

海洋二号卫星雷达高度计测高误差校正算法及验证

张有广¹, 贾永君¹, 范陈清², 张杰², 林明森¹

(1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061)

[摘要] 影响星载卫星雷达高度计测高精度的因素很多, 其中大气干对流层延迟、大气湿对流层延迟、大气逆压延迟、电离层延迟以及海况偏差直接影响海表面高度计算精度。本研究开展了海洋二号卫星雷达高度计上述误差修正算法研究, 并利用国外较为成熟的 Jason-1/2 和 Topex/Poseidon(T/P) 卫星雷达高度计数据产品对海洋二号卫星雷达高度计使用的误差校正算法进行验证。结果表明, 海洋二号卫星雷达高度计数据处理时使用的误差校正算法均可满足精度要求。

[关键词] 测高误差校正; 海洋二号卫星雷达高度计

[中图分类号] TP722 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)07-0053-09

1 前言

影响海洋二号卫星雷达高度计测高精度的因素很多, 主要包括卫星雷达高度计测高涉及的干湿对流层路径延迟、电离层路径延迟、海况偏差、大气逆压等误差。根据测量原理

海表面高度=轨道高度-校正后测量距离 (1)

校正后测量距离=实际测量距离+湿对流层延迟修正+干对流层延迟修正+大气逆压延迟修正+电离层误差修正+海况偏差修正 (2)

海洋二号卫星雷达高度计是我国首颗星载高度计, 没有成熟的误差校正算法可以借鉴。本研究借鉴国外同类高度计误差的相关校正算法, 开展海洋二号卫星雷达高度计上述要素校正算法研究, 并利用 Jason-1/2 和 Topex/Poseidon(T/P) 卫星雷达高度计产品进行验证。

2 大气延迟校正算法

2.1 干对流层延迟校正

2.1.1 海洋二号卫星雷达高度计干对流层延迟校正算法

雷达高度计发射的电磁波信号要穿过地球大气层, 由于大气层折射现象的存在, 使得电磁波的实际传播速度会小于真空中的光速值, 因此获得的高度计测量值总会比真实值大。

干对流层层路径延迟量^[1]

$$PD_{dry} = 0.2277 P_0 (1 + 0.0026 \cos 2\varphi) \quad (3)$$

式(3)中, PD_{dry} 的单位为厘米; P_0 为海面大气压 (SLP), mbar (1 bar=10 000 Pa); φ 为星下点地面纬度。

海面压强数据采用美国国家环境预报中心 (NCEP) 提供的压强数据。该数据为一天4次 (0、6、12、18 UTC (协调世界时)), $1^\circ \times 1^\circ$ 网格化全球数据, 可通过空间插值获得与高度计时空匹配的数据。

2.1.2 计算结果与 Jason-2 产品比较

基于 Jason-2 的 Cycle114 数据, 得到干对流层路径延迟校正算法计算值与 Jason-2 地球物理数据 (GDR) 数据干对流层校正值的比较结果, 如表1及图1和图2所示。

[收稿日期] 2013-04-22

[基金项目] 海洋公益项目(201105032, 201305032)

[作者简介] 贾永君(1981—), 男, 内蒙古清水河县人, 助理研究员, 博士, 主要从事雷达高度计数据处理研究; E-mail: jia Yongjun@mail.nsoas.gov.cn

表1 干对流层校正算法计算结果与 Jason-2 GDR 数据干对流层校正值比对结果

Table 1 Comparison of the dry atmospheric troposphere between the computed results and the Jason-2 GDR

参数	最大偏差	最小偏差	平均绝对误差	RMS
干对流层校正	22.81	0.00	0.19	0.46

注:RMS为均方根误差

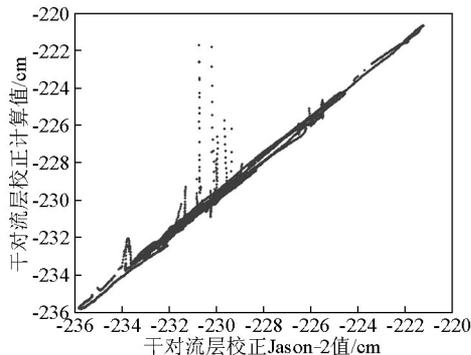


图1 干对流层校正计算结果与 Jason-2 数据比较散点图(10 000点)

Fig.1 Scatter diagram of the comparison of the dry atmospheric troposphere between the computed results and the Jason-2 (10 000 points)

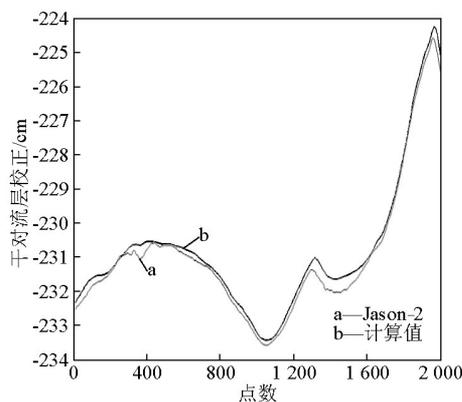


图2 单 pass 干对流层校正计算值与 Jason-2 GDR 数据干对流层校正值比较图(2 000点)

Fig.2 Comparison of the dry atmospheric troposphere between the computed results and the Jason-2 GDR for a single pass (2 000 points)

2.2 湿对流层延迟校正

2.2.1 海洋二号卫星雷达高度计湿对流层延迟校正算法

大气湿对流层延迟校正主要有两种方法:第一种是采用校正微波辐射计测得的亮温,根据亮温与

路径延迟的转换关系进行校正;第二种方法是基于当地气压,利用校正模型计算得到。但不管用哪种方法,湿对流层校正算法是相同的。

海洋二号校正微波辐射计的频率为 18.7 GHz、23.8 GHz 和 37 GHz,湿对流层路径延迟可以通过测量临近 22.235 GHz 水汽线的亮温计算得到,该部分内容为校正微波辐射计数据处理内容,本文不再赘述。

湿对流层路径延迟包括两部分:水蒸气导致的路径延迟和云液态水导致的路径延迟。水蒸气导致的路径^[2]为

$$PD_V = 1.763 \times 10^{-3} \int_0^H (\rho_V/T) dz \quad (4)$$

云液态水导致的路径延迟为^[2]

$$PD_L = 1.6L_z = 1.6 \int_0^H \rho_L(z) dz \quad (5)$$

总的湿对流层距离延迟为^[3]

$$PD_W = PD_L + PD_V \quad (6)$$

式(4)~(6)中, PD_V 、 PD_L 、 PD_W 分别为水蒸气、云中液态水和总的路径延迟, cm; ρ_V 、 ρ_L 、 T 分别为水蒸气、云中液态水的密度剖面 and 大气温度剖面数据, $g \cdot cm^{-3}$ 、 $g \cdot cm^{-3}$ 、K; H 为卫星高度, cm。

使用的数据为 NCEP 提供的 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格化位势、温度、相对湿度剖面数据和云液态水含量数据通过空间插值得到高度计星下点位置的相应数据。为保证时间上的相关性,选择与卫星过境时间最接近的 NCEP 数据进行计算。

其中位势剖面数据转化为卫星到海面的高度,温度和相对湿度剖面数据用下式转化为水蒸气密度剖面数据^[3]

$$\rho_V = 1.739 \times 10^9 \times RH \times \theta^5 \times \exp(-22.64\theta) \quad (7)$$

式(7)中, RH 为相对湿度; $\theta = 300/T$ 。

2.2.2 计算结果与 Jason-2 产品比较

基于 Jason-2 的 Cycle114 数据,得到模型湿对流层路径延迟校正算法计算值与 Jason-2 GDR 数据模型湿对流层校正值的比较结果,如表2、图3和图4所示。

表2 湿对流层校正算法计算值与 Jason-2 GDR 数据中湿对流层校正值比较结果

Table 2 Comparison of the wet atmospheric troposphere between the computed results and the Jason-2 GDR

参数	最大偏差	最小偏差	平均绝对误差	RMS
湿对流层校正	10.18	0.00	1.08	1.42

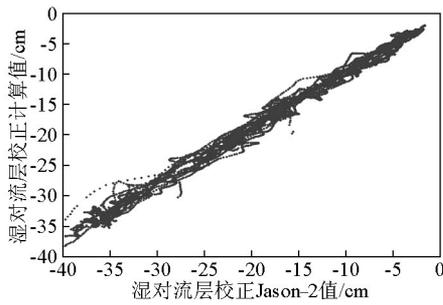


图3 湿对流层校正计算值与 Jason-2 数据湿对流层校正比较散点图(10 000 点)

Fig.3 Scatter diagram of the comparison of the wet atmospheric troposphere between the computed results and the Jason-2 (10 000 points)

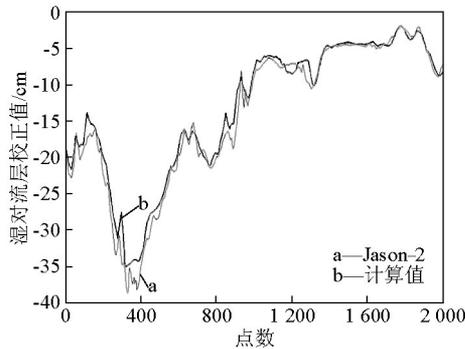


图4 单 pass 模型湿对流层校正计算值与 Jason-2 数据湿对流层校正比较图(2 000 点)

Fig.4 Comparison of the wet atmospheric troposphere between the computed results and the Jason-2 GDR for a single pass (2 000 points)

2.3 大气逆压延迟校正算法

2.3.1 海洋二号卫星雷达高度计大气逆压延迟校正算法

海洋二号卫星雷达高度计大气逆压延迟校正采用一个与海面气压和全球海面平均气压有关的模型方法进行校正,即大气逆压校正量^[4]

$$IB = -\frac{1}{\rho_w g}(p_a - \bar{p}_a) = -0.9948(p_a - \bar{p}_a) \quad (8)$$

式(8)中,IB的单位为厘米; ρ_w 为海水密度,取值 1.025 g cm^{-3} ; g 为重力加速度,取值为 $980.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$; p_a 为海面大气压(SLP),mbar; \bar{p}_a 为加权的当前Cycle的全球海面平均气压即 $\bar{p}_a = 0.5 \times \bar{p}_c + 0.5 \times 1013.3$, mbar。

2.3.2 计算结果与 Jason-2 产品比较

基于 Jason-2 的 Cycle114 数据,得到大气逆压校正算法计算值与 Jason-2 GDR 数据大气逆压校正值的比较结果如表3及图5和图6所示。

表3 大气逆压校正计算值与 Jason-2 数据比对结果

Table 3 Comparison of the invert barometry correction between the computed results and the Jason-2 GDR

参数	最大偏差	最小偏差	平均绝对误差	RMS
大气逆压校正	99.29	0.00	0.87	1.93

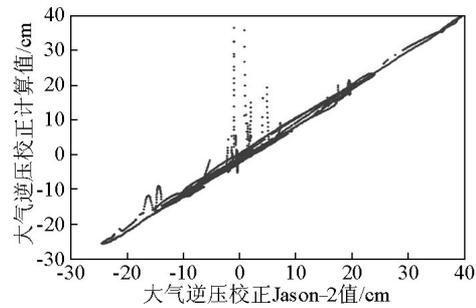


图5 大气逆压校正计算值与 Jason-2 数据比较散点图(10 000 点)

Fig.5 Scatter diagram of the comparison of the invert barometry correction between the computed results and the Jason-2 (10 000 points)

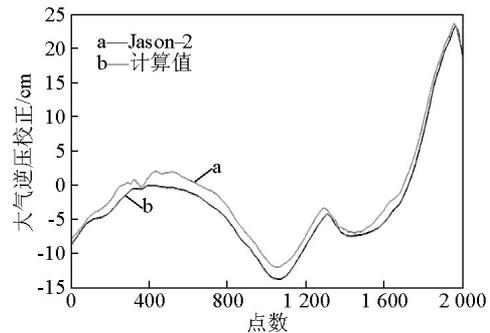


图6 单 pass 大气逆压校正计算结果与 Jason-2 数据比较图(2 000 点)

Fig.6 Comparison of the invert barometry correction between the computed results and the Jason-2 GDR for a single pass (2 000 points)

3 电离层路径延迟校正算法

3.1 双频高度计误差修正

电磁波经过电离层时会发生折射,大气中的电离层折射是由与自由电子有关的上层大气介电特性决定的。电离层折射引起的误差范围通常为0.2~40 cm,需要对电离层路径延迟进行校正。海洋二号卫星雷达高度计电离层校正采用双频高度计方法。

设Ku波段和C波段的测量值分别为 h_{ku} 和 h_c ,则

$$\begin{cases} h_{ku} = h_0 + A_{ku} I f_{ku}^2 + b_{ku} + c \\ h_c = h_0 + A_c I f_c^2 + b_c + c \end{cases} \quad (9)$$

海洋二号卫星雷达高度计工作在Ku波段和C波段,满足二次相位误差的限制条件,所以高阶频率的色散影响可以完全忽略。其中, A_{ku} 和 A_c 在忽略高阶频率色散影响时, $A=A_{ku}=A_c$,都等于 $40.3 \text{ m}^3/(\text{el} \cdot \text{s}^2)$, b_{ku} 和 b_c 为其他与频率相关的误差校正项(如电磁偏差);变量 c 为与频率无关的其他误差。设给定 b_{ku} 和 b_c ,可以利用 h_{ku} 和 h_c 来计算电离层误差和电离层总电子含量,通过上面公式可得

$$I = \frac{(h_c - h_{ku} + b_{ku} - b_c)}{A(\frac{f_{ku}^2}{f_c^2} - 1)} \quad (10)$$

令 $K=(f_{ku}/f_c)^2$,得

$$I = \frac{f_{ku}^2(h_c - h_{ku} + b_{ku} - b_c)}{A(K-1)} \quad (11)$$

$$\Delta h_{ion} = \frac{A}{f^2} I = \begin{cases} \frac{h_c - h_{ku} + b_{ku} - b_c}{K-1} & (\text{当} f=f_{ku} \text{时}) \\ \frac{K(h_c - h_{ku} + b_{ku} - b_c)}{K-1} & (\text{当} f=f_c \text{时}) \end{cases} \quad (12)$$

对海洋二号卫星雷达高度计, $f_{ku}=13.58 \text{ GHz}$ 、 $f_c=5.25 \text{ GHz}$,则 $K=6.69$ 。

电离层路径延迟精度还与电磁偏差计算精度有关,由于海况偏差也和频率有关,因此在电离层修正之前,需对两个频段的海况偏差作修正。

实测数据中,两个频段的海况偏差的差别约为波高的0.5%,当有效波高 $\text{SWH}=4 \text{ m}$ 时,此时由其引起的电离层校正项的误差约为3.5 mm,可以忽略不计。因此,电离层误差修正项 $\Delta h_{ion} = \frac{h_c - h_{ku}}{K-1} - \frac{b_c - b_{ku}}{K-1}$,在忽略电磁偏差时,可简化为

$$\Delta h_{ion} = \frac{h_c - h_{ku}}{K-1} \quad (13)$$

参考1994年Imel的结果,两波段测高偏差可假定为有 SWH 的函数^[5],可以看出,在 SWH 达8 m时,电离层校正项标准偏差为1.0 cm(见表4)。

表4 误差表
Table 4 Error table

SWH/m	$\sigma(\text{Ku})/\text{cm}$	$\sigma(\text{C})/\text{cm}$	$\sigma(\text{ion_Ku})/\text{cm}$
2	1.5	4.5	0.3
4	3.3	10	0.6
8	5.5	16.5	1.0

3.2 海洋二号卫星雷达高度计电离层修正算法验证

利用Jason-1 12个Cycle的Ku和C波段测高数据,计算出Ku波段双频校正值,结果与Jason-1 Ku波段双频校正值比较,取65 000个点得到散点图如图7所示。

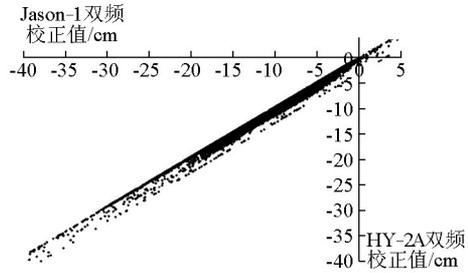


图7 Ku波段双频校正计算值与Jason-1 Ku波段双频校正值比较散点图

Fig.7 Scatter diagram of the comparison of the dual-frequency ionosphere delays between the Ku bands computed results and the Jason-1 of Ku bands

按照Jason-1的数据编辑准则,将电离层校正值小于-40 cm和大于4 cm的值作为异常数据剔除后,Ku波段双频校正值与Jason-1 Ku波段双频校正值的比较结果如表5所示。

表5 Ku波段双频校正计算值与Jason-1 Ku波段双频校正值之差

Table 5 The difference of the dual-frequency ionosphere delays between the Ku bands computed results and the Jason-1 of Ku bands

cm			
文件	时间	平均差值	标准偏差
Cycle001	2002年1月	0.362 7	0.274 0
Cycle004	2002年2月	0.313 9	0.274 0
Cycle007	2002年3月	0.370 0	0.274 6
Cycle010	2002年4月	0.328 2	0.242 8
Cycle013	2002年5月	0.329 1	0.275 1
Cycle016	2002年6月	0.259 8	0.255 7
Cycle019	2002年7月	0.294 7	0.286 5
Cycle023	2002年8月	0.297 2	0.248 4
Cycle026	2002年9月	0.361 3	0.305 7
Cycle028	2002年10月	0.304 5	0.249 2
Cycle032	2002年11月	0.320 5	0.252 5
Cycle035	2002年12月	0.321 1	0.279 7

4 海况偏差校正算法

4.1 海洋二号卫星雷达高度计海况偏差校正算法

电磁(EM)偏差、斜偏差和跟踪偏差统称为海况偏差(SSB),其典型值在-1%和-4% SWH之间。海况偏差在总RMS中所占的比重非常大。理论推导的SSB模型并不适用于雷达高度计的海况偏差校正。本研究采用Gaspar及Chelton描述的SSB模型算法^[6,7]。对高度计数据推导的相对于参考椭球面的海表面高度(SSH)、风速(U)和SWH进行交叉点差值,得到交叉点不符值 ΔSSH 、 ΔU 、 ΔSWH 。利用这三组数据进行线性回归得到最佳的海况偏差经验参数模型。最终利用海洋二号卫星高度计的有效波高和风速值求出SSB。

分别从T/P卫星高度计Cycle141-Cycle240和Jason-1卫星高度计Cycle041-Cycle140的数据中提取100个Cycle的交叉点数据,利用这些数据分别得到T/P高度计海况偏差参数模型和Jason-1海况偏差参数模型,并对这些模型进行性能评价确定出最佳的参数模型,最后对得到的最佳参数模型与Jason-1高度计GDR数据中的海况偏差校正正值进行对比,完成对海洋二号卫星雷达高度计海况偏差误差修正采用方法的评价。

海洋二号卫星雷达高度计海况偏差误差修正经验模型可以表示为如下形式

$$SSB = \sum_{i=1}^p a_i X_i + \varepsilon_{SSB} \quad (14)$$

式(14)中, ε_{SSB} 为海况偏差的非模型部分; a_i 为与SSB有关的 X_i 变量的参数; X_i 为有效波高、风速、波龄相关量($\rho = (rSWH/U^2)^{-0.5}$)或者它们的任意组

合。则式(14)变为

$$\Delta SSH'_m = \sum_{i=1}^p a_i \Delta X_i + \Delta \varepsilon_{SSB} + \Delta \eta + \Delta \varepsilon_{h_a} \quad (15)$$

将所有误差合为零平均噪声(ε)和偏差(a_0)的和,则可重新表示为

$$\Delta SSH'_m = \sum_{i=0}^p a_i \Delta X_i + \varepsilon \quad (16)$$

式(16)中, ΔX_0 假定为单位变量。那么此问题成为一个典型的多元线性回归问题。给定 $(\Delta SSH'_m, \Delta X_i)$ 的若干个观测值,参数的标准线性最小二乘估计为

$$\hat{a} = (\Delta X^T \Delta X)^{-1} \Delta X^T \Delta SSH'_m \quad (17)$$

如果 ΔX 和 ε 不相关,则估计量无偏。

根据实际情况将经验模型定为有效波高和风速以及这两个变量的各种组合形成的泰勒展开式。根据实际情况把展开式限制在二次。得到如下形式的经验算法模型

$$SSB_m/SWH = a_1 + a_2 SWH + a_3 U + a_4 SWH^2 + a_5 U^2 + a_6 SWH \cdot U \quad (18)$$

式(18)中, SSB_m/SWH 为相对海况偏差,各组参数模型保留常数项 a_1 ,可以得到1个常数模型,5个双参数模型,10个三参数模型,10个四参数模型,5个五参数模型,1个六参数模型,共计6组32种形式。

4.2 海洋二号卫星雷达高度计海况偏差校正算法模型性能评价和选择

利用100个Cycle高度计数据对32个经验模型进行线性回归得出各个模型的参数 a_i 之后即得出经验模型的具体形式。对各模型进行性能分析,确定最终的经验模型。利用Jason-1和T/P高度计数据得到的四参数模型的参数分别如表6和表7所示。

表6 Jason-1高度计数据得到的四参数模型的参数

Table 6 The parameters of the four parameters model from the Jason-1 altimeter data

模型	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
1234	0.047 122	-0.033 459	-0.003 652	0.000 074	0.000 446	—	—
1235	0.047 485	-0.048 718	0.001 832	-0.000 961	—	0.000 049	—
1236	0.046 807	-0.045 936	0.000 37	-0.000 478	—	—	0.000 119
1245	0.047 092	-0.032 836	-0.003 79	—	0.000 451	0.000 006	—
1246	0.047 012	-0.032 528	-0.003 854	—	0.000 433	—	0.000 024
1256	0.047 051	-0.054 737	0.002	—	—	0.000 006	0
1345	0.047 493	-0.042 478	—	-0.000 936	0.000 154	0.000 048	—
1346	0.046 901	-0.045 905	—	-0.000 324	0.000 08	—	0.000 085
1356	0.047 079	-0.039 914	—	-0.001 141	—	0.000 034	0.000 114
1456	0.047 273	-0.047 608	—	—	0.000 215	0.000 016	-0.000 047

表7 T/P 高度计数据得到的四参数模型的参数

Table 7 The parameters of the four parameters model from the T/P altimeter data

模型	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
1234	0.034 081	-0.069 164	0.006 886	0.000 063	-0.000 142	—	—
1235	0.034 755	-0.050 911	0.004 309	-0.001 305	—	0.000 067	—
1236	0.033 892	-0.055 071	0.003 873	-0.000 207	—	—	0.000 059
1245	0.033 886	-0.068 153	0.006 557	—	-0.000 13	0.000 008	—
1246	0.033 921	-0.068 084	0.006 656	—	-0.000 152	—	0.000 021
1256	0.034 636	-0.068 332	0.006 614	—	—	0.000 037	-0.000 128
1345	0.034 737	-0.031 877	—	-0.001 318	0.000 284	0.000 068	—
1346	0.033 759	-0.037 269	—	-0.000 332	0.000 22	—	0.000 089
1356	0.033 675	-0.025 795	—	-0.001 757	—	0.000 044	0.000 204
1456	0.034 457	-0.039 658	—	—	0.000 415	0.000 032	-0.000 101

对得到的参数模型按照残差与回归项 ΔU 和 ΔSWH 的相关系数,解释方差与模型方差的比值和模型计算海况偏差校正计算值与 Jason-1 高度计 GDR 数据中海况偏差校正值的偏差、RMS、相对 RMS 三个标准进行评价最终确定最优模型(见表8)。

求出模型残差最终求出残差与回归项 ΔU 和 ΔSWH 的相关系数,相关系数的绝对值越小则说明模型性能越好(见表9)。

可解释方差就是在进行 SSB 校正之前交叉点 SSH 不符值的方差与进行 SSB 补偿之后的方差之间的差值。可解释方差可以理解为交叉点 SSH 不符值的方差中 SSB 能够解释的部分。可解释方差反映了 SSB 模型的有效性。模型方差是利用高度计数据中的有效波高和风速值代入所求出的参数模型中计算得到的海况偏差计算值的方差。二者的比值越接近于 1 说明模型性能越好。

表8 Jason-1 高度计数据得到的四参数模型评价指标

Table 8 The four parameters model from the Jason-1 altimeter data

模型	残差与 U 相关系数(10^{-3})	残差与 SWH 相关系数(10^{-9})	相对 RMS	RMS	解释方差/模型方差
1234	1.8	-0.278 62	0.088	0.013 923	0.902 521
1235	9.3	-3.365 5	0.119 329	0.018 414	0.826 621
1236	1.02	1.188 2	0.085 43	0.012 423	0.868 176
1245	-4.0	4.156 5	0.090 588	0.013 772	0.892 161
1246	-0.853 2	9.268 3	0.088 634	0.013 706	0.894 715
1256	-3.1	-1.814 7	0.093 055	0.017 511	0.847 585
1345	9.4	-8.944 6	0.114 533	0.014 034	0.850 059
1346	8.7	-8.891 3	0.086 688	0.012 259	0.863 344
1356	12.9	-1.762 3	0.097 84	0.011 359	0.891 097
1456	-3.9	-0.029 45	0.096 749	0.012 697	0.853 736

表9 T/P 高度计数据得到的四参数模型评价指标

Table 9 The four parameters model from the T/P altimeter data

模型	残差与 U 相关系数(10^{-3})	残差与 SWH 相关系数(10^{-9})	相对 RMS	RMS	解释方差/模型方差
1234	-0.73	-1.109 2	0.134 65	0.021 406	0.559
1235	9.9	-0.822 77	0.175 855	0.019 745	0.613
1236	3.4	-1.58	0.134 405	0.015 098	0.651

(续表)

模型	残差与U相关系数(10^{-3})	残差与SWH相关系数(10^{-9})	相对RMS	RMS	解释方差/模型方差
1245	-12.7	-7.316 7	0.137 517	0.021 043	0.601
1246	-3.4	3.451 6	0.135 191	0.020 878	0.603
1256	-17.1	9.115 6	0.155 056	0.021 899	0.586
1345	7.3	-0.217 94	0.181 458	0.030 468	0.680
1346	3.4	4.213 6	0.140 345	0.025 637	0.731
1356	15.4	2.361 7	0.172 995	0.035 483	0.782
1456	-19.8	-0.995 78	0.155 875	0.027 145	0.697

从表8和表9可以得出Jason-1高度计数据和T/P高度计数据所得到参数模型中都是1236参数模型的模型性能最佳。式(19)和式(20)则分别表示最佳Jason-1数据得到的参数模型和T/P高度计数据得到的参数模型。

$$SSB = SWH(-0.045\ 936 + 0.000\ 37SWH - 0.000\ 478U + 0.000\ 119SWH \cdot U) \quad (19)$$

$$SSB = SWH(-0.055\ 071 + 0.003\ 873SWH - 0.000\ 207U + 0.000\ 059SWH \cdot U) \quad (20)$$

选取Cycle15-Cycle51的Jason-1高度计全年GDR数据,视Jason-1高度计GDR数据中的海况偏差校正值为真值,记为SSB-GDR,利用T/P模型得到的海况偏差计算值为SSB-TP,利用Jason-1模型得到的海况偏差计算值为SSB-Jason,对这3组数据进行比对(见图8)。

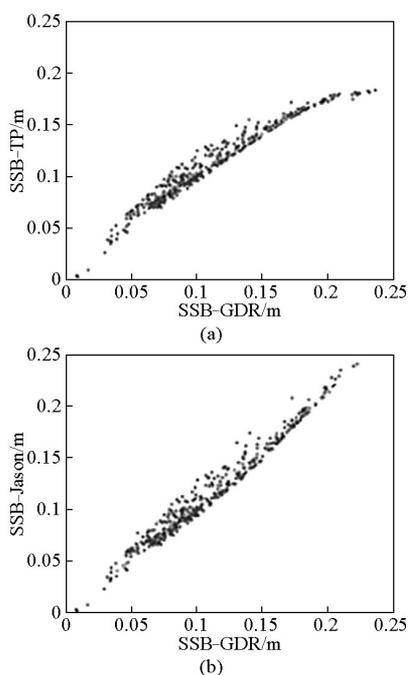


图8 海况偏差计算值与真值比对
Fig.8 Comparison of the sea state bias between the computed results and the true value

图8 a和b分别表示T/P高度计参数模型海况偏差计算值和Jason-1参数模型海况偏差计算值与Jason-1GDR数据中海况偏差校正值的关系,散点分布越接近直线 $y=x$ 则说明二者之符合度越好。图8中a、b两图说明T/P模型和Jason-1模型与真值的符合度比较好,但是Jason-1模型表现更佳。

图9表示了两个模型计算值之间的比对,二者在中小量级(小于0.15 m)时符合度良好。说明利用相同工作频率的两颗不同高度计的数据(Jason-1和T/P)所得到的参数模型具有一定的通用性,Jason-1模型只是略好一点。所以海洋二号卫星雷达高度计海况偏差校正算法采用的就是Jason-1模型。

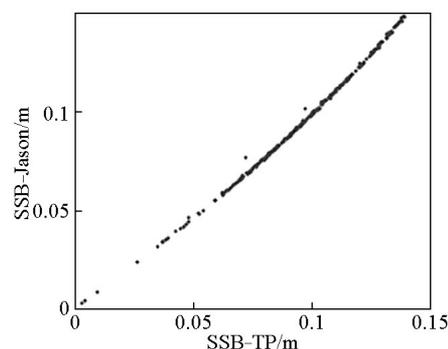


图9 T/P模型计算值与Jason-1模型计算值比对
Fig.9 Comparison between the T/P model computed results and the Jason-1 model computed results

4.3 海洋二号卫星雷达高度计海况偏差校正算法验证

选取Jason-1 Cycle355 pass033的GDR数据进行比较。得到单pass海况偏差校正值的变化趋势,如图10所示。其中,横坐标为数据点位顺序,纵坐标为海况偏差校正值。

选取Jason-2 Cycle114数据,Jason-2 GDR数据中的海况偏差校正值记为 SSB_{Jason} ,将GDR数据中

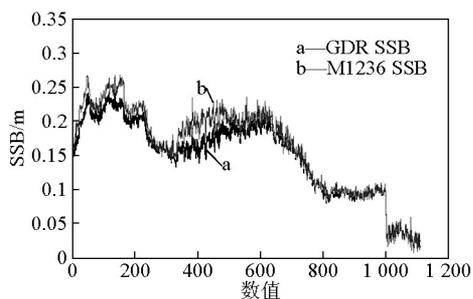


图10 Cycle355 pass033海况偏差值比较结果

Fig.10 Comparison of the sea state bias of Cycle355 pass033

的SWH和风速值(WSA)代入海洋二号卫星雷达高度计海况偏差误差校正模型中得到的海况偏差模型计算值记为SSB,对这两组数据进行比对。比较结果见表10和图11及图12。

表10 SSB计算值与Jason-2的GDR中SSB校正值比对结果

Table 10 Comparison of SSB between the computed result and the Jason-2 GDR

数据项	最大偏差	最小偏差	平均绝对误差	RMS
海况偏差	0.037 9	0	0.004 8	0.011 2

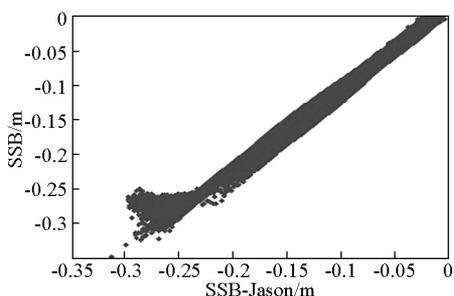


图11 海况偏差计算值与Jason-2数据中海况偏差校正值比较散点图

Fig.11 Scatter diagram comparison of SSB between the computed result and the Jason-2 GDR

5 结语

电离层、大气中干湿对流层、大气逆压及海况

偏差造成的海表面高度测量误差是卫星雷达高度计测高存在误差的重要原因,这种误差对高度计数据的分析应用产生很大的影响。本研究针对海洋二号卫星雷达高度计,开展了相关的误差校正算法研究,并利用Jason-1/2和T/P卫星雷达高度计产品对这些算法进行了验证。验证结果表明海洋二号卫星雷达高度计数据处理过程中使用的误差修正算法是正确的,可以达到预期目标。

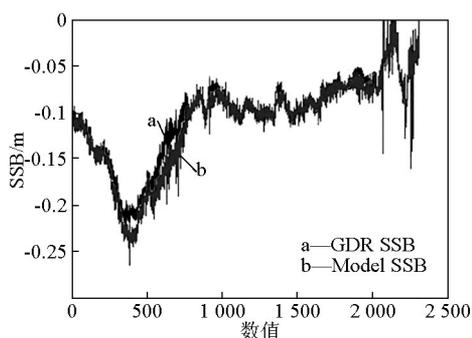


图12 单pass海况偏差计算值与Jason-2数据比较

Fig.12 Comparison of SSB between the computed result and the Jason-2 data for a single pass

参考文献

- [1] Fu L L, Anny Cazenave. Satellite Altimetry and Earth Sciences—A Handbook of Techniques and Applications[M]. San Diego: Academic Press, 2001.
- [2] Boudouris G. On the index of refraction of air the absorption and dispersion of centimeter waves by gasses[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1963, 67: 631-684.
- [3] Keihm S, V Zlotnlcki C Ruf. TOPEX microwave radiometer performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38: 1379-1386.
- [4] Hans J, Liebe. MPM-an atmospheric millimeter-wave propagation model[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1989, 10(6): 631-650.
- [5] Imel D A. Evaluation of the TOPEX/POSEIDON dual-frequency ionosphere correction[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 24895-24906.
- [6] Chelton D B, Schlax M G. The resolution capability of an irregularly sampled dataset: With application to GEOSAT altimeter data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1994, 11: 534-550.
- [7] Gaspar E, Ogor E, Le Traon, et al. Estimating the sea state bias of the TOPEX and Poseidon altimeters from crossover differences [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 24981-24994.

HY-2A satellite radar altimeter error correction algorithm and verification

Zhang Youguang¹, Jia Yongjun¹, Fan Chenqing²,
Zhang Jie², Lin Mingsen¹

(1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 2. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao, Shandong 266061, China)

[Abstract] There are many factors affecting the height accuracy of satellite radar altimeter. The dry troposphere delays, wet troposphere delays, invert barometer delays, ionosphere delays, and sea state bias influence the computational accuracy directly. The error correction algorithms for the HY-2A satellite radar altimeter were conducted in this research. And, these algorithms were verified using the more mature foreign satellite data such as Jason-1/2 and T/P. The results show that the HY-2A error correction algorithms can meet the accuracy requirements.

[Key words] altimeter error correction; HY-2A satellite radar altimeter

(上接 52 页)

In-orbit calibration and validation of atmospheric correction microwave radiometer on HY-2A satellite

Wang Zhenzhan^{1,2}, Zhang Dehai^{1,2}, Zhao Jin^{1,2}, Li Yun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, CAS, Beijing 100190, China; 2. National Space Science Center, CAS, Beijing 100190, China)

[Abstract] Atmospheric correction microwave radiometer (ACMR) is one of the main payloads for correcting atmospheric path delay of radar altimeter on HY-2A satellite. After discussion and analysis on thermal vacuum calibration method of ACMR, microwave transfer functions and related coefficients were given, especially nonlinear coefficients derived from the test for correcting nonlinear responds between the input of antenna temperature and the output of voltage at each channel of ACMR. Meanwhile, antenna pattern correction algorithms for removing the effects of side-lobe and cross-polarization were derived and their coefficients were used for in-orbit data processing. The calibrated antenna temperatures were compared with the similar space-borne microwave radiometer on Jason-1 and Jason-2 satellite (JMR), launched by the NASA-French Space Agency Ocean Surface Topography Mission. The results of comparison showed that the data from ACMR were well matched to those from Jason-1 and Jason-2.

[Key words] HY-2A; ACMR; calibration and validation