

高分辨率宽幅星载 SAR 海洋监视与信息反演

邓云凯,禹卫东,王宇

中国科学院电子学研究所航天微波遥感系统部,北京 100190

摘要 为了满足对海洋监视日益增长的需求,星载合成孔径雷达(SAR)系统应具备高分辨率宽测绘带能力。高分宽幅星载 SAR 系统不仅能够获得海洋的环境参数(如洋流、内波、风场、海浪等),还能够获得海面上各种目标(如舰船、溢油、海冰等)的信息,为国民经济建设和国防建设提供信息来源。本文讨论了星载 SAR 系统在海洋监视中的应用,论述了用于海洋监视的星载 SAR 系统关键技术,总结了未来海洋监视星载 SAR 的发展方向。

关键词 星载 SAR;高分宽幅;海洋监视

对海洋的有效探索和合理利用,对国家的发展和国防建设具有重要意义。在人类对海洋的漫长认知过程中,对海探测方式主要有常规探测和遥感探测。常规探测是以浮标、潜标、沿海自动站和测量船等为平台,对海洋环境进行直接测量,但由于其探测范围小,在时间和空间上均受到限制,因此人们逐渐发展了遥感探测方式。

相对于其他遥感方法,星载合成孔径雷达(SAR)具有全天候、大范围和高分辨的特点,可以利用不同波段、不同极化、不同视角、不同分辨率的优势,更加适合海面特征观测和信息反演。利用星载合成孔径雷达图像,结合海洋动力学理论,可以确定那些直接或间接影响海面粗糙度的动态结构,包括:内波、夕流、漩涡、洋流、工业排污、自然和人为海上灾害、航行中的舰船、海冰、溢油等。此外,还可以借助星载 SAR 系统进行水下地形探测研究。

经过几十年的发展,星载 SAR 系统对海监视取得了一系列成果^[1-9]。美国于 1978 发射了 SEASAT-A(海洋星)卫星,首次搭载了合成孔径雷达。SEASAT 是美国也是世界第 1 颗以海洋探测为主的卫星,其任务是论证海洋动力学测量的可靠性,具体目标是收集有关海面风、海面温度、波高、海洋内波、气态水、海冰特征和海洋地貌的数据。此后,美国宇航局(NASA/JPL)实施了轻型 SAR 技术研究计划(LightSAR)。其

主要任务包括:监测自然灾害,监测土壤、雪水,测量冰川/冰原平衡,测量海岸线,监测海洋对大气的影响。俄罗斯于 1991 年发射了 Almaz-1 卫星,利用 SAR 图像进行了海洋学的研究,包括:洋流运动、内波成像、大陆架不规则性、海洋表面污染、潮汐边界估计、浮冰监视等。ERS-1/2 是欧洲航天局(ESA)发射的欧洲遥感卫星系列,主要任务是海洋观测,包括对海浪、风场、海洋环流、海温和海冰结构的观测。在 ERS 系列卫星之后,欧洲航天局于 2002 年又发射了 Envisat 遥感卫星,搭载了先进的合成孔径雷达 ASAR。Envisat 是 1 颗多用途卫星,它以海洋和大气的全球探测为主,除能用于海洋和冰盖探测以外,也可用于陆地遥感,如植被、土地、地质、水灾及水文参数测量。此外,加拿大的 RADARSAT-1/2 卫星、德国的 TerraSAR-X 卫星及中国高分三号卫星均具有对海洋监视的用途。

对于星载 SAR 系统,几何分辨率和测绘带宽是 2 项重要的成像指标。通过调研发现,受系统脉冲重复频率(PRF)限制,上述星载 SAR 系统的分辨率和测绘带宽并没有得到较好兼顾。而对于对海监视而言,高分辨率能提供目标更为精细的特征信息,有利于目标的观测和信息提取;宽测绘带能够提供更为广阔的场景信息,以获取全局判读能力。这就要求未来的对海监视星载 SAR 系统应具备高分宽幅的能力。

收稿日期:2017-09-25;修回日期:2017-10-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0502700)

作者简介:邓云凯,研究员,研究方向为星载 SAR 系统总体技术,电子邮箱:ykdeng@mail.ie.ac.cn;王宇(通信作者)研究员,研究方向为星载 SAR 系统设计及信号处理技术,电子邮箱:yuwang@mail.ie.ac.cn

引用格式:邓云凯,禹卫东,王宇.高分辨率宽幅星载 SAR 海洋监视与信息反演[J].科技导报,2017,35(20):69-76;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.20.007

1 高分宽幅成像

星载SAR的高分辨率宽测带成像一直以来都是人们追求的目标。一方面,高分辨率能够提供关于目标更为精细的特征信息,便于目标识别和特征提取,这在军事侦察、城市绘图及灾害评估等方面有着重要的意义。另一方面,宽测带可提供更为广阔的场景信息,并提高对特定区域的重访频率,这有利于对土地、森林、海洋等大面积区域的观测。

通常用品质因数 Q 定义分辨率和测带带宽的综合性能,可表示为

$$Q = \frac{W_g}{\rho_{az}}$$

其中, W_g 和 ρ_{az} 分别为距离向测带带宽和方位分辨率。

在传统星载SAR系统中,这2个指标是一对矛盾,无法同时提高,其品质因数一般 ≤ 10 。围绕距离向测带带宽和方位分辨率之间的矛盾,近几十年来一直是国际星载SAR领域的研究热点。当星载SAR品质因数大于10时,一般认为该系统具备高分宽幅成像能力。

2 高分宽幅星载SAR海洋应用

2.1 高分宽幅星载SAR海上目标监测

相对于传统的星载SAR系统,利用高分宽幅星载SAR系统对海上运动目标进行监视具有明显的优势,根据监测运动目标的不同可以分为:舰船监测^[10-15]、溢油监测^[16-18]和海冰监测^[19-20]。

2.1.1 舰船监测

舰船目标检测与监视是世界各海岸地带国家的传统任务,在舰船寻找与救助、捕鱼船监视、非法移民、反毒品、保卫领土等方面有着广泛应用。对舰船进行监测,根据需要可以采用不同方式,如大范围海域普查、重点海域监视、特定船只跟踪等。

利用高分宽幅星载SAR系统进行舰船目标监测时,高分辨特性使得更小尺寸的舰船目标得到有效检测,甚至可以实现舰船目标分类识别;而宽幅特性可以提供较大的观测范围,从而分析区域内的舰船目标分布情况和观测完整的舰船编队。

图1为利用国产C波段1 m分辨率全极化机载SAR系统获取的海面舰船图像,从图1中可以清晰地观测到不同类型的船只及其细部结构信息。

2.1.2 溢油监测

随着海上物流运输业的迅速发展,港口和沿海的船舶数量急剧增加。超大型油轮的出现使海上通航环境更加复杂,导致船舶溢油污染,特别是重特大船舶溢油污染的风险随之增大。溢油事故对海洋环境和经济是一个巨大的威胁。溢油的监测十分重要,如果溢油能够在事故发生早期被监测,那么溢油的清理等处理工作将能够尽早展开,溢油造成的损失也可以被降低到最低点。

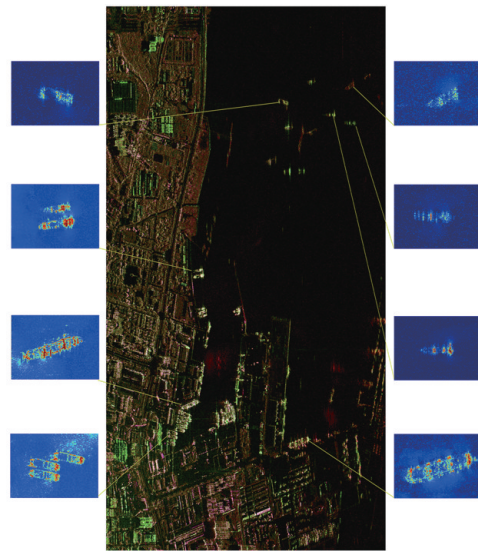


图1 C波段全极化机载SAR获取的舰船图像
Fig. 1 Ships captured by C-band full-polarization airborne SAR

(图片来源:中国科学院电子学研究所航天微波遥感部)

借助高分宽幅星载SAR系统,不仅能够在此范围内监测海洋溢油的发生及其扩散的动态特征,及时引导海事船舶和海监飞机进行跟进调查,还可以作为执法索赔证据。此外,利用多颗卫星可以连续观测和计算溢油范围,估计溢油漂移和扩散的方向,为海洋环保部门提供最佳油污清除和治理溢油灾害方案。

图2所示为国产C波段1 m机载SAR(VV极化)获取的海面固定石油开采平台及其溢油轨迹图像。



图2 C波段VV极化机载SAR获取的溢油图像
Fig. 2 Oil pictures captured by C-band VV-polarization airborne SAR

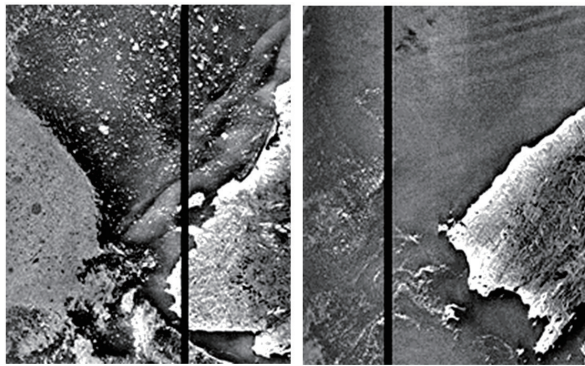
(图片来源:中国科学院电子学研究所航天微波遥感部)

2.1.3 海冰监测

海冰每年的冻结及漂移对海上航运、油气勘探及海上生产等均有不同程度的影响,甚至造成严重的灾害。因此,对

海冰漂移进行近实时、全天候跟踪具有重要意义。利用星载高分宽幅SAR系统获取到不同轨道周期的SAR图像序列可以对海冰漂移进行有效跟踪。

图3为Almaz-1对海面浮冰进行监测的结果,图3(a)为该卫星在南极得到的一幅SAR图像,图3(b)为该卫星在运行了143圈后对该地区的重新成像,可以看出浮冰向右侧产生了移动,其中黑色竖线为位置标记^[8]。



(a) 初始 (b) 143圈后

图3 南极浮冰 SAR 图像(黑色竖线为位置标记)

Fig. 3 SAR image of sea ice on the South Pole (the black vertical lines as the marked position)

2.2 高分宽幅星载SAR海洋动力要素监测及反演

利用高分宽幅星载SAR系统具有的全天时、全天候、高分辨率对海探测特点,可提供海洋及沿岸地区的海面风场、海表流场、海浪、海洋内波和中尺度涡等海洋物理信息,具有广阔的应用前景和重要的研究价值。

2.2.1 洋流监测

洋流又称海流,表示海洋中除了由引潮力引起的潮汐运动外,海水沿一定途径的大规模流动。利用高分宽幅星载SAR的沿航迹基线可以对洋流的速度进行测量,实现海表流场速度的反演,对海洋灾害预警、海洋经济监视、海洋战场环境测绘、航海安全以及维护国家海洋权益等具有重要意义^[21-24]。图4、图5给出TerraSAR系统对洋流速度反演结果。

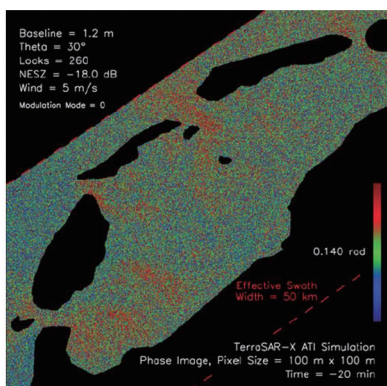


图4 TerraSAR 雷达沿航迹干涉相位

Fig. 4 Interferometric phase image obtained by TerraSAR

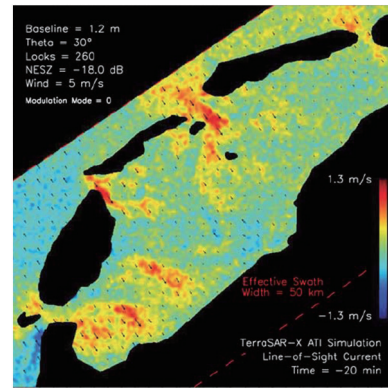


图5 基于TerraSAR的洋流速度反演

Fig. 5 Current velocity estimation by TerraSAR

2.2.2 内波监测

利用高分宽幅星载SAR系统对海洋内波进行监测具有重要意义。在民用领域,大幅度内波在传播过程中产生的扰动可导致海水强烈幅聚和突发性的强流,有可能对海洋工程、石油钻井平台和海底石油管道造成严重威胁;在军用领域,大振幅的内波会对水下潜艇航行产生灾难性后果。此外,内波会改变声信号在海水中传播路线,直接影响水声信道,内波产生的强烈流场会影响水下武器的发射及水下声呐的通信和探测^[25-28]。图6为国产C波段1 m机载SAR(VV极化)获取的中国南海地区内波图像。最重要的特征为较亮的周期波群,明显是从洋底辐射形成。

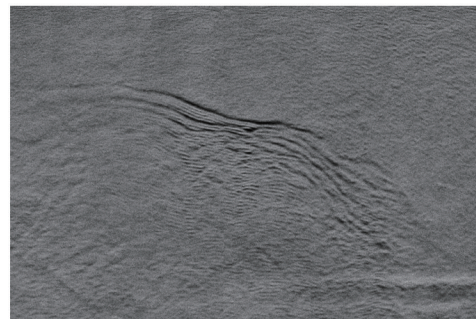


图6 C波段VV极化机载SAR获取的南海内波图像

Fig. 6 Internal waves captured by C-band VV-polarization airborne SAR

(图片来源:中国科学院电子学研究所航天微波遥感部)

2.2.3 风场监测

海面风场是海洋的主要动力来源,海面风是影响海浪、海流、水团等要素的活跃因子,也是海浪、海洋环流、海气边界层气象学以及海气相互作用研究中非常重要的参数,海洋学和气象学领域绝大部分研究都需要海面风场的资料。基于星载SAR的风速反演原理与微波散射计一样,都是根据风速与雷达后向散射截面的定量关系反推而得^[29-32]。图7为国产C波段1 m机载SAR(VV极化)获取的中国南海地区风场

图像,通过SAR图像可以反演出风向和风速。

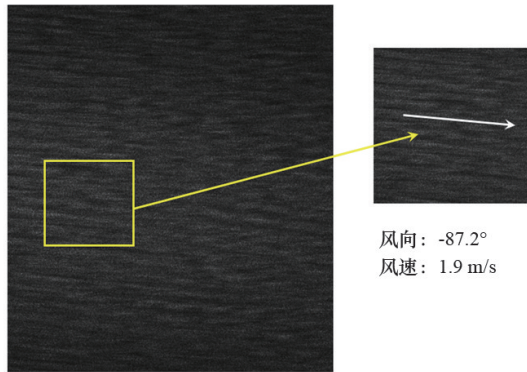


图7 C波段VV极化机载SAR获取的南海风场图像
Fig. 7 Wind picture captured by C-band VV-polarization airborne SAR
(图片来源:中国科学院电子学研究所航天微波遥感部)

2.2.4 海浪监测

SAR是目前唯一可以提供海浪方向谱的星载微波遥感器,可以计算得到有效波高、平均波周期、主波波长、主波波向等海浪参数。利用星载SAR图像,结合海洋动力学理论,可以进行海浪监测及信息反演^[33-34]。

图8为SEASAT SAR对加拿大温哥华岛(Vancouver Island)西北方400 km处的成像结果^[8],图像清楚地反映了风对于表面波检测的影响。一个向西传播的波长为220 m的表面波可以在较亮的区域被观测到,这是因为风的缘故使洋面不平整。

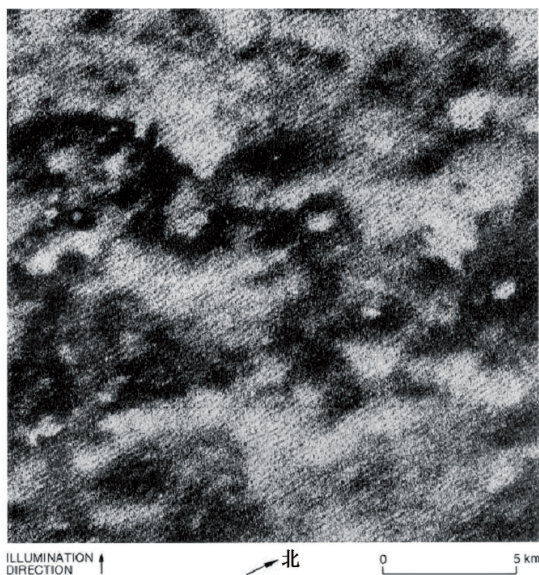
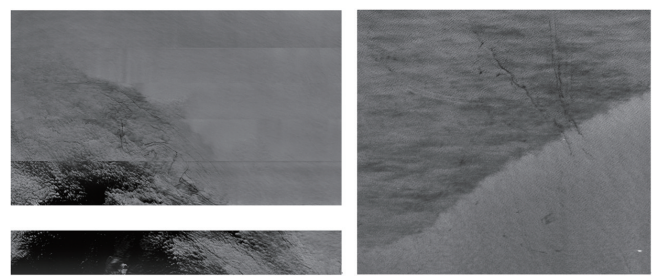


图8 SEASAT SAR对空间不同风速的表面波成像
Fig. 8 SAR image of surface wave in different wind speeds obtained by SEASAT SAR

2.2.5 中尺度涡旋和海洋锋面监测

海洋中尺度涡旋是叠加在海洋平均流场上的,尺度从几十至几百 km 的水平涡旋。而海洋锋面是指特征显著不同的两种或几种水体之间的狭窄过渡区域,代表了性质不同的水团之间的边界,是地球物理湍流的重要特征,在海洋动力学中有着重要的作用。

目前,对中尺度涡旋和海洋锋面的研究成果相关报道较少^[35-36]。在国内,中国科学院电子学研究所率先开展了海洋中尺度涡旋和海洋锋面探测方面的研究,并进行了机载飞行试验,首次获取了中尺度海洋涡旋的SAR图像。试验结果表明,从SAR图像中分离出中尺度涡旋和海洋锋面的信息完全可行(图9)。



(a) 海洋中尺度涡旋 (b) 海洋锋面
(机载L波段VV极化、1 m分辨率) (机载L波段VV极化、1 m分辨率)

图9 海洋中尺度涡旋和锋面SAR图像
Fig. 9 Sea Vortex and front SAR imagery
(图片来源:中国科学院电子学研究所航天微波遥感部)

3 星载SAR海洋监视与信息反演关键技术

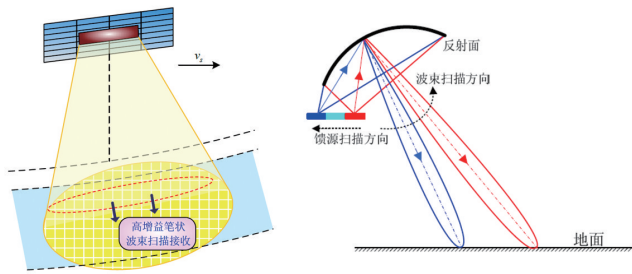
未来的星载SAR系统为了实现海上目标监测和海洋动力学要素监测及反演,需要借助的关键技术有:高分宽幅SAR成像技术、多基沿航迹干涉技术及多极化SAR技术等^[37-42]。其中,高分宽幅SAR成像技术是基础,而多基沿航迹干涉技术和多极化SAR技术用于信息反演。

3.1 高分辨率宽测绘带SAR成像技术

一方面,由于海洋面积大、范围广,需要星载SAR具有宽幅成像能力,从而快速了解宏观信息。另一方面,上述的海洋应用需要星载SAR具有高分辨率成像能力。因此,未来的星载SAR对海监视系统必须具有高分宽幅能力。

高分宽幅SAR体制在2001年IEEE地球科学与遥感大会(IGARSS)会议上首次被提出,其工作原理如图10(a)所示。该体制下发射端采用一个小孔径天线实现距离向与方位向的宽幅覆盖。接收端利用方位向的多通道和距离向的多通道接收回波。方位向通过多通道重构处理消除由于脉冲重复频率欠采样而导致的方位频谱混叠;距离向上利用多通道扫描接收(scan-on-receive, SCORE)处理,如图10(b)所示,形成一个由近及远实时追踪回波脉冲的高增益笔形波束,以此来弥补由于发射孔径面积较小而导致的增益损失,有效抑制

距离模糊。在进行距离向 SCORE 扫描时,需要借助数字波束形成技术(digital beam forming, DBF)。



(a) HRWS 系统工作原理示意 (b) 距离向 SCORE 接收原理示意

图 10 高分宽幅成像技术

Fig. 10 HRWS imaging techniques

图 11 为中国科学院电子学研究所航天微波遥感部利用研制的某星载高分宽幅 SAR 系统对海成像的结果图,其中白点为海面上的舰船。

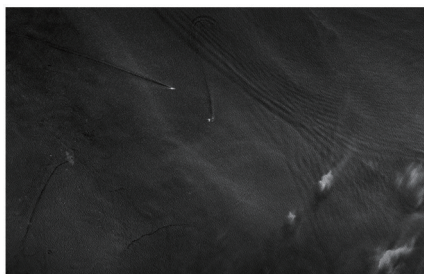


图 11 星载高分宽幅 SAR 对海监视成像结果

Fig. 11 Spaceborne HRWS-SAR imaging result for ocean surveillance

(图片来源:中国科学院电子学研究所航天微波遥感部)

3.2 多基沿航迹干涉技术

星载沿航迹干涉 SAR (along-track interferometric SAR, ATI SAR) 技术是通过沿航迹方向放置两路或多路相位中心,然后利用两通道数据的干涉相位来对消杂波,并获得运动目标的径向速度信息。该技术能检测到杂波谱内的慢速运动目标,已成功地应用于海流速度测量和海面运动目标检测等领域。

目前星载 SAR 系统形成沿航迹基线主要有 3 种方式。第一,单颗卫星通过孔径切换的方式形成多个距离较近的等效相位中心,如 TerraSAR-X (图 12)、Radarsat-2 等卫星;第二,单颗卫星通过伸展臂形成距离较远的等效相位中心,如 SRTM 双天线干涉 SAR 系统(图 13);第三,通过卫星星座的形式形成分布式星载 SAR 系统,如 TerraSAR-X 和 TanDEM-X 形成的 HELIX 编队方式(图 14)。

相对于单颗卫星形成的多相位中心,分布式卫星可以获得灵活调整的沿航向长基线以满足不同需求,突破单星雷达几何尺寸的限制,大大提高了对海面弱小、慢速运动目标的

探测能力。此外,对监视缓慢变化的洋流、冰川、海上漂浮物也有突出的优势。多颗卫星编队可在单次航过获得不同基线长度,灵活配置的卫星数量和基线组合,增大了系统自由度,提高了杂波抑制和动目标检测、定位能力。通过星间长-短基线结合,可有效解决最小可检测速度和盲速之间的矛盾,增大了动目标可测速范围。

因此,分布式星载 SAR 系统是未来星载 SAR 对海洋监视的发展方向。

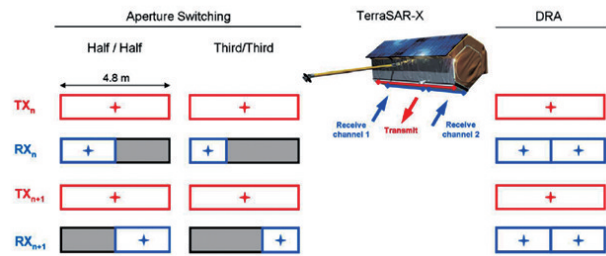


图 12 TerraSAR-X 的 2 种工作模式 (AS 模式和 DRA 模式)

Fig. 12 Two working modes of TerraSAR-X (AS mode and DRA mode)

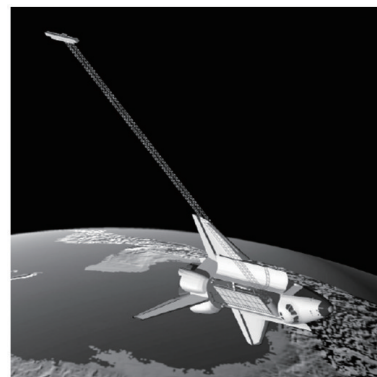


图 13 SRTM 天线位置

Fig. 13 Antenna position in SRTM system

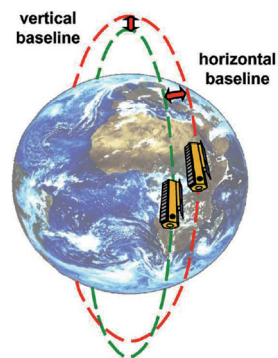


图 14 TerraSAR-X 与 TanDEM-X 的 HELIX 编队方式

Fig. 14 HELIX satellite formation mode of TerraSAR-X and TanDEM-X

图 15 为中国科学院电子学研究所航天微波遥感部利用研制的某星载高分宽幅沿航迹干涉 SAR 系统杂波对消的结果图。图 15(a) 为杂波对消前的 SAR 图像(对陆地成像), 图 15(b) 为利用沿航迹的两个通道进行杂波对消后的结果(其中亮线为行驶中的火车)。

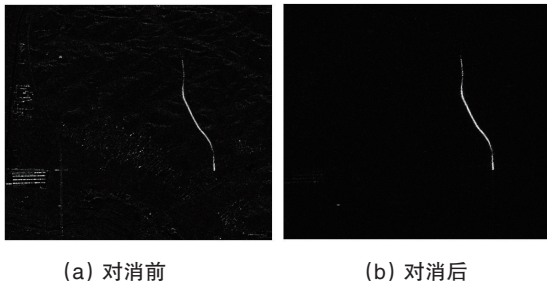


图 15 星载高分宽幅 SAR 沿航迹杂波对消结果
Fig. 15 Spaceborne HRWS-SAR clutter suppression result with two along-track channels
(图片来源:中国科学院电子学研究所航天微波遥感部)

3.3 多极化 SAR 技术

与普通星载 SAR 使用单一极化的天线发射和接收信号的方式不同, 星载极化 SAR (polarimetric SAR, PolSAR) 系统利用多极化的两个天线发射和接收雷达信号在相互垂直的 2 个方向上的分量, 获得海洋目标的极化散射矩阵, 可以得到除了目标散射回波的幅度和相位特征之外的极化信息, 极大地增强了星载 SAR 对海洋目标特性的获取能力。

对于舰船、溢油、海冰等海洋目标监测而言, 星载极化 SAR 系统丰富的散射信息和极化特征有助于海上目标的几何细节刻画和散射特性分析, 从而实现海上目标的检测、分类和识别。对于海洋动力环境要素, 星载极化 SAR 系统对不同海况条件下的不同尺度的海浪、海流、海面风场的敏感程度不同, 可以提供更加丰富的信息。因此, 星载极化 SAR 系统通过对极化信息的使用, 更有利于海上目标的有效探测和识别以及海洋动力要素的准确提取。

图 16 为中国科学院电子学研究所航天微波遥感部利用研制的某星载高分宽幅极化 SAR 系统对海成像的结果。

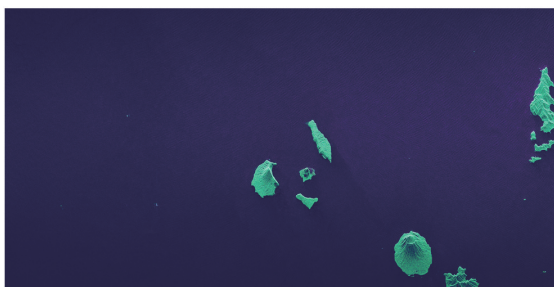


图 16 星载高分宽幅多极化 SAR 对海监视成像结果
Fig. 16 Spaceborne HRWS-PolSAR imaging result for ocean surveillance
(图片来源:中国科学院电子学研究所航天微波遥感部)

4 结论

为进一步满足人类对海洋探测和认知的需求, 星载 SAR 将以方位向多波束、俯仰向数字波束形成、变重频、多模式优化配置、高速数据采集与压缩等技术为手段, 以快速获取海洋多维动态信息为目的, 将人类带入一个高分辨率、宽测绘带、多维目标信息探测及快速响应的遥感探测新时代。

然而, 为了将以上这些新思想、新体制、新模式真正地工程化、实用化, 仍有诸多关键技术需要突破。随着技术的进步, 相信这些问题都会被最终解决。届时, 星载 SAR 对海观测亦将进入一个新的发展时期。

参考文献 (References)

- [1] 邓云凯, 赵凤军, 王宇. 星载 SAR 技术的发展趋势及应用浅析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 1-10.
Deng Yunkai, Zhao Fengjun, Wang Yu. Brief analysis on the development and application of spaceborne SAR[J]. Journal of Radars, 2012, 1(1): 1-10.
- [2] Wang R, Loffeld O, Nies H, et al. Frequency-domain bistatic SAR processing for spaceborne/airborne configuration[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(3): 1329-1345.
- [3] Cumming L G, Wong F H. 合成孔径雷达成像——算法与实现[M], 洪文, 胡东辉, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006.
Cumming L G, Wong F H. Digital processing of synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and implementation[J]. Hong Wen, Hu Donghui, trans. Beijing: Publishing House of Electronics, 2006.
- [4] Wang R, Deng Y K, Loffeld O, et al. Processing the azimuth-variant bistatic SAR data by using mono static imaging algorithms based on 2D principle of stationary phase[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2011, 49(10): 3504-3520.
- [5] Suchandt S, Runge H, Breit H, et al. Automatic extraction of traffic flows using terraSAR-X along-track interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2010, 48(2): 807-819.
- [6] Cerutti-Maori D, Sikaneta I, Gierull C. Ship detection with spaceborne multi-channel SAR/GMTI radars[C]//European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: VDE, 2012: 400-403.
- [7] 杨劲松, 王隽, 任林. 高分三号卫星对海洋内波的首次定量遥感[J]. 海洋学报, 2017, 39(1): 148.
Wang Jinsong, Wang Jun, Ren Lin. High three satellite on the first quantitative remote sensing of ocean internal waves[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 39(1): 148.
- [8] 中国科学院电子学研究所航天微波遥感系统部. 世界星载 SAR 系统调研报告[R]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2010.
Department of Space Microwave Remote Sensing System, Institute of Electronics, Chinese Academy Science. The spaceborne SAR system research report[R]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy Science, 2010.
- [9] 范开国, 傅斌, 黄韦良, 等. 浅海水下地形的 SAR 遥感仿真研究[J]. 海洋学研究, 2009, 27(2): 79-83.
Fan Kaiguo, Fu Bin, Huang Wengen, et al. Simulation study on SAR shallow water bathymetry[J]. Journal of Marine Sciences, 2009, 27(2): 79-83.
- [10] Baumgartner S V, Krieger G. Simultaneous high-resolution wide-swath SAR imaging and ground moving target indication: Processing approaches and system concepts[J]. Journal of Electromagnetic Waves

- and Applications, 2015, 8(11): 5015-5029.
- [11] on based on coherence images derived from cross correlation of multi-look SAR images[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2004, 1(3): 184-187.
- [12] Gao G, Liu L, Zhao L J, et al. An adaptive and fast CFAR algorithm based on automatic censoring for target detection in high-resolution SAR images[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2009, 4(6): 1685-1697.
- [13] 邢相薇, 计科峰, 康利鸿, 等. HRWSSAR 图像舰船目标监视技术研究综述[J]. 雷达学报, 2015, 4(1): 107-121.
Xing Xiangwei, Ji Kefeng, Kang Lihong, et al. Review of ship surveillance technologies based on high-resolution wide-swath Synthetic Aperture Radar imaging[J]. Journal of Radars, 2015, 4(1): 107-121.
- [14] 赵志. 基于星载 SAR 与 AIS 综合的舰船目标监视关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
Zhao Zhi. Spaceborne SAR and AIS comprehensive research on the key technologies of ship target surveillance[D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2013.
- [15] 唐沐恩, 林挺强, 文贡坚. 遥感图像中舰船检测方法综述[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(1): 29-36.
Tang Muen, Lin Tingqiang, Wen Gongjian. Overview of ship detection methods in remote sensing image[J]. Application research of Computers, 2011, 28(1): 29-36.
- [16] 朱宗斌. SAR 海洋溢油监测多源信息融合研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
Zhu Zongbin. SAR marine spilled oil monitoring research on multi-source information fusion[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [17] 龚宁. 海面溢油的微波散射模型研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
Gongning. Study on microwave scattering model of marine oil spill[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [18] 刘朋. SAR 海面溢油检测与识别方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
Liu Peng. Research on detection and recognition method of oil spill at sea SAR[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [19] 李旭坤. 多波段全极化 SAR 海冰分类研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
Li Xukun. Study on the classification of multi band polarization SAR sea ice[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [20] 常灿灿. ScanSAR 模式海冰图像分割[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
Chang Cancan. ScanSAR sea ice image segmentation[D]. Hefei: Hefei Polytechnic University, 2013.
- [21] Romeiser R, Thompson D R. Numerical study on the along-track interferometric radar imaging mechanism of oceanic surface currents[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2000, 38(1): 446-458.
- [22] Romeiser R, Runge H, Suchandt S, et al. Current measurements in rivers by spaceborne along-track InSAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2007, 45(12): 4019-4031.
- [23] 常亮, 高郭平, 郭立新. 星载 SAR 海洋表层流场反演综述[J]. 海洋科学进展, 2015, 33(1): 107-117.
Chang Liang, Gao Guoping, Guo Lixin. Review on ocean surface current field measurement by space-borne SAR[J]. Advances in Marine Science, 2015, 33(1): 107-117.
- [24] 李慧敏. 基于多普勒法的 SAR 海表流场反演算法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
Li Huimin. Study on flow field inversion algorithm of SAR sea surface based on Doppler method[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [25] 吴中鼎, 李占桥. 星载 SAR 遥感在海洋水文观测中的应用探讨[J]. 海洋测绘, 2001(2): 48-51.
Wu Zhongding, Li Zhanqiao. Application of spaceborne SAR remote sensing in marine hydrographic observation[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2001(2): 48-51.
- [26] 林珲, 范开国, 申辉, 等. 星载 SAR 海洋内波遥感研究进展[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 1081-1091.
Lin Hui, Fan Kaiguo, Shen Hui, et al. Review on remote sensing of oceanic internal wave by space-borne SAR[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(3): 1081-1091.
- [27] 范开国, 黄韦良, 甘锡林, 等. SAR 海洋内波表层流反演方法探讨[J]. 遥感学报, 2010, 14(1): 122-130.
Fan Kaiguo, Huang Weigen, Gan Xilin, et al. Retrieving internal wave surface currents from SAR image[J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(1): 122-130.
- [28] 陈捷, 陈标, 陶荣华, 等. SAR 图像海洋内波参数自动提取方法[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(6): 20-27.
Chen Jie, Chen Biao, Tao Ronghua, et al. An automatic extraction method of SAR images of ocean internal wave parameters[J]. Journal of Ocean Technology, 2014, 33(6): 20-27.
- [29] 刘丽娜, 陈曦, 赵现斌, 等. 机载 SAR 探测海面风场、海浪和海洋内波方法的分析与研究[J]. 气象水文海洋仪器, 2012, 29(2): 6-10.
Liu Lina, Chen Xi, Zhao Xianbin, et al. Sounding methods for ocean surface wind, wave and internal wave based on airborne SAR[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2012, 29(2): 6-10.
- [30] 艾未华, 严未, 赵现斌, 等. C 波段机载合成孔径雷达海面风场反演新方法[J]. 物理学报, 2013, 62(6): 1-9.
Ai Weihua, Yan Wei, Zhao Xianbin, et al. A new ocean surface wind field retrieval method from C-band airborne synthetic aperture radar[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(6): 1-9.
- [31] Kim T S, Park K A, Li X, et al. Observation of wind direction change on the sea surface temperature front using high-resolution full polarimetric SAR data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2017, 10(6): 2599-2607.
- [32] Bergeron T, Bernier M, Chokmani K, et al. Wind speed estimation using polarimetric RADARSAT-2 images: Finding the best polarization and polarization ratio[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2011, 4(4): 896-904.
- [33] 史伟哲. 星载 SAR 海洋场景仿真与反演方法综述[J]. 航天器工程, 2011, 20(1): 50-56.
Shi Weizhe. A review of spaceborne SAR simulation and retrieval for ocean scene[J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(1): 50-56.
- [34] 张彪, 何宜军. 高海况海洋遥感信息提取技术研究进展[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(3): 16-20.
Zhang Biao, He Yijun. Research progress of the ocean remote sensing information extraction technology under high sea states[J]. Journal of Ocean Technology, 2015, 34(3): 16-20.
- [35] Mitnik L M, Dubina V A. Satellite SAR sensing of oceanic dynamics in the Kuril Straits area[C]/IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 7632-7635.
- [36] 朱敏慧. SAR 的海洋动力探测研究及应用浅析[J]. 雷达学报, 2012, 1

- (4): 342-352.
Zhu Minhui. Review of ocean dynamical SAR detection[J]. Journal of Radars, 2012, 1(4): 342-352.
- [37] 蒋斌. 星载海洋宽幅 SAR 机载试验系统技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
Jiang Bin. The spaceborne ocean wide research SAR airborne test system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2012.
- [38] Cerutti-Maori D, Sikaneta I. A generalization of DPCA processing for multichannel SAR/GMTI radars[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2013, 51(1): 560-572.
- [39] Noviello C, Fornara G, Martorella M. Focused SAR image formation of moving targets based on Doppler parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(6): 3460-3470.
- [40] Rousseau L P, Cierull C, Chouinard J Y. First results from an experimental scanSAR-GMTI mode on Radarsat-2[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(11): 5068-5080.
- [41] Cerutti-Maori D, Sikaneta I, Gierull C H. Optimum SAR/GMTI processing and its application to the radar satellite RADARSAT-2 for traffic monitoring[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2012, 50(10): 3868-3881.
- [42] 张杰, 张晰, 范陈清, 等. 极化 SAR 在海洋探测中的应用与探讨[J]. 雷达学报, 2016, 5(6): 596-606.
Zhang Jie, Zhang Xi, Fan Chenqing, et al. Discussion on application of polarimetric synthetic aperture radar in marine surveillance[J]. Journal of Radars, 2016, 5(6): 596-606.

Ocean surveillance and information extraction based on HRWS spaceborne SAR system

DENG Yunkai, YU Weidong, WANG Yu

Department of Space Microwave Remote Sensing System, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract In order to satisfy the increasing demand for ocean surveillance, the spaceborne SAR system should have the capacity of High Resolution and Wide Swath (HRWS). The HRWS spaceborne SAR system can not only obtain the ocean environment parameters (such as current, wave, wide speed and direction and internal wave), but also extract a variety of target information (such as ships, oil spills and sea ice) on the surface of the sea. Therefore, the HRWS spaceborne SAR system plays an important role in the national economic development and the national defense construction. This paper reviews the applications of the spaceborne SAR system in ocean surveillance and the key techniques of the spaceborne SAR system for ocean surveillance. Finally, a possible HRWS SAR satellite constellation is designed, which can meet the demand of ocean surveillance in the future.

Keywords spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR); high resolution wide swath; ocean surveillance

(责任编辑 刘志远)