

电子与信息作战丛书

星载SAR与AIS综合的海洋目标 信息处理技术

郁文贤 计科峰 柳 彬 著



科学出版社

电子与信息作战丛书

星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标 信息处理技术

郁文贤 计科峰 柳 彬 著

本书得到国家自然科学基金重点项目“高分辨率
SAR 测试库及数据质量评估”(61331015)的资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是国内首部较系统、深入地研究和探索星载 SAR 与 AIS(特别是星载 AIS)综合的海洋目标信息处理技术的著作。全书在对星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术的研究背景、研究现状及发展趋势归纳、总结与分析的基础上,对星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理关键技术进行正确地定位,从特征层融合考虑,重点对面向融合的星载 SAR 与 AIS 信息预处理、星载 SAR 与 AIS 数据关联,以及星载 SAR 与 AIS 信息舰船目标融合检测与识别等关键技术进行较全面地论述,并通过实测星载 SAR 图像数据、岸基 AIS 数据,以及国内首颗小卫星(天拓一号)星载 AIS 数据进行实验验证,最后将提出的面向融合的星载 SAR 与 AIS 信息预处理、星载 SAR 与 AIS 数据关联等理论进一步应用在基于哨兵 1 号卫星(Sentinel-1)影像的海上舰船目标 SAR 样本库的构建中,为海量 Sentinel-1 数据在海洋监视领域的应用提供新思路。

本书可供从事卫星应用、海洋遥感等相关技术领域的科研人员和工程技术人员,以及高等院校教师和研究生教学之用。

图书在版编目(CIP)数据

星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术/郁文贤,计科峰,柳彬著. —北京:科学出版社,2017. 4

(电子与信息作战丛书)

ISBN 978-7-03-052004-3

I. 星… II. ①郁…②计…③柳… III. 海洋遥感—研究 IV. P715. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 044542 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 4 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 4 月第一次印刷 印张:14 1/4 彩插 4

字数:282 000

定价:110.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“电子与信息作战丛书”编委会

顾 问:李 天 孙 聪 刘志敏 李燕东 魏金钟
主 编:张 澎
编 委:王永庆 陈 刚 薛 晖 傅盛杰
桑建华 戴全辉 苏士明 邓龙江
丁鹤雁 许小剑 周建江 高 铁
高 健

“电子与信息作战丛书”序

21 世纪是信息科学技术发生深刻变革的时代,电子与信息技术的迅猛发展和广泛应用,推动了武器装备的发展和作战方式的演变,促进了军事理论的创新和编制体制的变革,引发了新的军事革命。电子与信息化作战最终将取代机械化作战,成为未来战争的基本形态。

火力、机动、信息是构成现代军队作战能力的核心要素,而信息能力已成为衡量作战能力高低的首要标志。信息能力,表现在信息的获取、处理、传输、利用和对抗等方面,通过信息优势的争夺和控制加以体现。信息优势,其实质是在获取敌方信息的同时阻止或迟滞敌方获取己方的情报,处于一种动态对抗的过程中,已成为争夺制空权、制海权、陆地控制权的前提,直接影响整个战争的进程和结局。信息优势的建立需要大量地运用具有电子与信息技术、新能源技术、新材料技术、航天航空技术、海洋技术等当代高新技术的新一代武器装备。

如何进一步推动我国电子与信息化作战的研究与发展?如何将电子与信息技术发展的新理论、新方法与新成果转化为新一代武器装备发展的新动力?如何抓住军事变革深刻发展变化的机遇,提升我国自主创新和可持续发展的能力?这些问题的解答都离不开我国国防科技工作者和工程技术人员的上下求索和艰辛付出。

“电子与信息作战”丛书是由设立于沈阳飞机设计研究所的隐身技术航空科技重点实验室与科学出版社在广泛征求专家意见的基础上,经过长期考察、反复论证之后组织出版的。这套丛书旨在传播和推广未来电子与信息作战技术重点发展领域,介绍国内外优秀的科研成果、学术著作,涉及信息感知与处理、先进探测技术、电子战与频谱战、目标特征减缩、RCS 测试与评估等多个方面。丛书力争起点高、内容新、导向性强,具有一定的原创性。

希望这套丛书的出版,能为我国国防科学技术的发展、创新和突破带来一些启迪和帮助。同时,欢迎广大读者提出好的建议,以促进和完善丛书的出版工作。

中国工程院院士

前 言

从国家发展战略的高度看,建设“海洋强国”是实现中华民族伟大复兴的需要,是实施海洋开发和维护海洋权益的可靠保障,是实现中国梦、构建“和谐海洋”的必然选择。走向海洋、开发海洋、监视海洋关系到国家的长远发展和安全。随着对海洋监视需求的与日俱增,海洋国际信息处理技术的发展受到越来越多国家的重视,实现大范围、高精度和近实时的海洋监视已成为国内外研究的热点之一。

星载合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)广泛应用于大范围海洋监视。特别是,其全天时、全天候和宽覆盖的工作能力使其成为海洋监视的首选。以 RADARSAT-2、TerraSAR-X 和 COSMO-SkyMed 为代表的新一代星载 SAR 系统进一步推动了海洋监视应用新的发展。然而,星载 SAR 图像舰船目标解译难度较大,极大地影响了海洋监视效率。本书作者针对星载 SAR 海洋监视应用的迫切需求与实际困难,瞄准国内外先进技术发展趋势,结合相关科研项目研究,以自动识别系统(automatic identification system, AIS)辅助星载 SAR 图像舰船目标解译为研究出发点,对星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术进行研究与探索。

本书是国内首部较系统、深入地研究和探索星载 SAR 与 AIS(特别是星载 AIS)综合的海洋目标信息处理技术的著作,汇集了作者近年来在该技术领域的最新研究成果,主要包括面向融合的星载 SAR 与 AIS 信息预处理、星载 SAR 与 AIS 数据关联、星载 SAR 与 AIS 信息舰船目标融合检测与识别,以及将以上理论应用到哨兵 1 号卫星(Sentinel-1)影像海上舰船目标 SAR 样本库构建。全书共 7 章,具体内容和章节安排如下。

第 1 章是概述,在对星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术研究背景及其意义分析的基础上,对星载 SAR 与 AIS 发展现状及趋势、星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术研究现状与发展趋势进行较全面地综述,并对星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理关键技术进行分析。

第 2 章是面向融合的星载 SAR 与 AIS 信息预处理技术。首先,针对性地研究星载 SAR 图像舰船目标信息提取相关技术。针对复杂海况条件下星载 SAR 图像舰船目标检测问题,提出一种自适应恒虚警率检测算法,可以较好地解决海面不均匀 SAR 图像舰船检测虚警率高的问题,并对舰船目标特征参数提取方法进行归纳总结。实验研究岸基 AIS 与“天拓一号”星载 AIS 信息解码及校验方法。在对星载 SAR 图像数据质量及定位误差水平分析基础上,实验研究星载 SAR 与 AIS

信息时空校准方法。

第 3 章是基于位置特征信息的星载 SAR 与 AIS 数据关联技术。在分析影响星载 SAR 与 AIS 数据关联主要因素的基础上,对基于位置特征信息的星载 SAR 与 AIS 数据关联的三个关键环节进行详细地分析与实验验证。为了增强基于位置特征信息的数据关联的鲁棒性,分别对其进行改进。针对复杂海况及舰船非线性运动的情况,提出两种改进的舰船运动预测模型——航向变化航位预测模型与航位灰色预测模型,实验对比分析其运动预测性能。在分析影响星载 SAR 图像运动舰船目标多普勒位移精度因素及其误差的基础上,提出多普勒位移估计中舰船投影航向与投影航速估计的改进方法。针对系统误差较大与高密度航行等情况,提出基于一致性点漂移(coherent point drift,CPD)的星载 SAR 与 AIS 数据关联方法,并通过实验评估算法性能。

第 4 章是基于位置与属性特征信息融合的星载 SAR 与 AIS 数据关联技术。在分析引入属性特征信息必要性的基础上,提出基于位置与属性特征信息融合的星载 SAR 与 AIS 数据关联方法。具体分析基于位置与属性特征信息融合的星载 SAR 与 AIS 数据关联关键技术——融合特征选择、融合决策准则和决策结果评估。重点针对基于位置与属性特征信息融合的星载 SAR 与 AIS 数据关联的融合决策准则选取,实验对比分析研究加权平均、非线性、DS (Dempster-Shafer) 证据理论,以及模糊推理四种决策方法的特点。

第 5 章是星载 SAR 与 AIS 信息舰船目标融合检测与识别技术。提出星载 SAR 与 AIS 信息舰船目标融合检测与识别模型,为融合检测与识别提供技术路线与方案。同时,提出一种基于层次分析法的高分辨率星载 SAR 图像舰船目标分类识别方法,建立舰船目标特征选择和分类决策中新的客观评价准则,为星载 SAR 与 AIS 信息舰船目标融合识别研究提供技术支撑。利用实测数据进行星载 SAR 与 AIS 信息舰船目标融合检测与识别实验,分析验证融合检测与识别技术方案的可行性。

第 6 章是基于星载 SAR 和 AIS 数据关联技术的哨兵 1 号卫星(Sentinel-1)影像海上舰船目标 SAR 样本库的构建。基于 Sentinel-1 星载 SAR 数据和海上目标的检测识别的应用背景,将前面章节提出的星载 SAR 与 AIS 数据预处理、星载 SAR 与 AIS 数据关联算法应用在构建海上舰船样本切片的测试数据库。根据 Sentinel-1 数据集的特点,分别提出针对 IW-SLC(interferometric wide single look complex)和 IW-GRD(interferometric wide ground range detected)两种数据产品模式下的 SAR 样本库构建流程,实现在线协同标注插件辅助提取星载 SAR 海上舰船信息,构建国内首个样本库数据管理平台——协同创新数据共享应用服务平台 OpenSAR。截至本书成稿,该样本库共包含 49 幅 Sentinel-1 SAR 场景影像、14 241 个 SAR 舰船样本切片、23 种舰船类型,同时融合风场信息,获得多极化、多分

分辨率的测试样本。该样本库预计在 2018 年可达五万个样本。

第 7 章是结束语,在本书内容总结的基础上,展望星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术的进一步研究工作。

本书的部分研究工作得到国家自然科学基金重点项目“高分辨率 SAR 测试库及数据质量评估”(61331015)、航天科技支撑基金、国防科学技术大学研究生创新资助,以及其他多个相关科研项目的资助。在研究工作过程中,国家海洋局第二海洋研究所、XXX 遥感所、XXX 信息工程技术研究所等合作单位在需求分析、实验数据获取,以及应用验证等方面提供了有益的帮助,特别是国防科学技术大学航天科学与工程学院微纳卫星工程中心提供了宝贵的“天拓一号”星载 AIS 数据支持。在书稿写作过程中得到了国防科技大学电子科学与工程学院孙即祥教授、周石琳教授、唐波副教授、邹焕新副教授、李智勇副教授、雷琳副教授、孙浩老师,ATR 国防科技重点实验室胡卫东教授,航天科学与工程学院陈小前教授,以及上海交通大学智能探测与识别上海市高校重点实验室张增辉副教授、郭炜炜博士后等专家的指导和帮助。国防科学技术大学电子科学与工程学院图形图像处理与模式识别课题组赵志和上海交通大学智能探测与识别上海市高校重点实验室黄兰清对于本书的成稿做出比较大的贡献。最后感谢各位博士、硕士提供的多方面支持和帮助:国防科学技术大学电子科学与工程学院图形图像处理与模式识别课题组邢相薇、赵志、陈文婷、冷祥光,上海交通大学智能探测与识别上海市高校重点实验室丁拥科、胡昊、刘泽宇、赵娟萍、祝胜男、李博颖、余文豪、李明杰等。另外,在写作过程中,作者还参阅了相关技术领域国内外专家学者的大量专著和论文,未及一一列出。在此一并表示最诚挚的谢意。

星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术的发展前景广阔,但在基础理论和工程应用方面还有大量的研究工作亟须开展。本书试图通过总结我们前期研究工作,对星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理关键技术进行研究与探索,以期对本技术领域研究抛砖引玉。

限于作者水平,不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。



2016 年 10 月
上海交通大学闵行校区

目 录

“电子与信息作战”丛书序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状与发展趋势	4
1.2.1 星载 SAR 与 AIS 发展现状与趋势	4
1.2.2 星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术研究现状	9
1.2.3 星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术发展趋势	17
1.3 星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术关键技术分析	19
1.4 本书内容	21
参考文献	23
第 2 章 面向融合的星载 SAR 与 AIS 信息预处理	31
2.1 概述	31
2.2 星载 SAR 图像舰船目标信息提取	31
2.2.1 舰船目标自适应 CFAR 检测	31
2.2.2 舰船目标特征参数提取	35
2.3 AIS 信息解码	37
2.3.1 AIS 信息解码及校验	37
2.3.2 AIS 信息解码实例分析	40
2.4 星载 SAR 与 AIS 信息时空校准	44
2.4.1 时间校准	44
2.4.2 空间校准	45
2.5 本章小结	47
参考文献	47
第 3 章 基于位置特征信息的星载 SAR 与 AIS 数据关联	56
3.1 概述	56
3.2 影响星载 SAR 与 AIS 数据关联的主要因素	57
3.3 基于位置特征信息的星载 SAR 与 AIS 数据关联关键技术	60
3.3.1 基于航位推测法的位置投影	60
3.3.2 基于多普勒位移补偿的位置预测	63

3.3.3 基于最近邻采样的搜索匹配	64
3.3.4 实验结果与分析	65
3.4 舰船运动预测模型改进	67
3.4.1 航向改变航位预测模型	67
3.4.2 航位灰色预测模型	70
3.4.3 实验结果与分析	72
3.5 高精度星载 SAR 图像运动舰船目标多普勒位移估计	77
3.5.1 影响多普勒位移精度的因素及其误差分析	77
3.5.2 舰船目标投影航速与投影航向的精确估计	78
3.6 基于空间拓扑结构特征的星载 SAR 与 AIS 数据关联	80
3.6.1 基于一致性点漂移的星载 SAR 与 AIS 数据关联	81
3.6.2 实验结果与分析	83
3.7 本章小结	91
参考文献	92
第 4 章 基于位置与属性特征信息融合的星载 SAR 与 AIS 数据关联	98
4.1 概述	98
4.2 基于位置与属性特征信息的星载 SAR 与 AIS 数据关联方法	99
4.3 基于位置与属性特征信息的星载 SAR 与 AIS 数据关联关键技术	100
4.3.1 融合特征选择	100
4.3.2 融合决策准则	103
4.3.3 融合决策结果评估	106
4.4 实验结果与分析	106
4.5 本章小结	119
参考文献	119
第 5 章 星载 SAR 与 AIS 信息舰船目标融合检测与识别	126
5.1 概述	126
5.2 星载 SAR 与 AIS 信息舰船目标融合检测与识别模型	127
5.2.1 星载 SAR 与 AIS 信息舰船目标融合检测	128
5.2.2 星载 SAR 与 AIS 信息舰船目标融合识别	129
5.3 基于层次分析法的高分辨率星载 SAR 图像舰船目标分类	131
5.3.1 基于层次分析的星载 SAR 图像舰船目标分类模型	131
5.3.2 基于层次分析的星载 SAR 图像舰船目标特征选择	131
5.3.3 基于层次分析的星载 SAR 图像舰船目标分类决策	134
5.3.4 实验结果与分析	136
5.4 星载 SAR 与 AIS 信息舰船目标融合检测与识别实验结果与分析	147

5.4.1 融合检测实验结果与分析	147
5.4.2 融合识别实验结果与分析	150
5.5 本章小结	156
参考文献	157
第6章 基于星载 SAR 和 AIS 数据关联技术的 SAR 样本库构建	164
6.1 概述	164
6.2 Sentinel-1 影像海上舰船目标 SAR 样本库构建流程	166
6.2.1 Sentinel 数据集介绍	166
6.2.2 IW-SLC 场景数据的 SAR 样本库构建流程	169
6.2.3 IW-GRD 场景数据的 SAR 样本库构建流程	175
6.3 星载 SAR 和 AIS 数据关联技术在 SAR 样本库构建中的应用	179
6.3.1 星载 SAR 海上舰船在线协同标注	180
6.3.2 星载 SAR 与 AIS 数据关联	182
6.3.3 SAR 与 AIS 信息融合的海上舰船样本	185
6.4 Sentinel-1 影像海上舰船目标 SAR 样本库分析	190
6.4.1 多源信息融合的海上舰船样本库	190
6.4.2 SAR 协同创新数据共享应用服务平台	194
6.4.3 SAR 样本库的应用与展望	197
6.5 本章小结	200
参考文献	200
第7章 结束语	202
7.1 总结	202
7.2 展望	203
附录 A 实验数据一览表	205
附录 B AIS 信息及解码标准	206
附录 C 海况相关参数	209
索引	210
彩图	

第 1 章 概 述

海洋安全是国家安全的基础和重要组成部分,海洋监视对维护国家海洋权益,保障国家海洋安全具有重要意义。目前,随着各国对海洋经济安全和军事战略利益的需求与日俱增,实现大范围、高精度和近实时的海洋目标信息处理技术已成为国内外研究的热点。星载合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)与自动识别系统(automatic identification system, AIS)综合的海洋目标信息处理技术研究立足于国家对大范围海洋监视和军事侦察需求,旨在突破限制星载 SAR 图像海洋目标解译能力的瓶颈,为基于多源遥感信息融合的海洋目标信息处理技术研究提供技术基础,充分利用星载 SAR 与岸基 AIS、星载 AIS 的互补性,实现高效准确的海洋目标信息处理。

1.1 研究背景及意义

海洋作为极其重要的战略资源,关系着国家的安全、前途与命运。海洋强国战略的提出彰显国家的战略决策与远见。从国家发展战略高度看,建设海洋强国是实现中华民族伟大复兴的需要,是实施海洋开发和维护海洋权益的可靠保障,是实现中国梦、构建“和谐海洋”的必然选择。走向海洋、开发海洋、监视海洋,关系到国家的长远发展和安全。海洋目标信息处理技术直接影响着国家维护领海权益的能力。近海监视已不能满足海洋大国的需求,必须发展远洋监视技术。特别地,大范围海洋目标信息处理技术的发展备受各国重视。随着对海洋经济安全和军事战略利益的需求与日俱增,实现大范围、高精度和近实时的海洋监视已成为国内外研究热点^[1,2]。

星载合成孔径雷达作为一种主动式微波传感器,以其全天时、全天候工作能力和广域探测能力成为海洋监视的首选。特别是,以 RADARSAT-2、TerraSAR-X 和 COSMO-SkyMed 为代表的新一代星载 SAR 系统有效促进了星载 SAR 海洋目标信息处理技术的发展,包括 TerraSAR-X2 在内的下一代星载 SAR 系统在保持已有技术优势的同时融入了新设计理念,将进一步推动海洋监视应用的新发展。在星载 SAR 海洋监视方面,虽然已成功实施了多项工程计划,如加拿大 OMW(ocean monitoring workstation)系统^[3]、美国阿拉斯加 SAR 演示验证系统^[4]、欧盟联合研究中心(Joint Research Centre, JRC)的 VDS 系统、英国 Qinetiq 的 MaST 系统、挪威 FFI 的 Eldhuset 系统、挪威 Kongsberg 的 MeosView 系统、欧盟的 IMPAST(improving fisheries monitoring through integrating passive and active sat-

ellite based technologies)系统^[5]和 DECLIMS(detection and classification of marine traffic form space)^[6]系统等,但均受限于星载 SAR 图像解译技术发展水平,舰船目标监视的能力十分有限。

自动识别系统产生于 20 世纪 90 年代,是集高精度卫星定位和甚高频无线传输等技术于一体的新型船舶助航系统^[7],是国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)规定强制安装在船舶上的航行设备。该设备具有全天时、全天候工作的优点,目前已广泛应用于识别跟踪船舶、避免碰撞、海洋环境治理和搜索救援等领域^[8]。AIS 信息包括船舶静态信息、动态信息、与航行有关的信息和与安全有关的信息。随着小卫星星载 AIS 技术的快速发展,岸基 AIS 有限的探测范围得到了很大的拓展,实现大范围,甚至全球的海洋舰船目标监视已成为现实。美国海军实验室和 ORBCOMM 公司等启动了 AIS 星座计划。海、陆、空、天一体的 AIS 立体监视网体系在舰船目标监视上有着独特的优势。由国防科学技术大学研制的我国第一颗小卫星星载 AIS“天拓一号”已成功发射,并为“神舟九号”搜救提供支持。另外,中国航天科技集团公司上海航天技术研究院等单位研制的国内首颗 AIS 商用微纳卫星,也是国内首颗采用高度集成设计理念的“精致”卫星平台研制的卫星,包括先进的 AIS 接收机和波束互补、对地全覆盖的 AIS 接收天线,对船舶高密度和中等密度区域有良好的检测率,具有低成本、高可靠、高性能和高通用化适应性等特点,计划于 2017 年上半年搭载长征四号丙火箭发射^[17],国内星载 AIS 与 SAR 同平台载荷技术的实现指日可待。

星载 SAR 与 AIS 在海洋监视方面具有优势互补的特性。AIS 报告具有丰富的舰船目标信息,而星载 SAR 图像舰船目标识别难度较大,利用 AIS 可以提高星载 SAR 图像舰船目标解译准确率。同时,考虑并非所有舰船都会安装 AIS,由于技术原因造成的 AIS 信号漏检和错检,以及由于人为操作造成的 AIS 信号漏检等,仅仅依靠 AIS 并不一定能把所有的舰船目标检测出来,而较成熟的星载 SAR 图像舰船目标检测算法完全可能将 AIS 漏报的舰船目标检测出来,因此星载 SAR 可以弥补 AIS 在舰船目标监视中的不足。

可以看出,星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术研究是非常有必要的。随着星载 SAR 与 AIS 的快速发展及其信息处理技术的不断进步,该项技术的研究对实现大范围、高精度和近实时的海洋监视具有十分重要的意义。目前该项技术已应用于海洋专属经济区监视、反海盗、奥运安保、搜索救援和海洋溢油事故污染源船只跟踪等应用中,如图 1.1 所示。星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术的研究可以有效地促进相关信息处理技术的进步,不管是在军用,还是在民用上均具有十分重要的科研价值。

首先,星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术的研究在促进星载 SAR 图像舰船目标解译技术进步的同时,可为基于多源遥感信息融合的海洋目标

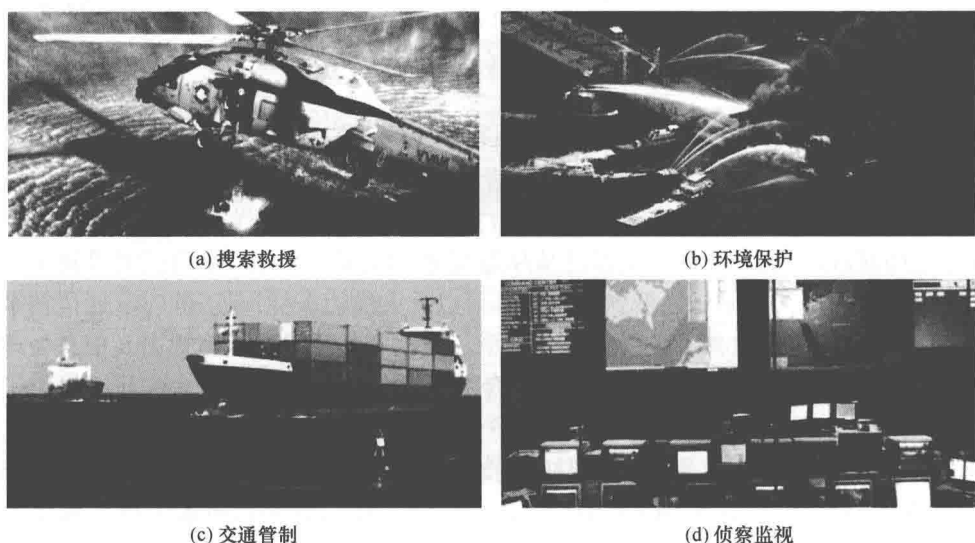


图 1.1 星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术应用

信息处理技术研究提供技术支撑。在利用星载 SAR 与 AIS 进行舰船目标监视时,一方面利用两者信息融合技术进行识别和跟踪,另一方面对 SAR 图像上检测到的舰船目标没有 AIS 报告对应的情况需要依靠优良的 SAR 图像舰船目标解译算法来进行处理。另外,基于卫星成像、电子侦察和 AIS 等多源遥感信息融合的海洋目标信息处理技术研究也离不开星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术支持。

其次,星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术在海洋专属经济区监视、海洋环境污染治理、反偷渡行动和奥运安保等民用中也发挥着十分显著的作用。随着全球化进程的不断加快,各国之间的海上交往活动日益密切,而同时引发的海上不安全因素也随之增多,这些不安全因素的存在会影响到航行安全、经济利益和国际合作。特别是,在立足近海向远海发展的总体战略指导下,星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术在保障海洋民用安全方面将发挥重要的作用。

再次,星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术是我军打赢信息化海战的军事战略需要。当前我国钓鱼岛和南海局势紧张,周边存在诸多不稳定因素,加之美国在战略上的遏制,实现实时、大范围和高精度的海洋监视显得尤为重要。远洋的情报搜集能力对海上作战影响较大,而星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术可有效地解决远洋舰船目标的预警问题。利用此技术可实现大范围海洋舰船目标的快速提取和识别、精确定位和近实时的连续跟踪,一方面提高了舰船目标定位精度和识别的能力,另一方面有效地拓展了海洋监视的时空范围,较好地解决了远洋作战情报保障问题。

1.2 国内外研究现状与发展趋势

海洋目标信息处理技术历来都受到许多国家的高度重视,并得到了较大的发展。星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术的发展离不开各自传感器技术的发展。先进的星载 SAR 系统可以为其提供含有丰富海洋环境信息及舰船目标信息的数据产品。AIS 传感器已从岸基发展到天基,其空间探测范围得到了较大的拓展,而从天基单星发展到天基星座可以大大缩短采样周期,同时其通信技术的不断发展显著地改善了数据的误差水平。数据产品质量的不断提高及信息处理水平的不断进步为星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术的研究提供了良好的基础。国内外对星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术的研究已有了一定的基础理论成果,并得到初步验证与试用。本节将对星载 SAR 与 AIS 发展现状与趋势、星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术的研究现状及发展趋势作全面地综述。

1.2.1 星载 SAR 与 AIS 发展现状与趋势

1. 星载 SAR 发展现状与趋势

星载合成孔径雷达作为一种主动微波传感器,从 20 世纪开始便有很多研究机构陆续开展了研究,典型的包括美国 SIR 系列、欧洲空间局(简称欧空局)(European Space Agency,ESA)ERS 系列和加拿大 RadarSat 系列等^[9]。从 20 世纪美国研制的首颗星载 SAR SEASAT,到目前以加拿大 RadarSat-2、德国 TerraSAR-X 和意大利 COSMO-SkyMed 为代表的新一代星载 SAR 系统,成像技术不断进步,具备了高分辨率、宽覆盖、多(全)极化和多工作模式等优点,促进了星载 SAR 海洋应用新的发展,如表 1.1 所示。目前,星载 SAR 已具备高分辨率、宽覆盖、多(全)极化和多模式等优点,包括加拿大 RadarSat-2、德国 TerraSAR-X,以及意大利 COSMO-SkyMed 在内的新一代星载 SAR 系统促进了星载 SAR 海洋应用新的发展。据公开报道,目前在轨运行的星载 SAR 系统有 20 个左右,另外还有 16 个星载 SAR 系统正在研发^[10]。2014 年发射的第二代 TerraSAR 具备更先进的探测能力,同时搭载 AIS 和热红外载荷。典型的 SAR 系统如图 1.2 所示。未来的星载 SAR 系统将在新技术、新模式和新体制等方面取得重大突破,全面具备高分辨率、小型化、低成本、宽测绘带、多基地,以及多模式等优点,并具有地面、海洋运动目标指示能力(ground moving target indication,GMTI),能够获取丰富的目标与环境信息。未来十年间,欧洲空间局计划发展大约 16 个星载 SAR 系统,美国计划发展大约 10 个星载 SAR 系统,德国计划发展大约 6 个星载 SAR 系统,加拿大计划发展大约 3 个星载 SAR 系统。此外,日本也计划发展大约 3~5 个星载

SAR 系统^[10]。

表 1.1 星载 SAR 发展

序号	名称	国家或组织	发射时间	波段	分辨率	备注
01	SEASAT	美国	1978 年	L	25 米	首颗星载 SAR
02	SIR-A/SIR-B	美国	1981/1984	L	40 米	航天飞机
03	Almaz 系列	苏联/俄罗斯	1987-1998	S	15-30 米	—
04	Lcacossl-5	美国	1988-2005	X	1(0.3)米	间谍卫星
05	SIR-C/X-SAR	美、德、意大利	1989 年	L/C/X	20 米	多极化航天飞机
06	Magellan	美国	1990 年	S	约 250 米	金星探测
07	ERS-1	欧洲空间局	1991 年	C	25 米	—
08	JERS-1	日本	1992 年	L	20 米	—
09	ERS-2	欧洲空间局	1995 年	C	25 米	—
10	RadarSat-1	加拿大	1995 年	C	9 米	Scan SAR
11	SRTM	美国	2001 年	C/X	30 米	干涉测高
12	ENVISAT(ASAR)	欧洲空间局	2002 年	C	30 米	多极化
13	ALOS(PALSAR)	日本	2006 年	L	10 米	全极化
14	SARLupe1-5	德国	2006-2008 年	X	1 米	间谍卫星 SAR-Lupe 3 搭载 AIS
15	遥感卫星一号	中国	2006 年	L	—	—
16	Cosmo-Skymed 1-4	意大利	2007-2010 年	X	3 米/1 米	星座
17	TerraSAR	德国	2007 年	X	3 米/1 米	全极化
18	RadarSat-2	加拿大	2007 年	C	3 米	全极化
19	TecSAR	以色列	2008 年	X	1 米	—
20	Kondor-E	俄罗斯	2008 年	S	1-2 米	—
21	遥感卫星六号	中国	2009 年	X	—	—
22	Kompsat-5	韩国	2009 年	X	1 米	—
23	RISAR	印度	2009 年	X	1 米	以色列研制
24	HJ-1-C	中国	2009 年	S	5 米	VV 极化
25	Smotr	俄罗斯	2009/2010 年	X	—	—
26	TanDEM-X	德国	2010 年	X	1 米	干涉测高
27	SAOCOM-1	阿根廷	2012 年	L	10 米	—
28	RISAT-1	印度	2012 年	C	3 米	双极化
29	MapSAR	巴西、德国	2012 年	L	3 米	—
30	Radarsat Constellation Mission(RCM)	加拿大	—	C	≤3 米	星座、搭载 AIS
31	TerraSAR-X2	德国	2014	X	0.5 米	搭载 AIS

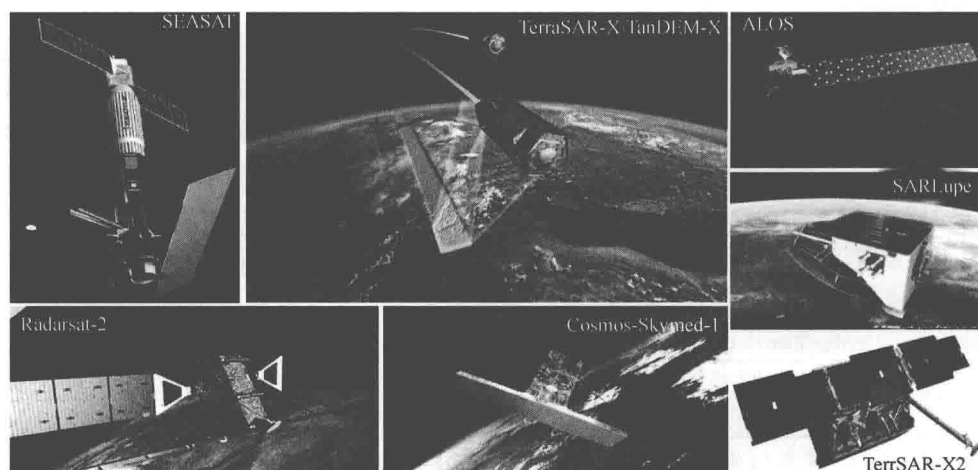


图 1.2 典型星载 SAR 系统

另外,在星载 SAR 图像舰船目标解译研究方面,目前国内外取得的研究成果主要集中在舰船检测和尾迹检测方面,而检测算法的研究尚不够深入、实验验证不够充分,存在普适性差等问题;对 SAR 图像舰船目标分类识别技术的研究尚处于起步阶段,研究成果较少。传统的星载 SAR 图像解译方法对于新数据产品可能不再适用,需要根据数据产品特点研究新的适用的数据处理方法,这将极大地促进星载 SAR 信息处理技术的发展。

2. 星载 AIS 发展现状与趋势

船舶自动识别系统是具有识别跟踪船舶、避免碰撞、环境保护和搜索救援等功能的一种新型辅助导航系统,采用 GPS(global position system)技术、甚高频(very high frequency, VHF)技术和自组织时分多址技术(self-organizing time division multiple access, SOTDMA)。AIS 按平台不同可分为船载 AIS、岸基 AIS、空载 AIS 和星载 AIS。限于岸基 AIS 探测距离有限,并随着小卫星系统技术的快速发展,基于小卫星星载 AIS 来实现大范围,甚至全球海洋监视的研究已成为热点。目前已基本形成多维空间一体化的 AIS 海洋监视体系,如图 1.3 所示。

星载 AIS 的研制虽然起步较晚,但目前已得到了较大发展,从最初的概念演示到星座计划前后发展不到十年时间,如表 1.2 所示。典型的在轨运行的 AIS 卫星平台主要包括美国 ORBCOMM 公司的 VesselSat 系列^[11,12]、美国 SpaceQuest 公司的 AprizeSat 系列^[13,14]、德国 OHB 公司的 Rubin 系列^[15,16]、加拿大 COM DEV 公司的 NTS^[17]、挪威 FFI 的 AISSat-1^[18]。为进一步发展星载 AIS 技术,抢占技术制高点,ORBCOMM 公司启动第二代卫星星座(OG2)计划^[19],美国海军实