

黄霞凤, 苗洪利, 苗翔鹰, 等. Jason-2 高度计电离层 GIM 误差分析及修正研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(7): 143–148. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.07.013

Huang Xiaofeng, Miao Hongli, Miao Xiangying, et al. Analysis and correction of GIM error about Jason-2 altimeter[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(7): 143–148. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.07.013

Jason-2 高度计电离层 GIM 误差分析及修正研究

黄霞凤¹, 苗洪利^{1*}, 苗翔鹰¹, 薛文文¹

(1. 中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 基于 Jason-2 高度计 2015 年地球物理数据集 (GDR)38 个周期太平洋海域的全球电离层图 (GIM) 电离层校正值和双频校正值的数据, 分不同季度和不同纬度区域比较二者的差异, 结果表明: GIM 值与双频校正值之间存在明显的差异, GIM 校正值普遍高于双频校正值, 说明 GIM 高估了电离层路径延迟, GIM 校正值与双频校正值的差异与季节和纬度区间有关。用梯度下降法得到 GIM 值的修正方程, 将修正方程应用于 2016 年 Jason-2 的全年数据, 修正后的 GIM 值与双频校正值十分接近, 在各年份中均具有良好的适用性。在单频高度计不能使用电离层双频校正算法的情况下, 可以利用不同季度和不同纬度区域的修正方程对同等高度的高度计 GIM 值进行修正以达到双频校正值的精度水平。

关键词: 雷达高度计; 电离层路径延迟; 双频校正算法; 全球电离层图

中图分类号: P715.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)07-0143-06

1 引言

电离层中大量的自由电子和离子会对微波的传播产生折射并导致延迟, 对于 Jason-2 高度计, 折射引起的测高误差通常为 $0.2\sim 40\text{ cm}$ ^[1], 在太阳风暴活动高潮期, 电子含量的剧烈变化所引起的误差将更大, 相对于厘米级的雷达高度计测高精度不可接受^[2]。

实时跟踪监测的电离层双频校正算法是目前最有效方法, 对于双频高度计可以直接采用该方法校正电离层延迟引起的测高误差^[3]。正因如此, IGS (International GPS Service) 于 1998 年开始, 采用双频算法连续发布 GIM (Global Ionosphere Map) 数据^[4-9], 该数据为不同位置、不同时间 GPS 卫星到地面路径上的电子总含量值, 其空间分辨率 (经纬度) 为 $5^\circ\times 2.5^\circ$ 、时间分辨率为 2 h ^[10]。1998 年, Mannucci 等^[7]通过 GIM 数据获得了 GPS 微波信号的电离层延迟值, 然而, GIM

数据是基于 20 000 km 的 GPS 双频信号获得。尽管在 2010 年 Jee 等^[11]将 GIM 模型应用于 Jason 系列高度计, 但由于 Jason 高度计的轨道高度仅有 1 336 km, 将 GIM 校正值直接用于高度计难免会存在过量使用电离层延迟带来的误差^[12]。

目前的双频雷达高度计发布的电离层延迟值均有双频 (Dual-frequency, DF) 校正值和未经高度修正的 GIM 校正值。雷达高度计双频校正法利用其自身发射两个不同频率信号, 通过两个频率上的实际观测距离, 完成电离层误差校正, 具有实时性好、精度高的特点^[13]。而对于我国即将发射的单频三维成像高度计 (Ku 波段), 不能使用电离层双频算法, 采用 GIM 模型算法是选择之一。因此, 有必要研究 GIM 校正值误差进而对其进行修正, 为单频高度计的电离层延迟校正建立准确的 GIM 校正算法。

本论文采用 Jason-2 GDR (Geophysical Data Re-

收稿日期: 2018-05-30; 修订日期: 2018-11-02。

基金项目: 海洋环境安全保障重点专项“三维成像雷达高度计海洋信息提取技术及应用”(2016YFC1401004)。

作者简介: 黄霞凤 (1993—), 女, 安徽省黄山市人, 主要从事海洋遥感方面研究。E-mail: huangxiafeng@stu.ouc.edu.cn

* 通信作者: 苗洪利 (1964—), 男, 山东省青岛市人, 教授, 主要从事海洋遥感方面研究。E-mail: oumhl@ouc.edu.cn

cords) 2015 年全年数据集, 由于太平洋海域辽阔, 受陆地影响较少, 故本文针对太平洋海域电离层 DF 校正值和 GIM 校正值得开展对比研究, 并使用梯度下降法建立不同季度、不同纬度的 GIM 修正方程。将修正方程应用于 Jason-2 GDR 2016 年全年的 GIM 值修正, 并对结果进行分析。

2 数据集

本论文选取 2015 年 Jason-2 高度计全年共 38 个周期的数据作为差异分析及建立修正方程; 选取 2016 年 Jason-2 高度计全年共 37 个周期的数据作为修正方程的应用及检验。提取各个周期波段的时间、经度、纬度、GIM 值和 DF 值, 剔除 GIM 值和 DF 值 $-40 \sim 0$ cm 范围之外的异常数据, 筛选出太平洋区域(纬度 $60^{\circ}\text{S} \sim 60^{\circ}\text{N}$; 经度 $150^{\circ}\text{W} \sim 180^{\circ}$, $120^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}$)的数据。

3 DF 与 GIM 差异分析

3.1 太平洋全域全年差异分析

对筛选出的 2015 年太平洋全域数据进行 DF 值与 GIM 值统计分析, 为便于分析说明, 本文将电离层校正值得取绝对值。DF 值与 GIM 值的散点分布如图 1 所示, DF 与 GIM 差值分布如图 2 所示, 统计结果见表 1, 其中 M 表示平均值, S 表示标准差。

从图 1、图 2 和表 1 可以看出: DF 值与 GIM 值整体呈现正线性相关, 二者的平均值和标准差基本接近, 但 GIM 值要大于 DF 值, 平均高出 0.73 cm。

3.2 不同纬度和不同季度差异分析

由于电离层与纬度区域和时间均有关, 将 2015 年

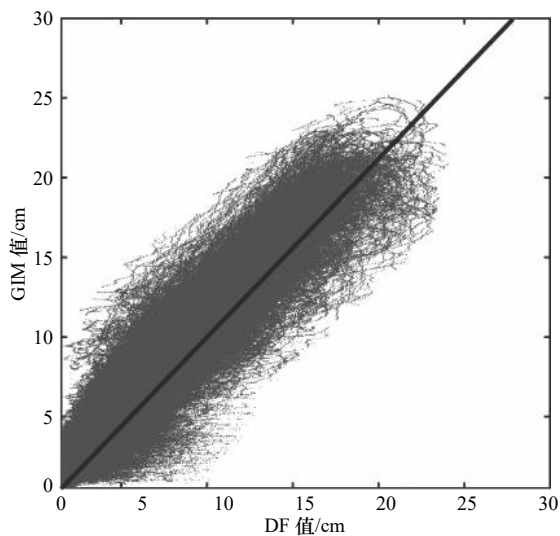


图 1 太平洋区域 DF 值和 GIM 值散点图

Fig. 1 The DF and GIM scatter plots for the Pacific Ocean

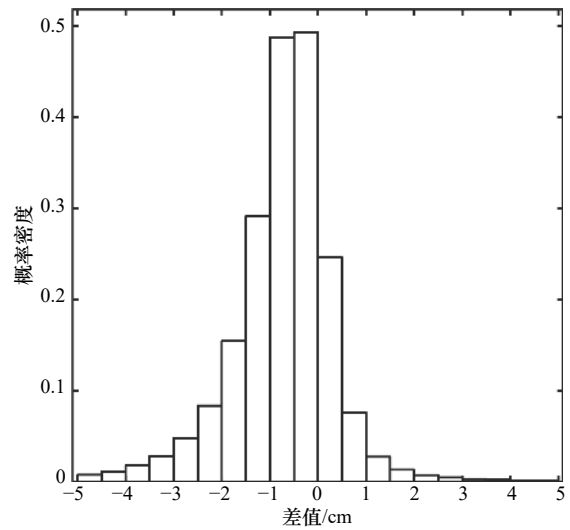


图 2 太平洋区域 DF 与 GIM 差值概率密度分布

Fig. 2 Distribution of the probability density between DF and GIM in the Pacific Ocean

表 1 太平洋全域、全年 DF 值与 GIM 值的统计结果

Tab. 1 The overall of the Pacific Ocean and annual statistical result of DF and GIM

M_{DF}/cm	S_{DF}/cm	M_{GIM}/cm	S_{GIM}/cm	$M_{(DF-GIM)}/\text{cm}$	$S_{(DF-GIM)}/\text{cm}$
4.73	3.45	5.46	3.79	-0.73	1.04

太平洋全域数据分北中纬($20^{\circ} \sim 60^{\circ}\text{N}$)、低纬度($20^{\circ}\text{S} \sim 20^{\circ}\text{N}$)和南中纬($20^{\circ} \sim 60^{\circ}\text{S}$) 3 个区域, 同时全年分为 4 个季度, 即 1-3 月为第 1 季度、4-6 月为第 2 季度、7-9 月为第 3 季度、10-12 月为第 4 季度。将全域、全年数据划分为 12 个数据集。统计不同纬度区域及不同季度 DF 值和 GIM 值及差值的平均值(M)和标准差(S)。结果如表 2 所示, DF 与 GIM 差值分布如图 3 所示。

表 2 不同季度及不同区域 DF 值与 GIM 值统计结果

Tab. 2 The statistics of DF and GIM in different quarters and different regions

区域	季度	M_{DF}/cm	S_{DF}/cm	M_{GIM}/cm	S_{GIM}/cm	$M_{(DF-GIM)}/\text{cm}$	$S_{(DF-GIM)}/\text{cm}$
北中纬	1	3.61	2.87	4.45	3.19	-0.84	0.88
	2	5.19	2.64	6.18	2.91	-0.99	0.92
	3	3.43	1.70	4.01	1.87	-0.58	0.77
	4	2.52	1.74	2.97	1.93	-0.45	0.72
低纬度	1	8.73	5.41	9.81	5.74	-1.08	1.48
	2	7.70	4.35	9.01	4.64	-1.31	1.37
	3	5.27	2.88	6.26	3.22	-0.99	1.08
	4	6.20	3.80	6.91	4.05	-0.71	1.21
南中纬	1	5.62	2.32	6.35	2.56	-0.73	0.99
	2	3.15	1.66	3.65	1.95	-0.51	0.82
	3	2.29	1.15	2.55	1.37	-0.26	0.67
	4	4.14	1.63	4.60	1.84	-0.46	0.80

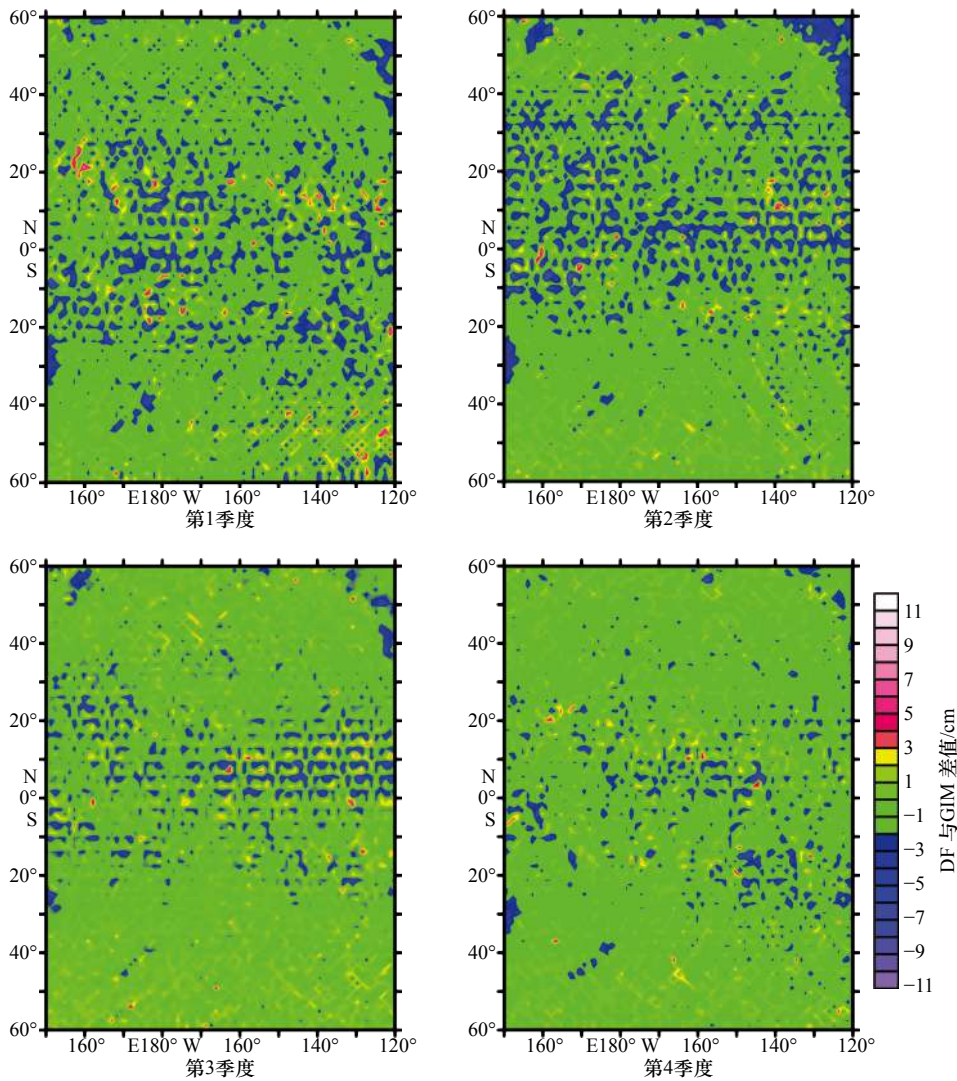


图3 不同季度下DF与GIM差值分布

Fig. 3 Distribution of DF and GIM difference in different quarters

根据表2和图3的分析,每个季节和每个纬度区域均表现出GIM值大于DF值,但差值的分布与季度和纬度有关。从季度角度的变化可以看出,无论是哪一个纬度区域,第2季DF值与GIM值的差异最大,其次是第1季,第4季的差异最小。从纬度角度的变化可以看出,无论是哪一个季节,赤道附近的低纬度区域表现出的DF值与GIM值差异最大,其次是北中纬区域,南中纬区域的差异最小。由于太阳的活动规律使得电离层呈现出固有的随时间和空间的变化特性,从而导致DF与GIM差异的时空特性。而DF是双频法获得的实时测量值,准确可靠。因此,有必要根据不同的季度和不同的纬度区域建立不同的GIM修正方程。

4 GIM修正方程的建立

从不同季度和不同纬度的DF与GIM的分布看,

呈现的均是相关系数 r 较高的线性关系,可知DF与GIM之间的关系可以表示为:

$$DF = \alpha \times GIM_{\text{uncorr}} + \beta, \quad (1)$$

式中, GIM_{uncorr} 为未修正的GIM值; α 和 β 为方程的系数。本文分别利用梯度下降法和最小二乘法拟合方程系数,通过对比各自的拟合优度,最终选择梯度下降法来确定方程系数。根据式(1),我们建立GIM的修正方程:

$$GIM_{\text{corr}} = \alpha \times GIM_{\text{uncorr}} + \beta. \quad (2)$$

利用公式(2)计算不同季度和不同纬度各自的相关系数 r ,计算结果如表3所示。

5 修正方程的应用

将建立的12组GIM修正方程应用于Jason-2的2016年全年数据,并计算各自修正前后的DF与GIM差值的平均值(M)和标准差(S),结果如表4所示,对

表 3 修正方程系数及 r 值

Tab. 3 The coefficient and r value of the correction equation

区域季度		α	β	r
北中纬	1	0.83	0.01	0.92
	2	0.84	-0.01	0.93
	3	0.85	-0.02	0.93
	4	0.85	-0.02	0.94
低纬度	1	0.89	0.01	0.95
	2	0.86	0.01	0.92
	3	0.84	-0.01	0.94
	4	0.90	-0.01	0.96
南中纬	1	0.88	-0.02	0.96
	2	0.84	-0.03	0.98
	3	0.86	-0.04	0.99
	4	0.88	-0.03	0.99

表 4 GIM 修正前后指标评价

Tab. 4 Evaluation of before and after GIM corrections

区域	季度	修正前		修正后	
		$M_{(DF-GIM)/cm}$	$S_{(DF-GIM)/cm}$	$M_{(DF-GIM)/cm}$	$S_{(DF-GIM)/cm}$
北中纬	1	-1.16	0.88	-0.47	0.80
	2	-1.36	0.93	-0.48	0.85
	3	-0.77	0.84	-0.04	0.76
	4	-0.59	0.84	-0.04	0.70
低纬度	1	-1.37	1.24	-0.53	1.19
	2	-1.43	1.36	-0.33	1.23
	3	-1.07	1.23	-0.11	1.14
	4	-0.89	1.31	-0.06	1.20
南中纬	1	-0.90	1.00	-0.30	0.92
	2	-0.81	0.99	-0.29	0.80
	3	-0.33	0.78	-0.12	0.68
	4	-0.56	1.02	-0.12	0.91

应不同季度差值修正前后概率分布, 如图 4 至图 7 所示。

从表 4 可以看到, 经过修正方程修正后的 GIM 与 DF 差值的平均绝对值和标准差与修正前相比, 均

有不同程度的减小。从图 4 至图 7 的差值分布也能直观地看出, 修正后的 GIM 值更接近双频校正值, 差值的分布更接近 0 值附近, 由于标准差的减小使得差

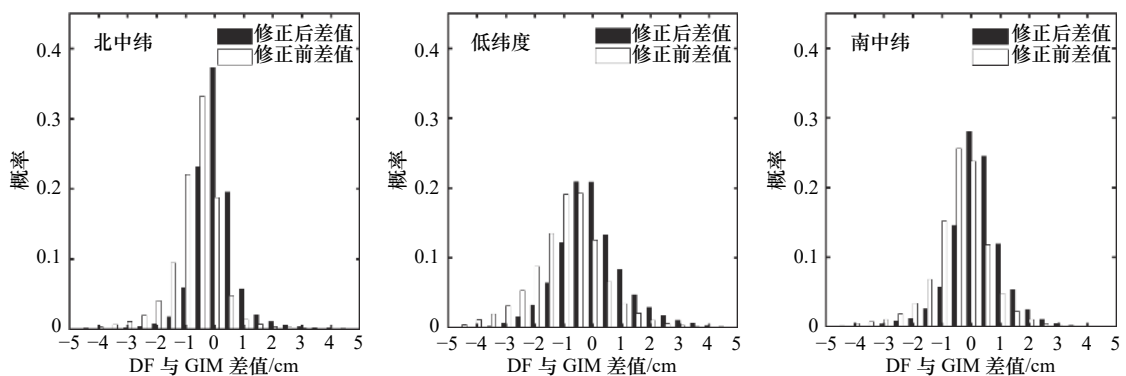


图 4 第 1 季度不同纬度修正前后 DF 与 GIM 差值分布

Fig. 4 Distribution of difference between DF and GIM before and after correction at different latitudes in the first quarter

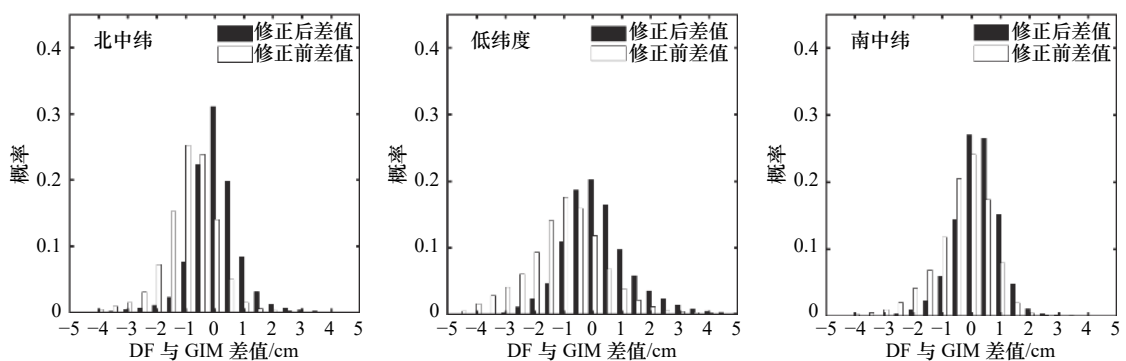


图 5 第 2 季度不同纬度修正前后 DF 与 GIM 差值分布

Fig. 5 Distribution of difference between DF and GIM before and after correction at different latitudes in the second quarter

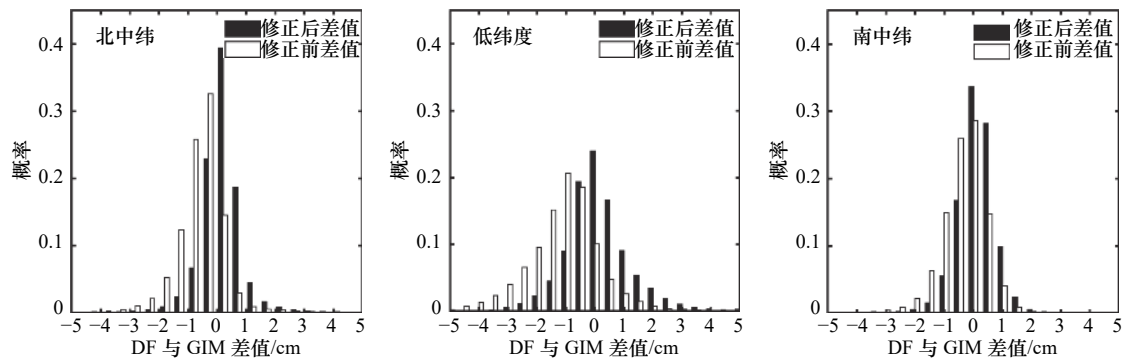


图6 第3季度不同纬度修正前后DF与GIM差值分布

Fig. 6 Distribution of difference between DF and GIM before and after correction at different latitudes in the third quarter

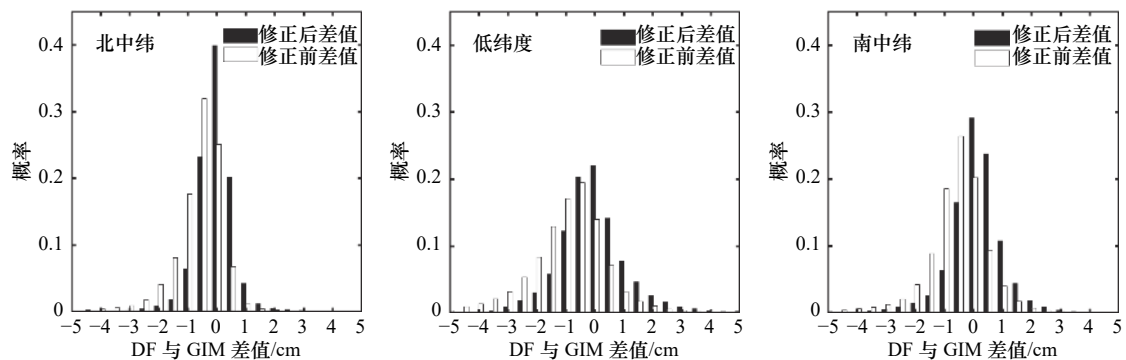


图7 第4季度不同纬度修正前后DF与GIM差值分布

Fig. 7 Distribution of DF and GIM differences before and after correction at different latitudes in the fourth quarter

值的分布更集中。

电离层具有年周期变化特点,针对同一高度计,在不同年份中DF值和GIM值具有相对稳定性。为了检验修正方程的适用性,对2009–2014年Jason-2的GIM数据分别进行修正,结果表明,修正方程在各年份中均具有良好的适用性。

6 小结

通过对比Jason-2高度计2015年全年38个周期数据的电离层双频校正值和GIM校正值,表明GIM平均绝对值普遍高于双频校正值,说明来自GPS卫星高度(20 200 km)的GIM值由于比Jason-2的轨道高度(1 336 km)高的多,导致过高估计了电离层路

径延迟。由于电离层变化与季节和区域有关,使得DF和GIM值均有季节和区域性变化特点,而DF测量值是实时观测,其测量误差不受季节和区域变化影响,但二者的差值表现出季节和区域性变化,说明需要对GIM分季度分纬度进行修正。根据不同季度、不同纬度区域的不同差异特征,分别建立了不同的GIM修正方程。将所建方程应用于Jason-2高度计2016年数据,通过对GIM修正前后的对比分析,表明修正方程有效,且在各年份中均具有良好的适用性,修正结果更接近电离层双频校正值。在与Jason-2同等高度的单频高度计不能使用电离层双频校正算法的情况下,可以利用不同季度和不同纬度区域的修正方程对GIM值进行修正以达到双频校正值的精度水平。

参考文献:

- [1] 张有广,贾永君,范陈清,等.海洋二号卫星雷达高度计测高误差校正算法及验证[J].*中国工程科学*,2013,15(7):53–61.
Zhang Youguang, Jia Yongjun, Fan Chenqing, et al. HY-2A satellite radar altimeter error correction algorithm and verification[J]. *Engineering Science*, 2013, 15(7): 53–61.
- [2] 张婷,张杰,崔廷伟,等.卫星高度计电离层校正模型比较分析[J].*遥感技术与应用*,2012,27(4):511–516.
Zhang Ting, Zhang Jie, Cui Tingwei, et al. Analysis of the ionosphere correct model for the satellite altimeter[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(4): 511–516.
- [3] 李子申,王宁波,李敏,等.国际GNSS服务组织全球电离层TEC格网精度评估与分析[J].*地球物理学报*,2017,60(10):3718–3729.
Li Zishen, Wang Ningbo, Li Min, et al. Evaluation and analysis of the global ionospheric TEC map in the frame of international GNSS

- services[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(10): 3718–3729.
- [4] Feltens J, Schaer S. IGS products for the ionosphere[C]//Proceeding of IGS 1998 Analysis Center Workshop, ESOC. Darmstadt, Germany, 1998: 225–232.
- [5] Schaer S. GNSS ionosphere analysis at CODE[C]//2004 IGS Workshop. Berne, Switzerland, 2014.
- [6] Feltens J, Schaer S. IGS products for the ionosphere, IGS position paper[C]//Proceedings of the IGS Analysis Centers Workshop. Darmstadt, Germany: ESOC, 1998.
- [7] Mannucci A J, Wilson B D, Yuan D N, et al. A global mapping technique for GPS - derived ionospheric total electron content measurements[J]. *Radio Science*, 1998, 33(3): 565–582.
- [8] Hernández-Pajares M, Juan J M, Sanz J. New approaches in global ionospheric determination using ground GPS data[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1999, 61(16): 1237–1247.
- [9] Feltens J. IGS ionosphere models comparison[R]. JPL Ionosphere Workshop. Pasadena, CA: JPL Ionosphere Workshop, 1998.
- [10] 余涛, 万卫星, 刘立波, 等. 利用IGS数据分析全球TEC的周年和半年变化特性[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(4): 943–949.
Yu Tao, Wan Weixing, Liu Libo, et al. Using IGS data to analysis the global TEC annual and semiannual variation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(4): 943–949.
- [11] Jee G, Lee H, Kim Y H, et al. Assessment of GPS global ionosphere maps (GIM) by comparison between CODE GIM and Topex/Jason TEC data: Ionospheric perspective[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(A10): A10319.
- [12] 金涛勇, 胡敏章, 蒋涛, 等. 卫星测高资料的电离层延迟改正交叉检验与误差分析[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2012, 37(6): 658–661.
Jin Taoyong, Hu Minzhang, Jiang Tao, et al. Cross-calibration and errors analysis of ionosphere correction in satellite altimetry[J]. *Ucomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(6): 658–661.
- [13] Imel D A. Evaluation of the TOPEX/POSEIDON dual-frequency ionosphere correction[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C12): 24895–24906.

Analysis and correction of GIM error about Jason-2 altimeter

Huang Xiaofeng¹, Miao Hongli¹, Miao Xiangying¹, Xue Wenwen¹

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

Abstract: Based on the ionospheric correction data of Global Ionospheric Map (GIM) and dual-frequency, extracting the Pacific Ocean dataset from the Jason-2 Altimeter's Geophysical Data Set (GDR) including 38-period in 2015. The dataset is divided into small twelve cell according to the features of ionosphere over seasons and in latitude. The result shows that there is a significant difference between the GIM and the dual-frequency correction value, and the GIM correction value is generally higher than the dual-frequency correction value, indicating that GIM overestimates the ionosphere path delay, also, the difference between the GIM and the dual-frequency is related to the season and latitude. Applying the modified equation to the 2016 Jason-2 annual data, the corrected GIM value is very close to the dual-frequency correction value, and the applicability of the modified equation remains the same over time. In the case where the single-frequency altimeter cannot use the ionospheric dual-frequency correction algorithm, the GIM value of the altimeter of the same height can be corrected by using the correction equations of different quarters and different latitude regions to achieve the accuracy level of the dual-frequency correction value.

Key words: radar altimeter; ionospheric path delay; dual-frequency correction algorithm; global ionospheric map