

一种基于HY-2卫星数据的多载荷联合 海流反演算法研究

张洁, 邹斌, 冯倩

(国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

摘 要: 基于长时间序列的多载荷HY-2卫星资料,利用OSCAR算法计算海流,不仅考虑了海面动力高度场和风场,还加入了海表温度梯度场,对于赤道处的处理采用正交多项式拟合的数学方法。将由动力模型算法得到的基于海洋二号卫星数据的反演海流结果和OSCAR海流数据产品进行对比验证。结果表明在近赤道处较差,中高纬地区较好。两种算法标准差在近赤道处达到0.30 m/s,在中高纬地区为0.05 m/s到0.10 m/s。

关键词: HY-2; OSCAR; 海流; 反演

中图分类号: P731.21 **文献标识码:** A

文章编号: 1003-0239(2016)04-0053-05

1 引言

传统的测量方法依赖于海上作业船艰难地进行有限的测量,既耗时,又耗人力,而且其观测范围也十分有限,因此实现海流流速与流向的准确反演具有重要意义。随着卫星海洋遥感手段的出现,海流观测在实时性以及大尺度观测上得到重要突破。

传统反演海流算法将海表流速分为两个部分:地转流速和Ekman流速,分别通过海面高度异常和海面风场数据获得地转流速和Ekman流速,二者相加得到海表流速。地转流通过地转平衡关系获取,但是在赤道处,由于地转平衡关系不再适用,所以赤道处的海流反演一直是学者们研究的重点。McPhaden得出赤道 β 平面地转近似($f=\beta y, \beta=2.3 \times 10^{-11} \text{m/s}$)通过对海面动力高度的 y 二阶偏导数计算近赤道区域的地转流流速和观测数据能够较好的吻合^[1]。1989年Picaut等研究表明观测噪声对地转的微小偏移都会对近赤道区域结果产生很大影响,为了减小这个影响,加入一个修正项 $O(y^2)$ 来平滑结果^[2]。1997年,Meurs等在15 m处Ekman流速和

表面风应力之间构建了两个参数的回归模型^[3]。2002年,Bonjean在传统算法的基础上,加入温度梯度对表层海流产生的斜压流,反演得到海流,该种算法即为OSCAR海流算法^[4]。HY-2卫星是中国海洋动力环境探测系列卫星的首颗卫星,其上配置了雷达高度计、微波散射计、微波辐射计、校正辐射计4种微波遥感器,能同时提供该算法所需的所有数据。本文基于海洋二号(HY-2)数据验证了OSCAR算法应用,为今后基于OSCAR算法利用HY-2卫星数据反演海流打下了基础。

2 数据采集及预处理

2.1 海面动力高度数据采集及预处理

研究所需高度计数据由国家卫星海洋应用中心提供,海面高度二级数据产品为已经过海陆标识和质量控制后的产品数据。采用Evensen等^[5]提出的海面动力高度网格化选点范围设置,赤道到15°N和15°S,沿经线向为250 km,纬线圈方向50+

收稿日期: 2015-06-25

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2013BAD13B01);国家发改委高技术产业化项目([2012]2083);国家海洋局海洋公益性行业科研专项(201105032,201305032)。

作者简介: 张洁(1990-),女,助理工程师,硕士,主要从事海洋遥感研究。E-mail:915114492@qq.com

$300\left(\frac{900}{2\phi_0^2+900}\text{km}\right)$; 纬度高于 15°N 和 15°S 的, 沿经线方向与纬线圈方向都为 $50+250\left(\frac{900}{\phi^2+900}\right)\text{km}$ 。

2.2 海面风场数据采集及预处理

研究采用由国家卫星海洋应用中心生产的海面风场二级产品数据。利用月平均散射计数据中混频的公式, 用经纬度直接代替距离得到权重函数, 同样具有高斯特性, 峰值在零附近, 并且距离峰值越远权重下降越快, 确保远处数据点对网格值的较小权重影响, 防止插值过度平滑^[6]。

2.3 海表温度场数据采集及预处理

从 remote sensing systems 网站下载 AMSR-2 辐射计的海表温度数据 (ftp.remss.com), 采用反距离权重进行网格化, 方法同海面动力高度网格化。

3 OSCAR 算法

大尺度时间平均的表层海流的动量平衡取决于科氏力、压力梯度和风应力, 因此为了准确反演海流流速不应只考虑上述的地转流和风生流, 还要加入海表温度梯度产生的斜压流^[4]。由块体公式计算得到风应力, 其中拖曳系数的设定采用 Large 等^[7]提出的计算方案。采用 Santiago-Mandujano 等的经验模型得到涡动粘性系数 A ^[8]。

3.1 垂直切变

垂直切力的方程为:

$$\vec{U}_z - \frac{if}{A}\vec{U} = \frac{1}{A}\nabla\vec{\theta} \quad (1)$$

将 $\vec{U}$ 看成原函数, 结合边界条件, 解偏微分方程。得其表达式为:

$$\vec{U}(Z) = \frac{\sinh\left(\frac{H+z}{h_e}\right)}{\sinh\left(\frac{H}{h_e}\right)}\frac{\vec{\tau}}{A} + \frac{2\sinh\left(\frac{H+z}{2h_e}\right)\sinh\left(\frac{z}{2h_e}\right)}{\cosh\left(\frac{H}{2h_e}\right)}\frac{h_e^2}{A}\nabla\vec{\theta} \quad (2)$$

式中: $h_e = (A/|f|)^{1/2}$ 。

3.3 海表流速

从海洋表面 ($z=0$) 处到 $z=h$ ($h<H$) 处, 海流流速平均值为 $\vec{U}$ 。

$$\text{if}\vec{U} = \frac{if}{h}\int_{-h}^0\vec{U}(z)dz \quad (3)$$

上式结合经典热成风方程^[9] $f\vec{U} = i\nabla\theta$ 转化为:

$$\text{if}\vec{U} = -g\nabla\xi + \frac{h}{2}\nabla\theta + \frac{\vec{\tau} - \overline{AU(-h)}}{h} \quad (4)$$

将 $h \rightarrow 0$ 得到海表流速 $\vec{U}_0$ 表达式:

$$\text{if}\vec{U}_0 = -g\nabla\xi + \frac{1}{H}q\left(\frac{H}{h_e}\right)\vec{\tau} + \frac{H/2}{q\left(\frac{H}{2h_e}\right)}\nabla\theta \quad (5)$$

式中: $q(\xi) = \frac{\xi}{\tanh(\xi)}$, $\tanh(\xi) = \frac{e^\xi - e^{-\xi}}{e^\xi + e^{-\xi}}$ 。

3.4 近赤道处海表流速

赤道处, 由于 $f=0$, 用正交多项式回归法进行近似处理。赤道处 (y_s, y_n) 用 β 平面变化将式(5)转化为:

$$iy\overline{U_0(y)} = \overline{F(y)} \quad (6)$$

$$\overline{U_0(y)} \approx \overline{U_a(y)} \equiv \sum_{k=0}^{M-1} \overline{a_k} \phi_k(y), y_s \leq y \leq y_n \quad (7)$$

用 $\overline{U_a(y)}$ 来代替 $\overline{U_0(y)}$, $\overline{U_a(y)}$ 满足 $\int_{y_s}^{y_n} |iy\overline{U_a} - \overline{F}|$ 最小, 即最佳平方逼近函数。梁昆森等论证了正交多项式序列可以实现对函数的最佳平方逼近^[9]。 $\phi_k(y)$ 具有正交性。本实验的权函数是 $\omega(x)=y^2$ 。

$$\int_{y_s}^{y_n} \phi_k(y)\phi_l(y)y^2dy = \begin{cases} 0, k \neq l \\ s, k = l \end{cases} \quad (8)$$

$$iy\overline{U_0(y)} = i \sum_{k=0}^{M-1} \overline{a_k} \phi_k(y) = \overline{F(y)} \quad (9)$$

$$\int_{y_s}^{y_n} [ia_0\phi_0(y)y\phi_0(y)y + ia_1\phi_1(y)y\phi_0(y)y + \dots + ia_{M-1}\phi_{M-1}(y)y\phi_0(y)y]dy = i \int_{y_s}^{y_n} F(y)\phi_0(y)ydy \quad (10)$$

$$\overline{a_k} = -i \int_{y_s}^{y_n} F(y)\phi_k(y)ydy \quad (11)$$

选择 $y_n = -y_s = 8^\circ$, $M \approx 0.75 \times N_y$, N_y 是纬度数。纬度数取决于原始数据网格化尺度, OSCAR 为 1° , 所以纬度数为 12。

4 结果对比

4.1 OSCAR数据获取

将反演得到的海流产品和OSCAR海流产品进行对比验证。OSCAR反演海流产品可以从OSCAR官网(<http://www.oscar.noaa.gov>)下载,提供5 d平均、月平均和长时间序列平均,空间分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ 。原始数据包括SSH、W和SST。本文主要采用 1° 网格化未滤波数据,经纬度设定为 90°N , 90°S , 0°E , 360°E 。时间取2013年7月6—10日。

4.2 对比验证

将实验采用算法得到的海流流速 u 、 v 分量与OSCAR海流产品流速的 u 、 v 分量对比得到相对误差图(见图1)。其中 u 、 v 分量分别表示海流流速的

东分量和北分量。 u 为正值表示从西指向东方向, v 为正值表示从南指向北方向。由图1看出,除去相对误差较大的点,整体相对误差差异维持在正负0.1之间。

由于赤道处海流流速差异很大,我们将赤道处单独分析,分析地区设定为 20°N — 20°S 。采用对比统计量中的偏差进行评估(见图2)。发现偏差的绝对值大体上呈现随着纬度减小而增加的趋势,其中海流流速 u 分量的差异较 v 分量更大,反映了算法随着纬度的增加对流速模拟的能力越差。

按纬度计算标准差(见图3),发现当纬度大于 10° 时, u 速度和 v 速度的标准差处于 0.05 — 0.15 m/s之间,这些差异来源于插值的不确定性和原始数据的误差。赤道处的 u 速度和 v 速度的标准差逐渐增大到 0.30 m/s,这可能是由于赤道处的实际海流变化较中高纬大,插值方法的选择可能会过度平滑。

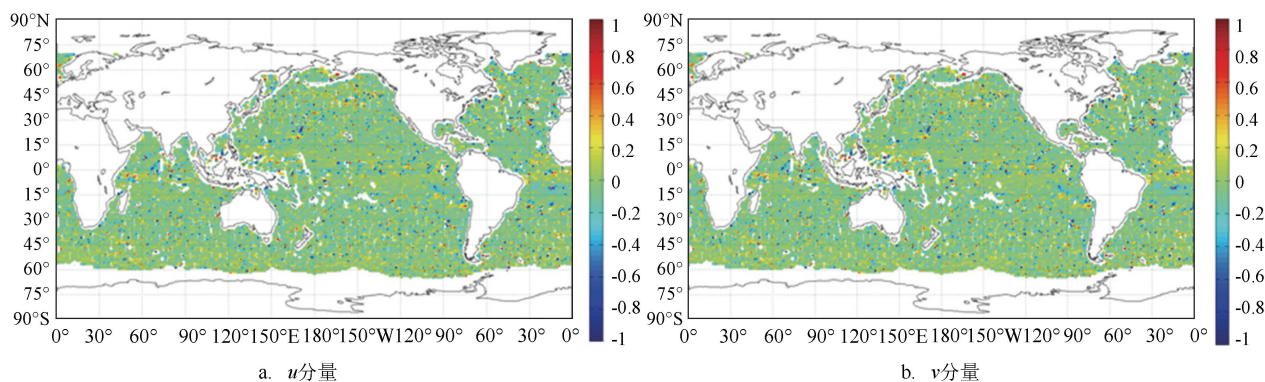


图1 海流流速的相对误差

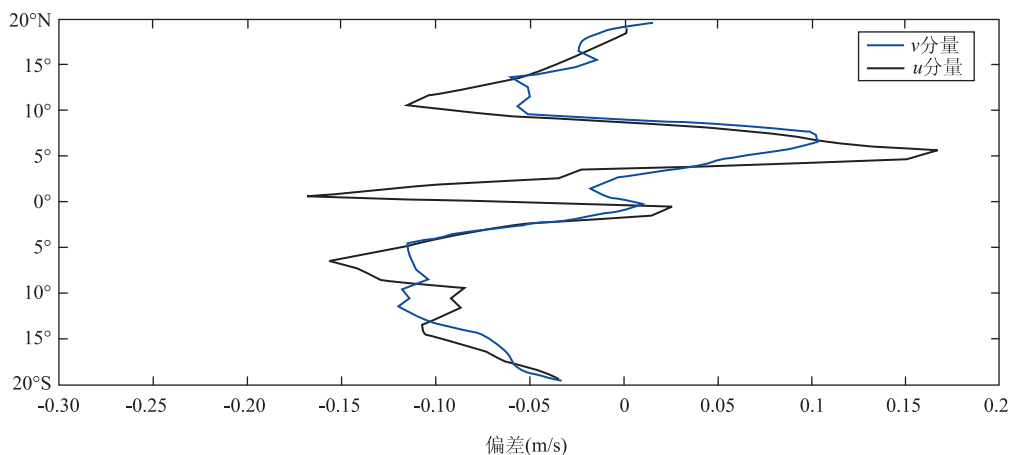


图2 近赤道处海流流速 u 、 v 分量的偏差

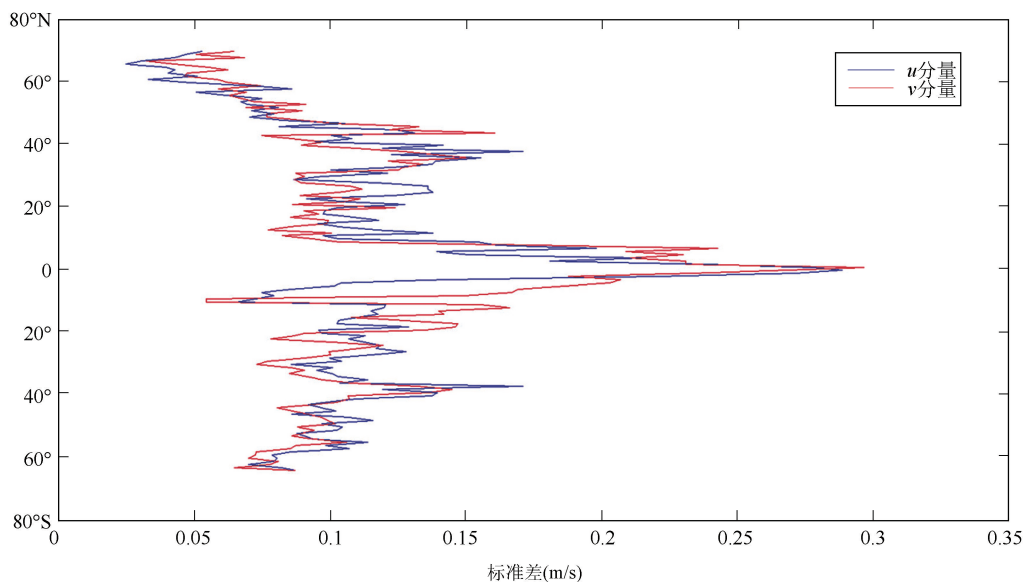


图3 海流流速的 u 、 v 标准差

5 总结和讨论

本文完成了对基于HY-2卫星数据的多载荷联合海流反演算法的初步研究。在本文基础上,海表流速数据处理技术尤其是提高赤道处海表流速精度还有待进一步深入的研究,对HY-2高度计数据、散射计数据和海表温度数据的筛选和网格化方法需要改进,在本文中只考虑了空间加权法,没有考虑时间的影响。本文实验结果在赤道处海流反演差异较大,由于高度计近岸数据质量不稳定,可考虑加入数值模式进行联合反演,同时在HY-2号卫星数据的基础上融合其他卫星数据,填补空白区域。

参考文献:

- [1] McPhaden, M. J. Continuously stratified models of the steady-state equatorial ocean[J]. Journal of Physical Oceanography, 1981, 11 (3): 337-354.
- [2] Picaut, J., Hayes, S. P., McPhaden, M. J. Use of the geostrophic approximation to estimate time-varying zonal currents at the equator[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012), 1989, 94 (C3): 3228-3236.
- [3] Van Meurs, P., Niiler, P. P. Temporal Variability of the Large-Scale Geostrophic Surface Velocity in the Northeast Pacific*[J]. Journal of physical oceanography, 1997, 27 (10): 2288-2297.
- [4] Bonjean F, Lagerloef G S E. Diagnostic model and analysis of the surface currents in the tropical Pacific Ocean[J]. Journal of Physical Oceanography, 2002, 32(10): 2938-2954.
- [5] Evensen, G., Van Leeuwen, P. J. Assimilation of Geosat altimeter data for the Agulhas current using the ensemble Kalman filter with a quasigeostrophic model[J]. Monthly Weather Review, 1996, 124 (1): 85-96.
- [6] 刘宇昕. 星载微波散射计数据和数值模式产品海面风场混合分析研究[D]. 北京: 国家海洋环境预报研究中心, 2013.
- [7] Large W G, Pond S. Sensible and latent heat flux measurements over the ocean[J]. Journal of Physical Oceanography, 1982, 12(5): 464-482.
- [8] Santiago-Mandujano, F., Firing, E. Mixed-layer shear generated by wind stress in the central equatorial Pacific[J]. Journal of physical oceanography, 1990, 20 (10): 1576-1582.
- [9] 梁昆森. 数学物理方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 1990.

An algorithm study of sea current retrieval based on multiple sensor data onboard HY-2 satellite

ZHANG Jie, ZOU Bin, FENG Qian

(National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081 China)

Abstract: Based on the long time series of multiple sensor data onboard HY-2 satellite, the ocean current is calculated using the OSCAR algorithm. The sea surface height field, sea surface wind field and sea surface temperature gradient field are considered in the OSCAR algorithm. The orthogonal polynomial method is adopted under calculating the current at the equator. The inversion current results from OSCAR algorithm based on HY-2 satellite data are compared with the current data product from OSCAR. The results show that the former data is better in the mid-high latitude, while worse near the equator than the latter data. The standard deviations are 0.30 m/s near the equator and are 0.05 m/s to 0.10 m/s in mid-high latitude.

Key words: HY-2; OSCAR; current; retrieval