

地转及均匀背景流场对混合层深度 SAR 遥感反演的影响

范聪慧^{1,2}, 宋金宝¹

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:以考虑了地转和均匀背景流场影响的两层流体界面内波频散关系模型为基础, 得到新的利用 SAR 遥感图像计算混合层深度的方法。利用该方法对一幅南海北部 SAR 内波图像进行了实例研究, 并且和时空同步的 CTD 资料进行了对比。结果表明, 加入地转和均匀背景流场影响的模型更为合理, 为更准确地反演混合层深度奠定了基础。

关键词: 孤立内波; SAR 遥感; 混合层深度; 地转; 背景流场

中图分类号: P731.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2007)04-0073-04

海洋上混合层的动力学过程支配着大气与海洋之间的能量、动量、热量及物质的交换, 其季节变化控制着与主温跃层间的热量交换。混合层的动力特性同样影响着海洋中的生物、化学过程, 因为几乎所有的生物活动都发生在上层海洋。同时, 上层海洋动力学直接控制着海表温度变化, 进一步影响着海洋向大气的热、水、气的通量输运, 因此, 海洋上混合层深度及其它上层混合参数的确定对人们了解上层海洋混合、海气相互作用具有重要的科学意义和实用价值。

近年来, 由于人们利用 SAR 拍摄到了很多清晰的内波观测图像, 这使得海洋上混合层深度反演的研究工作翻开了崭新的一页, Porter 和 Thompson^[1] 以及 Li 等^[2] 利用关于内波产生的半日潮假定和内波的弥散关系, 从 SAR 内波图像中计算了内波波速和深度, 与实测结果较为接近。Liu 和 Hsu^[3-5] 对我国内波多发海域进行了大量研究。杨劲松^[6-9] 以及范植松等^[10] 也进行了大量有关 SAR 图像仿真和参数反演工作。

然而以往在反演混合层深度时一直忽略地转以及背景流场的影响, 作者旨在加入这两方面的影响, 提出更为严谨的利用 SAR 图像计算混合层深度的方法。

1 两层流体界面内波的频散关系

(1) 刚盖近似下界面波频散关系为^[11]:

$$\omega^2 = \frac{(\rho_2 - \rho_1) g k}{\rho_2 \coth(k h_2) + \rho_1 \coth(k h_1)} \quad (1)$$

其中, h_1 和 h_2 分别是上、下两层海水的深度, ρ_1 和 ρ_2 分别为上、下两层海水的密度, k 为内波波数, ω 为内波频率。

(2) 考虑地转影响时的界面波频散关系^[12]:

$$\omega^2 = \frac{g m (\rho_2 - \rho_1) \sinh m h_1 \sinh m h_2}{\rho_1 \cosh m h_1 \sinh m h_2 + \rho_2 \cosh m h_2 \sinh m h_1} \quad (2)$$

其中: $m = \frac{k}{2 - f^2}$, $f = 2 \sin \phi$, ϕ 为地球自转角速度, ϕ 为纬度。

(3) 均匀背景流条件下界面波频散关系^[13]为:

$$\omega^2 (\rho_2 - U_1 k)^2 \coth(k h_1) + \omega^2 (\rho_1 - U_2 k)^2 \coth(k h_2) = (\rho_2 - \rho_1) g k \quad (3)$$

其中 U_1 和 U_2 分别是上、下两层流体运动的均匀流速。频散关系 (1) 和 (2) 的比较见图 1。

由图 1 可知, 加入地转的频散关系 (2) 与采用刚盖近似的频散关系 (1) 在频率小于 10^{-3} 时有非常明显

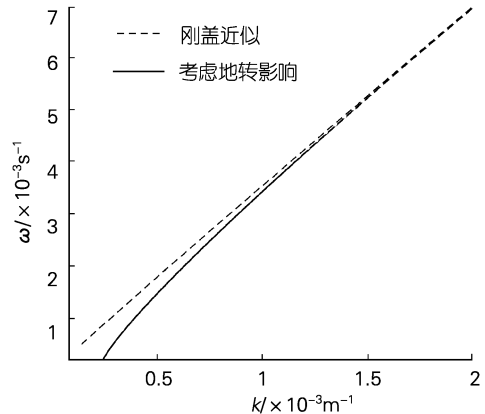


图 1 频散关系比较图

Fig. 1 Comparison of dispersion relations

收稿日期: 2006-11-18; 修回日期: 2007-01-19

基金项目: 中国科学院知识创新项目 (KZCX3-SW-222)

作者简介: 范聪慧 (1980-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生, 从事物理海洋学研究, 电话: 0532-82898907, E-mail: fanconghui@gmail.com

的区别,而内波发生的频率又在此频率段之内,即内波频率在惯性频率和 Brunt-Väisälä 频率之间^[14]。惯性频率也称之为科氏频率,按照传统近似,我们只考虑地转的铅直分量,计算方法为: $f = 2 \sin \phi$, 为地球自转角速度,约等于 $(2 / 24) \text{ h}$, 它的数量级在 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 内。Brunt-Väisälä 频率或浮力频率为流体密度层化时,质点由于浮力而产生垂直振荡的频率,它是海洋动力学中表征分层流动的重要参量,计算方法为: $N = \left[-\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \right]^{1/2}$, 一般来说,在大洋季节性温跃层中 N 的最大值是 10^{-2} s^{-1} ^[15], 因此可以得出内波的频率数量级大致在 $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 内,而对由半日潮或者全日潮生成的内波,周期为 12 ~ 24 h, 频率约为 10^{-4} s^{-1} , 基本上全都在这个有明显区别的区域,因此使用两层流体模型研究内波时,不应该忽略科氏力的影响。

2 混合层深度的计算方法

图 2 为 SAR 遥感反演混合层深度的流程图,通常混合层深度的计算方法^[9]为:

$$h_1 = \frac{g h \pm (g^2 h^2 - 4g h C_g^2)^{1/2}}{2g} \quad (4)$$

其中约化重力加速度 $g = g / \rho$, 内孤立波波包的传播速度 $C_g = g / T$, h 为海水的总深度, ρ_1, ρ_2 为上下两层的海水密度差, ρ 为海水的平均密度, g 为重力加速度, L_1, L_2 为同一波源生成的两个内孤立波波包的前导波之间的距离,式中 ρ_1, ρ_2 可由 Levitus 等月平均温盐资料插值,然后根据海水状态方程 EOS80 计算确定。而 L_1, L_2 可由 SAR 图像上直接测量出 2 个内孤立波波包的前导波之间的距离得到, T 根据内波产生的半日潮假定得到,故而可以得到混合层深度 h_1 , 此方法和从公式 (1) 计算得到的混合层深度 h_1 完全相同,因

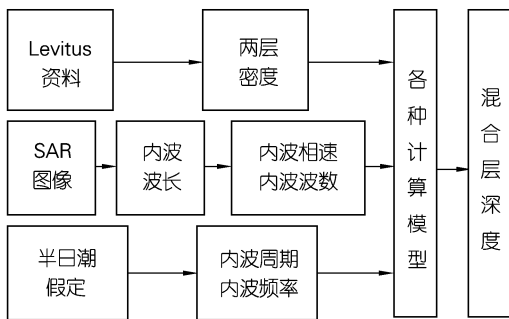


图 2 混合层深度反演流程图

Fig. 2 The flowchart of mixed-layer depth retrieved from SAR image

此可以认为传统方法是以刚盖近似下界面波的频散关系为基础而建立的,而公式 (2) 和 (3) 得到的结果与传统的 (4) 区别较大,所以作者新的方法主要依据的频散关系为公式 (2) 和 (3), 即加入了地转和均匀背景流场影响时的界面波的频散关系,由公式 (2) 和 (4) 求混合层深度的不同之处是考虑了科氏力参量 $f = 2 \sin \phi$, 它可由所测点的纬度和地转角速度而得到,类似的,在已知上下两层的均匀背景流 U_1, U_2 后,可依据公式 (3) 算出混合层深度。

3 实例研究验证

在 $19^\circ \sim 23^\circ \text{ N}$, $116^\circ \sim 120^\circ \text{ E}$ 区域内,作者收集到数个 CTD 实测资料,以及一幅时空同步的 SAR 遥感图像资料。研究区域见图 3。图 3 上中心点表示 SAR 图像的拍摄中心, SAR1 到 SAR4 点分别表示 SAR 图像拍摄时的左上、右上、左下、右下角 4 个边界角点,CTDzd4 则表示收集到的 CTD 所在的位置,此处水深为 443 m。CTD 测量时间为 2002 年 5 月 30 日 10:45:31, SAR 图像是由加拿大的 Radarsat-1 卫星拍摄于 2002 年 5 月 30 日 10:15:09, 图像的拍摄中心为 $20^\circ 43' \text{ N}$, $118^\circ 11' \text{ E}$ 。

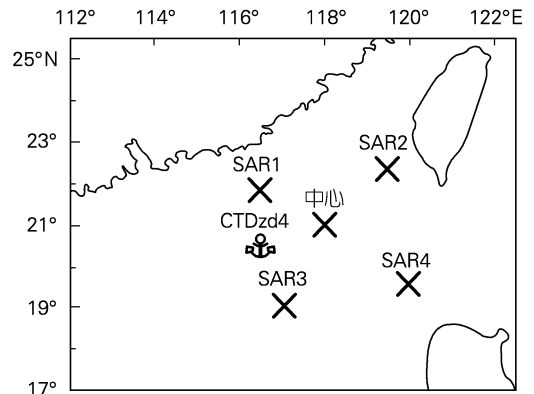


图 3 研究区域

Fig. 3 The map of the area under investigation

将得到的 SAR 滤波去噪后就可以得到如图 4 所示的图像,图中选定的区域是内波比较明显的区域。

由研究区域图 3 以及 SAR 图像数据图 4 可以看出,所选的 CTD 恰好在 SAR 拍摄到的内波图像区域附近,所以以下大部分的对比可以通过实测资料 CTDzd4 ($20^\circ 30' \text{ N}$, $116^\circ 30' \text{ E}$) 进行,作者首先给出前面提到的几种从 SAR 遥感图像反演出的混合层深度,然后给出从 CTD 实测资料得出的混合层深度,最后给出反演结果的对比表。

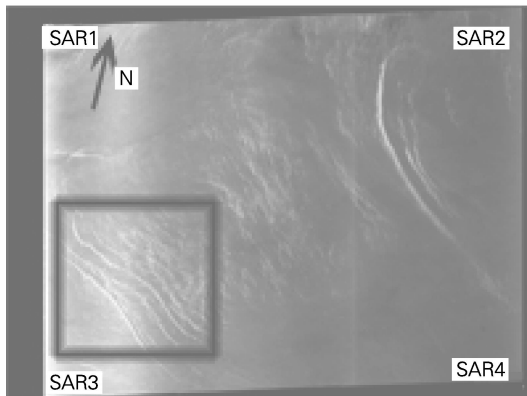


图4 2002年5月拍摄的中国南海北部 SAR 图像
Fig. 4 SAR image acquired from the north South China Sea in May 2002

3.1 SAR 遥感反演结果

反演方法在前文已经叙述,此处只列出具体的反演结果,由 Levitus2002 年月平均温盐资料插值,根据海水状态方程 EOS80 计算确定出上、下两层海水的密度分别为 $\rho_1 = 1\ 021.3\ \text{kg}/\text{m}^3$, $\rho_2 = 1\ 023.7\ \text{kg}/\text{m}^3$,

即为 $2.4\ \text{kg}/\text{m}^3$,海水平均密度 $\rho = 1\ 023\ \text{kg}/\text{m}^3$,从 SAR 图像上可以获得 L 为 $43\ \text{km}$,内波周期按照经验半日潮取 $12.42\ \text{h}$,即可得到波速 C_g 为 $0.96\ \text{m}/\text{s}$,当地的科氏力参数 $f = 5.0936 \times 10^{-5}$,这样,由公式(4)计算的混合层深度 h_a 为 $44\ \text{m}$,由考虑了地转影响的公式(2)计算的混合层深度 h_b 为 $38\ \text{m}$,由于没有当地的流场资料,作者假设了上下两层的背景流场来说明背景流场对混合层深度反演的影响,假设 U_1 为 $0.10\ \text{m}/\text{s}$, U_2 为 $0.05\ \text{m}/\text{s}$,依据公式(3)计算得 h_c 为 $35\ \text{m}$ 。

3.2 CTD 实测结果

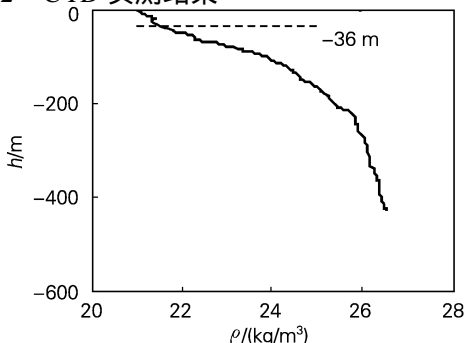


图5 CTDZd4 的密度剖面
Fig. 5 The density profile of CTDZd4

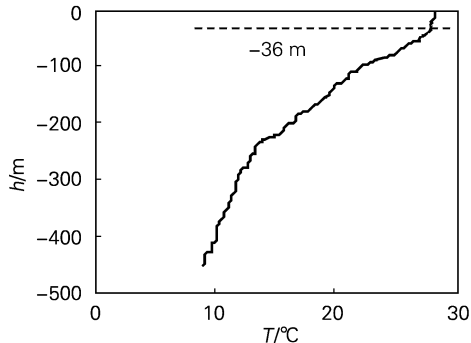


图6 CTDZd4 的温度剖面
Fig. 6 The temperature profile of CTDZd4

根据 CTDZd4 测到的温度、盐度、密度剖面,采用 Monterey 和 Levitus^[16] 所描述的混合层深度定义方法,即根据海表盐度和比表面温度低 0.5 的温度值计算得到的密度所在的深度,可以得到混合层深度 h_d 为 $36\ \text{m}$ 。

3.3 结果比较

h_a, h_b, h_d 及它们对 h_a 的相对误差见表 1。

表1 混合层深度结果比较

深度参数	混合层深度(m)	相对误差(%)
h_a	44	22
h_b	38	5.6
h_d	36	

由表 1 可以看出,地转对 SAR 遥感图像混合层深度反演是有影响的,而由于计算 h_c 使用了假设的背景流场,它的相对误差没有意义,因此没有在表 1 列出,但是 h_c 与 h_d 值不同说明了背景流场对 SAR 遥感图像混合层深度反演也是有影响的。

4 结论和讨论

作者比较分析了地转和均匀背景流对 SAR 图像反演混合层深度结果的影响。结果表明,地转和均匀背景流场对 SAR 遥感图像混合层深度反演都是有影响的。由于 SAR 资料昂贵,数量少,恰好发生内波被拍到而且那时刚好有实测资料的更少,所以文中只给出了单点资料的对比,而且缺乏背景流场的实测资料,但研究表明地转和均匀背景流场对 SAR 遥感图像计算混合层深度结果的影响是不可忽略的,而且文中使用的方法在理论上更为合理、严谨。

参考文献:

[1] Porter D L, Thompson D R. Continental shelf param-

- eters inferred from SAR internal wave observations [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1999, **16** (4): 475-487.
- [2] Li X F, Clemente-Colon P, Friedman K S. Estimating oceanic mixed-layer depth from internal wave evolution observed from Radarsat-1 SAR [J]. *Johns Hopkins apl Technical Digest*, 2000, **21** (1): 130-135.
- [3] 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.
- [4] Hsu M K, Liu A K, Liu C. A study of internal waves in the China Seas and Yellow Sea using SAR [J]. *continental shelf research*, 2000, **20** (4-5): 389-410.
- [5] Liu A K, Hsu M K. Internal wave study in the South China Sea using Synthetic Aperture Radar (SAR) [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25** (7-8): 1 261-1 264.
- [6] 杨劲松,周长宝,黄韦良,等. 合成孔径雷达图像内波参数提取方法研究[J]. 遥感技术与应用,2000, **15** (1): 6-9.
- [7] 杨劲松,黄韦良,周长宝,等. SAR 遥感测量非线性海洋内波的发生深度[J]. 微波学报,2001, **17** (增刊): 186-189.
- [8] 杨劲松,黄韦良,周成虎,等. 利用 SAR 图像计算内波深度和振幅的可行性研究[J]. 国土资源遥感,2003, **15** (1): 29-32.
- [9] Yang Y S, Huang W G, Xiao Q M, *et al.* Oceanic pycnocline depth retrieval from SAR imagery in the existence of solitary internal waves [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, **24** (5): 46-49.
- [10] 范植松,耿建,张远凌,等. 南海北部内孤立波 SAR 遥感反演的初步研究[J]. 中国海洋大学学报,2005, **35** (6): 885-888.
- [11] Lamb H. *Hydrodynamics* [M]. New York: Cambridge University Press, 1932. 371-371.
- [12] 范植松. 海洋内部混合研究基础[M]. 北京:海洋出版社,2002. 9-10.
- [13] Song J B. Second-order solutions for random interfacial waves under steady uniform currents[J]. *China Ocean Engineering*, 2005, **19** (2): 333-338.
- [14] Cushman-Roisin B. Lower and upper bounds on internal-wave frequencies in stratified rotating fluids [J]. *Physical Review Letters*, 1996, **77** (24): 4 903-4 905.
- [15] 范植松. 海洋内部混合研究基础[M]. 北京:海洋出版社,2002. 7-8.
- [16] Monterey G, Levitus S. *Seasonal Variability of Mixed Layer Depth for the World Ocean* [M]. Wash D C: U S Gov Printing Office, 1997. 96.

Influences of Coriolis force and steady uniform currents on mixed-layer depth retrieved from SAR image

FAN Cong-hui^{1,2}, SONG Jin-bao¹

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Received: Nov. , 18, 2006

Key words: internal solitary wave; synthetic aperture radar (SAR); mixed-layer depth; Coriolis force; steady uniform currents

Abstract: The new methods are presented to estimate the mixed-layer depth from synthetic aperture rader (SAR) image based on the dispersion relationships obtained by using the two-layer fluid model of oceanic internal waves when the effects of Coriolis forces and steady uniform currents are considered. A internal solitary wave captured by the SAR image in the north South China Sea is analyzed by the proposed inversion methods. Comparing the result with synchronized CTD data, it is shown that the models with the effect of Coriolis force and steady uniform currents are more reasonable.

(本文编辑:刘珊珊)