外,在民用商船及试验、保障等船只上配置声学、电磁学等探测设备,通过全球范围内广域、长期航行获取和累积海洋中目标活动变化的离散点位信息等;地面测控站利用卫星、无人机、远洋船以及水下固定探测网等构建起一体化海洋探测网络,汇集多类型、全时段的探测数据,为后续更高层次的信息融合提供全面、及时、充足的原始信息。

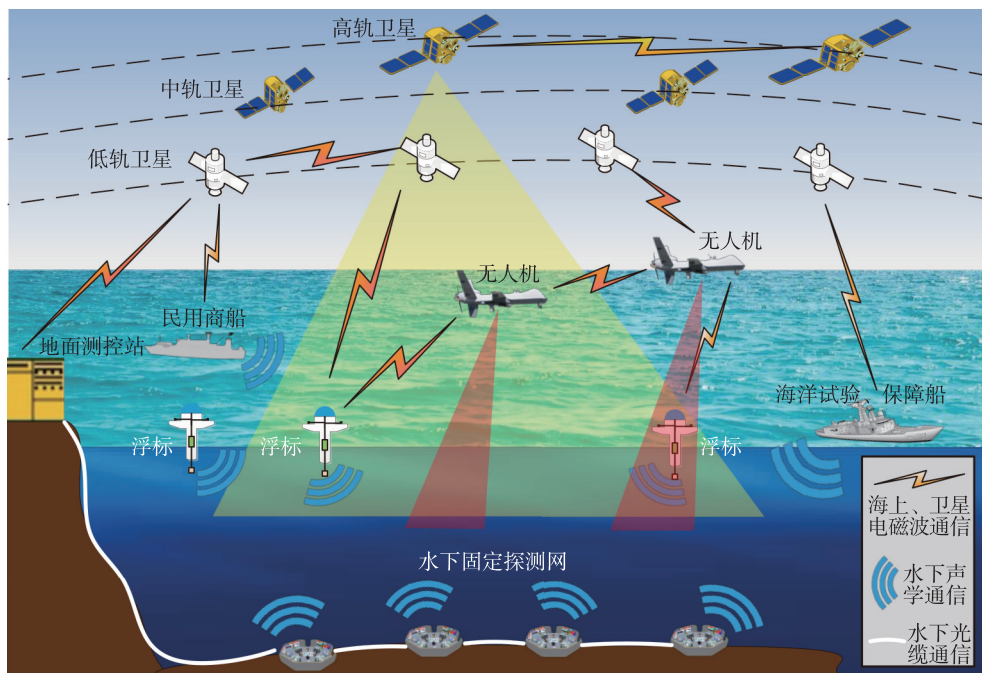


图1 海洋信息探测体系场景图

Fig. 1 Scenario of marine information detection system

2.2 分布式融合:发挥各级优势

针对深远海水下目标特征量受海洋环境影响大、无法直接获取、融合难度大等问题,本文提出分布式融合的策略,将复杂的多源信息按照声学、非声学进行分类,从低到高融合层级排序,从各部分数据处理到整体融合实现特征获取。声学信息类型相同或接近,采用数据级融合方式进行活动轨迹等信

息关联性分析,可有效剔除环境干扰和预测误差,提高融合精度,更好地提取运动特征。图像、磁异探测等非声学信息类型差异较大,分批采用特征级融合的方式,可以分别提取目标形态、局部热力学、电磁学分布等特征,减少中间量属性的特征参数在信息融合中的不确定性。

如图2所示,在基于卫星图像进行海洋生物探

测的特征级融合方案中,信息获取源被分为电子侦察卫星和遥感成像卫星两类,再分别进行信息融合,形成脉冲信号、内波尾迹图像和尾流温差等3种中间量特征信息,再将这些不同类型信息输入人工神经网络等数学模型中进行二次特征提取,实现可供识别的海洋生物目标特征信息;在决策级融合中,针对特征级提取的声学、图像等各类目标特征信息进行综合,利用机器学习等智能化手段实现再提取,最后进行综合判定。通过这样的方式,能够在每级获取局部最优特征提取,在多层次逼近全局最优目标识别。

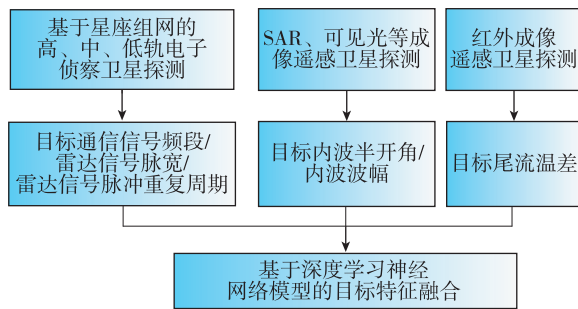


图2 基于卫星图像的特征级信息融合识别方案框图

Fig. 2 Block diagram of feature-level information fusion recognition scheme based on images of satellites

本文以局部海域的鲸鱼活动探测为例,进一步说明采用分布式融合方法在目标识别中的优势。基于网络公开数据,采用高斯分布、正态分布等通常分布模式,设置样本方差,生成训练样本和测试样本,包括3个类别鲸鱼游动尾迹波纹、体型轮廓投影、关键部位特征和主要活动规律等4类特征信息。首先采用支持向量机(SVM)对测试样本按照4类特征属性进行聚类处理,再利用反向传播网络(BP)神经网络进行目标的特征识别与分类。网络层与层之间采用全互连方式,包括输入层、隐含层和输出层。网络中设置输入层节点数为4(4类特征信息),隐含层节点数为12,输出层节点数为3(3种类别目标),最大训练迭代次数为500。利用训练样本生成网络,利用测试样本对目标类型识别效果进行验证。

在实验中设置训练样本为1200,选取类别1的130个测试样本数据进行测试。如图3所示,在测试中有5个样本错分为类别2,有2个样本错分为类别3。识别率(正确识别个数与总样本数的比值)达到94.62%。如图4所示,采用BP网络直接进行所有原始数据训练的单步骤信息融合方法,得到的

识别率为79.23%。相比之下,分信息属性SVM聚类+整体BP网络识别的分布式信息融合方法能够获得较高的识别准确率。因为此方法最大限度地缓解了特征级和决策级融合中信息量损失、信息类型复杂导致的低精度问题。一般而言,对于目标种类更多、信息特征类型更复杂的情况,采用分布式融合方法进行目标识别的提升效果更为明显。

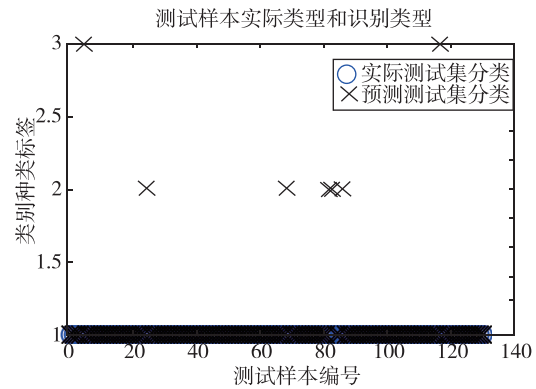


图3 基于多源信息的分布式融合效果的实例

Fig. 3 Example of distributed fusion effects based on multi-source information

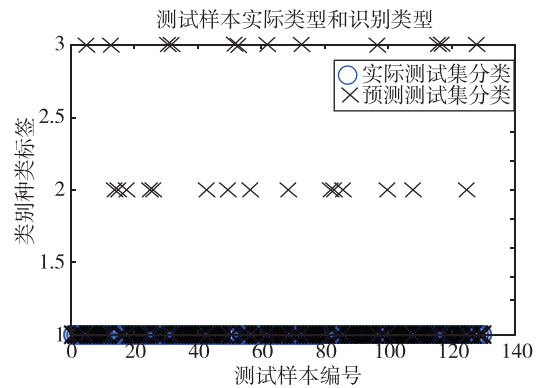


图4 基于多源信息的单步骤融合效果的实例

Fig. 4 Example of single-step fusion effects based on multi-source information

2.3 先验性知识: 辅助最终辨识

为了有效区分海洋探测中目标的关键性差别,提高决策级融合的准确性,在决策级引入多元化、先验性特征知识,辅助进行识别判定^[15]。一方面,针对目标本身的关键特性进行分析,包括:外形轮廓、水流特征振动声纹特征等,尾流图、声纹库等一系列关键特征判别数据库;另一方面,基于目标的历史活动观测记录和轨迹分析,提炼变化规律,构建智能化仿真和预测模型,有针对性地进行广域和局域的海洋监控及探测模型验证,

提高预测精度,为最终信息辨识、海洋活动计划制定构建多个维度的辅助判定标准,减少在决策级信息融合中由于关键信息缺失或人为因素干扰带来的误判和虚警。

3 未来展望

基于上述深远海探测信息融合技术分析,本文对多源信息融合技术未来的应用和发展提出如下思考与建议。

1) 发展新型探测技术,完善体系化探测系统。传统声学 and 图像等探测手段在信息获取中存在探测深度浅、范围小、易受干扰等问题。进一步拓展面向海洋探测的信息传感技术^[10-11]、研发新型探测手段有利于弥补当前系统的不足。以海洋探测应用为例,蓝绿激光在海水中信号衰减小,可利用光波获取高分辨率水下图像;重力梯度法能够跨介质将水下探测范围拓展到 km 级别;光量子探测技术能够通过水体参数快速识别目标位置;甚低频声波技术能够通过观察水动力场识别水下低噪声声源和远距离探测;紫外线照射海洋发光细菌来标记水下目标荧光尾流轨迹的生物探测技术等。有针对性地发展和引入这些新型探测技术,能够更好地完善体系化探测系统,更全面、及时地获取海洋探测的有效信息。

2) 针对具体应用场景构建分层次、分布式的信息融合机制。随着海洋活动越来越频繁,探测手段愈发多源化,数据量加速增长,环境场景日趋复杂,采用层次化、分布式的思路有针对性地构建信息融合机制,有利于快速降低信息融合的复杂度,提高态势感知决策效率。相比于集中式信息融合,分布式信息融合根据信息类型的划分,将数据初步处理放在信息源头,特别是在软硬件资源约束条件下,通过复杂问题划分和多源信息属性分类,实现单类型信息数据的最佳逼近,能够有效提高融合质量,降低特征提取偏差、误识别机率等。通过构建信息融合机制数据库,在不同场景需求下筛选合适的信息融合机制,可以大幅提升多源多维探测效率和质量。

3) 针对具体目标特性构建起先验知识库。知识是信息传播中获取的经验,知识的积累有益于不断提高信息获取的效率,使人们对于事物及其变化规律的认知更加清晰、稳定。构建先验知识库,是提高信息融合和算法模型效率的重要手段,

在已知信息下进行融合分析,不仅能极大地减少模型训练的难度和周期,还可以快速剔除大量错误判断情况^[13]。对于海洋探测而言,先验知识库的建立需要充分利用海底光缆、航行船只、水下悬浮网络节点等方式,针对水下探测目标的声纹特征、尾迹形态、活动规律等关键信息进行综合协同和长期积累。持续更新的先验知识库有助于和当前有限的特征级融合结果进行快速比对,进行决策级目标辨识,同时这对于复杂环境下系统化、体系化的态势感知、判断和决策,都有至关重要的作用。

4) 针对具体信息特点优化智能算法和模型。从支持向量机到神经网络模型,越来越多的智能算法和模型帮助人们在多源数据融合中实现有效地聚类、分类、计算和预测,在减少计算复杂度的同时,提高目标特征的提取质量。在具体应用过程中,还需要考虑数据量的大小,数据类型的关联性特征,合理选择模型的类型和规模,减少数据训练过程中梯度消失、无法收敛等问题;同时也要结合模型长期训练的方法和经验,在增强学习的过程中不断加入新的样本,逐渐提高模型预测的鲁棒性和准确度,探索模型架构的通用性优化思路、测试方法和评价标准^[16]等,不断提升模型构建的效率。

5) 目前,多源信息融合的研究主要停留在理论研究层面上,我国自主研发信息融合系统的能力不强,这是由于信息融合系统涉及结构模型、实时响应、判决准则等多方面的因素,而相应的技术与平台都需要进一步的完善。采用全局化体系构建、多元化平台研发、关键性技术突破、局限性近似等效、研究难点分解、多方联合验证等综合治理手段,能够由点及面、分阶段地实现多源信息融合系统工程的落地和应用。

4 结论

随着科学探测环境日趋复杂和信息获取技术快速发展,多源信息融合分析已成为人们进行环境感知、活动决策的关键性输入条件。但应用到海洋探测等具体领域时,通用化的融合方法会导致信息获取片面化、特征提取质量低、目标误判概率大等问题。基于本文提出的体系化探测、分布式融合和利用先验性知识等一系列解决思路,可以有效提高目标辨识准确率,减低多源信息融

合计算复杂度。随着全球星座组网部署应用、新型探测技术加速突破、体系化探测平台构建优化、多源信息融合机制深入探究和先验知识系统不断完善,针对具体应用场景探测感知的多源信息融合技术及工程实践将发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 刘准钊,潘泉,韩德强.多源信息融合专题简介[J].中国科学:信息科学,2020,50(11):1781-1782.
- [2] 张佳琦,张修社,韩春雷,等.跨域信息域融合技术发展思考[C].中国指挥与控制学会:第八届中国指挥控制大会论文集,2020:717-722.
- [3] 李洋,赵鸣,徐梦瑶,等.多源信息融合技术研究综述[J].智能计算机与应用,2019,9(5):186-189.
- [4] 张春宇,刘福才,黄茹楠.水下航行器姿态检测与数据融合算法综述[C].中国自动化学会过程控制专业委员会,中国自动化学会:第31届中国过程控制会议(CPCC 2020)摘要集,2020:121.
- [5] 张红,程传祺,徐志刚,等.基于深度学习的数据融合方法研究综述[J].计算机工程与应用,2020,56(24):1-11.
- [6] 王施运,李白杨,白云,等.面向国家安全场景的态势感知与分析方法研究[J/OL].情报理论与实践:1-10 [2021-06-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1762.g3.20210207.1712.007.html>.
- [7] 赵玲.多传感器信息融合技术及其应用[J].红外,2021,42(1):21-26.
- [8] 金亮.基于热尾迹红外特性探测水下航行器的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [9] 许述文,白晓惠,郭子薰,等.海杂波背景下雷达目标特征检测方法的现状与展望[J].雷达学报,2020,9(4):684-714.
- [10] Cho H, Seo Y W, Vijaya Kumar B V K, et al. A multi-sensor fusion system for moving object detection and tracking in urban driving environments[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Hong Kong, 2014.
- [11] Sun S, Lin H L, Ma J, et al. Multi-sensor distributed fusion estimation with applications in networked systems[J]. Information Fusion, 2017, 38(11): 122-134.
- [12] 张臣,李佳撞.海洋环境对猎雷声呐探测识别的影响及对策建议[J].数字海洋与水下攻防,2019,2(4):65-69.
- [13] Bader K, Lussier B, Schön W. Fault tolerance from formal analysis of a data fusion mechanism[C]. The 1st IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), Taichung, 2017:69-72.
- [14] 方尔正,黄志浩,桂晨阳.水面水下目标识别技术的现状与挑战[J].国防科技工业,2020(7):66-68.
- [15] 李季,孙同晶,刘桐.融入频域先验信息压缩感知方法的主动声呐回波信号处理[J].声学技术,2020,39(5):532-539.
- [16] 于洪,何德牛,王国胤,等.大数据智能决策[J].自动化学报,2020,46(5):878-896.

引用格式:李洪,张大铭,严晞隼,等.面向海洋探测的多源信息融合技术研究及展望[J].宇航总体技术,2021,5(4):1-6.

Citation: Li H, Zhang D M, Yan X J, et al. Research and prospect of multi-source information fusion technology for ocean detection[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(4): 1-6.