

doi:10.3788/gzxb20174610.1001002

基于高分光学遥感探测东沙岛北部 第二模态内孤立波

梅源¹, 王晶¹, 孙丽娜², 孟俊敏²

(1 中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

(2 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要: 收集高分一号光学遥感图像对南中国海东沙岛北部第二模态内孤立波进行研究, 对 2014 年 4 月至 10 月期间的的光学遥感图像处理. 结果表明: 第二模态内孤立波分布在东沙岛的北部, 在第一模态内孤立波后方; 与第一模态内孤立波相比, 第二模态内孤立波的波峰线短, 长度约为第一模态的 20% 至 40%; 第二模态内孤立波的表面亮暗间距小, 宽度约为第一模态的 10% 至 50%. 高分辨率光学遥感图像可用于第二模态内孤立波精细结构的研究, 为定量研究内孤立波的能量传播、破碎和耗散提供依据.

关键词: 内孤立波; 光学遥感; 第二模态; 波峰线; 亮暗间距

中图分类号: P731.24, P23

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)10-1001002-7

Detection of Mode-2 Internal Solitary Waves in Northern Dongsha Atoll Based on High Resolution Optical Remote Sensing

MEI Yuan¹, WANG Jing¹, SUN Li-na², MENG Jun-min²

(1 College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong 266100, China)

(2 First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao Shandong 266061, China)

Abstract: The GF-1 optical high resolution images have been collected to study mode-2 ISWs of northern Dongsha Atoll in the South China Sea. Based on optical remote sensing images from April to October 2014, mode-2 ISWs spatial distributed in northern Dongsha Atoll, following mode-1 ISWs. Compared with mode-1 ISWs, the crest of mode-2 ISWs was shorter and the length was about 20% to 40% of mode-1. The distance between the positive and negative peaks of mode-2 ISWs was also shorter, the length was about 10% to 50% of mode-1. The fine structure of mode-2 ISWs was investigated by high resolution optical remote sensing images, which offers the references for quantitative study of the energy propagation, fragmentation and dissipation of internal solitary waves.

Key words: Internal solitary waves; Optical remote sensing; Mode-2; Crest line; Peak-to-Peak distance

OCIS Codes: 010.4450; 100.2960; 240.5770; 240.6690; 280.4788; 280.4991

0 引言

海洋内孤立波在密度稳定层化的海水内部会形成垂向位移, 根据不同的层化结构, 垂向运动的形式分为第一模态、第二模态和更高阶模态. 第一模态内孤立波在海洋内部仅存在一个向下的垂向位移, 第二模态内孤立波具有两个反向垂向位移且各有一个极值点, 对凸型第二模态内孤立波而言, 在同一海域第一模态和第二模态内孤立波的光学遥感图像中, 亮暗条纹顺序恰好相反, 本文只研究此种形式的第二模态内孤立波. 常用的卫星光学遥感主要是 MODIS, 其空间分辨率最高为 250 m, 很少观测到第二模态内孤立波. 微波合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 遥感虽然具有全天候、全天时探测能力, 但重访周期较长, 时间分辨

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos 61171161, 61471136) 资助

第一作者: 梅源 (1990-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光学遥感. Email: yuanmei.register@gmail.com

导师 (通讯作者): 王晶 (1962-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为海洋光学与激光探测. Email: wjing@ouc.edu.cn

收稿日期: 2017-04-01; 录用日期: 2017-06-07

<http://www.photon.ac.cn>

率较低,难以获得第二模态内孤立波图像.随着我国高分专项实施,高分一、二和四号等光学遥感卫星的成功发射,实现了高时空分辨率和多光谱的光学遥感探测.其中高分一号卫星位于太阳同步轨道,具备对全球4天重访能力,载有2台2 m 全色、8 m 分辨率多光谱相机和4台16 m 分辨率多光谱相机,通过图像拼接融合技术能够获取第二模态内孤立波的精细结构图像,为深入研究海洋第二模态内孤立波的生成、传递和耗散提供了重要手段.

内孤立波活跃于世界各大洋^[1],南中国海是研究的热点区域,内孤立波广泛分布于吕宋海峡、东沙岛和海南岛以东等.基于多源遥感图像,学者们主要研究了南海第一模态内孤立波的时空分布、生成地和传播路径^[2-7].随着现场探测内孤立波技术的成熟,Yang^[8-10]在 ASIAEX 实验中研究南海北部大陆坡的内孤立波,将测量到的内孤立波细分为四类,首次提出南海的第二模态内孤立波.并根据实测数据,分别计算第二模态内孤立波在夏冬两季的振幅,发现海洋水体三层结构的中层厚度决定了第二模态内孤立波凸凹型.Liu^[11]发现第二模态内孤立波由第一模态内孤立波的破碎、耗散和湍流混合生成,具有半宽度大、持续时间短等特征.Qian^[12]基于潜标观测到南海北部陆架区的一个典型第二模态内孤立波,分析水平流速的垂向结构并计算能量,发现与理论结果吻合良好.Dong^[13]在 SAR 图像上追踪到第二模态内孤立波的传播,分析得出其可能的生成机制包含水深分层变化产生第二模态内孤立波和第一模态与反气旋涡共振激发第二模态内孤立波两种.在现场实测和微波 SAR 遥感探测的同时,第二模态内孤立波的数值模拟和实验室研究也在积极进行.Guo^[14]利用 MITgcm 模型模拟大振幅第二模态内孤立波经陆架向浅水传播的过程,陆坡变陡时,振幅变小,第二模态内孤立波会迅速衰减直至耗散.Carr^[15]在实验室条件下,由重力塌陷法在三层结构下产生第二模态内孤立波波列,调节每一层水体的厚度和密度,研究第二模态内孤立波的水体结构与稳定性之间的关系.这些实测和模拟研究探索了南海第二模态内孤立波的生成和演变机理,为第二模态内孤立波的认知奠定了良好的基础.目前鲜有采用光学遥感手段探测第二模态内孤立波的研究,本文基于高分一号光学遥感卫星探测到的内孤立波图像,利用其16m 高空分辨率的优势,选取东沙岛海域的第一模态和第二模态内孤立波为研究对象,探索第二模态内孤立波在光学遥感上成像特征,并分析其特征参量与第一模态内孤立波的异同,为充分利用我国高分光学遥感数据深入研究海洋动力过程起到示范作用.

1 光学遥感图像特征

1.1 东沙岛北部水文数据

由于内孤立波的生成、传播都与海区地形密切相关,本文研究的南海东北部的的水深地形二维平面和三维立体图如图1.五角星代表露出水面的东沙岛,方框代表第二模态内孤立波多发区域,观测到第二模态内孤立波的区域集中在东沙岛的北部,水深在1200 m至400 m变化.

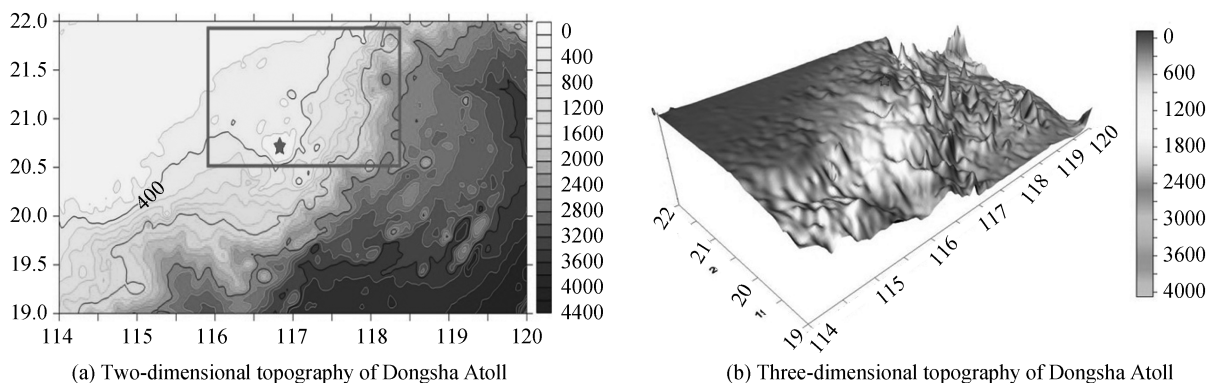


图1 东沙岛研究区域的地形图
Fig.1 The topography of the study area

可以看出研究区域东南至西北,随着大陆坡的爬升,水深不断变浅,东沙岛北部的东侧水深大于西侧水深.通过温度、盐度和密度数据可以分析东沙岛所属经纬度区域的水深分层,如图2.

东沙岛海域垂向温度随水深减小,盐度和密度随水深增加,斜率最大处代表着水深分界的密度跃层,在水深100 m至200 m处有显著的跃层.

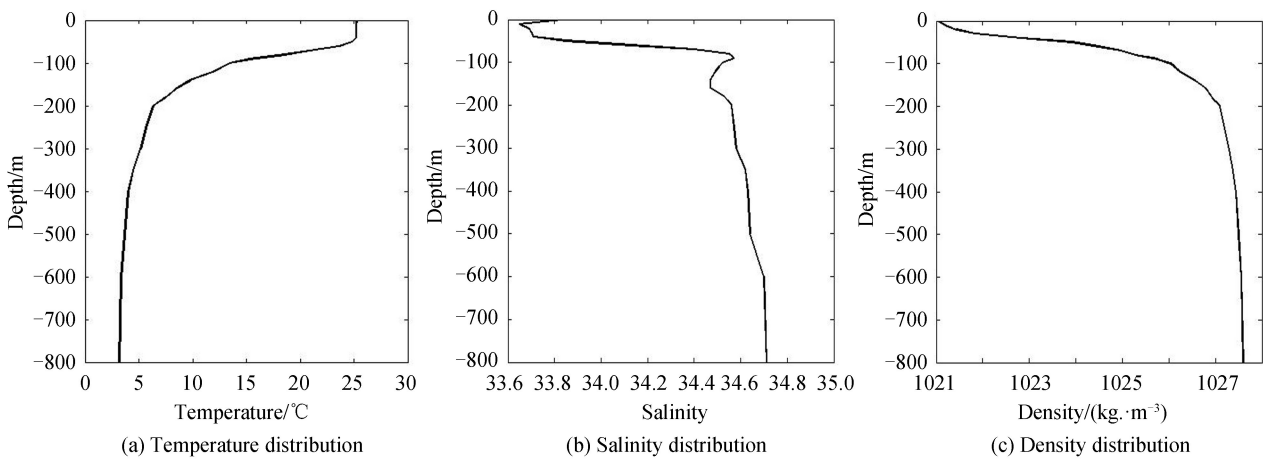


图2 东沙岛研究区域的垂向温度、盐度和密度分布

Fig.2 Temperature, salinity and density distribution in the study area of Dongsha Atoll

1.2 光学遥感图像特征

在本文研究海域,已有现场测量数据证明第二模态内孤立波存在.如2005年6月24日 Yang^[9]在东沙岛北部实测的等温线如图3.

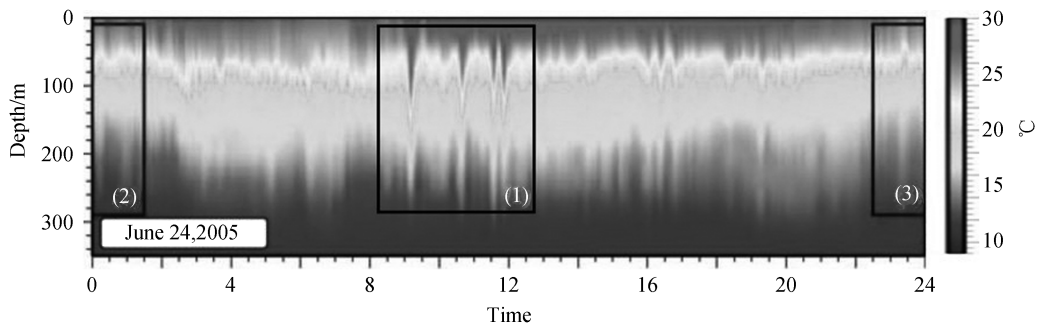


图3 东沙岛北部第一和第二模态内孤立波的等温线

Fig.3 Isotherm of mode-1 and mode-2 ISWs in northern Dongsha Atoll

黑色框(1)中存在向下的垂向位移,为第一模态内孤立波,黑色框(2)和(3)中存在反向的两个垂向位移,为第二模态内孤立波.在实测东沙岛北部第二模态内孤立波的基础上,利用高分光学遥感进一步研究东沙岛北部的第二模态内孤立波的表面图像特征.

内孤立波引起海表面毛细波的辐聚与辐散,在光学遥感图像中呈现亮暗相间的条纹.为了能够实现高分辨率和大幅宽的结合,选取 GF-1 卫星的 16m 分辨率的宽幅相机数据,进行收集和处理,查找南海东沙岛北部的第一和第二模态内孤立波,发现了两种情况的第二模态内孤立波光学遥感图像,如图4.第二模态内孤立波在高分辨率光学遥感图像上的轨迹非常清晰,波峰线长短分明,亮暗顺序也特征显著.

从图4看到第一模态内孤立波呈现暗亮条纹,第二模态内孤立波呈现亮暗条纹.图4(a)中第二模态内孤立波跟随在第一模态内孤立波后方,图4(b)第二模态内孤立波位于第一模态内孤立波的前方,东沙岛北部的第一模态内孤立波在海表面的亮条纹紧跟着暗条纹,其波型属于下降波,第二模态内孤立波则恰好相反,暗条纹紧跟亮条纹.可以看出,第二模态内孤立波的出现通常伴随着第一模态内孤立波的出现,这与陆坡处的实测结果一致^[16].

观测到的 GF-1 光学遥感图像的亮暗条纹顺序不同存在两种假设:一种是第一模态内孤立波传播至东沙岛海域,随着水体的变浅,发生极性转变,下降波型转变为上升波型,导致亮暗条纹顺序相反;另一种是第二模态凸型内孤立波的生成,在光学遥感成像的亮暗条纹顺序与第一模态内孤立波恰好相反.第一模态内孤立波的理论数值模型建立在两层流体的基础上,将海洋理想化为上下两层密度均匀的水体,上层水深度与下层水深度之和构成总水深.由图2水文参数垂向分布图可知,上层水深度小于下层水深度,而第一模态内孤立波的上升波存在于上层厚度大于下层厚度的浅水区域,所以排除水深导致第一模态内孤立波极性反转的可能,确认观测的亮暗条纹是第二模态内孤立波.

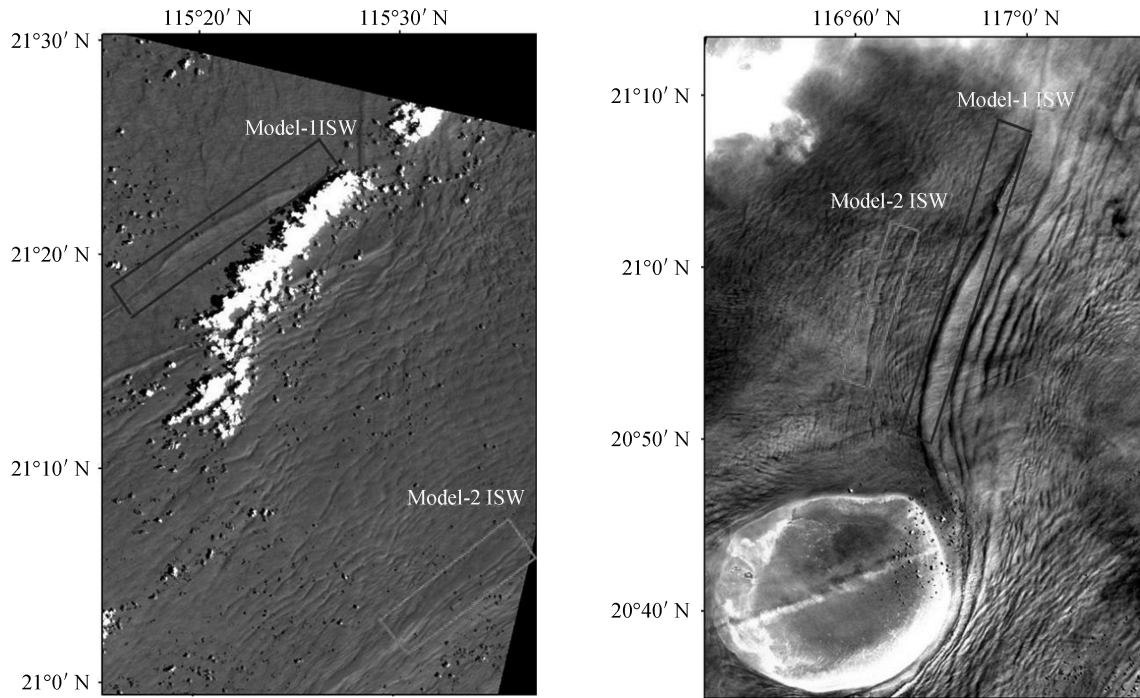


图4 第一和第二模态内孤立波的 GF-1 光学遥感图像
Fig.4 Mode-1 and mode-2 ISWs on GF-1 optical remote sensing images

1.3 成像机理

为了理解内孤立波在光学遥感上的成像,根据遥感图像和水文资料,以图 5 示意.图 5(a)和(b)分别是第一和第二模态内孤立波密度跃层、海表粗糙度和图像信号强度的关系,其中从下到上起伏曲线分布代表垂向位移,海表面辐聚和辐散引起的粗糙度变化,光学遥感图像的接收信号强度.东沙岛北部内孤立波自东向西传播,第一模态下降型内孤立波的上层水平流与传播同向,在峰前形成辐散区,峰后形成辐聚区.辐聚辐散调制海表面毛细波分布,辐聚区的表面粗糙,光学遥感观测呈亮色,辐散区的表面平滑,光学遥感观测呈暗色,所以第一模态下降型内孤立波呈现先暗后亮条纹.第二模态凸型内孤立波的上层水平流与传播反向,辐聚辐散与第一模态下降型内孤立波恰好相反,光学遥感观测呈现先亮后暗条纹.

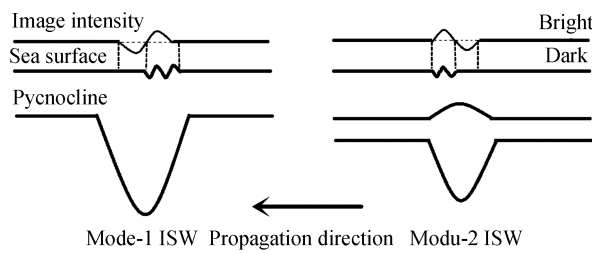


图5 第一和第二模态内孤立波密度跃层、海表粗糙度和图像信号强度的关系示意图
Fig.5 Schematic diagram of pycnocline, sea surface roughness and image signal intensity of mode-1 and mode-2 ISWs

2 图像处理结果与分析

收集 2014 年 4 月至 10 月的 GF-1 数据,用 ENVI 软件查找南中国海东沙岛(20°N~22°N,116°E~118°E)北部的第一和第二模态内孤立波,在无云和少云的图像中筛选出具有清晰内孤立波轨迹的 15 景图像,提取图像波峰线长度和亮暗间距,并进行分析.

2.1 波峰线特征

利用高分辨的 GF-1 光学遥感图像,可以观测到第二模态的精细结构,从 15 景包含第一、二模态内孤立波的光学遥感图像中,测量垂直内孤立波传播方向的波峰线长度,并将第二模态与第一模态内孤立波的波峰线相比,结果见表 1.

表 1 第一和第二模态内孤立波 GF-1 光学遥感图像上的波峰线长度
Table 1 The crest length of mode-1 and mode-2 ISWs on GF-1 optical remote sensing images

Serial number	The crest length of mode-1/km	The crest length of mode-2/km	Ratio	Serial number	The crest length of mode-1/km	The crest length of mode-2/km	Ratio
ISW0729	58.19	10.06	0.17	ISW0803 ²	117.26	34.52	0.29
ISW0516	67.35	25.62	0.38	ISW0815 ¹	164.23	21.75	0.13
ISW0709	108.79	17.76	0.16	ISW0803 ³	121.58	39.59	0.33
ISW0602	70.92	25.52	0.36	ISW0815 ²	158.84	45.27	0.29
ISW0730 ¹	110.91	31.59	0.28	ISW0627	161.59	59.11	0.37
ISW0803 ¹	166.47	57.79	0.35	ISW0701 ²	113.15	26.04	0.23
ISW0701 ¹	153.22	34.93	0.23	ISW0929	68.96	41.81	0.61
ISW0730 ²	87.46	47.34	0.54				

由表 1 可知,在同时存在第一、二模态内孤立波的一张光学遥感图像中,第一模态内孤立波的波峰线清晰明显,波峰线长度较长,最长波峰线可达 166.47 km;而第二模态内孤立波的波峰线不规则,波峰线长度较短,约为第一模态的 20% 至 40%,第二模态内孤立波波峰线长度远小于第一模态内孤立波波峰线长度,且尾随在第一模态内孤立波后方。

2.2 亮暗条纹特征

基于非线性薛定谔方程的振幅反演模型,探究东沙岛北部的大陆坡和大陆架处内孤立波的振幅演变^[17-18],其中表面亮暗间距是研究内孤立波的重要参数。图 6 为 2014 年 8 月 15 日的 GF-1 数据,第二模态内孤立波分布在东沙岛的东北部,从光学遥感图像上能够辨别出与第一模态内孤立波的亮暗顺序相反。

图 6(a)是第一模态内孤立波海表面的暗亮条纹放大图,6(b)是第二模态内孤立波海表面的亮暗条纹放大图。针对 GF-1 光学遥感图像观测到的内孤立波波包的头波波峰线作灰度剖面曲线,如图 7。

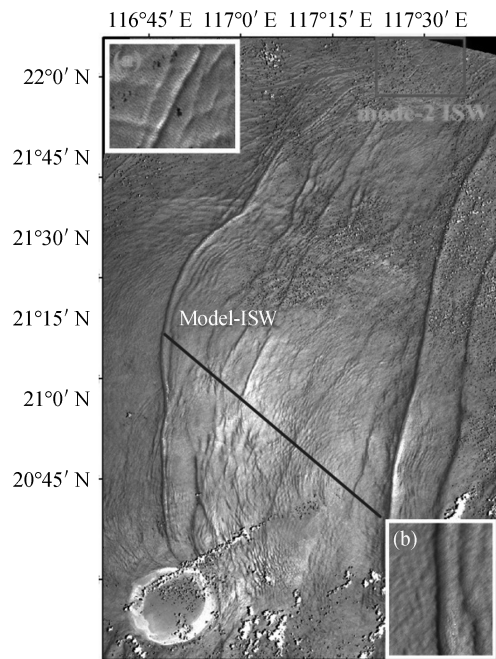
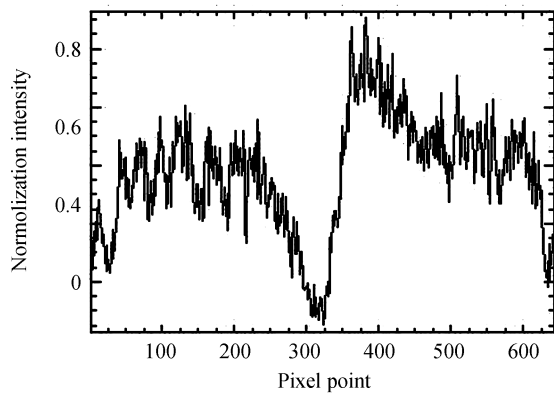
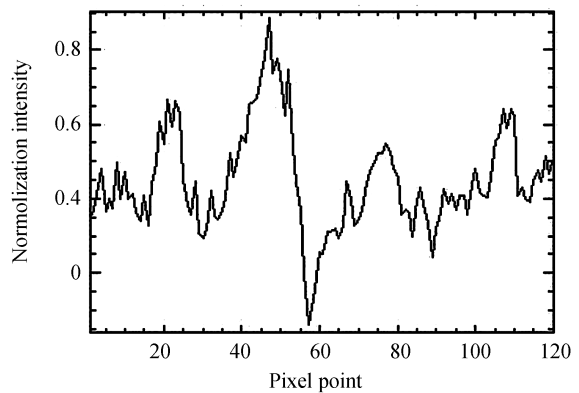


图 6 2014.8.15 第一和第二模态内孤立波 GF-1 光学遥感图像

Fig.6 2014.8.15 mode-1 and mode-2 ISWs on GF-1 optical remote sensing images



(a) Gray level profile curve of mode-1



(b) Gray level profile curve of mode-2

图 7 第一和第二模态内孤立波的灰度剖面曲线

Fig.7 Gray level profile curve of mode-1 and mode-2 ISWs

图 7 中横坐标为图像上的像素点间距,纵坐标为归一化灰度强度。由图 7 可以看出在太阳耀斑区的海表面,第一模态内孤立波先暗后亮,暗亮条纹之间的像素点较密,第二模态内孤立波先亮后暗,亮暗条纹之间的

像素点较疏.将 15 景 GF-1 内孤立波图像提取到的第一和第二模态内孤立波亮暗间距,绘制成表 2.

表 2 第一和第二模态内孤立波 GF-1 光学遥感图像上的亮暗间距

Table 2 The distance between the positive and negative peaks of mode-1 and mode-2 ISWs

Serial number	Peak-to-peak distance of mode-1/m	Peak-to-peak distance of mode-2/m	Ratio	Serial number	Peak-to-peak distance of mode-1/m	Peak-to-peak distance of mode-2/m	Ratio
ISW0729	1 276	496	0.39	ISW0803 ²	792	160	0.20
ISW0516	549	420	0.77	ISW0815 ¹	1 489	236	0.16
ISW0709	373	80	0.21	ISW0803 ³	811	208	0.26
ISW0602	838	256	0.31	ISW0815 ²	1 228	161	0.13
ISW0730 ¹	283	130	0.46	ISW0627	204	45	0.22
ISW0803 ¹	283	213	0.75	ISW0701 ²	568	173	0.30
ISW0701 ¹	307	113	0.37	ISW0929	992	288	0.29
ISW0730 ²	289	234	0.81				

由表 2 可以看出,多数情况下第二模态内孤立波的光学遥感图像亮暗间距小于第一模态内孤立波,第二模态内孤立波的亮暗间距宽度约为第一模态的 10%至 50%.一般来说,因为第二模态内孤立波是内孤立波的高阶模态,所以能量更小,振幅相较第一模态内孤立波更小.

3 结论

基于高分光学遥感探测东沙岛海域的第二模态内孤立波,在东沙岛北部水深显著变浅处,第二模态内孤立波发生的频率较高.通过水深图和温盐数据得出东沙岛研究区域的海底地形和密度跃层深度,验证表明光学遥感观测到是第二模态凸型内孤立波,而非第一模态下降波随水深变浅发生的极性反转,第二模态内孤立波可能是第一模态内孤立波与海底地形相互作用产生的.

收集 2014 年 4 月至 10 月高分光学遥感图像,筛选第一模态内孤立波和第二模态内孤立波共存于一景的 GF-1 光学遥感图像,获取第二模态内孤立波的精细结构,突显了高分辨率和多光谱的高分光学遥感的优势.同时,提取遥感图像上内孤立波的波峰线长度和表面亮暗间距,结果表明相较于第一模态内孤立波,第二模态内孤立波的波峰线较短,长度约为第一模态的 20%至 40%;亮暗间距更小,宽度约为第一模态的 10%至 50%.由于第二模态内孤立波属于内孤立波的高阶模态,能量小于第一模态.

可见随着我国高分项目的推进,高时空分辨率和亚米级的光学遥感探测技术可能成为探测高模态内孤立波的有力手段,为南海内孤立波的研究提供遥感数据.

参考文献

- [1] JACKSON C. Internal wave detection using the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS)[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2007, **112**(C11012): 1-13.
- [2] ALFORD M H, PEACOCK T, MACKINNON J A, *et al.* The formation and fate of internal waves in the South China Sea[J]. *Nature*, 2015, **528**(7580): 65-69.
- [3] CAI Shu-qun, HE Jian-ling, XIE Jie-shuo. Recent decadal progress of the study on internal solitons in the South China Sea[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, **26**(7): 703-710.
蔡树群, 何建玲, 谢皆烁. 近 10 年来南海孤立内孤立波的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2011, **26**(7): 703-710.
- [4] RAMP S R, YANG Y J, REEDER D B, *et al.* Observations of a mode-2 nonlinear internal wave on the northern Heng-Chun Ridge south of Taiwan[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2012, **117**(C3043): 1-11.
- [5] RAMP S R, YANG Y J, REEDER D B, *et al.* The evolution of mode-2 nonlinear internal waves over the northern Heng-Chun Ridge south of Taiwan[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics Discussions*, 2015, **2**(1): 243-296.
- [6] GAN Xi-lin, HUANG Wei-gen, YANG Jin-song, *et al.* The study of spatial and temporal distribution characteristics of internal waves in the South China Sea from multi-satellite data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, **22**(2): 242-245.
甘锡林, 黄韦良, 杨劲松, 等. 利用多源遥感卫星数据研究南海内孤立波的时空分布特征[J]. *遥感技术与应用*, 2007, **22**(2): 242-245.
- [7] ZHANG Xu-dong, WANG Jing, WEI Zi-zhang, *et al.* Detection of internal solitary wave in the South China Sea using optical remote sensing [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2015, **52**(4): 224-228.
张旭东, 王晶, 魏子章, 等. 利用光学遥感探测南海内孤立波[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, **52**(4): 224-228.

- [8] YANG Y J, TANG T Y, CHANG M H, *et al.* Solitons northeast of Tung-Sha Island during the ASIAEX pilot studies [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, **29**(4): 1182-1199.
- [9] YANG Y J, FANG Y C, CHANG M H, *et al.* Observations of second baroclinic mode internal solitary waves on the continental slope of the northern South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2009, **114**(C10): 637-644.
- [10] YANG Y J, FANG Y C, TANG T Y, *et al.* Convex and concave types of second baroclinic mode internal solitary waves [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2010, **17**(6): 605-614.
- [11] LIU A K, SU F C, HSU M K, *et al.* Generation and evolution of mode-two internal waves in the South China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, **59**(59): 18-27.
- [12] QIAN Hong-bao, HUANG Xiao-dong, TIAN Ji-wei. Observational study of one prototypical mode-2 internal solitary waves in the northern South China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, **38**(9): 13-20.
钱洪宝,黄晓冬,田纪伟. 一个典型南海北部第二模态内孤立波的观测分析[J]. *海洋学报*, 2016, **38**(9):13-20.
- [13] DONG Di, YANG Xiao-feng, LI Xiao-feng, *et al.* SAR Observation of eddy-induced mode-2 internal solitary waves in the South China Sea[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, **54**(11): 6674-6686.
- [14] GUO Chun-cheng, CHEN Xue-en. Numerical investigation of large amplitude second mode internal solitary waves over a slope-shelf topography[J]. *Ocean Modelling*, 2012, **42**(1): 80-91.
- [15] CARR M, DAVIES P A, HOEBERS R P. Experiments on the structure and stability of mode-2 internal solitary-like waves propagating on an offset pycnocline[J]. *Physics of Fluids*, 2015, **27**(046602): 1-19.
- [16] SHROYER E L, MOUM J N, NASH J D. Mode 2 waves on the continental shelf: Ephemeral components of the nonlinear internal wavefield[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2010, **115**(C7): 419-428.
- [17] SONG Shi-yan, WANG Jing, WANG Jian-bu. Numerical simulation of internal waves propagation in deep sea by nonlinear Schrodinger equation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **39**(9): 818-823.
宋诗艳,王晶,王建步,等. 应用非线性薛定谔方程模拟深海内孤立波的传播[J]. *物理学报*, 2010, **59**(9):6339-6344.
- [18] ZHANG Xu-dong, WANG Jing, SUN Li-na, *et al.* Study on the amplitude inversion of internal waves at Wenchang area of the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, **35**(7): 14-19.