

基于空间信息网络的海洋目标监视分析与展望

何友¹, 姚力波¹, 江政杰²

(1.海军航空大学信息融合研究所, 山东 烟台 264001; 2.海军装备部信息系统局, 北京 100841)

摘要: 空间信息网络是海洋目标监视必不可少的技术, 基于空间计算模式的多源卫星信息融合能够有效提升天基平台对海洋目标的广域搜索、精细识别、持续监视和快速响应能力, 是我国未来天基海洋目标监视的重要发展方向。从空间信息网络和天基海洋目标监视的发展现状、相关研究工作、差距与不足等角度出发, 分析了基于空间信息网络的海洋目标监视, 结合空间计算技术, 提出了基于空间信息网络的海洋目标监视发展建议, 并重点研究了空间资源组网、在轨信息融合和新型载荷三方面的关键技术。

关键词: 空间信息网络; 海洋目标监视; 空间计算模式; 信息融合

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019056

Summary and future development of marine target surveillance based on spatial information network

HE You¹, YAO Libo¹, JIANG Zhengjie²

1. Research Institute of Information Fusion, Naval Aviation University, Yantai 264001, China

2. Information System Agency, Naval Equipment Department, Beijing 100841, China

Abstract: The space information network is indispensable for marine target surveillance. Multi-satellite information fusion methods which are based on spatial computing mode can improve the ability of wide-area scanning, accurate recognition, persistent tracking and rapid responding. The mode of on-board information fusion for sea target surveillance needs to be further studied. Firstly, the developments of spatial information network and satellite for sea surveillance were discussed and the existing problems were summarized. Then the architecture of marine target surveillance based on spatial computing was put forward. The key technology and future development of on-board computing for ocean target surveillance were studied and discussed in the fields of spatial networking and information fusion.

Key words: space information network, maritime surveillance, spatial computing mode, information fusion

1 引言

海洋是国家安全的重要屏障和经济发展的主要通道, 海上安全关系到我国国家利益的发展, 海上方向仍然面临着传统和非传统的安全威胁。目前, 地基、海基、空基和天基海洋目标探测技术发展迅速, 形成了全谱段、主被动的海洋监视传感器谱系, 但这些平台之间或独立工作, 或者仅进行简

单配合, 多平台、多时相、多维度的海洋目标探测信息得不到及时有效的融合, 海洋目标尤其是远海区域目标监视的实时性、连续性仍然较弱, 海洋重点目标的持续监视能力和海洋突发事件的快速响应能力仍需要进一步提升。

空间信息网络是以空间平台(如同步卫星或中、低轨道卫星、平流层气球和有人或无人驾驶飞机等)为载体, 实时获取、传输和处理空间信息的网络系

收稿日期: 2018-12-02; 修回日期: 2019-03-24

通信作者: 姚力波, ylb_rs@126.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.91538201)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.91538201)

统。空间信息网络通过组网互联,实时采集、传输和处理海量数据,实现卫星遥感、卫星导航和卫星通信的一体化集成应用与协同服务^[1]。空间信息网络主要包括探测、通信和计算三类资源,空间计算以快速处理和高速通信为基础,将传感器、处理器和用户终端组成一个动态实时分布式处理网络,实现海量空间数据在轨观测、处理与分析。随着空间信息网络探测、通信和计算能力的极大提高,空间计算可以代替地面数据处理的大部分功能,进一步支撑海洋目标的多平台协同探测和多源信息融合,逐步实现海洋目标的广域发现、精确识别、连续观测和快速响应。

本文结合我国空间信息网络建设发展现状和未来规划,从空间信息网络海洋目标监视的发展现状、差距与不足、未来趋势等几个方面分别进行阐述,研究基于空间信息网络的海洋目标监视,分析展望其体系架构和关键技术,重点研究空间信息融合处理。

2 空间信息网络海洋目标监视概述

2.1 空间信息网络的 Research 与发展

空间信息网络是地面网络技术向空中、太空和深空的延伸和拓展,是卫星通信技术和互联网技术相结合的必然结果。国外空间信息网络研究经历了由天基通信组网到天基、空基、地基一体化和通信、探测、计算一体化组网的发展历程。美国对空间信息网络的研究起步较早,实施了 IPN(interplanetary internet)^[2]、NGSI(next generation space internet)^[3]、OMNI(operating mission as nodes on the internet)^[4]、TCA(transformation communication architecture)^[5]、SCaN(space communication and navigation)^[6]等项目,对空间组网体系架构、通信协议进行研究和验证,开展了 Sensor Web^[7-8]、IEOS(intelligent earth observing satellite)^[9-11]等计划,研究空间传感器系统集成和信息融合技术。美军建设的 GIG(global information grid)系统能够将美军布设在全球范围内的传感器网、计算机网和武器平台网综合集成,实现全球性的信息化作战空间网,GIG 是空间信息网络设计思想和应用优势的体现。欧盟和俄罗斯也提出了各自的空间信息网络计划,进行了通信系统和对地观测系统集成化研究。随着微纳卫星技术的发展,一些商业公司也开始进行空间信息网络的研究和构建,例如 Google、One Web、SpaceX、LEOSat

等公司各自提出的太空互联网计划,Planet Labs、BlackSky Global、UrtheCast、EarthNow 等公司也开始构建各自的遥感小卫星星座。

美国一直重视研究卫星数据在轨处理技术,美军战术快响(ORS, operationally responsive space)系列卫星能够在轨分析卫星采集的图像数据和信号数据,准实时地快速提供目标信息、战备及战场毁伤评估信息,同时该项目还开展了卫星之间如何相互引导实现目标成像的研究^[12]。美军自 2012 年起开始关注空间计算技术,开展了卫星在轨信息处理、空地一体化协同组网等技术研究,涵盖了云计算、空间预测分析、空间信息协同等领域。目前,美国空军研究实验室已完成了在地球同步轨道部署星上云计算网络的实验,并正在探究高/中/低多种轨道类型的异构网络云计算部署方案及性能研究^[13]。

我国对空间信息网络的研究也经历了与国外相同的发展路径。1999 年,召开了天基综合信息网络研讨会,2000 年,在《中国的航天》白皮书中首次明确建设天地一体化网络系统的发展目标,2013 年、2015 年和 2017 年召开了天地一体化信息网络高峰论坛,2013 年,国家自然科学基金委员会立项空间信息网络基础理论与关键技术重大研究计划,2016 年,实施天地一体化信息网络重大工程。国内学者对空间信息网络体系和技术进行了深入研究。沈荣骏院士在 2006 年正式提出了“天地一体化航天互联网”设想^[14],分析了我国天地一体化航天互联网发展的体系结构、网络协议和发展步骤。张乃通院士研究了我国建设天地一体化信息网络的基本架构、技术难点并给出了初步建设性建议^[15]。吴曼青院士设计了我国天地一体化信息网络的总体架构,并分析了网络协议、安全保密、运维管控等关键技术。姜会林院士深入分析了天地一体化信息网络中光通信和光学探测的关键问题^[16]。孙家栋院士和李德仁院士提出了“互联网+天基信息服务系统”的构想,李德仁院士还提出了空地一体化对地观测网络、对地观测脑等构想^[17-19],通过组网互联,实时采集、传输和处理海量数据,实现卫星通信、卫星遥感和卫星导航一体化的天基信息实时协同服务。国内其他学者也开展了空间信息网络架构、关键技术等方面的相关研究^[20-24]。此外,国内学者还开展了智能遥感对地观测卫星和在轨数据处理方面的研究工作^[25-28]。北京理工大学、中国科学院自动化所、中国科学院电子所等单位开展了星上合成孔径雷达

(SAR, synthetic aperture radar) 实时成像、星上图像预处理、星上目标检测与识别等方面的研究。我国卫星已经具有在轨数据预处理、数据压缩、目标检测等功能^[29-31]。

2.2 空间信息网络海洋目标监视研究现状

空基和岸基海洋目标监视的研究发展较早,国内外对其体系设计和关键技术研究相对较多。本节主要分析讨论天基海洋目标监视的发展。世界各海洋大国都非常重视利用天基平台来提高海洋监视能力。军事上,美国和俄罗斯已经建成了以电子侦察方式为主、雷达和成像为辅的实用型海洋监视卫星系统,其发展历程充分体现了多手段融合、多目标兼顾和天地一体网络化的特点。法国积极发展电子侦察卫星和高轨高分辨率光学成像侦察卫星,以满足未来海洋作战需求。德国、意大利、加拿大、日本、欧盟等国家和国际组织虽然没有专门的天基海洋目标监视系统,但借助于军事成像侦察卫星或者商业遥感卫星,开展了一系列天基海洋目标监视研究,这些项目主要是基于合成孔径雷达(SAR)卫星开展,例如德国的 SAR-Lupe、TerraSAR-X 和 TanDEM-X 卫星,意大利的 COSMOS-Skymed 卫星,加拿大的 RadarSat 卫星等,特别值得注意的是,这些 SAR 卫星具备地面动目标指示(GMTI, ground moving target indicator)工作模式,对海上慢速目标和弱小运动目标检测非常有利^[32]。

民用上,国外天基海洋目标监视主要基于商业 SAR 卫星和 AIS (automatic identification system) 卫星,逐渐融合商业光学遥感卫星。美国、德国、加拿大、挪威等国家都发射了专门的 AIS 卫星,未来规划将建成多个 AIS 小卫星星座,实现全球海域合作目标的实时动态监视。国外开展了一系列融合卫星信息的全球海域连续观测研究项目,例如美国的 C-SIGMA(collaboration in space for global maritime awareness)项目融合 SAR 和光学遥感卫星、AIS 卫星和通信卫星(M2M/SMS/LRIT)数据^[33]。加拿大的 Polar Epsilon 项目融合 SAR 遥感卫星、AIS 卫星、通信卫星 LRIT (long range identification and tracking)、岸基 AIS 和岸基雷达数据,未来还将融合光学遥感卫星、无人机、海岸巡逻机、巡逻艇等提供的数据^[34]。欧盟的 LIMES (land/sea integrated monitoring for European security) 项目用 GMES (global monitoring for environment and security) 卫星、SAR 和光学商业遥感卫星、星载 AIS、通信卫

星等实现对地中海目标监视^[35], Pilot 项目主要研究利用 SAR 遥感卫星和光学遥感卫星提高对海上目标的精细探测和识别能力,并进行海上态势决策支持研究^[36]。

我国已经成功发射了“高分”“海洋”“资源”“环境”等系列的民用遥感卫星。其中,高分四号地球同步轨道光学成像卫星,在 3.6 万千米外的轨道上实现 50 m 空间分辨率,其监测范围覆盖中国及周边 4 900 万平方千米的陆海区域,高分三号卫星是我国首颗分辨率达到 1 m 的 C 波段多极化民用 SAR 卫星,能够高时效地实现 1~500 m 空间分辨率、10~650 km 幅宽的不同应用成像模式,具有高分辨率、大成像幅宽、多成像模式,能够全天候、全天时进行海洋和陆地监测与监视,能通过调整姿态机动扩大观测范围,提升快速响应能力。我国天基探测系统的发展显著提高了对海洋目标监视的时空覆盖能力和快速响应能力,为实现大范围海洋目标持续监视提供了多模式的海量空间数据支持^[37-39]。中国科学院电子所、国防科技大学、武汉大学等单位开展了基于多源卫星信息融合的海洋目标监视研究^[40-42]。

2.3 发展启示

世界各海洋大国都十分重视空间信息网络海洋目标监视的研究,其发展具有以下特点:1) 多传感器协同探测,针对近海和远海应用场景,逐步完善天、空、岸对海探测手段,形成多平台、全谱段、主动被动相结合的多维探测网络,未来重点发展高轨高分辨率成像卫星、天基监视雷达等新型海洋目标探测系统;2) 多源信息融合处理,基于中/低分辨率光学和 SAR 遥感图像实现海洋目标的广域发现,基于高分辨率的光学和 SAR 图像实现海洋目标的精细识别,基于电子侦察和 AIS 数据实现海洋目标的连续跟踪,未来将重点向航迹推演、危险告警等高层次融合的研究方向发展;3) 观测与处理智能融合,基于空间计算模式设计多载荷协同控制、多平台相互引导和多信息融合处理的新机制,实现海量空间数据在线协同获取和协同分析,是基于空间信息网络的海洋目标监视未来发展新模式。

目前,我国空间信息网络对海洋目标监视研究发展迅速,但仍存在以下问题:1) 远海区域的热点海域事件和海上时敏目标实时持续掌控能力仍然不足,卫星资源有限,受轨道、频谱、工作弧段、运载能力等因素的限制,难以通过增加卫星节点数量和提高单卫星节点能力来获得大范围海洋目标

持续跟踪所需的时空覆盖范围，并且天基平台之间或单独工作或进行简单的配合工作，还不具备卫星动态组网协同探测能力；2) 空间数据智能化处理水平滞后，海洋目标检测、识别和跟踪大多基于传统理论实现，以深度学习为代表的类脑智能计算理论在海洋目标监视信息处理中尚处于起步阶段，与实际应用需求还有较大的差距；3) 空间计算能力有限，大部分卫星只能实现在轨数据预处理，部分卫星具备了一定的海洋目标在轨检测能力，天基与岸基、空基之间的信息交互能力较弱，空间信息网络分布式动态组网协同计算仍处于理论研究阶段；4) 多源空间信息融合处理能力不足，现有空间数据处理系统大多按照单一平台数据源设计，积累的海量空间数据没有充分处理，舰船目标识别特征、舰船目标行为规律、海上态势威胁估计等高层次融合识别核心技术研究较少。

基于空间信息网络的海洋目标监视是未来的发展趋势，尤其是空间计算技术将极大提升海洋目标监视的信息处理能力和快速响应能力，因此，既要注重研究先进的海洋目标侦察监视技术，发展新型海洋目标侦察监视装备，建立完善的海洋目标监视系统，更要重视天、空、岸、海多平台多传感器观测信息融合处理核心技术的研究，通过信息融合处理，将不同空间平台、不同类型传感器深度整合，

实现广域海洋目标的精细识别和连续观测。

3 关键技术研究

空间信息网络中的航天、航空、海基、岸基、临近空间等平台共同组成探测、通信和计算一体化网络，通过空间计算模式实现海洋目标监视信息在线获取、处理和传输，为用户提供近实时多维度的海上态势情报，其体系如图 1 所示。空基、海基和岸基海洋目标监视长期是研究的重点，其技术发展相对成熟，但上述平台传感器只能用于监视近海和舰船周边。天基海洋目标监视是远海区域海上目标监视的主要手段。天基平台组网探测具有节点高速运动频繁交接、网络拓扑结构动态变化、空间观测稀疏非均匀、数据海量异构等特点，需要解决网络架构、通信协议、运维管控、信息获取与处理等多个方面的关键技术。相对于美国的全球布设地面站的特点，我国主要以本土布站和测量船结合的方式完成卫星测控和数据接收，从任务规划到数据分发的延迟难以满足远海区域高时效性的任务需求。基于空间计算的海洋目标监视通过空间计算资源分布式动态组网，在轨融合处理多源海量异构空间数据，利用星间链路共享目标指示与引导信息，实现自主任务规划和多星多载荷协同控制，提高探测数据处理的时效性和快速响应能力。基于空间计算的

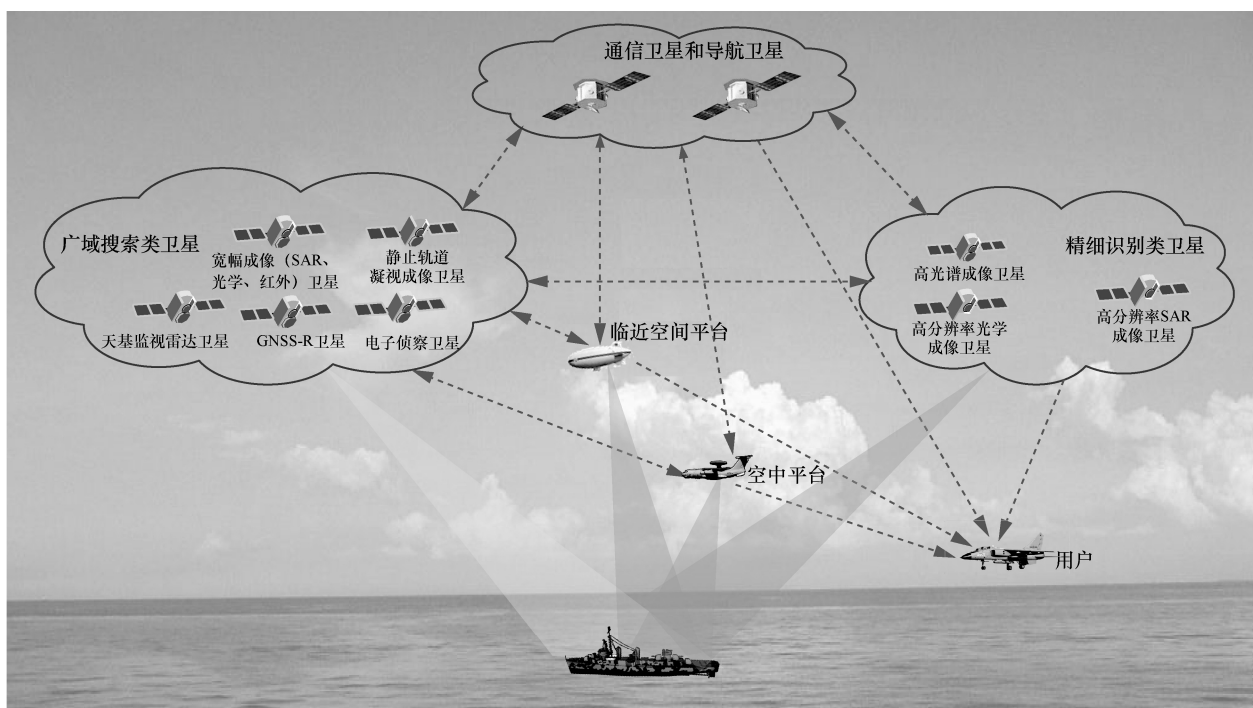


图 1 空间信息网络海洋目标监视体系示意

多源信息融合是我国海洋监视的发展方向 and 必然趋势。本节从空间计算的角度出发,研究天基海洋目标监视信息感知,即信息获取与处理方面的关键技术,从空间资源组网、在轨信息融合和新型海洋目标监视载荷三方面进行分析。

3.1 空间资源组网

空间资源组网包括探测、通信和计算资源等方面的组网,随着星上探测、存储、计算和通信能力的不断提升,不同类型、不同轨位的卫星组成一个高速动态互联网络,通过空间计算技术,结合基于地面大数据处理的星地协同处理机制,将多源海量异构空间数据分配到空间云计算网络,实现在轨任务驱动、信息感知与融合相统一的海洋目标空间智能观测与处理一体化网络。

1) 天基多平台多传感器协同探测

海洋目标监视具有海域广阔、目标稀疏且机动性较强等特点,单一卫星、单一传感器难以满足探测需求。天基海洋目标监视可以综合运用多平台(高/中/低轨)、多传感器(电子侦察、成像侦察、AIS、通信等),在通信卫星和中继卫星的支持下,通过优势互补实现协同探测。天基多平台多传感器海洋目标协同探测与单星探测和静止目标多星探测不同,需要重点解决多平台频繁交接背景下的海洋目标接力跟踪问题,包括时敏目标和事件在轨智能感知、天基多平台主动补盲机制、天基多平台海洋目标交叉提示与引导交接,以及建立面向海洋监视任务需求的在轨动态自主任务规划机制,实现天基海洋目标在轨探测与处理一体化。

2) 天基多平台云计算架构

天基多平台获取的观测数据具有海量异构的特点,单一卫星难以及时有效地完成多源数据融合处理,并且海量原始数据的传输给通信卫星带来了负担。卫星都具有星上计算和存储能力,不同轨位卫星的计算资源组成一个高速动态重构的空间云计算网络,通过设计适应在轨实时快速处理的体系架构、硬件芯片和软件算法,将海量多维的海洋目标观测数据进行星间动态分配,实现分布式计算和存储。需要重点解决大时空尺度下的网络体系结构模型、可扩展的异构平台组网、快速发现和自适应容断处理网络、星上高速嵌入式数据处理架构与硬件等关键技术,实现多源卫星海洋目标监视信息的在轨分布式融合处理。

3) 天基平台高速通信组网

天基平台高速运动,网络拓扑结构实时动态变化,链路之间频繁中断,并且平台之间距离遥远,链路之间通常存在较大的传输时延。传统的地面网络技术不能直接移植应用到空间网络,需要解决高动态时变网络结构模型、异构大时空尺度组网协议、宽频带大容量高速星间通信、星间传输高效可靠编码等核心技术,实现天基海洋目标监视信息的多节点实时传输和共享。

3.2 在轨信息融合

传统信息融合方法是基于岸基、海基和空基稠密观测数据和地面处理系统设计的^[43]。基于空间计算模式的在轨信息融合需要考虑卫星稀疏观测、星上处理系统等多方面的特点,对海量多维异构的卫星观测数据进行数据层、特征层和决策层的融合处理(其中特征层融合是研究的重点和核心),为不同层次的用户提供符合应用需求的信息情报。在轨信息融合需要重点开展以下几方面的研究。

1) 单源卫星数据在轨预处理与信息提取

卫星海洋目标观测数据量大,但海洋目标分布稀疏,有效的卫星观测数据仅占很小一部分。相对于陆地应用,卫星海洋目标监视的特点是固定控制点稀少,甚至没有固定控制点。需要研究卫星遥感图像实时在轨辐射校正、无控定位、去云、海陆分割等预处理技术,设计高/中/低分辨率不同细节层次的多尺度遥感图像海上目标检测深度学习框架,设计基于多维特征融合的多源遥感图像(SAR、红外、光谱等)迁移学习算法,实现大范围卫星遥感数据在轨轻量化智能预处理与信息提取,为在轨多源信息融合提供高精度的舰船目标信息。

2) 多源卫星数据海洋目标智能关联

卫星海洋监视覆盖范围广,同一场景内相似目标多,重访周期长,通常采用稀疏非均匀采样观测模式,不同类型卫星数据从不同角度刻画海洋目标,数据结构和目标特征差异大。传统的基于目标状态信息的关联算法在卫星大时空跨度观测下关联准确率不高,传统的目标特征相似性度量关联方法大多是针对同类型、同结构数据设计,基于Minkowsky距离、Mahalanobis距离等距离度量函数实现。而多源异类数据的目标关联无法直接使用上述方法,多源异类数据在表征上是异构的,但是在语义层次上是关联的。需要通过研究海洋目标在数据类型、时空尺度、特征类型等之间的深层关系

图谱, 学习多维特征之间的隐含相似性关系和语义相关性, 设计基于认知理论的海洋目标关联模型, 实现多源卫星数据海洋目标跨域、多视图的智能关联。

3) 多源卫星数据海洋目标特征在轨融合

相对于数据层和决策层融合, 特征层融合能够最大限度地保留原始目标信息、降低数据冗余。但是卫星观测数据类型多, 提取的海洋目标特征维度和尺度不一致, 特征融合模型设计难度大, 现有数据描述方法未充分考虑各维特征之间的相关性, 冗余度高。借鉴生物认知和神经科学理论, 综合形状、光谱、极化等特征, 设计多维异类异构特征协同的层次化、稀疏化目标一致性描述模型, 将多源异构卫星观测数据映射至同一耦合特征空间, 并结合星上硬件和软件环境实现不同类型传感器、不同尺度观测数据的海洋目标特征在轨融合。

4) 星上海洋目标高层知识生成

高时效用户更关注海洋目标的高层次态势信息, 如威胁、意图、目的等, 卫星通常难以对海洋目标进行持续长时间跟踪监视, 难以生成海洋目标的稳定航迹, 稀疏长时间间隔的观测模式给海上态势估计与推演带来极大的挑战。多源卫星海洋目标观测数据融合处理的同时, 还需要综合水文气象、由历史运动数据学习得到的运动规律等信息, 设计基于多维时空信息的海洋目标行为协同推理模型, 实现卫星稀疏观测条件下的不完备观测数据信息拓展和态势推演, 帮助用户及时全面地掌控目标海域态势, 辅助用户决策。

5) 星地联合数据处理与动态交互

星上存储、计算能力与地面处理系统差别巨大, 海洋目标潜在特征和行为规律的挖掘需要海量数据支持, 信息融合过程中还需要更新大量的专家知识。设计在轨和地面的联合处理机制, 在地面进行海量遥感时空大数据的机器学习, 结合专家先验信息, 挖掘海上目标的识别特征、行为规律、动向意图和威胁程度、编队联动规则等隐性信息, 实时上传更新至星上, 为在轨海洋目标识别、海上态势预测及威胁评估等高层次应用提供支持。

3.3 新型海洋目标监视载荷

针对海洋目标和海洋环境的复杂性, 天基海洋目标监视载荷应该重点向广域搜索、反隐身、反电磁静默等方向发展, 完善多轨道、多谱段、多尺度、主被动相结合的天基海洋目标监视体系。

1) 地球静止轨道高分辨率成像卫星

地球静止轨道高分辨率成像卫星可以长期驻留在固定区域上空, 根据需要快速调整成像监视区域, 具备对重点事件的快速响应能力和对重点目标的近实时监视能力, 非常适合长时间监视和快速成像访问, 未来将在海上运动目标的侦察监视中发挥重要作用。目前, 国外正在加快开展光学合成孔径成像、稀疏空间成像、膜衍射光学成像等新技术研究, 突破静止轨道高分辨率卫星成像限制, 例如, 美国要求静止轨道遥感卫星分辨率达到 1 m, 实现对导弹发射车等地面目标和海洋舰船等高价值动目标的跟踪, 欧洲要求静止轨道遥感卫星分辨率达到 3 m, 实现实时监视海洋目标^[44-48]。

2) 基于导航卫星信号探测的遥感卫星

GNSS-R (global navigation satellite system-reflectometry) 是一种被动遥感探测技术, 利用全球导航卫星 L 波段信号为辐射源, 通过接收并处理海洋表面和海洋目标反射的导航卫星伪随机测距码信号或者载波信号, 实现海上目标探测, 具有信号源丰富、覆盖范围广、时空分辨率高、定位精度高等优点^[49-51]。由多颗低轨小卫星组成 GNSS-R 星座, 并结合海面、海浪对电磁波的反射和散射理论, 可以提取反射信号中的海洋目标的特征, 尤其是无线电静默条件下的海洋目标探测定位。国外已经发射了多组 GNSS-R 小卫星用于海面风速、风向测量和海面测高, 并初步开展了海洋目标探测的研究, 未来还将发射多个 GNSS-R 小卫星组成星座^[51]。

3) 分布式雷达小卫星星座

海洋目标隐身设计是针对舰载、机载雷达, 天基监视雷达可以有效地探测隐身海洋目标。天基监视雷达有雷达大卫星和分布式雷达小卫星星座这 2 种方案。雷达大卫星研制难度大、费用高; 分布式雷达小卫星星座通过空间上相隔几十米甚至几千米、编队构型相对稳定的多颗雷达小卫星组成卫星星座, 通过信号处理的方式, 虚拟形成比较长的雷达天线基线, 实现对雷达隐身海洋目标的大范围高概率发现^[52-54]。

4) 高轨红外海洋监视卫星

红外成像具备白天、暗夜、微光等条件下的海洋目标探测能力, 尤其是海洋背景比较单一, 红外图像反映的温度特性可以使舰船目标与背景分离, 有利于水面目标和水下目标尾迹的探测。高轨宽幅红外海洋监视卫星利用高灵敏度红外探测器观测

海洋目标本身及其活动特征, 可以为海洋目标发现提供补充信息。

5) 多载荷一体化卫星

多载荷卫星将具有广域搜索功能的载荷和具有精细识别能力的载荷进行综合一体化设计, 实现前一种载荷引导后一种载荷协同观测, 例如中/低分辨率遥感载荷引导高分辨遥感载荷, 电子侦察载荷引导高分辨率遥感载荷等, 通过单星多载荷协同探测和信息处理, 提高重点海洋目标的发现概率和识别准确度。

3.4 发展趋势

随着新型体制卫星传感器载荷和天上计算存储能力的提升, 天基海洋目标监视未来将发生以下4个方面的转变。

1) 静态向动态转变。凝视卫星能够对某一区域进行一定时间的连续观测, 能够应用于环境动态监视和运动目标持续跟踪, 实现了卫星遥感由定期静态普查向实时动态监测的发展, 数据由静态图像转变为动态视频, 可以获取运动信息, 从而提升对海上目标态势研判的准确性。

2) 稀疏向连续转变。通过发展中/高轨卫星系统和低轨小卫星星座系统, 对海上目标进行持续观测或者接力观测, 从稀疏观测向连续监视转变, 数据采样周期由小时级提升至分钟级, 提升天基系统对海上重要目标和突发事件的快速响应能力。

3) 人工向智能转变。天基信息感知已经进入大数据时代, 深度学习能够获得大数据背后的深层次情报, 揭示潜在规律, 挖掘人类不能发现的新模式, 云计算则为大数据的实时处理提供了平台支持。借鉴生物认知和神经科学理论建立天基遥感大数据智能分析技术, 能够极大地提高天基数据的应用价值。

4) 垂直向扁平转变。随着先进微纳卫星的发展, 卫星任务控制权限下放到用户, 使其能够操控在轨卫星, 直接下达观测指令, 直接获取情报数据, 极大缩短了从卫星传感器到用户的卫星指控链条, 实现快速感知海上时敏目标和事件。

4 结束语

当前是我国空间信息网络建设的重要时期, 尤其是天基信息网络正在进入全面组网的关键时期。空间计算将进一步显著提升对海洋目标监视的广域覆盖、精细识别、持续监视和快速响应能力, 是未来海洋目标监视的重要发展方向。但是基于空间

计算模式的海洋目标监视仍然存在着许多亟待解决的难点问题和关键技术, 需要结合空间资源组网、在轨信息融合等多个方面, 从我国海洋监视装备的发展现状和未来规划出发, 建设新型天空基海洋监视平台, 实现海洋目标协同探测和融合印证。

参考文献:

- [1] 李德仁, 沈欣, 龚健雅, 等. 论我国空间信息网络的构建[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 40(6): 711-715.
LI D R, SHEN X, GONG J Y, et al. On construction of China's space information network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 40(6): 711-715.
- [2] CERF V. Interplanetary internet (IPN): architectural definition[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society, 2001(5): 247.
- [3] RASH J, HOGIE K, CASASANTA R. Internet technology for future space missions[J]. Computer Networks, 2005, 47(5): 651-659.
- [4] MUKHERJEE J, RAMAMURTHY B. Communication technologies and architectures for space network and interplanetary internet[J]. IEEE Communication Surveys and Tutorials, 2012, 15(2): 881-897.
- [5] PULLIAM J, ZAMBRE Y, RMARKAR A. TSAT network architecture[C]/Military Communications Conference. 2008.
- [6] NASA. NASA space communications and navigation architecture recommendations for 2005-2030[R]. National Aeronautics and Space Administration, 2006.
- [7] BUTLER D. 2020 computing: everything, everywhere[J]. Nature, 2006, 440(7083): 402-405.
- [8] DELIN K A, JACKSON S. The sensor Web: a new instrument concept[C]/The International Society for Optical Engineering. SPIE, 2001, 4284: 1-9.
- [9] ZHOU G Q. Architecture of future intelligent earth observing satellites (FIEOS) in 2010 and beyond[C]/SPIE Earth Observing Systems VIII. 2001.
- [10] ZHOU G Q, MENAS K. Future intelligent earth observing satellites[C]/SPIE Earth Observing Systems VIII. 2002.
- [11] OKTAY B, ZHOU G Q. From global earth observation system of system to future intelligent earth observing satellite system[C]/The 3rd International Symposium on Future Intelligent Earth Observation Satellites. 2006.
- [12] 高永明, 吴钰飞. 快速响应空间体系与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
GAO Y M, WU Y F. The architecture and application of operationally responsive space[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [13] SHEKHAR S, FEINER S K, AREF W G. Spatial computing[J]. Communication of the ACM, 2016, 59(1): 72-81.
- [14] 沈骏. 我国天地一体化航天互联网构想[J]. 中国工程科学. 2006, 8(10): 19-30.
SHEN R J. Some thoughts of Chinese integrated space-ground network system[J]. Engineering Science, 2006, 8(10): 19-30.
- [15] 张乃通, 赵康健, 刘功亮. 对建设我国“天地一体化信息网络”的思考[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(3): 223-230.
ZHANG N T, ZHAO K L, LIU G L. Thought on constructing the integrated space-terrestrial information network[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 10(3): 223-230.

- [16] 姜会林, 刘显著, 胡源, 等. 天地一体化信息网络的几个关键问题思考[J]. 兵工学报, 2014, 35(1): 96-100.
JIANG H L, LIU X Z, HU Y, et al. Several key problems of space-ground integration information network[J]. ACTA Armamentarii, 2014, 35(1): 96-100.
- [17] 李德仁. 论“互联网+”天基信息服务[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 708-715.
LI D R. The ‘internet plus’ space-based information services[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 708-715.
- [18] 李德仁, 王蜜, 沈欣, 等. 从对地观测卫星到对地观测脑[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(2): 1-7.
LI D R, WANG M, SHEN X, et al. From earth observation satellite to earth observation brain[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(2): 1-7.
- [19] ZHANG X, CHEN N C, CHEN Z Q, et al. Geospatial sensor Web: a cyber-physical infrastructure for geoscience research and application[J]. Earth-Science Review, 2018, 185: 684-703.
- [20] 闵士权. 我国天基综合信息构想[J]. 航天器工程, 2013, 22(5): 1-14.
MIN S Q. An idea of China’s space-based integrated information network[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(5): 1-14.
- [21] 陈能成, 张良培. 空天地一体化对地观测传感网的概念与特征[J]. 测绘地理信息, 2015, 40(5): 4-7.
CHEN N C, ZHANG L P. Concept and characteristics of integrated earth observation sensor Web[J]. Journal of Geomatics, 2015, 40(5): 4-7.
- [22] 常青, 李显旭, 何善宝. 我国空间信息网发展探讨[J]. 遥测遥控, 2015, 36(1):1-10.
CHANG Q, LI X X, HE S B. Confer on the evolution of earth-space integrated information network of China[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2015, 36(1): 1-10.
- [23] 王俊, 杨进佩, 梁维泰, 等. 天地一体化网络信息体系构建设想[J]. 指挥信息系统与技术, 2016, 7(4): 59-65.
WANG J, YANG J P, LIANG W T, et al. Enlightenment of constructing integrated space-ground network information system[J]. Command Information System and Technology, 2016, 7(4): 59-65.
- [24] 孙晨华. 天基传输网络和天地一体化信息网络发展现状与问题思考[J]. 无线电工程, 2017, 47(1): 1-6.
SUN C H. Research status and problems for space-based transmission network and space-ground integrated information network[J]. Radio Engineering, 2017, 47(1): 1-6.
- [25] 李德仁, 沈欣. 论智能化对地观测系统[J]. 测绘科学, 2005, 30(4): 9-11.
LI D R, SHEN X. On intelligent earth observation system[J]. Science of Surveying and Mapping, 2005, 30(4): 9-11.
- [26] 李德仁. 论广义空间信息网格和狭义空间信息网格[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 513-520.
LI D R. On generalized and specialized spatial information grid[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 513-520.
- [27] 张兵. 智能遥感卫星系统[J]. 遥感学报, 2011, 15(3): 423-427.
ZHANG B. Intelligent remote sensing satellite system[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(3): 423-427.
- [28] 张吉祥, 郭建恩. 智能对地观测卫星初步设计与关键技术分析[J]. 无线电工程, 2016, 46(2): 1-5, 22.
ZHANG J X, GUO J E. Preliminary design on intelligent remote sensing satellite system and analysis on its key technologies[J]. Radio Engineering, 2016, 46(2): 1-5, 22.
- [29] 边明明, 李盛林, 岳荣刚. 星载 SAR 在轨成像实时处理算法研究[J]. 航天器工程, 2013, 22(6): 97-103.
BIAN M M, LI S L, YUE R G. Research of on-board real-time imaging processing algorithm of space-borne synthetic aperture radar[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(6): 97-103.
- [30] 谢愚, 陈亮, 龙腾, 等. 星载 SAR 在轨实时成像处理技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(S1): 317-320.
XIE Y, CHEN L, LONG T, et al. Research of space-borne SAR on-board real-time imaging processing technology[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(S1): 317-320.
- [31] 高昆, 刘迎辉, 倪国强, 等. 光学遥感图像星上实时处理技术的研究[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(1): 50-54.
GAO K, LIU Y H, NI G Q, et al. Study on on-board real-time image processing technology of optical remote sensing[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2008, 29(1): 50-54.
- [32] MITTERMAYER J, WOLLSTADT S, PRATS-IRAOLA P, et al. Bidirectional SAR imaging mode[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(1): 601-614.
- [33] THOMAS G. Collaboration in space the silver bullet for global maritime awareness[J]. Canadian Naval Review, 2012, 8(1): 14-18.
- [34] BUTLER P J. Project polar epsilon: joint space-based wide area surveillance and support capability[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2005.
- [35] CANNIZZARO G, TELESPAZIO S. The LIMES and G-MOSAIC EC integrated projects to support security management in EU[C]//ISU 13th Annual Symposium. 2009.
- [36] LENNOR M, THOMAS N, MARIETTE V, et al. Oil slick detection and characterization by satellite and airborne sensors: experimental results with SAR, hyper spectral and Lidar data[C]//IEEE international Geoscience and Sensing Symposium. IEEE, 2005.
- [37] 黄汉文. 海洋目标天基综合感知技术[J]. 航天电子对抗, 2011, 27(6): 11-14.
HUANG H W. Marine target space-based comprehensive awareness technology[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2011, 27(6): 11-14.
- [38] 王志敏, 王建斌, 王长力. 卫星信息支持海域感知关键技术分析[J]. 电讯技术, 2012, 52(5): 831-834.
WANG Z M, WANG J B, WANG C L. Analysis of key techniques for satellite information supporting maritime sensing[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(5): 831-834.
- [39] 徐一帆, 谭跃进, 贺仁杰, 等. 天基海洋目标监视的系统分析及研究综述[J]. 宇航学报, 2010, 31(3): 628-640.
XU Y F, TAN Y J, HE R J, et al. System analysis and research overview of space-based maritime surveillance[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(3): 628-640.
- [40] 雷琳. 多源遥感图像舰船目标特征提取与融合技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
LEI L. Research on feature extraction and fusion technology of ship target in multi-source remote sensing images[D]. Changsha: National Defense University of Science and Technology, 2008.
- [41] 种劲松, 欧阳越, 朱敏慧. 合成孔径雷达图像海洋目标检测[M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
ZHONG J S, OUYANG Y, ZHU M H. Maritime targets detection in synthetic aperture radar images[M]. Beijing: Ocean Press, 2006.
- [42] 郁文贤, 计科峰, 柳彬. 星载 SAR 与 AIS 综合的海洋目标信息处理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017.

- YU W X, JI K F, LIU B. Maritime target information processing based on spaceborne SAR and AIS[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [43] 何友, 王国宏, 关欣. 信息融合理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
HE Y, WANG G H, GUAN X, et al. Information fusion theory with applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [44] 郭玲华, 邓峥, 陶家生, 等. 国外地球同步轨道遥感卫星发展初步研究[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(6): 23-30.
GUO L H, DENG Z, TAO J S, et al. Preliminary research on development of foreign GEO remote sensing satellites[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2010, 31(6): 23-30.
- [45] 刘韬. 国外静止轨道大口径反射成像技术发展综述[J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(5): 1-9.
LIU T. An overview of development of foreign large aperture reflection imaging technology on geostationary orbit[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2016, 37(5): 1-9.
- [46] 孔祥皓, 李响, 陈卓一, 等. 面向持续观测的静止轨道高分辨率光学成像卫星应用模式设计与分析[J]. 影像科学与光化学, 2016, 34(1): 43-50.
KONG X H, LI X, CHEN Z Y, et al. Continuous observation oriented application mode design and analysis for geostationary-orbit high-resolution optical imaging satellites[J]. Imaging Science and Photochemistry, 2016, 34(1): 43-50.
- [47] 李晓博, 孙文方, 李立. 静止轨道遥感卫星海面运动舰船快速检测方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(8): 1862-1867.
LI X B, SUN W F, LI L. Ocean moving ship detection method for remote sensing satellite in geostationary orbit[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2015, 37(8): 1862-1867.
- [48] 张志新. 地球同步轨道卫星遥感图像舰船检测与运动监测[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
ZHANG Z X. Ship detection and motion monitoring with geosynchronous satellite remote sensing images[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2017.
- [49] USMAN M, ARMITAGE D W. Details of an imaging system based on reflected GPS signals and utilizing SAR techniques[J]. Journal of Global Positioning Systems, 2009, 8(1): 87-99.
- [50] YE J H, JIANG Y S, ZHAO J Z, et al. Study of SAR imaging with COMPASS signal[C]//Science China Physics Mechanics and Astronomy, 2011, 54(6): 1051-1058.
- [51] MARTIN-NEIRA M, LI W, ANDRES-BEIVIDE A, et al. "Cookie": a satellite concept for GNSS remote sensing constellations[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(10): 4593-4610.
- [52] 周荫清, 徐华平, 陈杰. 分布式小卫星合成孔径雷达研究进展[J]. 电子学报, 2003, 31(12A): 1939-1144.
ZHOU Y Q, XU H P, CHEN J. Research progress of distributed small satellite synthetic aperture radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12A): 1939-1144.
- [53] LI Z F, BAO Z. A novel approach for wide-swath and high-resolution SAR image generation from distributed small spaceborne SAR systems[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(3): 1015-1033.
- [54] 贲德, 王海涛. 天基监视雷达新技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
BEN D, WANG H T. Space-based surveillance radar technologies[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.

[作者简介]



何友(1952-), 男, 吉林磐石人, 博士, 中国工程院院士, 海军航空大学教授, 主要研究方向为信息融合理论及应用、大数据技术与应用等。



姚力波(1980-), 男, 山东昌邑人, 博士, 海军航空大学讲师, 主要研究方向为多源卫星信息融合。

江政杰(1982-), 男, 江西都昌人, 海军装备部信息系统局参谋, 主要研究方向为海上侦察预警体系规划与设计。