

# 卫星测高逆气压改正及其对 海平面变化的影响

金涛勇<sup>1,2</sup> 李建成<sup>1,2</sup> 王正涛<sup>1,2</sup> 蒋涛<sup>1</sup>

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘要:**研究了全球平均大气压的变化特征,分析了传统卫星测高逆气压改正存在的缺陷,并对以常数大气压为参考值、以全球海洋平均大气压为参考值和顾及高频信号的 3 种逆气压改正进行了对比。根据 T/P 卫星测高数据对 3 种改正方法得到的海面高和海平面变化进行了比较分析,相比于前两种逆气压改正,顾及高频信号的逆气压改正最接近海平面的真实响应,可减少卫星测高海面高交叉点不符值 RMS 约 5.70 mm,分别提高海平面变化估计精度约 18% 和 12%。

**关键词:**卫星测高;大气压;逆气压改正;海平面变化

**中图分类号:**P228.3

由于海水的不可压缩性,海平面对其表面大气压具有一种流体静力学响应,当气压增大时,海面降低,通常 100 Pa 的大气压约产生 1 cm 的海平面变化,这种现象称为逆气压效应。传统的卫星测高逆气压改正<sup>[1-3]</sup>模拟了海面对于大气压力的静态响应,以常数为参考值,通过与大气压的简单线性关系进行计算,但忽略了大气压力动态变化和海面风的影响。相关研究指出,海平面在高频波段和中高纬度地区对于大气压力具有明显的动力响应,且在 10 d 左右的周期内也存在海面风的影响<sup>[4-7]</sup>。本文对以常数大气压为参考值、以全球海洋平均大气压为参考值和顾及高频信号的 3 种逆气压改正进行了比较,给出了逆气压改正的变化特征,并分析了逆气压改正高频信号对海面高和海平面变化确定的影响。

## 1 传统逆气压改正

卫星测高数据中采用的逆气压改正为:

$$IB = -9.948 \times (P - 1013.3) \quad (1)$$

式中, $P$  是观测点的海面大气压;尺度因子  $0.948 = 1/\rho g$ , $\rho$  为海水密度, $g$  为重力异常,根据中纬

度经验平均值计算;1 013.3 为参考大气压。

全球平均大气压具有时变特性,各海域的大气响应随时间变化而不同,特别是大气压的高频部分。在计算平均海平面变化中,使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)平均大气压值作为参考大气压进行逆气压改正的方差,相对式(1)或不作逆气压改正时可提高约 20%<sup>[8]</sup>。

根据海水质量均衡原理和不可压缩性,逆气压改正在全球海洋范围内的平均值应该为 0,式(1)的结果不能满足该条件。因此,使用非常数的参考大气压更具有代表性,且更接近于真实情况<sup>[9]</sup>,有:

$$IB = -9.948 \times (P - \bar{P}) \quad (2)$$

式中, $\bar{P}$  是全球平均大气压值,可由观测周期内所有有效海面观测值的加权平均,或直接由 ECMWF 模型值代替。李建成等<sup>[10,11]</sup>以周期加权平均大气压为参考值比较了 T/P、ERS-2 和 Geosat/ERM 的两种逆气压改正,其差值呈年周期变化。

T/P 测高卫星在前 8 a 运行时间内的平均大气压为 101 090 Pa,年变化率为 60 Pa/a,所产生的海面高差距为 23.9 mm,其年变化率为 6 mm/a,该误差对利用卫星测高数据确定全球海平面变化有极大的影响。

## 2 顾及高频信号的逆气压改正

根据奈奎斯特采样定理,如果信号最高频率不到采样频率的一半,那么此时这些离散的采样点能够完全表示原信号。高于或处于奈奎斯特频率的分量会导致混叠现象,即采样间隔为  $\Delta t$  的信号会受到周期小于  $2\Delta t$  信号的混叠。因此,卫星测高重复周期观测数据不能恢复小于其 2 倍观测周期的高频海洋信号,并且由其确定的低频信号(大于 2 倍观测周期)会受到该高频信号的混叠,从而影响其总体估计值。

卫星测高逆气压改正高频影响主要来源于大气压力动态部分和海面风等<sup>[4-7]</sup>。Carrère 和 Lyard<sup>[12]</sup>研制的 MOG2D-G 全球正压模型,利用有限元空间离散化特点,在地形起伏剧烈区域和浅海区适当增加空间分辨率,其有限元格网大小从开阔海域 400 km 到近岸 20 km 不等。动力大气改正模型(dynamic atmospheric correction, DAC)由 CLS 联合 Mog2D-G 模型的高频部分(小于 20 d)和传统海面静态大气压力响应逆气压改正(以全球海面平均大气压作为参考值)的低频部分(大于 20 d)得到,其有效时间自 1992 年起,空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,每天提供 0:00、6:00、12:00 和 18:00 4 个时间点上的改正模型,其他时间通过内插得到,现已应用到 Jason-1 测高卫星的 c 版本数据和 Envisat-1 测高卫星数据校正,以及 Jason-2 测高卫星数据改正中。

## 3 不同逆气压改正比较

选取 T/P 测高卫星第 11~481 周期观测数据,比较了以常数作为参考大气压、全球海洋平均值作为参考大气压和顾及高频信号的 DAC 模型

3 种逆气压改正,分别从逆气压改正差值、海面高交叉点不符值和对海平面变化的影响 3 个方面进行了比较和分析。

### 3.1 逆气压改正差值

对所选数据各周期的 3 种沿轨的逆气压改正差值进行统计得到平均值和 RMS(见图 1)。这 3 种逆气压改正都是基于 ECMWF 的大气压分析结果,与 ECMWF 全球平均大气压具有相似的年周期变化特征。但其中以常数为参考和以全球海洋平均为参考的两种逆气压改正差值变化幅度较大,且其相位与以全球平均为参考和顾及高频信号的 DAC 模型逆气压改正的差值相差约  $180^\circ$ 。以全球平均为参考和 DAC 模型两种逆气压改正的差值主要体现在高频信号,简单地将全球海洋大气压进行平均,使得高频信号也被平滑,因此,后两种逆气压改正的差值可看作是前两种逆气压改正差值的重新补偿,在变化幅度上,应小于前两种改正的差值,与真实情况相符。

### 3.2 海面高交叉点不符值比较

利用 3 种不同的逆气压改正对所选取观测数据进行了改正,并计算了每个周期的海面高交叉点不符值。采用 DAC 模型改正的海面高交叉点不符值 RMS 最小,比采用平均值为参考的逆气压改正时 RMS 平均小约 5.70 mm(见图 2),最大时可达 22.7 mm。虽然该项改善较小,但说明顾及高频信号的逆气压改正提高了海面高观测值的精度,其贡献不可忽视,特别是对于海平面变化计算等。采用常数为参考和平均值为参考的逆气压改正的海面高交叉点不符值相当,后者精度略高,其 RMS 差距最大为 0.09 mm,平均为 0.03 mm。

### 3.3 对海平面变化的影响

基于上述由 3 种不同逆气压改正得到的海面高,以 CLS01 全球平均海面高模型为参考海平面,分别计算了各周期的沿轨海平面变化,然后以

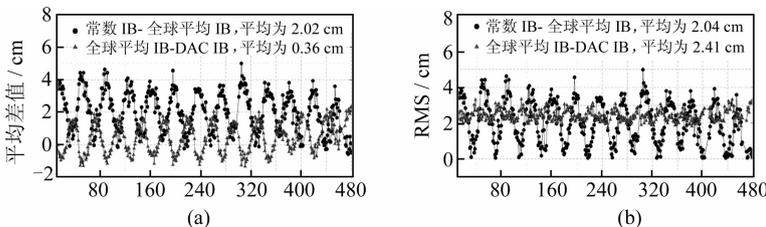


图 1 3 种逆气压改正差值的平均值和 RMS 统计

Fig. 1 Mean and RMS of Difference Between Three Inverse Barometer Corrections

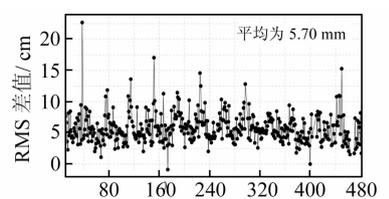


图 2 顾及高频逆气压改正的海面高交叉点不符值 RMS 与采用传统逆气压改正时的差距

Fig. 2 Difference of Cycle by Cycle Cross-over RMS Between DAC IB Corrected SSH and Traditional IB Corrected SSH

纬度的余弦定权进行平均,得到各周期的全球平均海平面变化,进而建立了所选数据时间段内的各自海平面变化时间序列,并利用最小二乘方法以常数项、斜率、正弦和余弦项拟合计算了各自的偏差、长期性趋势、周年及半年变化。

表 1 给出了 3 种逆气压改正后计算的海平面变化趋势。目前还没有办法判断何种逆气压改正后的海平面变化绝对精度更高,但从各自计算误差来看,顾及了高频信号的 DAC 模型逆气压改

正精度最高,以常数为参考的逆气压改正精度最低,不同的逆气压改正对海平面周年变化的影响小于半年变化。3 种海平面变化时间序列拟合后的中误差见表 2,顾及高频信号的 DAC 模型逆气压改正相对以常数为参考的逆气压改正可提高海平面变化拟合中误差约 18%,相对以全球海洋平均为参考的逆气压改正可提高约 12%,更加说明高频逆气压改正影响不容忽视。

表 1 3 种逆气压改正后计算的海平面变化趋势

Tab. 1 Trends of Sea Level Variations Corrected by Three Kinds of IB

数据源	长期性 趋势/(mm/a)	周年变化		半年变化	
		幅度/mm	相位/(°)	幅度/mm	相位/(°)
常数逆气压	2.68±0.09	1.14±0.45	83.5±22.5	4.47±0.44	356.9±5.8
平均值逆气压	2.18±0.08	0.67±0.41	150.2±35.4	6.60±0.41	162.6±3.6
DAC 模型逆气压	2.58±0.07	1.08±0.37	136.9±19.4	4.04±0.37	59.8±5.2

表 2 3 种海平面变化时间序列拟合的中误差

Tab. 2 Fitting Mean Square Errors of Three Kinds of Sea Level Variation Time Series

不同改正的海平面变化时间序列	拟合中误差/mm
常数逆气压改正	6.70
平均值逆气压改正	6.20
DAC 模型逆气压改正	5.47

图 3~5 分别给出了这 3 种逆气压改正后建立的海平面变化时间序列。采用以常数为参考的逆气压改正的海平面变化时间序列与其他两种逆气

压改正后结果有较大的系统偏差,约 2 mm,且整个时间序列较离散,周期特征不明显(见图 3)。采用以全球海洋平均值为参考的逆气压改正之后,系统偏差大幅度减小,并表现出较强的周期变化特性,但有些周期的海平面变化仍存在较大的误差,与真实值有一定的偏离(见图 4)。当采用顾及了高频信号的逆气压改正之后,各周期的海平面变化误差减小(见图 5)。3 种海平面变化时间序列所得的长期上升趋势估计中误差精度依次提高。

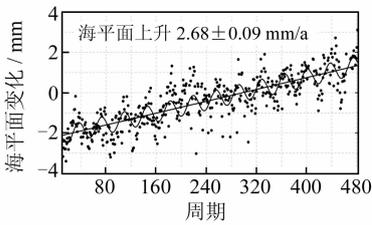


图 3 利用常数为参考的逆气压改正后所建立的海平面变化时间序列

Fig. 3 Time Series of Sea Level Variations Corrected by Constant Referenced IB

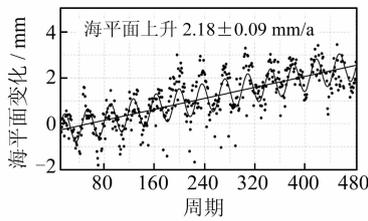


图 4 利用平均值为参考的逆气压改正后所建立的海平面变化时间序列

Fig. 4 Time Series of Sea Level Variations Corrected by Global Mean Value Referenced IB

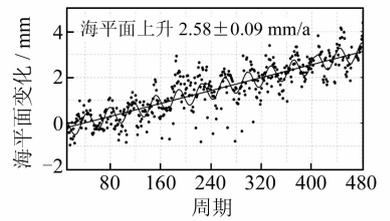


图 5 利用顾及高频信号的 DAC 模型逆气压改正后所建立的海平面变化时间序列

Fig. 5 Time Series of Sea Level Variations Corrected by DAC IB

## 4 结 语

本文比较和分析的结果表明了传统的以常数为参考的逆气压改正偏离海平面对大气的真实响应,不能有效改正卫星测高海平面观测值。以全球海洋平均为参考的逆气压改正有了一定的改善,但未顾及到高频信号的影响,简单的全球平均

导致了高频信号的损失。与前两种逆气压改正相比,顾及高频信号的 DAC 模型逆气压改正最接近海平面的真实响应,可减少卫星测高海面高交叉点不符值 RMS 约 5.70 mm,提高海平面变化估计精度分别约 18%和 12%。因此,建议在卫星测高数据应用时,应采用顾及高频信号的逆气压改正。

## 参 考 文 献

- [1] Lillibridge J, Cheney R. The Geosat Altimeter JGM-3 GDRs [R]. National Ocean Atmospheric Administration, Silver Spring, USA, 1997
- [2] CERSAT. Altimeter and Microwave Radiometer ERS Products User Manual [R]. IFREMER, France, 2001
- [3] Blanc F, Borra M, Boudou P. AVISO User Handbook for Merged TOPEX/POSEIDON Products [R]. AVI-NT-02-101-CN, Edition 3.0, Toulouse, France, 1996
- [4] Ponte R, Gaspar P. Regional Analysis of the Inverted Barometer Effect over the Global Ocean Using TOPEX/POSEIDON Data and Model Results [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104 (C7): 15 587-15 601
- [5] Stammer D, Wunsch C, Ponte R. De-aliasing of Global High Frequency Barotropic Motions in Altimeter Observations[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(8): 1 175-1 178
- [6] Tierney C, Wahr J, Bryan F, et al. Short-Period Oceanic Circulation: Implications for Satellite Altimetry[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(9): 1 255-1 258
- [7] Hirose N, Fukumori I, Zlotnicki V, et al. Modeling the High-Frequency Barotropic Response of the Ocean to Atmospheric Disturbances; Sensitivity to Forcing, Topography, and Friction[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106 (C12): 30 987-30 995
- [8] Dorandeu J, Le Traon P. Effects of Global Mean Atmospheric Pressure Variations on Mean Sea Level Changes from TOPEX/Poseidon[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1999, 16(9): 1 279-1 283
- [9] Rapp R, Yi Y, Wang Y. Mean Sea Surface and Geoid Gradient Comparisons with TOPEX Altimeter Data[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(C12): 24 657-24 667
- [10] 李建成, 王正涛, 胡建国. 联合多种卫星测高数据分析全球和中国海平面变化[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(4): 343-347
- [11] 李建成, 姜卫平, 章磊. 联合多种测高数据建立高分辨率中国海平均海面高模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(1): 40-45
- [12] Carrère L, Lyard F. Modeling the Barotropic Response of the Global Ocean to Atmospheric Wind and Pressure Forcing: Comparisons with Observations[J]. Geophys Res Lett, 2003, 30(6): 1 275-1 278

第一作者简介: 金涛勇, 博士, 现从事卫星大地测量学研究。  
E-mail: whutyjin@163.com

## Inverse Barometer Correction in Satellite Altimetry and Its Effect on Mean Sea Level Change

JIN Taoyong<sup>1</sup> LI Jiancheng<sup>1, 2</sup> WANG Zhengtao<sup>1, 2</sup> JIANG Tao<sup>1</sup>

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** We study the characteristic of global mean atmosphere pressure, and point out the shortcoming of traditional inverse barometer (IB) correction of satellite altimetry. Then, three kinds of inverse barometer corrections are compared in detail based on T/P altimeter data. Compared to the constant referenced IB and global mean value referenced IB, the DAC model based IB correction which high frequency signal is considered shows best, which can reduce the RMS of crossover difference 5.70 mm, and improve the fitting mean square error in sea level change 18% and 12% relative to the constant referenced IB corrected SSH and global mean value referenced IB corrected one, respectively.

**Key words:** satellite altimetry; atmosphere pressure; inverse barometer correction; sea level change