

我国海洋卫星遥感大数据及其应用服务

刘建强^{1,2}, 叶小敏^{1,2}, 兰友国^{1,2}

1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081;
2. 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室, 北京 100081

摘要

我国海洋水色卫星、海洋动力环境卫星和海洋监视监测卫星3个系列卫星星座以及配套的地面应用系统已基本建成。阐述了我国海洋卫星的发展历程、海洋系列卫星及其载荷、产品体系、数据获取和分发方式;从数据体量、数据种类、数据时效、数据价值等方面分析了海洋卫星遥感数据的大数据特征;同时分析了海洋卫星遥感基础数据集及其在灾害与环境监测中的典型应用及公共服务情况。

关键词

海洋卫星; 遥感大数据; 海洋应用

中图分类号: TP79

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-0271.2022016

Remote sensing big data from Chinese ocean satellites and its application service

LIU Jianqiang^{1,2}, YE Xiaomin^{1,2}, LAN Youguo^{1,2}

1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China
2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China

Abstract

The constructions of three series of the Chinese ocean satellite constellations, including ocean color satellites, ocean dynamic environment satellites and ocean monitoring satellites, and the supporting ground application system have been completed. The Chinese ocean series satellites and their development histories, payloads, product system, data acquisition and distribution methods were introduced. The big data characteristics of ocean satellite remote sensing data were analyzed from their data volumes, data types, data timeliness and data values. The basic data set of ocean satellite remote sensing and its typical application in disaster and environmental monitoring and public services were analyzed.

Key words

ocean satellite, remote sensing big data, ocean application

2022016-1

0 引言

占地球表面71%的海洋不仅是生命的摇篮,还是资源宝库和交通要道,是全球气候变化的调节器。海洋是四维动态变化的流动水体,其环境要素主要包括海面风场、海浪、海流、海表温度、盐度、海水深度、海洋水色以及各类时空尺度的动力过程等,覆盖从厘米到数千公里的空间尺度和从秒到年的时间尺度。

2002年我国第一颗海洋卫星——海洋一号A(HY-1A)卫星成功发射。截至2021年9月,我国已发射了海洋水色(海洋一号(HY-1)系列)、海洋动力环境(海洋二号(HY-2)系列)和海洋监视监测(海洋三号(HY-3)系列)3个系列共10颗海洋卫星(含高分三号(GF-3)卫星),已初步形成了海洋卫星组网业务化观测格局。在研的9颗海洋卫星将在未来几年内发射。海洋卫星多种类多数量组网后,可实现全天候、全球观测,获得高频次、周期性、长期、近实时的全球多尺度多要素海洋信息,且不受地理位置和人为条件限制。卫星遥感与现场海洋监测手段相结合,取得了过去单纯用现场监测手段无法替代的重大成果,是认识、研究、开发、利用海洋不可替代的工具,已成为现代海洋观测的主导手段之一^[1-3]。

本文总结性地介绍我国海洋卫星发展历程、观测和产品体系,并在此基础上分析我国海洋卫星数据的大数据基本特征,介绍海洋卫星遥感大数据的应用服务。

1 我国海洋系列卫星

1.1 卫星发展

依据海洋卫星探测要素的种类以及

探测技术能力与特点,我国海洋卫星按照海洋水色、海洋动力环境和海洋监视监测3个系列进行规划发展。“十二五”和“十三五”期间,我国发射了2颗海洋水色卫星(HY-1C和HY-1D)、2颗海洋动力环境卫星(HY-2B和HY-2C)以及中法海洋卫星(CFOSAT)共5颗海洋卫星,配置了紫外、可见光、红外、主被动微波遥感载荷及相关辅助载荷,可快速获取海面风场、浪场、海面高度场、海表温度场、海洋水色要素信息以及海岛、海岸带环境信息,还可获取南北极冰盖、海冰、大型江河湖泊水体、陆地植被、森林火灾变化等信息,在海洋与陆地自然资源环境监测、自然灾害监测等领域具有很大的应用潜力,我国已发射的海洋卫星信息见表1。

海洋一号系列卫星用于全球海洋水色要素探测、海表温度探测和海岸带动态环境监测,配置有光学遥感载荷,以海洋探测为主,陆海兼顾,载荷具有多种空间分辨率、高信噪比、高动态范围和宽刈幅等优点。HY-1A和HY-1B卫星均配置了海洋水色水温扫描仪、海岸带成像仪(coastal zone imager, CZI),而HY-1C和HY-1D卫星均配置了水色水温扫描仪(Chinese ocean color and temperature scanner, COCTS)、海岸带成像仪(coastal zone imager, CZI)、紫外成像仪(ultra-violet imager, UVI)、定标光谱仪(satellite calibration spectrometer, SCS)和船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)。这4颗海洋一号卫星均已发射。

海洋二号系列卫星用于全球海面风场、有效波高、海面高度、海表温度等多种海洋动力环境参数的全天候监测,直接为灾害性海况预警预报提供近实时遥感观测

表1 我国已发射的海洋卫星信息

类型	海洋水色卫星	海洋动力环境卫星		海洋监视监测卫星
卫星	HY-1A/B/C/D	HY-2A/B/C/D	CFOSAT	GF-3
探测要素与覆盖范围	全球海洋水色要素、海表温度、海冰信息及海岸带动态环境信息	全球海面风场、有效波高、海面高度、海表温度等多种海洋动力环境参数	全球海面波浪谱、海面风场、南北极海冰	全球海洋与陆地信息
发射时间	2002年5月15日 2007年4月11日 2018年9月7日 2020年6月11日	2011年8月16日 2018年10月25日 2020年9月21日 2021年5月19日	2018年10月29日	2016年8月10日
卫星轨道高度/km	798 (HY-1A/B)、 782 (HY-K/D)	971	521	755
轨道类型	太阳同步	太阳同步	太阳同步	太阳同步
降交点地方时	10:30am、1:30pm	6:00am	7:00am	6:00am
交点周期/min	100.34	104.1241	94.90	100.84
数据码速率/(Mbit/s)	6.3232 (HY-1A/B)、 190(HY-1C/D)	20	60	2×450 (双通道)
载荷配置	海洋水色水温仪、海岸带成像仪、紫外成像仪、定标光谱仪、AIS	雷达高度计、笔形波束微波散射计、扫描微波辐射计、校正辐射计、全球定位系统(global positioning system, GPS)、DORIS、数据收集系统(data collection system, DCS)、AIS	海浪波谱仪(surface waves investigation and monitoring, SWIM)、中法海卫星扇形波束旋转扫描散射计(CFOSAT scatterometer, CSCAT)	合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)

数据,为海洋防灾减灾、海洋权益维护、海洋资源开发、海洋环境保护、海洋科学研究以及国防建设等提供支撑服务,其有效载荷为雷达高度计、微波散射计、扫描微波辐射计、校正辐射计等。HY-2A、HY-2B、HY-2C和HY-2D均已发射。

海洋三号系列卫星用于全球海洋和陆地信息的全天候监视监测,载荷为合成孔径雷达,它可通过左右姿态机动提升快速响应能力、扩大对地观测范围,获取的C频段多极化合成孔径雷达图像可以用于海洋、减灾、水利及气象等多个领域,是我国实施海洋开发、进行陆地环境资源监测和应急防灾减灾的重要技术支撑。GF-3卫星已成功发射。

中法海洋卫星为中国和法国的国际合作科研试验卫星,其主要任务是获取全球海面波浪谱、海面风场、南北极海冰

等信息,进一步加强对海洋动力环境变化规律的科学认知;提高对巨浪、海洋热带风暴、风暴潮等灾害性海况预报的精度与时效;同时获取极地冰盖相关数据,为全球气候变化研究提供基础信息。该卫星由中国提供散射计,法国提供波谱仪,双方各自建立地面系统,但进行数据共享,充分体现了共商共建共享的特点以及创新、协调、绿色、开放、共享五大发展理念,CFOSAT的有效载荷包括扇形波束散射计和海浪波谱仪。

在“十三五”期间建设的海洋观测卫星共有3个系列9颗卫星,包括7颗业务星,2颗科研星。按照《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025年)》,海洋水色卫星星座将保持2颗卫星同时在轨,海洋动力环境卫星星座将保持1颗极轨海洋动力环境卫星和2颗倾斜轨道海洋动力环

境卫星同时在轨,海洋监视监测卫星将保持3颗卫星同时在轨。“十三五”规划建设海洋卫星信息见表2。

1.2 海洋卫星主要载荷

1.2.1 海洋一号卫星

海洋一号卫星有效载荷配置COCTS、CZI、UVI、SCS和一套AIS。载荷的具体用途与主要技术指标如下。

- COCTS: 主要用于探测海洋水色要素(叶绿素a浓度、悬浮泥沙浓度和可溶性有机物等)和海表温度场等。通过连续获取长时序的我国近海及全球海洋水色要素和海表温度信息,研究和掌握海洋初级生产力分布、海洋渔业和养殖业资源状况和环境质量等,为海洋生物资源合理开发与利用提供科学依据;为全球气候变化研究、海洋在全球二氧化碳循环中的作用及厄尔尼诺现象探测提供海洋水色和海表温度信息。COCTS幅宽 $\geq 2\ 900\text{ km}$;星下点地面像元分辨率(ground sample distance, GSD) $\leq 1\ 100\text{ m}$;单星可实现

可见光波段的一天一次全球覆盖观测,热红外波段的一天两次全球覆盖观测。COCTS通道与应用对象见表3。

- UVI: 主要用于提高COCTS近岸高浑浊水体大气校正精度。UVI通道与应用对象见表4。

- CZI: 主要用于获取海陆交互作用区域的实时信息进行海岸带监测;了解重点河口港湾的悬浮泥沙分布规律;并对海冰、赤潮、绿潮、污染物等海洋及大型江河湖泊环境灾害进行实时监测和预警。CZI幅宽 $\geq 950\text{ km}$;GSD $\leq 50\text{ m}$;单星对中国海岸带及关注区域可实现三天一次全覆盖观测,CZI工作于可见光波段,境外存储容量为39 min。CZI通道与应用对象见表5。

- SCS: 为COCTS的8个可见光、近红外波段和UVI的2个紫外波段提供星上同步校准功能,监测水色水温扫描仪的可见光、近红外波段和紫外成像仪在轨辐射稳定性。可见光、近红外波段具备400~900 nm范围内5 nm带宽连续光谱数据下传的能力。SCS具有在轨太阳定标的功能,覆盖UVI的2个紫外波段及COCTS的8个可见光、近红外波段。

- AIS: 主要用于获取大洋船舶位置及其属性信息,为海洋防灾减灾、海上权益维护和大洋渔业生产活动等提供数据服务,可监测幅宽 $\geq 3\ 000\text{ km}$ 。

1.2.2 中法海洋卫星

CFOSAT装载了SWIM、CSCAT两个全新载荷。SWIM是国际上首次采用六波束真实孔径雷达方式连续测量全球海面波浪谱的卫星遥感载荷,扫描幅宽为180 km。CFOSAT的散射计也是国际上首次采用扇形波束扫描方式测量海洋风场的微波散射计,其刈幅大于1 000 km,CFOSAT散

表2 “十三五”规划建设的海洋卫星信息

卫星名称	类别	所属系列
新一代海洋水色卫星	科研星	海洋水色卫星
新一代海洋水色卫星	业务星	
极轨海洋动力环境卫星(HY-2E)	业务星	海洋动力环境卫星
倾斜轨道海洋动力环境卫星(HY-2D)	业务星	
倾斜轨道海洋动力环境卫星(HY-2F)	业务星	
海风海浪探测卫星	业务星	
海洋盐度探测卫星	科研星	
1米C-SAR卫星1星	业务星	海洋监视监测卫星
1米C-SAR卫星2星	业务星	

注: HY-2D卫星于2021年5月发射。

射计选用扇形波束天线,可以与海洋波谱仪实现观测角的互补,对于研究海洋动力环境作用过程和表面散射特性具有重要意义。CFOSAT的SWIM和CSCAT技术指标分别见表6和表7。

1.2.3 海洋二号卫星

海洋二号卫星是海洋动力环境卫星,集主被动微波遥感器于一体。该卫星具有高精度测轨、定轨能力与全天候的全球海洋动力环境要素探测能力。有效载荷为雷达高度计、微波散射计和扫描微波辐射计等。

- 雷达高度计:用于测量海面高度、有效波高和重力场等参数,具有外定标工作模式。工作频率为13.58 GHz、5.25 GHz,脉冲有限足迹优于2 km,测距精度优于2 cm(海洋星下点),具有海陆观测功能。

- 微波散射计:用于测量海面风矢量场,具有外定标工作模式,工作频率为13.256 GHz,工作带宽为1 MHz(1 dB)(即微波散射计能量低至1 dB时,工作带宽为1 MHz),极化方式为水平(HH)和垂直极化(VV)极化,处理后地面分辨率为25 km,刈幅HH极化优于1 350 km,VV极化优于1 700 km,测量精度为0.5 dB,测量范围为-40~20 dB。

- 扫描微波辐射计:用于测量海表温度、海面水汽含量、液态水含量和降雨强度等参数,其技术指标见表8。

1.2.4 高分三号卫星

GF-3卫星配置了C频段多极化合成孔径雷达,具有聚束、条带、扫描、波模式等12种成像模式,分辨率达到1~500 m,幅宽达到10~650 km。工作频段为C波段(5.4 GHz),常规入射角为20°~50°,扩展入射角为10°~20°或50°~60°。高分三

表3 COCTS 通道与应用对象

波段编号	波段/ μm	应用对象
1	0.402~0.422	黄色物质、水体污染
2	0.433~0.453	叶绿素吸收
3	0.480~0.500	叶绿素、海水光学、海冰
4	0.510~0.530	浅海地形、低含量泥沙
5	0.555~0.575	叶绿素、低含量泥沙
6	0.660~0.680	中高含量泥沙、大气校正、气溶胶
7	0.730~0.770	大气校正、高含量泥沙
8	0.845~0.885	大气校正
9	10.30~11.30	水温、海冰
10	11.50~12.50	水温、海冰

表4 UVI 通道与应用对象

波段编号	波段/ μm	应用对象
1	0.345~0.365	浑浊水体大气校正、溶解有机物
2	0.375~0.395	浑浊水体大气校正、溶解有机物

表5 CZI 通道与应用对象

波段编号	波段/ μm	应用对象
1	0.42~0.50	叶绿素、污染、冰、浅海地形
2	0.52~0.60	叶绿素、低浓度泥沙、污染、滩涂
3	0.61~0.69	中等浓度泥沙、植被、土壤
4	0.76~0.89	植被、高浓度泥沙、大气校正

表6 CFOSAT 的 SWIM 技术指标

指标	数值
工作频率	13.575 GHz
天线入射角	0°、2°、4°、6°、8°、10°
面元分辨率	70 km×90 km
星下点波束反演精度	有效波高10%或优于0.5 m, 风速±2 m/s 或10%(取较大值)
可探测波长范围	70~500 m
波向精度	优于15°

表7 CFOSAT 的 CSCAT 技术指标

指标	数值
工作频率	13.256 GHz
刈幅	1 050 km
空间分辨率	12.5 km×12.5 km、25 km×25 km
后向散射系数测量精度	优于 0.5 dB(风速6~24 m/s), 优于 1 dB(风速4~6 m/s)
测量范围	≥45 dB(-21~24 dB)
风速精度	1.5 m/s
风向精度	优于20°

表8 海洋二号卫星的扫描微波辐射计技术指标

指标	数值				
频率/GHz	6.925	10.7	18.7	23.8	37.0
带宽/MHz	350	100	200	400	1 000
极化	交叉(VH)	VH极化	VH极化	VV极化	VH极化
扫描刈幅/km	优于1 600				
地面足迹/(km×km)	90×150	70×110	36×60	30×52	20×35

号卫星合成孔径雷达载荷成像模式和能力见表9。

1.3 海洋卫星产品体系

我国海洋卫星产品体系按卫星载荷及产品制作流程分为原始数据、0~4级产品及辅助数据,各级产品按轨道生成,使用

时需要投影转换。卫星辅助数据主要是为卫星辐射定标和真实性检验、精密定轨、质量检验分析、数据处理等提供的,主要包括亮度温度数据、海面风场数据、气象数据、海表温度数据、海冰掩膜数据、星历数据、姿态数据、预报星历数据、遥测数据、卫星星历文件、卫星钟差文件、地球定向参数文件、地面信标站参考框架文件、大气参数文件、定标数据、有效波高、海陆标识文件、臭氧数据、浮标数据、全球探空数据、网格化数据、海冰标识文件、查找表、卫星信息文件、地球空间环境数据文件等。我国海洋卫星主要海洋要素观测产品见表10。

1.4 海洋卫星数据的获取与分发

我国海洋卫星接收系统在北京市、海

表9 高分三号卫星合成孔径雷达载荷成像模式和能力

成像模式	分辨率/m			成像幅宽/km		视数方位向×距离向	极化方式
	标称	方位向	距离向	标称	范围		
聚束	1	1.0~1.5	0.9~2.5	10×10	≥10×10	1×1	可选单极化
超精细条带	3	3	2.5~5	30	≥30	1×1	可选单极化
精细条带1	5	5	4~6	50	≥50	1×1	可选双极化
精细条带2	10	10	8~12	100	95~110	1×2	可选双极化
标准条带	25	25	15~30	130	95~150	3×2	可选双极化
窄幅扫描	50	50~60	30~60	300	≥300	2×3	可选双极化
宽幅扫描	100	100	50~110	500	≥500	2×4	可选双极化
全极化条带1	8	8	6~9	30	20~35	1×1	全极化
全极化条带2	25	25	15~30	40	35~50	3×2	全极化
波成像模式	10	10	8~12	5×5	≥5×5	1×2	全极化
全球观测成像模式	500	500	350~700	650	≥650	4×2	可选双极化
低扩展入射角	25	25	15~30	130	120~150	3×2	可选双极化
高扩展入射角	25	25	20~30	80	70~90	3×2	可选双极化

表 10 我国海洋卫星主要海洋要素观测产品

产品	载荷	卫星	分辨率	频次
海面风场	微波散射计	HY-2A HY-2B HY-2C HY-2D	25 km、0.25°×0.25°	2次/天
海面风速	微波散射计 雷达高度计	CFOSAT HY-2A HY-2B HY-2C HY-2D	25 km、12.5 km 沿轨7 km	2次/天
有效波高	微波辐射计 雷达高度计	HY-2B HY-2A HY-2B HY-2C HY-2D	Res0-90 km×150 km Res6-90 km×150 km Res10-70 km×110 km Res18-36 km×60 km 沿轨7 km	1次/14天
海面温度	微波辐射计	HY-2B	Res0-90 km×150 km Res6-90 km×150 km Res10-70 km×110 km Res18-36 km×60 km 0.25°×0.25° 25 km/25 km	2次/天
海面高度	水色水温扫描仪 高度计	HY-1C HY-1D HY-2A HY-2B HY-2C HY-2D	1.1 km 9 km 沿轨7 km	1次/14天
海面高度异常	高度计	HY-2B HY-2C HY-2D	0.25°×0.25°	1次/14天
海面动力高度	高度计	HY-2B HY-2C HY-2D	0.25°×0.25°	1次/14天
地转流	高度计	HY-2B HY-2C HY-2D	0.25°×0.25°	1次/14天
大气水汽含量	辐射计	HY-2B	Res0-90 km×150 km Res6-90 km×150 km Res10-70 km×110 km Res18-36 km×60 km	2次/天
云液水含量	辐射计	HY-2B	Res0-90 km×150 km Res6-90 km×150 km Res10-70 km×110 km Res18-36 km×60 km	2次/天
叶绿素浓度	水色水温扫描仪	HY-1C HY-1D	1.1 km 9 km	2次/天/星
悬浮泥沙含量	水色水温扫描仪、 海岸带成像仪	HY-1C HY-1D	1.1 km 9 km	2次/天/星
植被指数	海岸带成像仪	HY-1C HY-1D	1.1 km 9 km	1次/3天/星
船舶位置信息	船舶识别系统	HY-1C HY-1D HY-2B HY-2C HY-2D	—	2次/天/星

南省(三亚市、陵水黎族自治县)、牡丹江市及雪龙号极地考察船上设有海洋卫星地面接收站^[4],可实时接收过境卫星数据和延迟接收全球其他地区的观测数据。未来将在南极建立海洋卫星地面接收站,以提高传输海洋卫星实时数据和境外回放数据时效。我国还建有海洋光学定标场和万山定标场,定标场网获取的海上现场观测数据均由海洋卫星数据处理中心负责处理、存档和分发。

国家卫星海洋应用中心负责我国海洋卫星星地一体化运行管理。海洋系列卫星星地系统业务化运行链条完整,产品时效高。以2020年为例。2020年各站共接收海洋系列卫星(HY-1C/D卫星、HY-2A/B/C卫星、中法海洋卫星)数据17 802轨,高分系列卫星数据1 615轨,EOS-MODIS卫星数据8 714轨;数据分发系统共向1 637位用户分发海洋卫星数据1 499 749轨,数据量为275.92 TB;国家卫星海洋应用中心数据中心作为高分节点共向126家单位分发高分卫星数据59 495景,数据量为103.73 TB;海洋卫星数据共享服务平台共向各部委直属事业单位、地方政府部门等19家单位推送各类卫星数据文件124.26万个,共计275.5 TB,其中推送海洋卫星数据143.3 TB。

2 海洋卫星遥感数据的大数据特征分析

大数据从5个维度体现,包括数据体量、数据种类、数据增长速度与时效、数据价值和数据真实性^[5-6]。随着国家空间基础设施的建设以及航天技术和海洋遥感的迅猛发展,我国海洋卫星遥感数据已具备了大数据的多项基本特征。

2.1 数据体量

自2002年我国第一颗海洋卫星HY-1A发射以来,截至2021年9月我国已发射了10颗海洋卫星,其中2018—2021年先后发射了HY-1C、HY-2B、CFOSAT、HY-1D、HY-2C、HY-2D共6颗卫星。与HY-1A/B、HY-2A卫星相比,这6颗卫星的空间分辨率与量化等级更高,光谱通道更多,扫描幅宽更大,产品级别更丰富,每天工作时间更长,有的载荷每天24 h连续工作,寿命也由原来的2~3年变为5~8年。实际上, HY-1B卫星在轨稳定运行了8年10个月,超期服役5年10个月,在轨期间共成像19 233轨,地面应用系统共获取卫星采集的原始数据8.84 TB,生产各级各类数据产品65.5 TB。HY-1B卫星资料和产品已向海洋管理部门、科研院所、大专院校、业务部门共50家国内外单位进行了分发应用,累计分发数据量达86.57 TB。其后续业务卫星HY-1C的各级数据产品日增量超过3 TB,在2年9个月的在轨时间里就已经累计生产卫星数据2 749 076景,累计存档2.549 PB,仅2020年HY-1C卫星数据累计分发224.3 TB,海洋卫星数据存储量与分发量呈指数级增长。

2.2 数据种类

“十三五”海洋观测卫星建设完成后,我国将建成海洋水色卫星、海洋动力环境卫星和海洋监视监测卫星3个系列卫星星座,在轨卫星将达十余颗,卫星轨道有太阳同步轨道、倾斜轨道,卫星主载荷包括COCTS、CZI、UVI、中分辨率可编程成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)、雷达高度计、微波散射计、扫描微波辐射计、校正微

波辐射计、SWIM、盐度计和SAR及辅助载荷等20多个载荷。遥感要素包括叶绿素a浓度、悬浮物浓度、海水透明度、海表温度、海面风场、有效波高、海面高度、海面流场、大气水汽含量、云液水含量等。数据产品级别包括0到4级。无论从卫星种类、载荷种类还是产品种类与级别等维度来看,我国海洋卫星数据产品均具有丰富的多样性。

2.3 数据时效

随着多种卫星组网运行以及海洋卫星地面系统建设完成,我国海洋卫星数据探测计划实现自主可控,探测计划制定和数据获取的时效提高,数据处理能力和分发服务能力不断提高。随着芬兰卫星地面接收站的投入运行以及未来南极海洋卫星地面接收站建成,海洋卫星数据获取时效将大幅提高,实时接收的区域产品将在接收结束后0.5 h内生产完成,目前全球数据在6 h内完成生产,如HY-2系列卫星的全球数据生产时效(从观测到L2B级产品)和分发时效(从观测到可分发系统查询)基本为6 h以内。

2.4 数据价值

我国海洋卫星实现了从试验星到业务星的跨越,其应用服务能力也实现了从应用示范到业务化应用的转变,海洋水色卫星、海洋动力环境卫星和海洋监视监测卫星3个系列星地一体业务化运行,获取的数据与产品是高价值的信息资产并被不断重复使用,3个系列卫星星地一体的业务化运行是海洋调查与监测的有力、有效手段。通过数据分析研究发现,很多海洋现象的变化过程与规律已经在海洋环境与资源监测、海洋灾害监测、海洋权益维护、海洋环境预报与南北极考察、安全保障以及全球气候变化研究中发挥了重要作用^[7-14]。

2.5 数据真实性

卫星探测能全面、客观、真实地获得海洋与陆地表面特性,通过空间基础设施建设、在轨测试与海上定标检验,海洋卫星多种产品的精度得到验证,其时空分辨率和辐射精度得到了极大的提升。将海洋水色产品和海洋动力要素产品进行海上现场观测检验并与国外同类卫星数据进行交叉比对发现,其达到国际先进水平。以HY-2B卫星遥感产品为例,微波散射计的海面风速产品精度优于1.5 m/s、海面风向产品精度优于20°,扫描微波辐射计的海面温度产品精度优于1°C。**图1**为HY-2B卫星微波散射计海面风场产品的检验精度结果。

3 海洋卫星大数据应用服务

自20世纪末开始,我国开始发展海洋卫星,目前3个系列的海洋卫星体系已基本建成;载荷种类与卫星型谱日益丰富;由北京市、海南省、牡丹江市、杭州市、船载移动站、海外站构成的地面站接收网布局基本完成;定标检验场网初步确立;从卫星探测规划控制、数据多站接力实时接收、数据快速传输、标准基础产品制作、数据定标与产品真实性检验到产品存档分发全过程自主控制,生产链条完整,海洋卫星星地一体业务化运行体系日趋完善,完成了从试验型向业务型的转变。我国海洋系列卫星获取了紫外、可见光、近红外、热红外、主被动微波遥感载荷及AIS、DCS、GPS等辅助载荷的海量探测数据。数据覆盖全球,空间分辨率为1 m~50 km,时间分辨率为1~3天,形成了多要素海洋遥感数据集。海洋卫星遥感数据在海洋动力环

境、海洋生态环境、南北极环境监测中发挥了重要作用,同时在海岛海岸带、水体、极地遥感等专项调查以及公众服务中成效显著^[7-13]。海洋卫星遥感应用的广度与深度不断扩展,海洋遥感应用将迎来大数据时代。海洋卫星遥感数据是智慧海洋、数字海洋、透明海洋、数字中国构建与海洋强国建设的重要数据支撑。

3.1 海洋卫星遥感基础数据集

我国各类海洋卫星数据量已达4.35 PB,其中HY-1A卫星数据量为10 TB, HY-1B卫星数据量为50 TB, HY-1C卫星数据量为2 823 TB, HY-1D卫星数据量为923 TB, HY-2A卫星数据量为11 TB, HY-2B卫星数据量为46 TB, HY-2C卫星数据量为5 TB, CFOSAT卫星数据量为78 TB, GF-3卫星数据量为507 TB。数据按载荷或要素形成不同级别的产品(沿轨产品、区域产品以及全球产品)。各类产品按时间周期形成日平均、月平均、季节平均数据集后归档。上述归档历史数据经再定标处理后,重新获取海洋水色要素产品、海表温度产品、海洋动力环境要素产品的再定标数据集,该数据集可为涉海部门提

供大数据支撑,为后续研究打下基础。

目前,相关部门每天获取各级数据7 TB,分发数据3.3 TB,用户数为2 052个,且逐年上升;专项服务通过专线进行推送,普通用户通过订单网络进行下载,用户包括311个业务部门、393个科研院所、1 172个高等院校、177个其他单位。

3.2 海洋卫星在灾害与环境监测中的应用

我国海洋卫星遥感数据在风暴潮、海冰、大洋和极地的环境与航行保障、海洋生态以及陆地等领域具有巨大的应用价值^[7-14]。

(1) 风暴潮监测

海洋卫星是风暴潮监测的利器。台风海面风场和云系结构分别可由海洋二号系列卫星微波载荷和海洋一号系列卫星可见光、红外、紫外云图获得。自海洋二号卫星发射以来,影响我国的各个台风的生成、增强、消亡过程均能被海洋卫星监测到。每个台风的海面风场及其变化过程均可通过多星协同观测获取。利用HY-2A/2B/2C和CFOSAT以及Metop-A/B/C卫星上的散射计获得的数据已实现台风

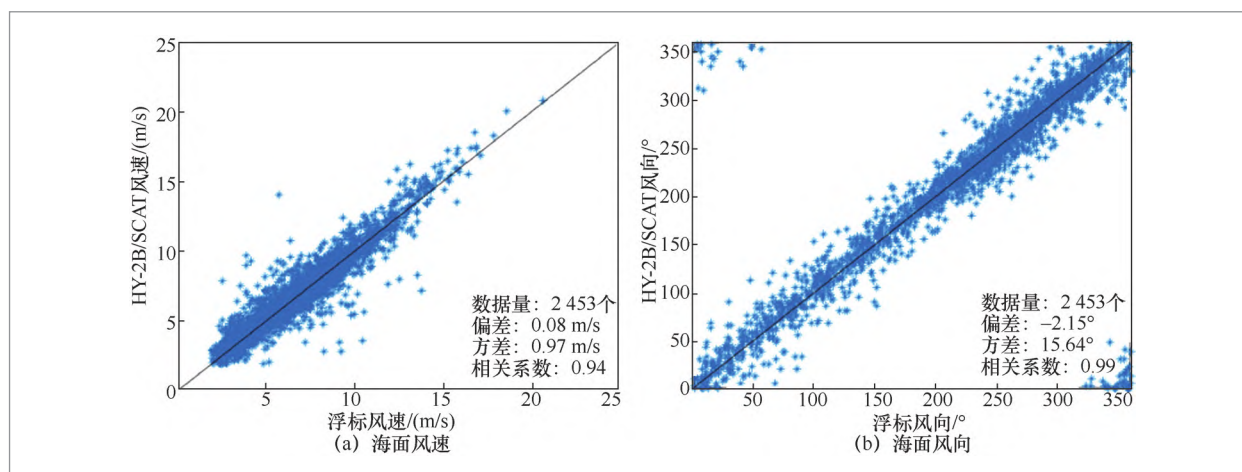


图1 HY-2B卫星微波散射计海面风场产品的检验精度结果

监测的业务化运行,近实时制作单星单轨和单星全球网格化风场专题产品、全球海面风场融合专题产品以及台风监测专题产品,并进行业务化分发。台风监测专题图信息包括海面风场、台风半径、风暴中心位置和强度等。通过分析时序数据可得到台风移动轨迹。在进行台风业务化监测的同时,海洋二号系列卫星雷达高度计、微波辐射计载荷的海面风速产品,以及GF-3卫星的合成孔径雷达海面风场产品也可作为辅助产品进行台风监测。利用HY-1A/B/C/D卫星的COCTS、UVI数据制作台风云图,可分析台风云系结构及变化,为风暴潮预报提供准确的信息服务。

(2) 海冰监测

每年11月下旬到第二年3月底,渤海、黄海北部有不同程度的结冰,严重的海冰可影响海上交通运输和海上工程作业,危及海上石油平台安全。利用HY-1A/B/C/D卫星海岸带成像仪数据、地球观测系统(earth observation system, EOS)/MODIS可见光数据、GF-3卫星及国外卫星SAR数据等多颗卫星的资料,相关部门开展了业务化海冰监测,多颗卫星在空间、时间以及探测手段方面优势互补,20多年来连续完成了对渤海及黄海北部的冬季海冰冰情每天多次监测。自HY-1C/D卫星组网后,50 m空间分辨率海岸带成像仪的数据成像幅宽增大,双星组网实现至少三天两次对渤海海冰的监测,获取数据时效提高。再加上GF-3卫星SAR载荷补充,实现了可见光与SAR协同,得到的信息更丰富,深受用户欢迎,为海洋工程以及海冰预报提供了有力支撑。

(3) 极地遥感监测与航行保障

基于HY-1C/D卫星海岸带成像仪数据开展南极地区卫星遥感影像镶嵌,形成了50 m分辨率的HY-1C南极卫星影像镶嵌图,为南极地理基础资料更新提供了

新的数据源。利用海岸带成像仪成功监测到2018年西南极松岛冰川崩解、2019年东南极埃默里冰架崩解、2021年布伦特冰架裂缝及崩解、2021年南极埃里伯斯火山喷发等场景。在多次南北极科考期间,针对雪龙号极地考察船冰区应急航行需求,利用HY-1、HY-2卫星开展了冰情应急监测,利用雪龙号船载遥感接收系统实时接收、处理海洋卫星数据并制作专题图,为建设“冰上丝绸之路”和“雪龙探极”重大工程提供了保障服务。

(4) 海洋生态环境监测

陆源污染排放、海上生产经营活动、石油开采与交通运输等会导致海上生态环境发生变化,有的会危及海上生态安全。其造成的影响可被我国多颗海洋卫星连续观测到。

赤潮是我国近海频发的一种海洋生态系统异常现象,海洋中的浮游生物急剧繁殖造成海水呈现黄色、绿色、褐色、红色等不同颜色。近年来相关部门利用HY-1C和HY-1D卫星监测到了我国渤海、黄海、东海、南海的多次赤潮事件,获得了其位置、影响范围等重要信息。

自从2008年青岛海域浒苔爆发以来,浒苔监测成为一项业务化监测工作。相关部门利用HY-1A/B/C/D、EOS/MODIS以及高分系列卫星等多种卫星资料提取黄海和东海浒苔信息,每天制作和发布绿潮卫星遥感监测报告,实现了绿潮灾害早期发现和全过程跟踪监测,为绿潮漂移路径预测和防灾减灾提供了准确及时的信息服务。

溢油污染对海洋环境、海洋生态及人类经济生活均可产生极大的危害,海洋溢油能被微波雷达、可见光、近红外、热红外和紫外等不同遥感器探测到。相关部门利用HY-1C、HY-1D以及GF-3卫星对渤海、南海、东海的多次溢油事件进行了监测,效果显著。

此外,相关部门利用海洋一号卫星对广西山口国家级红树林生态自然保护区的红树林分布范围等信息进行提取,制作了广西山口国家级红树林生态自然保护区红树林分布范围专题图。

(5) 非海洋应用

● 水环境与水资源监测: HY-1C/D卫星自运行以来,对我国陆地上的大江大河每年有10~100多次有效覆盖,可得到水体枯水期、丰水期的水体面积和出现时间,同时可监测到湖泊的水体生态环境变化,如太湖、巢湖、滇池、洱海等内陆湖泊水华,还可监测到山岳冰川分布和变化过程。

● 洪涝灾情监测: 海洋一号卫星载荷是针对水体设计的,扫描幅宽大,重访周期短; GF-3卫星全天候监测; 国家卫星海洋应用中心利用光学和SAR载荷与省级卫星数据应用部门联合开展应用,汛期时间序列的卫星遥感专题图已为江西、安徽、湖北、湖南、陕西、甘肃、江苏、四川、黑龙江等省份的汛期防灾减灾与灾后重建提供了有力的信息服务支撑。

● 森林火灾监测: 利用HY-1C/D卫星重访周期短以及海岸带成像仪高信噪比的优势,相关部门已对青岛、山西、广东、四川、云南、江西、北京等多地发生的森林火灾进行了有效监测分析,利用灾前、灾中、灾后多次图像植被变化和烟雾方向分析得到火情专题图,并在第一时间向应急管理部门及有关省份的前方指挥部推送,为应急救援提供了有效有力的服务。

3.3 公众服务

国家卫星海洋应用中心于2020年推出了“海洋卫星遥感实况”微信小程序。该小程序向公众提供海洋卫星数据产品服务,可随时随地获取全球任何海域的CFOSAT、HY-2系列卫星及Metop-A/B卫

星单星海面风场产品以及多星融合的海面风场产品,查询指定海域的台风或气旋分布情况及其最近7天的变化过程。公众、涉海企业及政府部门通过该小程序可方便快捷地得到其特定关注区域的海上实况。小程序运行一年多来,查看产品的用户约9万个。

4 海洋卫星大数据管理和应用面临的问题和挑战

海洋卫星数据应用中的首要问题是数据获取时间太长。如HY-1C/D卫星的CZIL1C产品一景数据为4 GB,白天用户多,通信带宽受限,数据获取时间有时很长。解决办法一是先将用户不关心的区域或通道剔除,使数据量小一点;二是将用户的算法部署到处理中心运行,直接获取结果数据,减少中间传输时间;三是改变数据格式,确定数据取值范围后,将所有数据减去基数(即最小值)后重新编码,减少文件字节数,计算时再增加基数。

其次是缺乏多源卫星数据的关联模型。由于获取的数据的空间分辨率、时间分辨率、评价准则不同,误差与精度不一,融合使用时已经是数据产品,还需要建立关联模型将数据归一化。

最后是缺乏分析展示海洋多要素信息特征的工具软件。海洋要素涉及海面风场、海浪、海表流程、潮流、海表温度、海水密度和海洋水色等,缺乏直观展示其产品的标准规范,同时还缺少多要素关联展示及相互影响分析、随时间同步互动变化的多维空间展示分析工具。

5 结束语

我国海洋卫星体系已基本建成,星-地

系统进入业务化运行阶段。多载荷、多时空分辨率遥感影像数据和要素产品的数据量激增,完全具备了大数据的5项基本特征,海洋卫星遥感迎来了大数据时代。

海洋卫星遥感数据挖掘、不同时空尺度数据融合、多源卫星数据可视化表达、大数据抽取与截取、大数据传输以及遥感数据与其他数据的同化融合、海洋卫星的非海洋应用等还有待进一步拓展和深入研究、实践。

参考文献:

- [1] 刘建强, 蒋兴伟, 林明森. 中国海洋卫星发展中的问题分析与对策建议[J]. 卫星应用, 2012(2): 54-60.
LIU J Q, JIANG X W, LIN M S. Problem analysis and recommendations of the development of China's ocean satellites[J]. Satellite Application, 2012(2): 54-60.
- [2] 林明森, 何贤强, 贾永君, 等. 中国海洋卫星遥感技术进展[J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 99-112.
LIN M S, HE X Q, JIA Y J, et al. Advances in marine satellite remote sensing technology in China[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(10): 99-112.
- [3] 蒋兴伟, 何贤强, 林明森, 等. 中国海洋卫星遥感应用进展[J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 113-124.
JIANG X W, HE X Q, LIN M S, et al. Progresses on ocean satellite remote sensing application in China[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(10): 113-124.
- [4] 刘建强, 吴奎桥, 孙从容, 等. “雪龙号”车载海洋卫星接收处理系统及应用[J]. 卫星应用, 2016(4): 48-52.
LIU J Q, WU K Q, SUN C R, et al. The receiving and processing system on the Xuelong Ship and its applications[J]. Satellite Application, 2016(4): 48-52.
- [5] 李晓明, 黄冰清, 贾童, 等. 星载合成孔径雷达海洋遥感与大数据[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2020, 12(2): 191-203.
LI X M, HUANG B Q, JIA T, et al. Ocean remote sensing by spaceborne synthetic aperture radar (SAR) and big data[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2020, 12(2): 191-203.
- [6] 卢凯旋, 管露洋, 李庆亭, 等. 基于遥感大数据的应急管理空间信息智能提取[J]. 卫星应用, 2020(6): 40-45.
LU K X, ZAN L Y, LI Q T, et al. Intelligent extraction of emergency management spatial information from the remote sensing big data[J]. Satellite Application, 2020(6): 40-45.
- [7] 蒋兴伟, 刘建强, 邹斌, 等. 浒苔灾害卫星遥感应急监视监测系统及其应用[J]. 海洋学报, 2009, 31(1): 52-64.
JIANG X W, LIU J Q, ZOU B, et al. The satellite remote sensing system used in emergency response monitoring for Enteromorpha prolifera disaster and its application[J]. Haiyang Xuebao, 2009, 31(1): 52-64.
- [8] 袁新哲, 林明森, 刘建强, 等. 高分三号卫星在海洋领域的应用[J]. 卫星应用, 2018(6): 17-21.
YUAN X Z, LIN M S, LIU J Q, et al. Marine application of GF-3 satellite[J]. Satellite Application, 2018(6): 17-21.
- [9] 陆应诚, 刘建强, 丁静, 等. 中国东海“桑吉”轮溢油污染类型的光学遥感识别[J]. 科学通报, 2019, 64(31): 3213-3222.
LU Y C, LIU J Q, DING J, et al. Optical remote identification of spilled oils from the SANCHI oil tanker collision in the East China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(31): 3213-3222.
- [10] 沈亚峰, 刘建强, 丁静, 等. 海洋一号C星光学载荷对海面溢油的识别能力分析[J]. 遥感学报, 2020, 24(8): 933-944.
SHEN Y F, LIU J Q, DING J, et al. HY-1C COCTS and CZI observation of marine oil spills in the South China Sea[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(8): 933-944.
- [11] 刘建强, 曾韬, 梁超, 等. 海洋一号C卫星在自然灾害监测中的应用[J]. 卫星应用, 2020(6): 26-34.
LIU J Q, ZENG T, LIANG C, et al. Application in monitoring of nature disaster by HY-1 satellite[J]. Satellite Application, 2020(6): 26-34.

- [12] 邹亚荣, 刘建强, 梁超, 等. 基于HY-1C卫星CZI数据的红树林长势遥感监测[J]. 海洋学研究, 2020, 38(1): 68-76.
ZOU Y R, LIU J Q, LIANG C, et al. Monitoring of mangrove growth using HY-1C satellite CZI data based on remote sensing[J]. Journal of Marine Sciences, 2020, 38(1): 68-76.
- [13] 刘建强, 叶小敏, 曾韬, 等. 海洋一号D卫星捕捉到南极火山喷发[J]. 海洋学报, 2021, 43(2): 139-140.
LIU J Q, YE X M, ZENG T, et al. A volcanic eruption in Antarctica was monitored by the HY-1D satellite[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(2): 139-140.
- [14] 贾永君, 刘建强, 林明森, 等. 海洋二号卫星3个主要载荷风速测量比较[J]. 中国工程科学, 2014, 16(6): 27-32.
JIA Y J, LIU J Q, LIN M S, et al. Comparison of wind speed from 3 main payloads of HY-2 satellite[J]. Engineering Sciences, 2014, 16(6): 27-32.

作者简介



刘建强(1964-), 男, 国家卫星海洋应用中心研究员, 主要研究方向为海洋卫星规划论证、地面应用系统建设、业务化运行与遥感应用



叶小敏(1983-), 男, 国家卫星海洋应用中心副研究员, 主要研究方向为海洋卫星数据处理与遥感应用。



兰友国(1974-), 男, 国家卫星海洋应用中心副研究员, 主要研究方向为海洋卫星地面系统运行控制、数据存档与分发技术。

收稿日期: 2021-10-26

通信作者: 刘建强, jqliu@mail.nsoas.org.cn