



主题：创新驱动发展战略引领下的中国海洋科技

中国海洋学会2017年学术年会

论文集

中国海洋学会 编
中国太平洋学会

ZHONGGUO HAIYANG XUEHUI 2017 NIAN
XUESHU NIANHUI LUNWENJI



海洋出版社

中国海洋学会 2017 年 学术年会论文集

中国海洋学会 编
中国太平洋学会

海洋出版社

2017 年 10 月 · 北京

图书在版编目 (CIP) 数据

中国海洋学会 2017 年学术年会论文集/中国海洋学会, 中国太平洋学会编.
—北京: 海洋出版社, 2017. 10
ISBN 978-7-5027-9936-6

I. ①中… II. ①中… ②中… III. ①海洋学-文集 IV. ①P7-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 239662 号

责任编辑: 王 倩 高 英

责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京朝阳印刷厂有限责任公司印刷 新华书店北京发行所经销

2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷

开本: 880 mm×1230 mm 1/16 印张: 30

字数: 966 千字 定价: 168.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

目次

SAR 与光学融合的海洋内波遥感探测及传播特性研究	孙丽娜,张杰,孟俊敏(1)
基于星载微波散射计风场和 NCEP FNL 分析资料的多波数海面混合风场	刘宇昕,王兆徽,宋清涛(11)
HY-2A 卫星大气校正微波辐射计再定标	赵瑾,张德海,王振占,李芸(14)
基于一种大气数值产品的全球海洋预报试验	王少可,赵军,李琰(20)
星载微波辐射计非线性算法的 HY-2A 数据质量控制	王兆徽,陈晨,宋清涛(28)
近 6 年影响河北沿海的天气统计及分析	张坤兰,闫智超,姚远(32)
多种水深光学遥感探测模型比较研究	陈安娜,马毅,张靖宇(39)
基于亚米级高分 SAR 影像的珊瑚礁岸线自动提取模型——以西沙赵述岛为例	胡亚斌,马毅,孙伟富,安居白(44)
滨海湿地主被动遥感联合 DCNN 分类模型	孙钦佩,马毅,张靖宇,胡亚斌(51)
基于视频监控的厦门白城海滨浴场海漂垃圾污染调查分析	崔文婧,姜静柔,张彩云(57)
典型河口、海湾水体的光学特征及其悬浮物含量的反演算法	卢楚谦,蔡伟叙,段国钦,姜广甲(64)
珠江口海域溶解有机物的时空分布特征及其动力变化	张纯超,袁蕾,吕彦儒,刘景钦,姜广甲(74)
海水增温和富营养化驱动下的黄海水体脱氧和酸化	韦钦胜,王保栋,姚庆祯,薛亮,于志刚(83)
不同光源和水流条件下 ATS 对氮磷固定效率的影响	郁琨,穆怀利,柴源,张晓明,赵守发(98)
西太平洋板内海山成因研究进展	唐立梅,陈灵,初凤友,董彦辉(103)
基于无人机遥感技术的黄河口湿地生态红线区环境现状研究	徐栋,杨敏,严晋,于骁(112)
南海珊瑚骨骼中 ²²⁸ Th/ ²²⁸ Ra 不平衡及其年代学应用初探	林武辉,余克服,王英辉,覃祯俊(119)
基于 BP 神经网络的中西太平洋鲉鱼围网渔场预报	陈洋洋,陈新军,郭立新,方舟,汪金涛(125)
渤海典型鱼类体内重金属分布状况研究	王海荣,李超,丁龙,刘超,吴建平(135)
秋季我国近海不同海域短蛸角质颚形态学研究	方舟,金岳,胡飞飞,马迪,陈新军(139)
南极磷虾油中磷脂的富集工艺优化研究	张晓慧,王践云,尹佳,李文强,潘浩波(147)
厦门主要海湾红树林湿地的时空演变特征	张彩云,林锐,罗汉宏,洪华生(153)
长茎葡萄蕨藻(<i>Caulerpa lentillifera</i>)多糖的提取及单糖组分分析	高萍,王欣,曲凌云(161)
3 种常见海藻对营养盐吸收的初步研究及海藻的应用	陈志伟(169)
利用海藻建立水族箱生态系统的研究	曾小,王森,刘辉,黄丹美,孙立奎,贾建民(174)
东印度洋可培养细菌的分离鉴定及多样性分析	尹康宇,鲁小曼,杜光迅,曲凌云(182)
海洋工程勘察系列平台研究及应用	胡建平,李孝杰(190)
竖板横摇浮筒式波浪能发电装置的结构设计及试验研究	崔天宇,赵江滨,周建林,朱风绅(201)
摆翼式波浪能发电水下航行器研究	赵江滨,周建林,朱风绅,周克记(206)
基于丝束电极技术的沉积物覆盖下管线钢的局部腐蚀研究	曾靖波,贺丽敏,蔡伊扬,黄一(213)
浅析海岛航空遥感监测技术的发展	蒋旭惠,韩磊,董梁(218)
赤潮航空遥感监测技术浅析	周凯,刘秋萍(223)
绿潮航空遥感监测技术浅析	周凯,刘秋萍(229)

溢油航空遥感技术浅析	周凯,刘秋萍(236)
我国海洋科学数据网络共享现状	徐超,李莎(243)
海洋数据共享的问题和对策	徐承德(253)
馆养伪虎鲸自然分娩及仔鲸的护理	卢凤琴,牟恺,李昕,阎宝成(258)
人工饲养白鳍鲨的繁殖浅析	韩绍荣,林乐宏(263)
对北极熊(<i>Ursus maritimus</i>)人工育幼的研究	史红霞,乜英奎,孙世佳(271)
从“丑小鸭”到“白天鹅”——帝企鹅 <i>Penna</i> 的故事	郭惠,方宇,邹德泉,王忠人(280)
红小丑苗种繁育技术研究	周庆杰,林乐宏(285)
“十三五”海洋能发展战略研究	麻常雷(291)
建议加强海洋观测仪器设备应用与管理	高艳波,任炜,王祎,石建军(296)
南海岛礁生态建设的研究概述	韩玉康,赵艳玲,郑崇伟(298)
我国海洋生态文化国际合作战略分析	徐文玉(304)
关于海洋渔业管理相关问题的探讨	王志明(310)
产业链协同对水产品质量安全追溯体系运行的影响——基于全国 209 家水产企业的实证分析	胡求光,朱安心(315)
舟山国际水产城鱼市场的问题与对策分析	蔡璐,马丽卿(327)
中国海洋战略:内涵、目标、诉求与举措	成志杰,冯妮,邓春楠,师桂杰,马蕊(331)
论边缘海权	丁启学(343)
中国海洋经济发展的总体趋势分析	文艳,倪国江(353)
海洋经济学的学科交叉和学术传播	赵琴琴,任国征(357)
供给侧结构性改革视角下海洋经济创新发展路径研究——基于台州的实证分析	牟盛辰(363)
海洋渔业与海洋强国战略	陈晔(373)
海洋教育:概念、特征与发展路径	季托,武波(380)
新形势下的海洋旅游人才教育改革初探	马丽卿,陈思佳(387)
“一带一路”背景下南海海洋科普工作	李云哲,蒲凌海,周沛翔,孙涛(392)
海上丝绸之路海外史料中的山东海商研究	袁晓春(396)
唐朝东北亚丝绸之路远东段遗迹探寻	窦博(407)
“21 世纪海上丝绸之路”视角下的我国邮轮母港现状分析与发展研究	姜锐,姜华,彭鹏,盛方清(414)
基于因子聚类分析的我国游艇旅游制度优先改善目标研究	姚云浩,栾维新,王依欣(425)
自然生长是推动旅游发展的有效途径	岑博雄(433)
“一带一路”背景下的舟山群岛旅游发展研究	蔡璐,马丽卿(436)
海洋旅游市场营销策略研究——以海南省为例	李智,马丽卿(441)
海南省国际旅游岛建设前后旅游发展水平的对比分析	袁腾,武壮,孙涛(446)
北海市发展全域旅游的环境与对策	镇威(456)
The innovative ships for navigation in Arctic seas	Sergei A.Ogai,Michael V.Voyloshnikov(463)
Ensuring security in the Arctic as a key to the stability of the northern sea route development	Zhuravel Yuri(475)
Northern expansion of transport and logistic geography for economies of the apr countries	Sokolova Ekaterina(476)

SAR 与光学融合的海洋内波遥感探测及传播特性研究

孙丽娜¹, 张杰¹, 孟俊敏¹

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 海洋内波是发生在海洋内部一种常见的动力现象, 它虽然发生在海洋内部, 但在传播过程中会引起海表面微尺度波的分布, 在遥感图像中呈现明暗相间的条纹。遥感技术已广泛应用于内波的时空分布、生成与演变和参数反演等研究, 是大范围内波观测的最佳手段。光学影像 MODIS 空间覆盖范围大、时间分辨率高, 但易受云、雾等天气影响; SAR 虽获取的数据量有限, 但具有全天时、全天候的优势。本文将 SAR 与 MODIS 有效融合, 利用 MODIS、ENVISAT ASAR 和 RADARSAT-2 遥感图像开展内波遥感探测及传播特性研究, 给出了内波在 SAR 和光学图像中的特征并进行了分析; 同时结合 SAR 和光学图像给出了南海北部内波的传播特征; 最后基于 SAR 与光学融合数据进行了内波传播速度探测。

关键词: 海洋内波; 遥感; MODIS; ENVISAT ASAR; RADARSAT-2; 传播特性

1 引言

海洋内波是发生在海洋内部的波动现象, 它不同于海表面波, 不能被人们轻易观察到。内波经过时, 海表面看似平静, 但海洋内部却波澜起伏, 内波产生的等密度面起伏可以达到百米量级, 流速可达数十厘米每秒。内波严重威胁着水下潜艇航行安全, 对海上石油平台及其他工程作业也有较大的影响; 同时, 内波的传播可以导致湍流和混合, 是海洋能量输送的一种途径。

由于内波在水下生成和传播, 在水平方向和垂向上有其固有的结构。因此, 对于内波的现场观测相对于表面波困难的多, 常规的观测手段成本较高, 受环境条件的制约且只能定点观测。遥感技术的迅猛发展, 使其成为大范围探测内波的主要观测手段。目前对内波的遥感观测主要应用高度计、SAR 和光学手段。高度计主要是用于测量海面高度的, 大量用于表面潮、中尺度涡等大尺度过程的研究, 因此对于内波的研究, 高度计数据大多用来研究深海处的内潮^[1]。SAR 可以全天时、全天候的工作, 具有较高的空间分辨率, 是海洋内波遥感的常用手段。Elachi 和 Apel^[2]与 Richez^[3]最早从机载 SAR 图像中识别出来内波, 并分析了穿越内波波峰的后向散射界面的变化。Fu 和 Holt^[4]对 Seasat 卫星的内波 SAR 图像进行了分析, 获得了与 Apel 在 Landsat 卫星可见光图像上观测到的相似的内波特征。此后大量 SAR 影像被利用与内波特征的观测, Liu^[5]用 ERS-1 卫星的 SAR 影像研究了中国大陆东部海域和南海的内波演化。Small^[6]利用同一地点相隔 24 h 的两景 SAR 图像捕获了相同的内波特征。Zheng 等^[7]利用 1995 年到 2001 年的 SAR 影像不仅分析了南海内波的空间分布特征, 同时研究了内波随时间的分布特征。与此同时, 许多学者基于内波成像机理从 SAR 遥感图像中反演了内波波长、波速、振幅和混合层深度等参数和上层海洋动力学参数^[8-10]。

光学遥感 MODIS 图像空间覆盖范围大、时间分辨率高, 也是内波遥感探测的主要手段。Shand^[11]最早以航空摄影的形式记录了内波引起的海面条带现象, 这是最早利用遥感技术光学手段发现的内波。

基金项目: 国家自然科学基金 (61471136); “全球变化与海气相互作用”专项 (GASI-02-SCS-YGST2-04)。

作者简介: 孙丽娜 (1985—), 女, 吉林省桦甸市人, 研究方向为海洋内波遥感探测。E-mail: sunln@fio.org.cn

Melsheimer 和 Keong^[12]较详细的分析了内波、溢油等在 SPOT 图像的耀斑区成像的过程,分析了观测几何和海面风速对图像强度的影响。谢志宏^[13]利用大量的 SAR 和 MODIS 影像分析了安达曼海内波的激发源地和传播特征。Jackson^[14-15]更是利用 ASTER 图像给出了全球各大洋内孤立波的分布图,随后又利用 MODIS 研究了全球内波的分布情况,给出了全球七大地区的内波特征。有大量学者已将光学与 SAR 图像相结合研究内波,Matthews 等^[16]基于大量 MODIS 图像和 SAR 图像研究了龙目海峡附近海域的内波特征,发现该海域主要有两种类型的内波:一种是向北传播的我们熟知的“圆弧型”内波,一种是向南传播的“非规则”内波。da Silva 等^[17]基于 MODIS、MERIS 和 SAR 影像观测到,内波从红海中部的水深较深处产生传向大陆架,传播至大陆架时内波结构已经不明显。

SAR 与光学相融合,可以弥补 SAR 与光学探测内波的不足,在研究内波的时空分布、传播特性及传播速度方面具有很大的优势。本文拟利用 SAR 与光学遥感图像,开展内波遥感探测研究,给出内波在 SAR 和光学图像中的特征,进行内波传播特性研究,最后基于 SAR 与光学融合数据进行内波传播速度分析。

2 内波 SAR 与光学图像特征

2.1 内波 SAR 图像特征分析

SAR 工作在微波波段,不受云雾的干扰,它通过工作微波与海表面微尺度波共振相互作用成像,因此,凡是影响到海表面微尺度波分布的海洋现象都可以在 SAR 成像。内波在传播过程引起海表面流场的变化,调制了海表面微尺度波的分布,进而改变了海面的后向散射截面,在 SAR 图像中呈现明暗相间的条纹。受海水分层的影响,上层厚度和下层厚度的大小关系,内波分为上升型和下降型两种,上升型内波在 SAR 图像上表现为先暗后亮,下降型内波在 SAR 图像上是先亮后暗的,如图 1 所示。图 1 为 2011 年 5 月 12 日 02:19:39 (UTC) 的 ENVISAT ASAR 内波图像。从图中可以看出,内波表现较为清晰,其中,图 1a 中的内波表现为先亮后暗,为下降型内波;图 1b 中的内波表现为先暗后亮,为上升型内波。在遥感图像中,下降型内波是比较常见的,受海水分层和水深的影响,一般下层海水的深度要大于上层海水的深度,内波在 SAR 图像中多表现为先亮后暗。

基于对大量的内波 SAR 图像分析可知,内波在 SAR 图像上主要有以下特征:

- (1) 内波呈现明暗交替的条带形式,或直或弯曲,大多数是弯曲的;
- (2) 沿内波传播方向,先亮后暗为下降型内波,先暗后亮为上升型内波;
- (3) 内波沿传播方向大多以波包的形式传播,每个波包含有几个或多个孤立子;
- (4) 沿内波传播方向,最前沿的内波即前导波一般最大,后面的内孤立子依次减小;
- (5) 内波的波峰线一般与海底等深线平行;
- (6) 波波相互作用一般不改变原来的传播方向。

2.2 内波光学图像特征分析

内波在光学传感器上成像机理与 SAR 相似,内波的传播改变了海表面的粗糙度,进而调制了光学遥感接收的太阳光的反射强度,使得内波在光学传感器上呈现亮暗或暗亮相间的条带。光学遥感图像虽然容易受云、雾等环境条件的影响,但它的覆盖范围广、时间分辨率高,可免费获取的优点,可以完全弥补其不足。根据目前的大量观测可知,内波大部分是在太阳耀斑区附近成像,这里传感器接受的基本上是太阳光的镜面元反射。

基于大量的光学遥感图像分析得,内波在光学图像中的特征与在 SAR 图像中的特征类似,不同之处在于:内波在太阳耀斑区和非耀斑区的成像特征不同,在耀斑区内,内波表现为先暗后亮;在耀斑区外,内波表现为先亮后暗,如图 2 和图 3 所示。从图中可以看出,MODIS 图像虽然有部分被云雾遮挡,但部分内波还是清晰可见的。图 2 为 2010 年 6 月 17 日 02:05 (UTC) 的 MODIS 图像,可以明显看到耀斑区

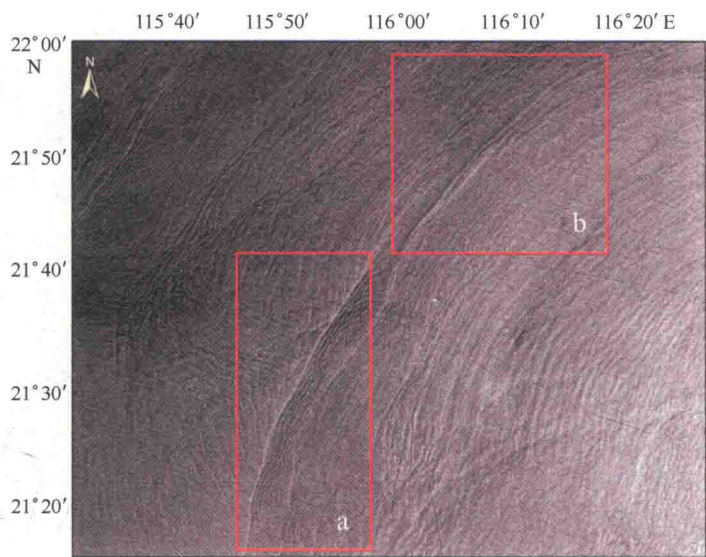


图1 2011年5月12日内波 ENVISAT ASAR 图像 (02: 19: 39, UTC)
a. 内波呈现先亮后暗, 下降型内波; b. 内波呈现先暗后亮, 上升型内波

内和耀斑区外的内波条纹, 两条蓝色线中间区域为太阳耀斑区。其中, 图 2a 框为非耀斑区, 图中有 2 个内孤立波包, 由东向西传播, 表现为先亮后暗。

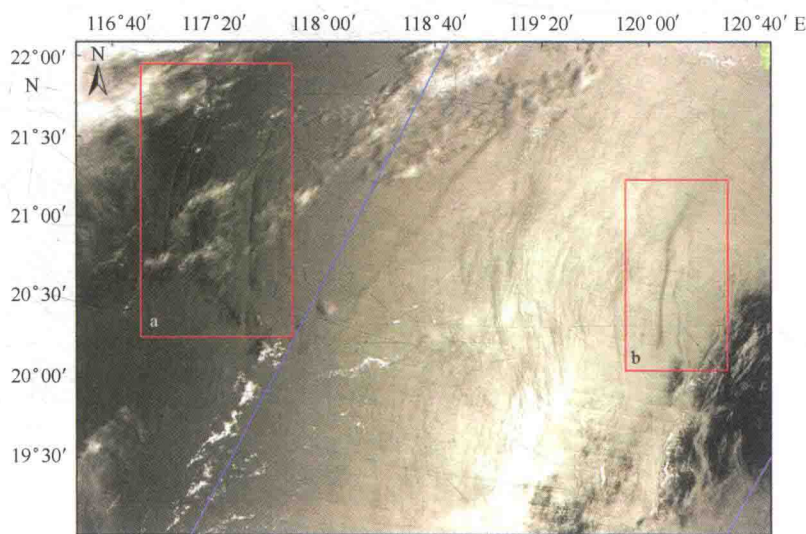


图2 2010年6月17日内波 MODIS 图像 (02: 05, UTC)
a. 太阳耀斑区的内波; b. 非耀斑区的内波

图 2b 框为耀斑区, 图中有一个明显的较大的内孤立波, 后面尾随着一些较小的内波, 表现为先暗后亮。图 3 为 2010 年 7 月 17 日 03: 00 (UTC) 的内波 MODIS 图像, 该图为太阳耀斑区内的内波图像。图中可以明显看见多条内波, 自东向西传播, 绕过东沙群岛继续向西传播。在一个波包中, 头波的波峰线最长, 随后依次减弱, 内波均表现为先暗后亮。

图 4 为 2011 年 6 月 8 日 05: 30 (UTC) 的内波 MODIS 图像, 该图像中的内波位于非耀斑区内, 内波条纹表现为先亮后暗, 受环境 (云) 的影响, 部分内波被遮挡表现不完全。该图像中的内波位置与图 3 中的内波位置大致相同, 都位于东沙群岛附近海域; 但图像获取时间在月份上相差 1 个多月, 太阳高度角不同, 内波的亮暗顺序不同。

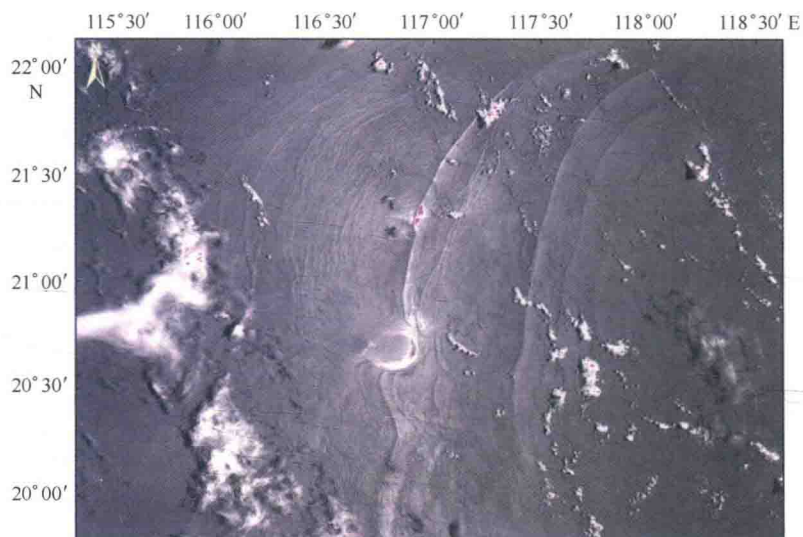


图3 2010年7月17日的太阳耀斑区的内波 MODIS 图像 (03: 00, UTC)

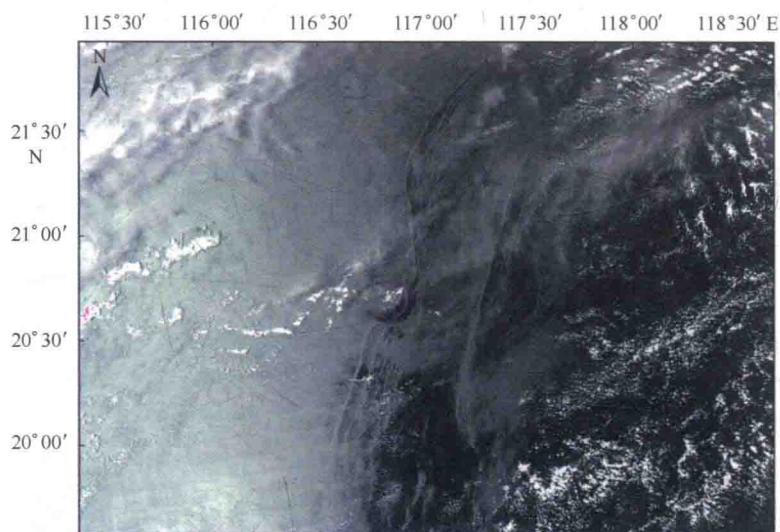


图4 2011年6月8日内波 MODIS 图像 (05: 30, UTC)

通过对大量的内波遥感图像分析可知,内波在 SAR 图像和光学图像中有共有的特征:内波在图像中表现为直线或曲线状的亮暗相间的条纹;内波多以波包的形式传播,波包含有一个或多个孤立子,前导波一般最大,往后依次呈现递减趋势。对于 SAR 图像,因不受天气环境等的影响,内波表现较为清晰,但其时间分辨率较低,获取的数据量有限;而光学图像虽然受云雾等环境的影响,但其空间覆盖范围大,时间分辨率高。因此,将 SAR 与光学融合,结合二者的优势,有利于内波的探测及传播特征研究,有效提高内波的探测率。

3 SAR 与光学融合的内波遥感探测

由于光学遥感图像受云雾影响较大,内波很容易被云雾遮挡而导致漏检;SAR 具有穿透云雾的能力,可以弥补光学传感器探测内波的不足。图 5 为 2011 年 5 月 12 日东沙群岛附近海域的内波遥感图像,上图为 2011 年 5 月 12 日 02: 45 (UTC) 的内波 MODIS 图像,下图为 2011 年 5 月 12 日 02: 19: 39 (UTC) 的内波 SAR 图像, SAR 图像与光学图像的获取时间间隔为 25 分 21 秒。从下图中可以看出,光学 MODIS

图像的云雾覆盖面积较大, 且内波所在区域不是太阳耀斑区, 仅在图像左端位置可以看到几条内孤立波, 条纹并不清晰; 图像右部分被云雾遮挡, 看不见内波条纹。下图 SAR 相同的覆盖区域, 可以清晰看见内波条纹, 内波由东偏南向西偏北方向传播, 东沙群岛附近海域的内波尺度较大, 向西传播过程中, 内波尺度逐渐减小且清晰可见。光学图像探测不到的内波可以通过 SAR 查找, 利用 SAR 和光学的各自优势, 能够有效提高内波的探测。

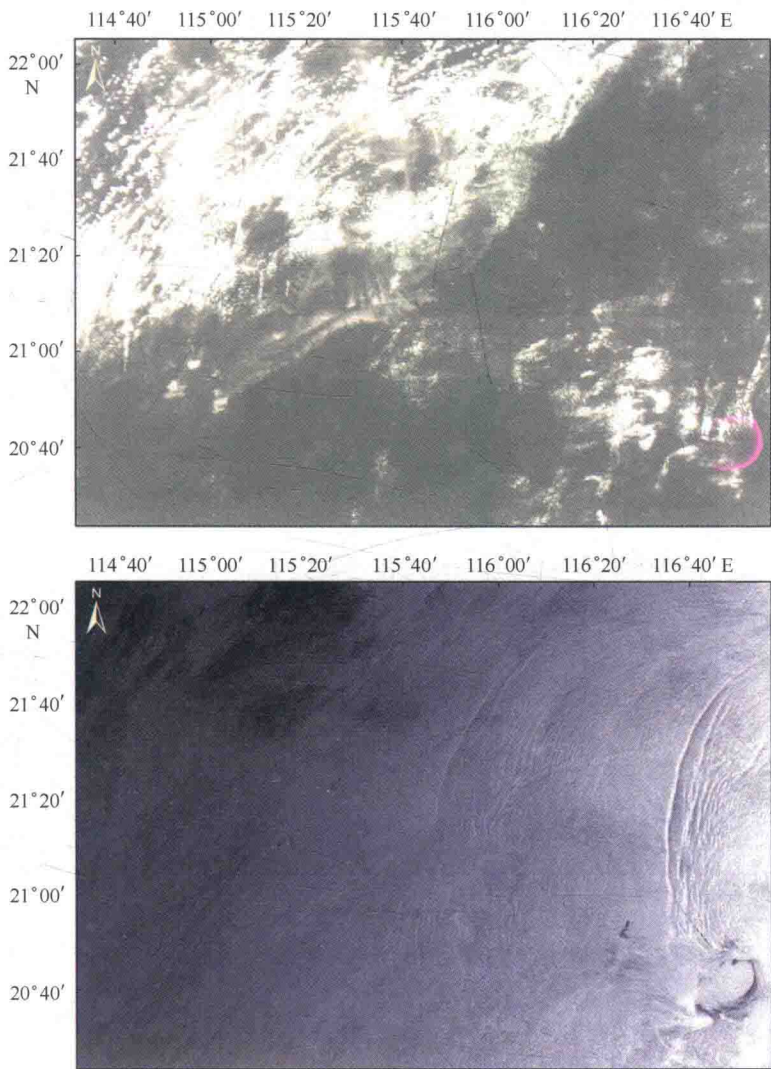


图 5 2011 年 5 月 12 日东沙群岛附近海域的内波图像

上图为 2011 年 5 月 12 日 02: 45 (UTC) 的内波 MODIS 图像, 下图为 2011 年 5 月 12 日 02: 19: 39 (UTC) 的内波 SAR 图像

图 6 为 2011 年 6 月 8 日的两景覆盖同一区域的内波光学图像和 SAR 图像, MODIS 图像的获取时间为 2011 年 6 月 8 日 05: 30 (UTC), SAR 图像的获取时间为 2011 年 6 月 8 日 02: 29: 59 (UTC)。从图中同样可以看出, MODIS 图像受云雾的遮挡几乎看不见内波, 仅在图像右下角区域有几条内波; 而 SAR 图像中可以清晰看见多条内波。

光学图像受云雾等影响较大, 其探测不到的内波可以通过 SAR 图像查找, 但由于 SAR 获取数据的局限性, 并非所有的光学图像都能够找到与其相匹配的 SAR 图像; 另 SAR 图像的获取时间与光学图像的获取时间不同, 所探测到的内波大多数不同步, 而光学图像的获取时间分辨率较高, 能够获取更多的遥感图像。因此, 利用 SAR 和光学的各自优势, 能够有效提高内波的探测。

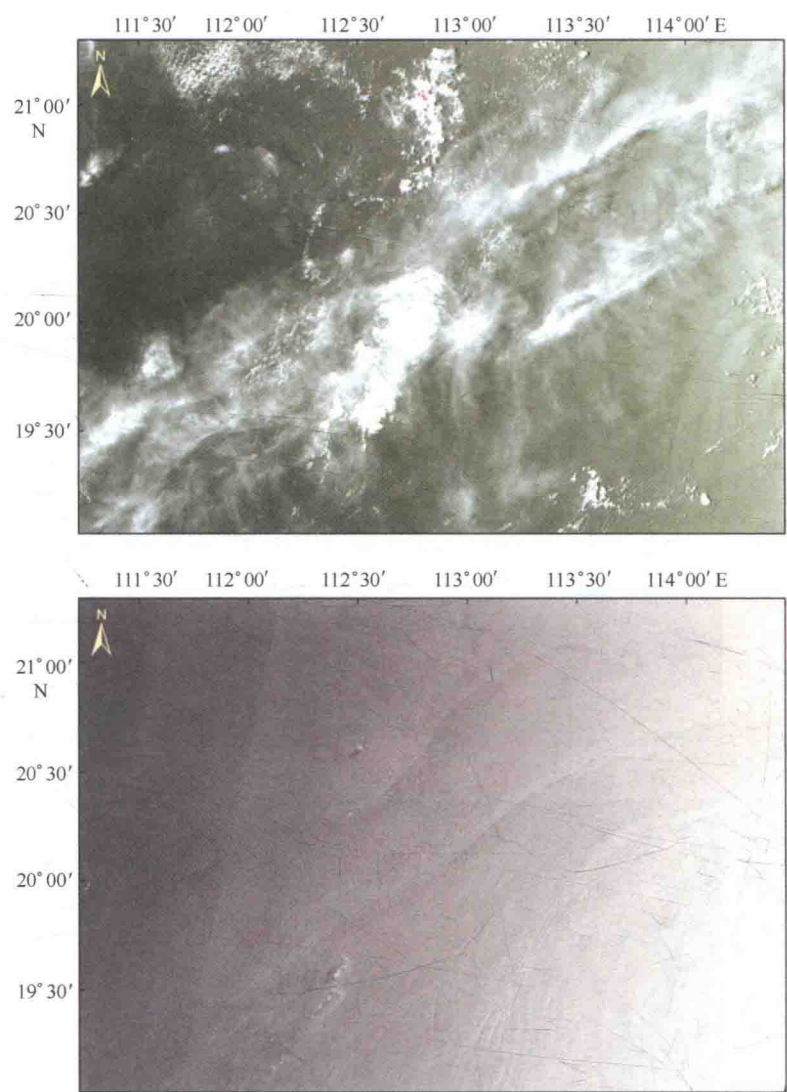


图 6 2011 年 6 月 8 日南海北部的内波图像

上图为 2011 年 6 月 8 日 05: 30 (UTC) 的内波 MODIS 图像, 下图为 2011 年 6 月 8 日 02: 29: 59 (UTC) 的内波 SAR 图像

4 SAR 与光学融合的内波传播特性研究

4.1 内波传播特性

南海北部海域作为内波研究的天然试验场，其内波的激发源、激发机理和传播路径已被学者广泛研究。南海北部的内波可能源于吕宋海峡中的巴士海峡和巴林塘海峡，也可能源于陆架坡折处的内潮波，甚至可能源于中尺度涡与正压潮波相互作用^[18]。也有学者认为南海内波大部分源于吕宋海峡，少部分由陆架坡局地产生或由吕宋海峡产生的内波向西传播经东沙岛折射后产生^[19-20]。该海域内波在吕宋海峡附近海域由半日潮与海底地形相互作用产生，向西传播进入南海北部，最终耗散于大陆架，传播距离可达上百千米甚至上千千米。遥感器获取的内波图像只是某一时刻的内波位置图像，单景图像不能够描述内波的整个传播过程。光学图像 MODIS 虽然幅宽可达 2 330 km，但易受云雾的遮挡，且内波大部分在太阳耀斑区成像，获取的内波范围受限；SAR 图像虽不受云雾的影响，但其幅宽较小。因此，有效结合 SAR 和光学遥感图像，可以得到南海北部内波的传播特性。

利用 2011 年 5 月 8 日—2011 年 5 月 13 日连续 6 d 的南海北部海域的内波 MODIS 和 ENVISAT ASAR 图像, 获取了南海北部内波的传播过程图, 如图 7 所示。所用数据表列表如表 1。

图 7a 为 2011 年 5 月 8 日—2011 年 5 月 13 日连续 6 d 的 7 景图像的叠加图, 图 7b 为提取的内波波峰线的叠加图, 不同颜色的曲线代表不同时间的内波。从图中可以明显看出内波的传播路径, 该海域内波在吕宋海峡附近海域产生, 向西偏北方向传播进入南海北部。内波在向西传播过程中, 经过东沙环礁发生折射绕过东沙环礁继续向西传播。内波被东沙环礁分成两部分, 由图 7b 可以明显看出内波传播路径被分成两条, 受水深等环境条件的影响, 内波传播速度大小及方向都发生了变化。一部分内波沿路径 P_1 向西偏北方向传播, 一部分内波沿路径 P_2 也向西偏北方向传播, 继续向西传播最终耗散于大陆架。

表 1 Terra/Aqua-MODIS、ENVISAT-ASAR 数据信息

序号	卫星数据	成像时间 (UTC)
1	Terra-MODIS	2011/5/8/ 03: 05
2	Terra-MODIS	2011/5/8 03: 10
3	ENVISAT-ASAR	2011/5/9 02: 29: 18
4	Terra-MODIS	2011/5/10 02: 55
5	Aqua-MODIS	2011/5/11 05: 10
6	ENVISAT-ASAR	2011/5/12 02: 19: 03
7	ENVISAT-ASAR	2011/5/13 14: 25: 10

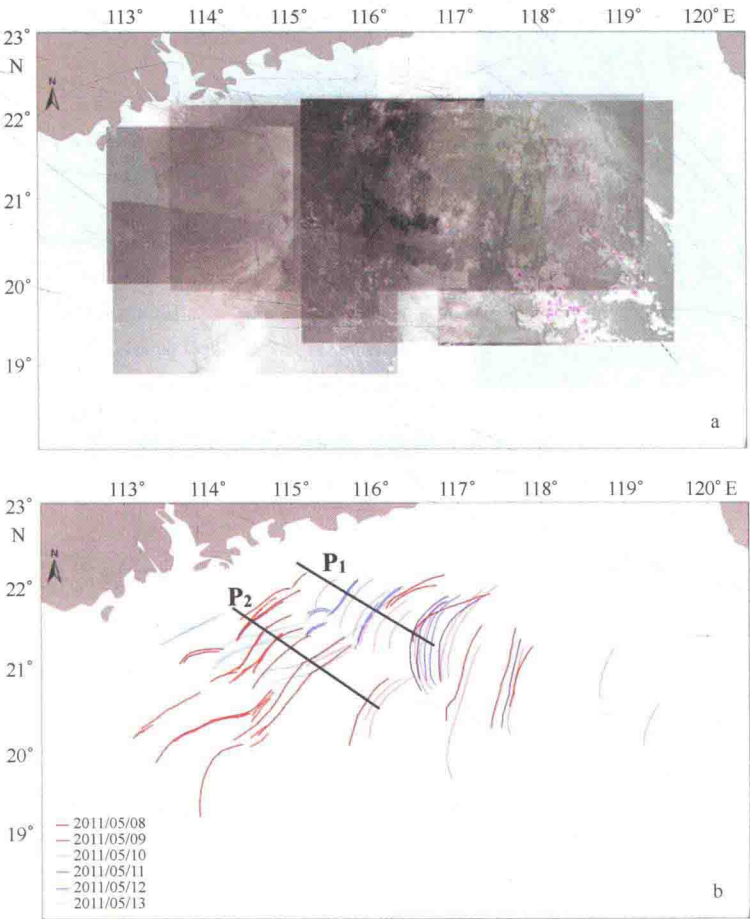


图 7 南海北部内波传播过程图

4.2 内波传播速度

受海洋环境可变性以及海底地形复杂性的影响，内波的传播速度具有可变性。光学和 SAR 有效融合可以获取内波传播速度。采用的光学图像为 MODIS，SAR 图像为 RADARSAT-2，通过同一地点相邻两幅遥感图像捕获同一内波，可由空间位移和时间间隔计算出内孤立波的传播速度。如图 8 所示，MODIS 内波图像的获取时间为 2013 年 5 月 15 日 02: 55 (UTC)，RADARSAT-2 内波图像的获取时间为 2013 年 5 月 15 日 10: 11: 16 (UTC)，两景图像的获取时间间隔为 7 小时 16 分 16 秒。根据 SAR 图像和光学图像中所捕获的内波条纹在图像中的位置，测量得内波的平均距离为 45.25 km，从而可以计算得到内波的传播速度大约为 1.73 m/s。

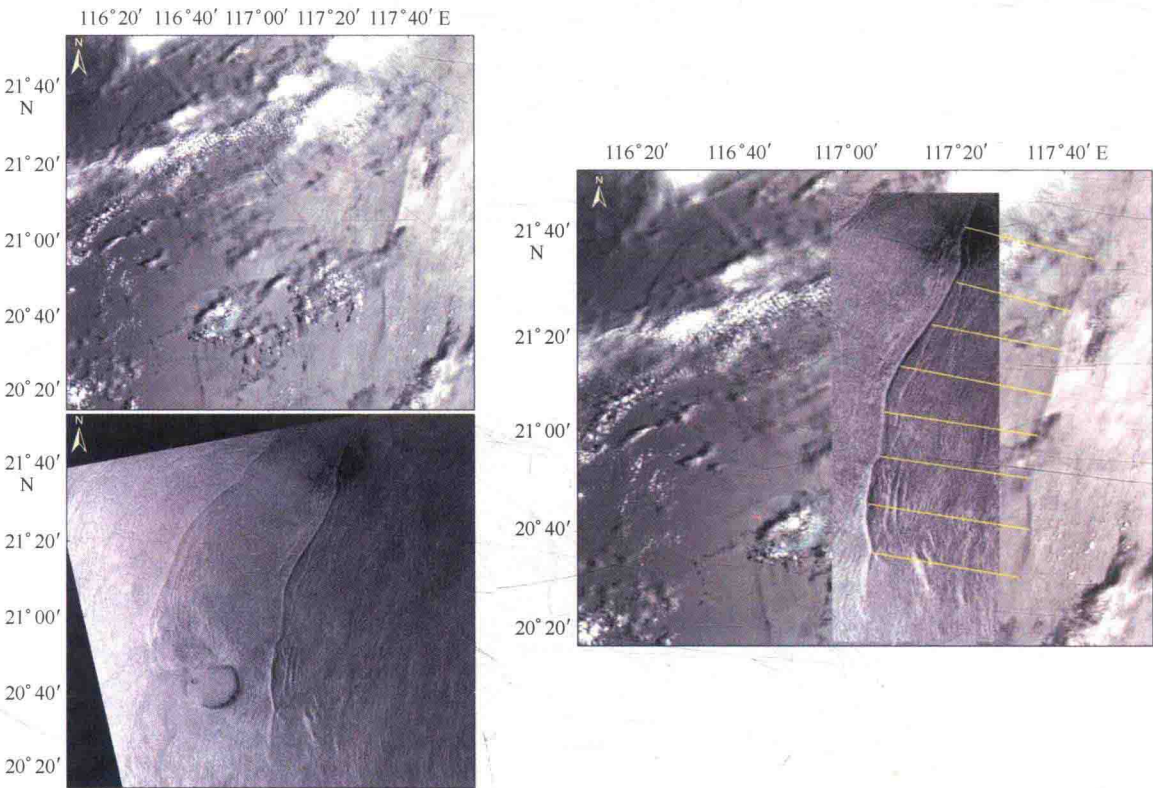


图 8 2013 年 5 月 15 日 02: 55 (UTC) 的内波 MODIS 图像 (左上图) 和 2013 年 5 月 15 日 10: 11: 16 (UTC) 的 RADARSAT-2 内波图像 (左下图); 右图为 SAR 和 MODIS 融合图像

内波传播速度的获取，对于潮汐和地形相互作用产生的内波，根据遥感图像中 2 个或多个波包距离和潮周期可得内波传播速度，但该方法由于时间较长，内波在传播过程中受海底地形及潮流等多种环境的影响，反演误差较大。而内波光学与 SAR 相融合探测内波速度，在较短的时间内，根据两幅图像中的同一条内波传播距离反演的内波速度误差较小，是目前较为精确计算内波传播速度的方法。

5 结论

基于内波在光学遥感图像和 SAR 遥感图像中的不同特征，开展了内波 SAR 与 MODIS 的融合探测。内波在 SAR 图像和光学图像中有共有的特征，都表现为直线或曲线状的亮暗相间的条纹；内波多以波包的形式传播，波包含有一个或多个孤立子，前导波一般最大，往后依次呈现递减趋势。SAR 工作在微波波段，不受云雾的干扰，获取的内波图像较为清晰。在 SAR 图像中，内波表现为两种形式，先亮后暗为上

升型内波,先暗后亮为下降型内波。在 SAR 遥感图像中,下降型内波是比较常见的,因为海水分层的原因为,一般下层海水的深度要大于上层海水的深度。在光学遥感图像中,内波主要在太阳耀斑区成像,对于 MODIS 图像,太阳耀斑区内的内波表现为先暗后亮;太阳非耀斑以外的内波表现为先亮后暗。对于 SAR 图像,虽不受云雾等天气环境的影响,但其幅宽相对较小,时间分辨率较低,获取的数据量有限;而光学图像虽然受云雾等环境的影响,但其空间覆盖范围大,时间分辨率高。因此,将 SAR 与光学融合,结合二者的优势,探测了内波的传播过程。本文利用连续 6 d 的 MODIS 和 ENVISAT ASAR 图像探测了南海北部海域内波传播过程示意图。内波在吕宋海峡产生后向西传播过程中,经过东沙环礁发生折射,绕过东沙环礁继续向西传播。在此过程中,内波被东沙环礁分成两部分,并沿着两条不同的路径传播,受水深等环境条件的影响,内波传播速度大小及方向都发生了变化。一部分内波沿路径 P_1 向西偏北方向传播,一部分内波沿路径 P_2 也向西偏北方向传播,继续向西传播最终耗散于大陆架。同时利用 MODIS 和 RADARSAT-2 内波遥感图像获得了内波的传播速度,大约为 1.73 m/s 。

SAR 和光学图像融合探测内波,空间上, SAR 图像可以弥补光学图像的内波不清晰及被遮挡的情况;时间上,光学图像可以弥补 SAR 图像获取的有限性,二者结合有利于内波的探测与研究。

致谢:感谢 NASA 网站提供的 MODIS 数据;感谢中欧“龙计划”合作项目提供的 ENVISAT ASAR 数据。

参考文献:

- [1] Cummins P F, Cherniawsky J Y, Foreman M G G. North Pacific internal tides and modeling [J]. J. Marine Res., 2001, 59: 167-191.
- [2] Elachi C, Apel J R. Internal wave observations made with an airborne synthetic aperture imaging radar [J]. J. Geophys. Res., 1976, Lett., 3: 647.
- [3] Richez C. Airborne Synthetic Aperture Radar tracking of internal waves in the Strait of Gibraltar [J]. Progress in Oceanography, 1994, 33(2): 93-159.
- [4] Fu L L, Holt B. Seasat Views Oceans and Sea Ice with Synthetic-Aperture Radar [J]. JPL publication, 1982: 81-120.
- [5] Liu A K, Chang Y S, Hsu M K, et al. Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China Seas [J]. J. Geophys. Res., 1998, 103: 7995-8008.
- [6] Small J, Zack H, Gary P, et al. Observations of large amplitude internal waves at the Malin Shelf edge during SESAME 1995 [J]. Contin. Shelf Res., 1999, 19: 1389-1436.
- [7] Zheng Q, Susanto R D, Ho C R, et al. Statistical and dynamical analyses of generation mechanisms of solitary internal waves in the northern South China Sea [J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2007, 112(C3): 83-87.
- [8] Li X, Clemente-Colon P, Friedman K S. Estimating oceanic mixed layer depth from internal wave evolution observed from Radarsat-1 SAR [J]. Johns Hopkins APL Tech. Dig., 2000, 21: 130-135.
- [9] 王晶, 郭凯, 孙美玲, 等. 3 层模型的内波传播方程与参数反演 [J]. 遥感学报, 2015, 19(2): 188-194.
- [10] Zhang X, Wang J, Sun L, et al. Study on the amplitude inversion of internal waves in the Wenchang area of the South China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(7): 14-19.
- [11] Shand J A. Internal waves in Georgia Strait [J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1953, 34(6): 849-856.
- [12] Melsheimer C, Keong K L. Proceeding of the Sun glitter in spot images and the visibility of oceanic [R]. The 22nd Asian conference on remote sensing, Singapore, 2001.
- [13] 谢志宏. 利用 SAR 及 MODIS 卫星影像研究安达曼海非线性内波之发源及演变 [D]. 基隆: 台湾海洋大学, 2004.
- [14] Jackson C R, Apel J R. An Atlas of Internal Solitary-like Waves and their Properties [M]. Alexandria: Global Ocean Associates, 2004.
- [15] Jackson C. Internal wave detection using the Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS) [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(C11): C11012.
- [16] Matthews J P, Aiki H, Masuda S, et al. Monsoon regulation of Lombok Strait internal waves [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012), 2011, 116(C5), doi: 10.1029/2010JC006403.
- [17] da Silva J C B, Majalhaes J M, Gerkema T, et al. Internal Solitary Waves in the Red Sea: An Unfolding Mystery [J]. Oceanography, 2012, 25(2): 96-107.
- [18] 杜涛, 吴巍, 方欣华. 海洋内波的产生与分布 [J]. 海洋科学, 2001, 25(4): 25-28.
- [19] Zhao Z X, Klemas V, Zheng Q A, et al. Estimating parameters of a two-layer stratified ocean from polarity conversion of internal solitary waves ob-

- served in satellite SAR images[J].Remote Sensing of Environment,2004,92(2):276-287.
- [20] Zhao Z X,Klemas V,Zheng Q A,et al.Remote sensing evidence for baroclinic tide origin of internal solitary waves in the northeastern South China Sea[J].Geophysical Research Letters,2004,31:L06302.
- [21] Zhao Z X.A study of nonlinear internal waves in the northeastern South China Sea[D].Newark:University of Delaware,2005.

基于星载微波散射计风场和 NCEP FNL 分析资料的多波数海面混合风场

刘宇昕^{1,2}, 王兆徽^{1,2}, 宋清涛^{1,2}

(1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 2. 国家海洋局空间海洋遥感与应用研究重点实验室, 北京 100081)

摘要: 现有的散射计观测不能同时满足应用在时间和空间分辨率上需求, 需要利用多种风场资料生产混合风场产品来填补数据空白。本文介绍了 NCEP FNL 风场、微波散射计风场, 使用高波数分析法结合散射计资料和模式再分析数据构建混合风场, 分辨率达到 6 h、0.25°。

关键词: 卫星观测; 海面风场; 高波数分析

1 引言

目前, 海面风速可以通过多颗卫星观测, 单个卫星产品可以提供丰富信息的高空间分辨率数据, 但是一颗卫星通常需要 2 d 的时间才能观测全球, 时间分辨率较低。风场的相关产品和研究需要越来越高时间和空间分辨率的风场数据, 一些应用要求时间分辨率和空间分辨率分别达到 6 h 和 50 km。然而以现存的全球卫星以及现场观测, 不能在时间和空间分辨率上同时满足需求。因此需要利用多种风场资料生产混合风场产品来提高风场分辨率。

ASCAT/NCEP 混合风场以 ASCAT 卫星反演风场资料为基础, 在卫星资料空白区补充 ASCAT 风场的月平均高波数信息到 NCEP 背景场数据, 该资料同时具备高空间和时间分辨率 (0.25°×0.25°, 6 h)。HY-2A/NCEP 混合风场与 ASCAT/NCEP 混合风场类似, 空间和时间分辨率同样达到 0.25°×0.25°和 6 h。

风作为波浪的驱动力, 波浪预报的精度在很大程度上依赖于海面风场的计算精度, 因此风场数据在海浪的数值模拟中起着相当关键的作用。利用星载散射计风场数据和数值模式风场数据合成的混合风场, 可以满足要求高分辨数据的海洋中小尺度研究等需求。

2 数据

NCEP FNL 资料是 1°×1°、6 h 间隔的 GDAS (Global Data Assimilation System), 与 the Global Forecast System (GFS) 使用相同的模式, 但是在 GFS 初始化 1 h 以后, 所以包括了更多的观测资料。所以本文选取了 NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, 数据为 1°×1°网格、grib2 格式。

选取的散射计数据包括 ASCAT、HY-2A, 技术指标见表 1。MetOp-A 卫星搭载的微波散射计 ASCAT

表 1 HY-2 和 MetOp-A 的 ASCAT 散射计技术指标

指标	轨道倾角	轨道高度	轨道周期	散射计工作频率	风速测量范围	风速精度	风向精度	刈幅
MetOp-A	98.67°	820 km	101 min	5.3 GHz	4~24 m/s	2 m/s	20°	550 km×2
HY-2A	99.34°	971 km	104.5 min	13.2 GHz	2~24 m/s	2 m/s	20°	优于 1 700 km

基金项目: 近海观测网; 遥感业务化。

作者简介: 刘宇昕 (1987—), 男, 河南省商丘人, 主要从事微波遥感研究。E-mail: liuyuxin@mail.nsoas.org.cn

数据持续时间 2007 年 3 月 28 日至今，分辨率是 25 km。HY-2A 是中国第一颗海洋动力环境监测卫星，数据持续时间是 2011 年发射至今，分辨率是 25 km。6 h $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的 NCEP 数据 持续时间是 1999 年 7 月 30 日至今。

3 构建混合风场

通过对 NCEP 风场进行低通滤波得到低波数 NCEP 背景场，对 ASCAT/HY-2A 散射计风场进行高通滤波得到高波数变化信息，然后将低波数的 NCEP 背景场与高波数变化信息相加得到高波数混合风场。由于 ASCAT/HY-2A 散射计每个时刻 (00UTC、06UTC、12UTC、18UTC) 的风矢量分量 (u 、 v) 通过相同的方法分别处理得到，所以只给出对 ASCAT 散射计 u 分量的处理流程 (图 1，图 2，图 3)。

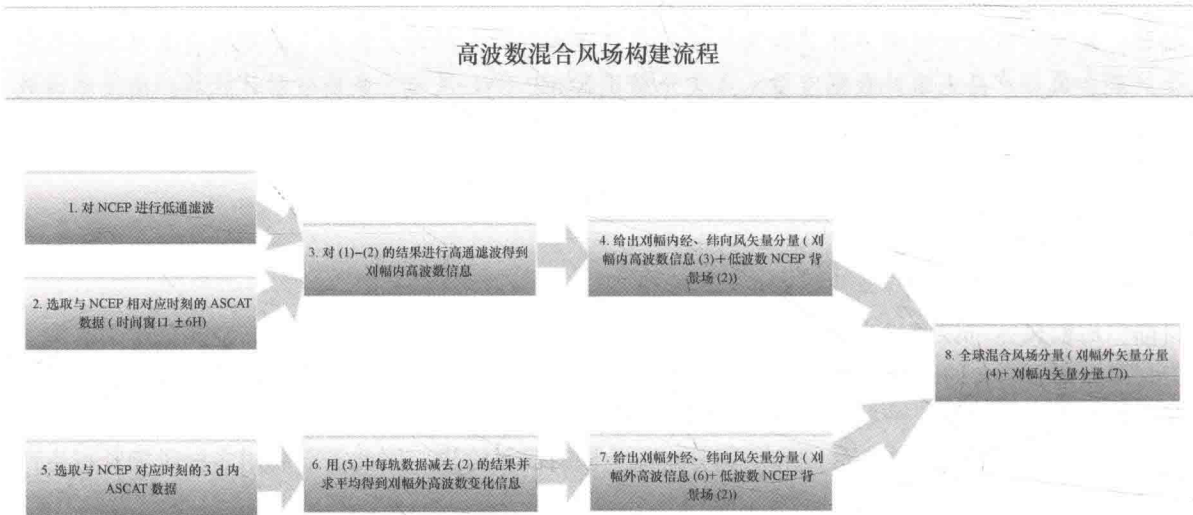


图 1 高波数混合风场流程图

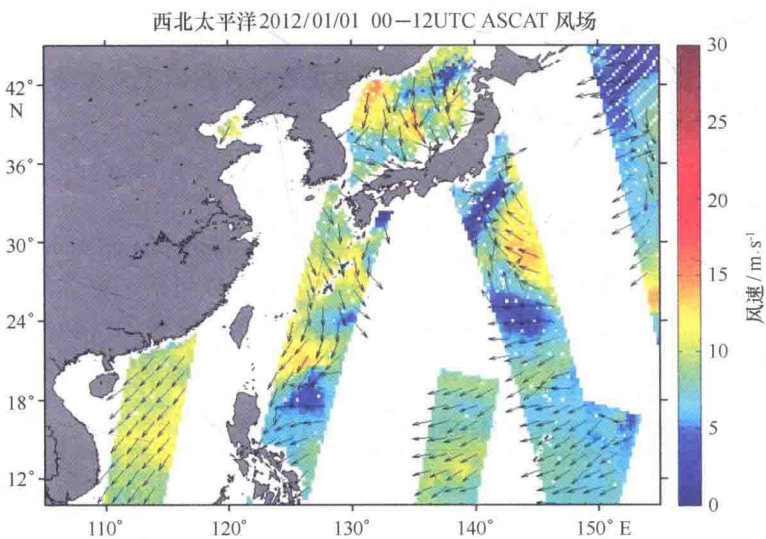


图 2 西北太平洋 ASCAT 12 h 风场

4 结束语

以 ASCAT 风场、HY-2A 风场、ASCAT/NCEP 混合风场为例，从图 2、图 3 与图 4 的对比可以看出，通过构建混合风场提高了风场数据覆盖范围，全球海面风场的时间分辨率达到 6 h，空间分辨率达到