

基于 X 波段雷达获取东沙群岛附近内波的传播速度

吕海滨^{1,2}, 何宜军³, 申 辉²

(1. 淮海工学院 测绘工程学院, 江苏 连云港 222005; 2. 中国科学院 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 南京信息工程大学 海洋科学学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 根据 2009 年 6 月 24 日 15 时 40 分至 25 日 16 时 40 分“科学一号”考察船在东沙岛东北部陆架上 K106 站进行的长达 25 h 的 X 波段雷达、温度链、声学多普勒流速剖面仪(ADCP)同步观测数据, 在该海域利用 Radon 变换技术获取了本次观测到的内孤立波的传播速度。利用该孤立波到达前 30 min 的 ADCP 流速值, 计算得到内波传播方向上的背景流流速为 0.04 m/s。最终得出该孤立波的传播速度为 3.04 m/s, 传播方向约为 297°。基于同样的处理方法, 求解了本航次中获取的南海东北部陆架处其他站点部分内波的波速信息。南海东北部陆架处内波, 主要向西或西北方向传播。本研究对增进东沙群岛附近内孤立波传播特征的认识, 具有重要意义。

关键词: X 波段雷达; 内波; Radon 变换

中图分类号: P 71

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2012)11-0098-05

海洋内波是很重要的一种海洋中尺度现象, 在层化海洋中的陆架上被频繁地发现。海洋学家一直以来大多用卫星影像来研究海洋内波。许多不同的卫星影像被用来研究南海的非线性内波的空间分布特征^[1-3]。东沙群岛附近的大振幅非线性内波可能是从吕宋海峡传来。此外, 大振幅非线性内波可以损害水下油气钻井平台^[4]。对于东沙群岛附近非线性内波的传播速度, Bole 等^[5]发现在东沙群岛附近内波传播速度介于 0.5~1.5 m/s 之间, 有时最大超过 3 m/s; Ramp 等^[6]发现在南海东北部大振幅非线性内波向西传播的波速达到 3 m/s; 甘锡林等^[7]处理了多种遥感影像得出东沙群岛附近内波的传播速度介于 1.5~2 m/s 之间; Cai 等^[8]在同一东沙群岛海区观测得到内孤立波的相速度 1.36 m/s, 得到的传播角度 290°。由于大振幅孤立波具有很大的破坏性, 所以研究东沙群岛附近大振幅内波的特性是有必要的。Ramos 等^[9]证明利用 X 波段雷达研究内波参数比卫星遥感更有优势。本文的工作就是在东沙群岛附近, 利用 Radon 变换技术对 X 波段雷达影像进行处理, 获取东沙群岛附近内波的传播速度等信息。

1 数据获取

由中国科学院知识创新工程重大项目组织进行的海上考察第二航次历时 29 d, 其中从 2009 年 6 月 24 日 15 时 40 分到 25 日 16 时 40 分对东沙群岛的东

北部陆架上 K106 站(117°37.6198'E, 21°02.2990'N)进行了连续观测, 水深 697 m(图 1)。本航次利用船载 X 波段雷达对海表回波信息进行观测记录, 雷达工作频率 9.4 GHz, HH 极化。‘科学一号’考察船利用 GPS 进行定位, 同时利用 SBE 911plus CTD 和温度链来监测温盐信息, 温度链长 240 m, CTD 每 4 h 采样一次。此次监测中, 成功地测到一个振幅大于 100 m 的孤立内波, 如图 2 中线框所示。下面主要对该孤立波利用 Radon 变换技术求取其波速, 然后利用同样的方法求取了本航次其他部分站点(图 1)测到的部分内波波速信息。

2 图像处理

X 波段船载雷达能监测后向散射强度, 该后向散射强度与海面粗糙度有关。图 3a~b 显示了大尺度缓慢移动的内波信息。在现场 25 h 连续观测中, ‘科学一号’随着海流漂移。船的位置附近有个大的亮环, 由于船的位置在缓慢地漂移, 为了进行有效的对比

收稿日期: 2012-03-11; 修回日期: 2012-08-28

基金项目: 中国科学院海洋环流与波动重点实验室开放基金课题(KLOCW1205); 江苏高校优势学科海洋科学与技术建设工程专项资助; 江苏省科技支撑计划(工业)项目(BE2010125); 国家海洋公益专项(201105004); 淮海工学院引进人才基金资助(KQ12002)

作者简介: 吕海滨(1979-), 男, 山东烟台人, 讲师, 博士, 主要从事海洋内波遥感与海洋数值模拟研究, 电话: 13861427903, E-mail: kjxlhb@126.com

分析,把两幅影像经过坐标变换,放在同一个坐标系。

2.1 图像增强处理

该过程包括一次小波分解,然后进行小波逆变换,目的是尽量滤除海表杂波信息。然后利用 Radon 变换从后向散射强度影像中提取内波参数信息。

2.2 Radon 变换

在二维图像平面, Radon 变换就是计算图像函数 $f(x,y)$ 在同一个平面上,沿指定角度射线方向上投影的变换方法。Radon 变换可在任意维空间定义,而且定义也存在多种形式,下面给出在 2D 空间的定义式:

$$f(\rho, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x,y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \quad (1)$$

式中, $g(x,y)$ 代表在 (x,y) 处的影像灰度; δ 是狄拉克函数; ρ 是坐标原点到直线的垂直距离; θ 是垂

线与 x 轴的夹角。

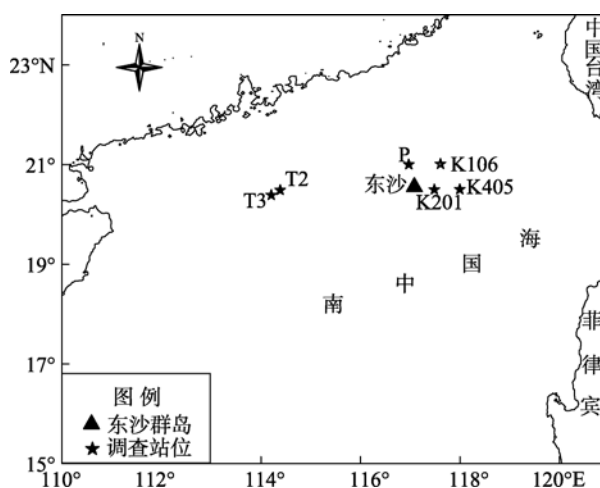


图 1 南海东沙附近部分测站

Fig. 1 The sampling sites around the Dongsha Islands of the South China Sea

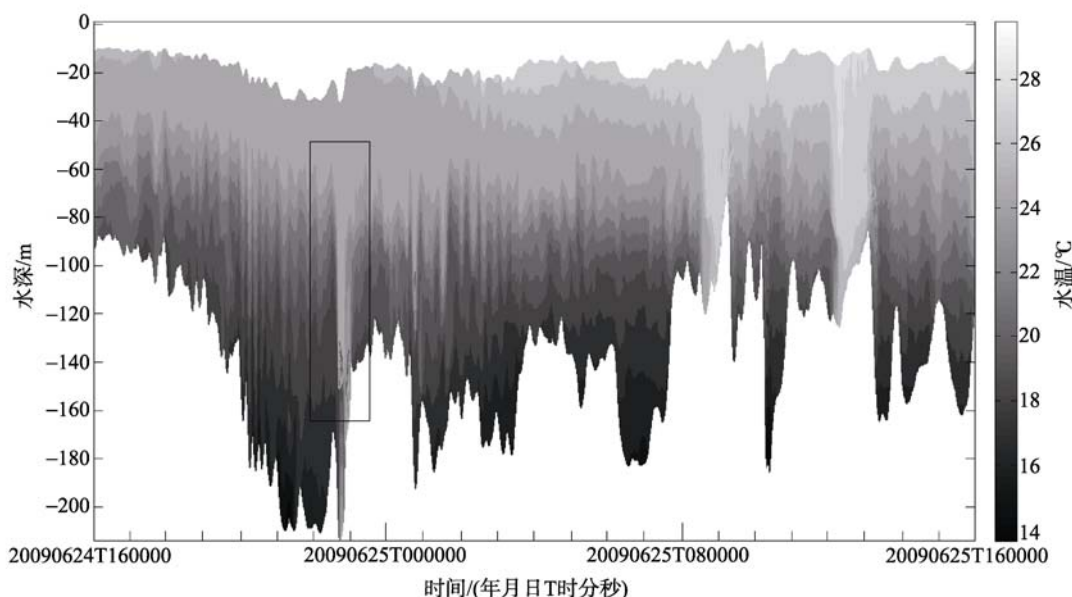


图 2 温度链 25 h 连续监测的温度数据

Fig. 2 The internal soliton wave was recorded by the rmistor chains during in-situ measurement for 25 hours
线框标记本文所研究的孤立内波
marked by a line box at left

3 孤立波传播速度和传播方向

经过 Radon 变换,图 3a,b 雷达影像的 Radon 空间分布分别对应图 4a,b,表 1 列出了孤立波距离原点的距离 ρ 和角度 θ ,在该孤立波传播过程中,传播方向基本保持一致。因此,可以计算该孤立波的传播速度,它在 1 670 s 里传播了 5 137 m,其速度为 $C_0 = 5137/1670 = 3.08$ m/s。因为孤立波传播速度受背景流影响,所

以,应该把背景流速从 C_0 中减去。Yang 等^[10]取内孤立波到达前的 30 min 内的平均流定义为背景流,Shroyer 等^[11]取内孤立波到达前的 15 min 内的平均流定义为背景流。我们把该孤立波到达之前的 30 min 里声学多普勒流速剖面仪(ADCP)所测流的平均值作为背景流,其等于 0.04 m/s。所以该孤立波的传播速度 $C = 3.08 - 0.04 = 3.04$ m/s。由于 Radon 变换存在 180° 模糊,结合东沙群岛附近孤立波向西北陆架传播的监测事实,其传

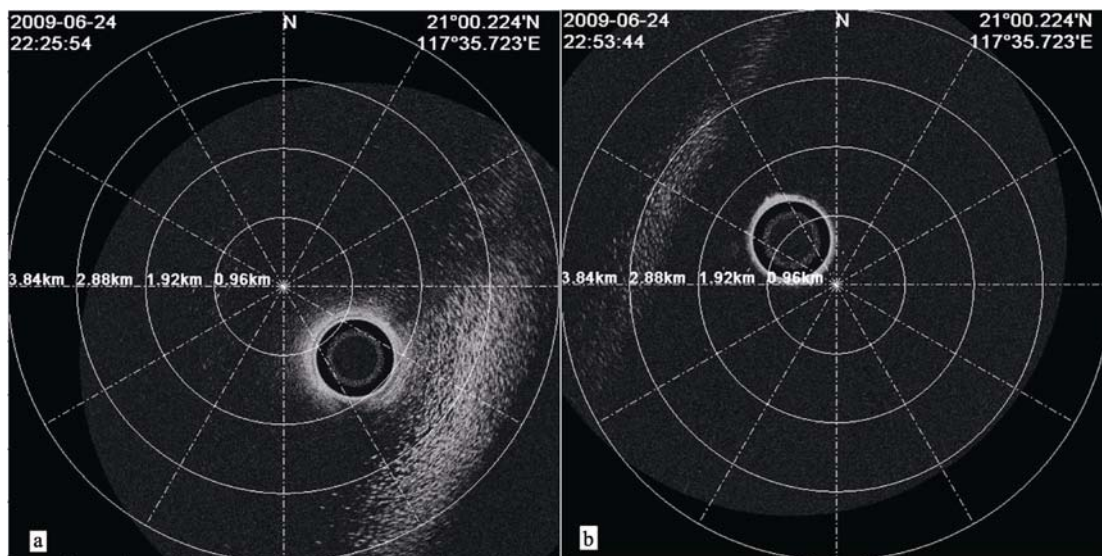


图3 “科学一号”调查船上 X 波段雷达获取的 2009 年 6 月 24 日后向散射影像图
Fig. 3 Backscatter power image recorded on board R/V Science 1 on 24 June 2009

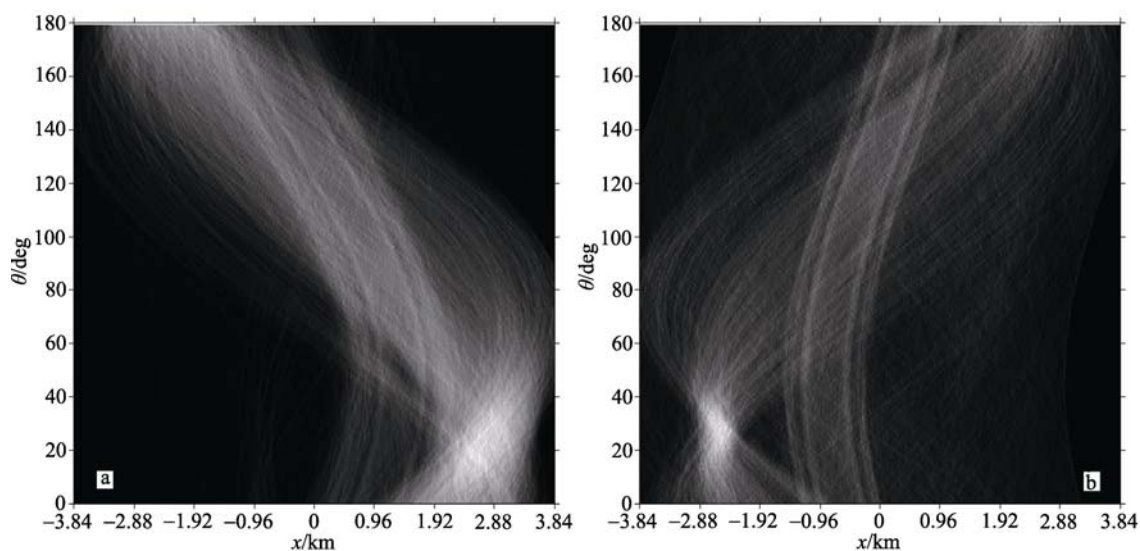


图4 Radon 空间里后向散射强度图
Fig. 4 Backscatter power image in normalized Radon space

表 1 孤立波相对坐标原点的 ρ 和 θ
Tab. 1 Distance (ρ) and angle (θ) from the internal soliton wave to origin of the coordinate

图序	ρ	θ
图 4a	2452	26
图 4b	-2685	27

播方向为 $270^\circ + 27^\circ = 297^\circ$ 。

4 其他站点内波的波速

本航次历时 29 d, 期间 X 波段雷达测到大量内

波信息, 大部分出现在陆架陆坡处。前面已经基于 Radon 变换技术讨论了 K106 站在 6 月 24 日测到的振幅超过 100 m 的孤立子的波速, 下面基于同样的处理方法, 求解了本航次中获取的其他站点(图 1)部分内波的波速信息, 具体见表 2。

由表 2 可见, 南海东北部陆架处内波, 主要西北方向传播。传播速度大小与地理空间分布没有必然联系。由于没有同步的温度链获取水下内波的传播信息, 这里仅仅通过 X 波段雷达获取的表面回波信息, 求取了部分站点测到的内波的波速。

表 2 基于 X 波段雷达获取部分站点的内波波速

Tab. 2 Internal wave velocity at some sampling sites by X-band radar

站点	时间 (年月日 T 时分秒)	经度	纬度	波速 (m/s)	波向 (°)	水深 (m)
T2	20090616T060718	114°23.158' E	20°29.013' N	1.63	325	109.7
	20090616T061317	114°23.162' E	20°28.99' N			
T3	20090616T130351	114°12.42' E	20°23.082' N	1.91	317	111.9
	20090616T131100	114°12.252' E	20°23.018' N			
K405	20090623T123018	117°59.903' E	20°29.957' N	0.62	260	366
	20090623T123143	117°59.925' E	20°29.964' N			
K201	20090623T235720	117°29.142' E	20°29.752' N	2.21	283	1444
	20090624T000054	117°29.037' E	20°29.819' N			
P	20090628T090853	116°58.262' E	21°0.05' N	0.22	279	无
	20090628T091144	116°58.825' E	21°0.147' N			

5 结论

东沙群岛附近大振幅非线性内波对海上石油平台破坏性很大, 本文主要研究了东沙群岛附近振幅大于 100 m 孤立子内波, 利用 2009 年 6 月 24 日获取的船载 X 波段雷达影像, 在该海域利用 Radon 变换技术获取了大振幅内孤立波传播速度。利用该孤立波到达前 30 min 的 ADCP 流速值, 计算内波传播方向上的背景流流速为 0.04 m/s。最终得出该孤立波的传播速度为 3.04 m/s, 传播方向约为 297°。基于同样的处理方法, 求解了本航次中获取的南海东北部陆架处其他站点部分内波的波速信息, 南海东北部陆架处内波, 主要向西北方向传播。

参考文献:

- [1] Hsu M K, Liu A K. Nonlinear internal waves in the South China Sea [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2000, 26(2): 72-81.
- [2] Zheng Quan-an, 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): 1-16.
- [3] Du Tao, Tseng Y H, Yan X H. Impacts of tidal currents and Kuroshio intrusion on the generation of nonlinear internal waves in Luzon Strait [J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2008, 113(C8): 1-15.
- [4] Hyder P, Jeans D R G, Cauquil E, et al. Observations and predictability of internal solitons in the northern Andaman Sea [J]. Applied Ocean Research, 2005, 27(1): 1-11.
- [5] Bole J B, Ebbesmeyer C C, Romea R D. Soliton currents in the South China Sea: measurements and theoretical modeling[C]//Offshore Technology Conference. 1994 Offshore Technology Conference. Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 1994:367-376.
- [6] Ramp S R, Tang T Y, Duda T F, et al. Internal solitons in the northeastern South China Sea - Part I: Sources and deep water propagation [J]. Ieee Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(4): 1157-1181.
- [7] 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波的时空分布特征[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(2): 341-345.
- [8] Cai Shuqun, Gan Zijun, Long Xiaomin. Some characteristics and evolution of the internal soliton in the northern South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(1): 21-26.
- [9] Ramos R J, Lund B, Graber H C. Determination of internal wave properties from X-Band radar observations [J]. Ocean Engineering, 2009, 36(14): 1039-1047.
- [10] 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: 1-15.
- [11] Shroyer E, Moum J, Nash J. Observations of polarity reversal in shoaling nonlinear internal waves[J]. Journal of Physical Oceanography, 2009, 39(3): 691-701.

Velocity of the internal waves around the Dongsha Islands calculated based on X-band radar

LÜ Hai-bin^{1,2}, HE Yi-jun³, SHEN Hui²

(1. School of Geodesy & Geomatics Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China; 2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Received: Mar., 11, 2012

Key words: X-band radar; internal waves; Radon transform

Abstract: One day's continuous observation from 15:40 on June 24 to 16:40 on June 25, 2009 was made from the R/V *Science I* anchored at position K106 in the vicinity of the continental slope northeast of the Dongsha Islands. The onboard X-band radar, thermistor chains and Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) were obtained during this in situ observation. In this paper, the Radon transform is firstly used to obtain the velocity of the internal soliton wave (ISW) around the Dongsha Islands. According to the current velocity from ADCP during thirty minutes ahead of the arriving of the ISW, the background current speed is calculated as 0.04 m/s in the propagating direction of the ISW. The speed of the ISW is confirmed to be 3.04 m/s, and its propagating direction is about 297 degree. The velocity of internal waves at other sampling sites on the northern continental shelf of the South China Sea (SCS) is obtained through the same upside processing method. The internal waves on the northeast continental shelf of SCS translate western or northwestern. This research has provided very important information on internal solitary wave propagation characteristics near the Dongsha Islands.

(本文编辑: 刘珊珊)