

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.04.014

基于卫星测高技术的浙江近海平均海面高模型建立

李 静¹, 吉渊明², 岳建平¹, 彭刚跃¹, 宋亚宏¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江省测绘科学技术研究院, 浙江 杭州 310012)

摘要: 利用 Jason-2 卫星与 SARAL/AltiKa 卫星的 Waveform 数据, 研究一种新的测高数据粗差剔除方法, 即剔除不在预定轨迹的海面高后, 参考拟合各 Pass 每个 Cycle 的海面高值, 对测高数据分段剔除粗差, 以提高近海卫星数据的可用性; 经过交叉点平差, 进一步削弱径向轨道误差和海平面时变信号; 采用“移去-恢复”法得到较高精度的离散海面高; 采用径向基函数法格网化离散海面高, 建立 2.5'×2.5' 格网分辨率的平均海面高模型; 将所得模型与验潮站提供的海面高比较, 均方根为 ±0.017 m, 与 MSS-CNES-CLS11 比较, 标准差为 ±0.070 m。研究结果表明, 采用本文方法建立的浙江近海平均海面高模型精度可靠。

关键词: 卫星测高技术; 粗差剔除; 浙江近海; 平均海面高模型; Jason-2 卫星; SARAL/AltiKa 卫星
中图分类号: P228 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)04-0356-05

Establishment of mean sea surface height model for Zhejiang coastal areas based on satellite altimetry technique

LI Jing¹, JI Yuanming², YUE Jianping¹, PENG Gangyue¹, SONG Yahong¹

(1. College of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Zhejiang Academy of Surveying and Mapping, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Based on the Waveform data from Jason-2 and SARAL/AltiKa satellites, a new method of eliminating the gross error of altimetry data was developed. By eliminating the sea surface height that was not in the predetermined trajectory, the gross error in each segment of altimetry data was eliminated according to the sea surface height in each cycle of each Pass file, in order to improve the usability of satellite data in coastal areas. Through crossover adjustment, the time-varying signals for the radial orbit error and sea level were further weakened. The discrete sea surface height with high accuracy, which was obtained with the remove-restore technique, was gridded using the radial basis function method. A mean sea surface height model with grid resolutions of 2.5'×2.5' was established. The root mean square error between the sea surface height data from the established model and the data from tidal stations is ±0.017 m, and the standard deviation between the established model and MSS-CNES-CLS11 was ±0.070 m. The results show that the established mean sea surface height model for Zhejiang coastal areas is reliable.

Key words: satellite altimetry technique; gross error elimination; Zhejiang coastal areas; mean sea surface height model; Jason-2 satellite; SARAL/AltiKa satellite

平均海面的确定是大地测量学和物理海洋学研究的重要内容。相对于参考椭球, 平均海面由大地水准面和海面地形两部分组成, 因而可以用来研究海域大地水准面、地球形状、重力场模型等问题^[1]。卫星测高技术以其能提供丰富海面高信息的特点, 在平均海面的研究中被广大学者所采用^[2-5]。在开阔的深海区域, 卫星测高数据受陆地、岛屿、水底地形起伏、地球物理和硬件响应等因素影响小, 而当卫星地面轨迹靠近海岸时, 其受陆地、海底、地球物理因素等影响, 导致测高数据含有较大的噪声。如何处理近海测高卫星数据, 成为计算高精度、高分辨率平均海面高模型的关键技术。

收稿日期: 2014-11-04

作者简介: 李静(1992—), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事卫星大地测量研究。E-mail: hhu_lj@sina.com

针对近海区域,一些研究者结合验潮站数据与全球平均海面高模型进行“移去-恢复”,本文利用 Jason-2 卫星与 SARAL/AltiKa 卫星的 Waveform 数据,根据浙江近海的测高数据特点,采用一种新的数据剔除方法,结合验潮站数据,研究建立浙江近海平均海面高模型。

1 研究区与数据

1.1 浙江海域概况

浙江海岸线总长 6400 余 km,居中国海岸线长省份首位。浙江海域面积 26 万 km^2 ,有沿海岛屿 3000 余个。面积大于 500 m^2 的海岛有 3061 个,是中国岛屿最多的省份。该区域岸长水深,可建万吨级以上泊位的深水岸线达 290.4 km(占全国数量的 1/3 以上),可建 10 万吨级以上泊位的深水岸线达 105.8 km^[6]。本文以领海基线为界,将向内一侧的水域视为近海研究区域。

1.2 测高数据

采用 AVISO 发布的 Waveform 数据进行计算,目前,该数据产品已具有较好的数据质量。Jason-2 卫星重复周期约 10 d,每运行一个周期为一个 Cycle,每个 Cycle 中包含 254 个 Pass 文件,文件中包含了卫星高度、测距、对流层改正、电离层改正、后向散射系数及风速等数据项^[7-8]。Jason-2 卫星的 Pass62 及 Pass240 弧段经过了研究区,选择数据自 2009 年 3 月至 2014 年 3 月。SARAL/AltiKa 是印度空间研究组织和法国国家太空研究中心共同合作、于 2013 年 2 月发射的用于海洋测量任务的卫星,该卫星重复周期为 35 d,每个 Cycle 中包含 1002 个 Pass 文件,同样包含卫星高度、测距、对流层改正、电离层改正、后向散射系数及风速等数据项^[9]。SARAL 卫星的 Pass92、Pass178、Pass277、Pass363、Pass636、Pass735、Pass821 及 Pass907 弧段经过研究区,对 Jason-2 卫星的地面轨迹起到了很好的补充作用,选择数据自 2013 年 3 月至 2014 年 3 月。为了在共线平均处理中能够更好地消除海平面变化信号,所选数据均为周年数据。卫星数据与验潮站数据分布合理,可满足计算要求。

2 数据分析及处理

2.1 数据分析

测高数据已进行包括湿对流层改正、干对流层改正、电离层改正、固体潮改正、极潮改正、海况改正、海潮改正、逆气压改正、风速改正等多项预处理。以 SARAL 卫星 Pass277 的 Cycle2 为例进行分析,图 1 为经过预处理的经度与海面高,图 2 为经过预处理的经度与纬度。

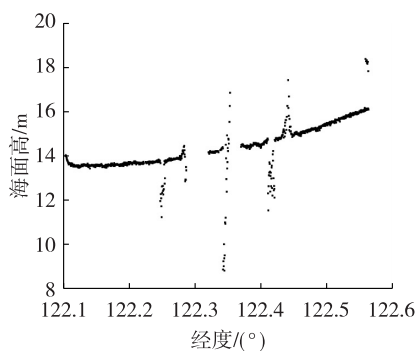


图 1 经预处理的经度与海面高

Fig. 1 Pretreated longitude and sea surface height

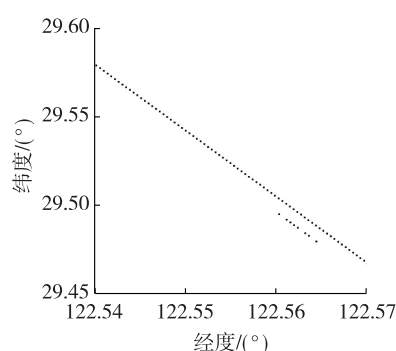


图 2 经预处理的经度与纬度

Fig. 2 Pretreated longitude and latitude

由图 1 可见,数据有隔断现象,产生该现象的原因是近海区域有岛礁,卫星经过岛礁与经过水域的数据编辑标准不同,本文提取的是水域数据,故产生不连续现象。图 3 中的海面高有明显粗差,产生该现象的原因是数据受陆地回波污染,这也与数据隔断处存在粗差相吻合。由于本研究区域范围较小,卫星在该区域的地面轨迹可视为直线,由图 2 可见,卫星地面轨迹存在偏差。

2.2 粗差剔除

基于以上分析,本文研究一种粗差剔除方法,以提高近海区域卫星测高数据的可用性。由于所涉及研究区域较小,卫星在该区域的地面轨迹可视为直线。对测高数据经纬度进行最小二乘拟合,剔除偏离拟合轨迹

一定距离的点,结果如图 3 所示。

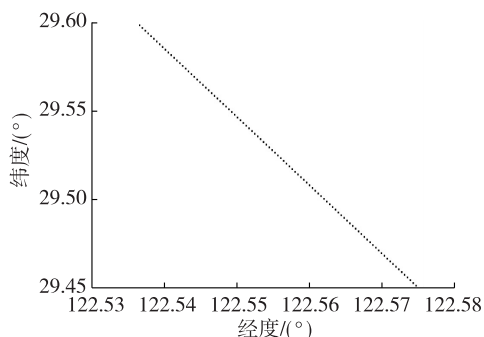


图 3 经修正的经度与纬度

Fig. 3 Corrected longitude and latitude

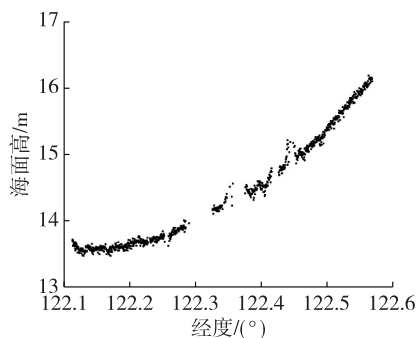


图 4 经修正的经度与海面高

Fig. 4 Corrected longitude and sea surface height

近海区域平均海面变化较为平缓,首先对 1 个 Cycle 的经度与海面高进行最小二乘拟合,剔除偏离 1 m 的海面高。由图 1 可见,数据隔断处存在粗差,故对 1 个 Cycle 分段最小二乘拟合,并剔除粗差值。具体如下:(a)相邻 2 点的经度差大于设定阈值时,进行分段。(b)参考对整个 Cycle 拟合时每段的海面高,插值出分段后每段起始、中间与结束处的海面高,并进行拟合。(c)对分段后的数据进行最小二乘拟合,求其与整体拟合时相同经度处海面高的偏差,对这些偏差值的绝对值求平均,若平均值大于 1 m 则以整体拟合为标准,剔除偏离 0.5 m 的海面高;否则以分段拟合为标准,剔除偏离 0.5 m 的海面高,结果如图 4 所示。由图 4 可直观看出,经过剔除粗差,提高了海面高的平滑性,表明上述方法有效。

对测高数据进行共线平均,可以削弱海面高的时变影响和大范围海洋学异常现象(如厄尔尼诺和拉尼娜现象)所引起的测高数据短波误差。交叉点不符值反映的是轨道径向误差,它的确定对交叉点平差至关重要,其精度主要由交叉点位置决定^[10-12]。本文采用基于快速排斥和跨立试验的计算机图形学方法来直接求解全弧段交叉点的精确位置。该方法避免了全球范围运用多项式拟合求解造成的误差,同时也解决了人为分段效率低的问题^[13]。表 1 为剔除粗差前后交叉点不符值(“—”代表该卫星未形成交叉点)。

由表 1 可见,在近海区域 $R_{MS} = 16.353$ m,显然存在粗差。经过粗差剔除, $R_{MS} = 0.485$ m,表明上述方法可以有效地剔除粗差,获得较高精度的海面高。

本文参考文献[14]进行测高数据交叉点平差。Jason-2 卫星与 Saral 卫星 R_{MS} 改正前为 0.041 m,改正后为 0 m; Saral 卫星与 Saral 卫星 R_{MS} 改正前为 0.485 m,改正后为 0.249 m。

2.3 “移去-恢复”法

“移去-恢复”法基本思路是:用卫星测高方法得到离散海面高,内插得到验潮站处的海面高值,并将其与验潮站处海面高值求差;将所得到的残差采用一定的方法进行拟合,得到卫星测高点处的海面高残差值;在拟合后的海面高残差值基础上,对海面高进行恢复。本文基于 150 个验潮站提供的平均海面高值,采用“移去-恢复”法,得到了浙江近海离散海面高值。

2.4 格网化

为获得较高的格网化精度,利用多种方法进行测高数据的格网化,并进行交叉验证,验证结果见表 2。

由表 2 可知,径向基函数法格网精度最好,均方根误差为 ± 0.017 m,且标准误差和标准差均为最小。故选择径向基函数对测高数据进行格网化,格网分辨率为 $2.5' \times 2.5'$ 。将浙江近海平均海面高绘制成等值线栅格图如图 5 所示。

3 精度评定

以本文建立的平均海面高模型插值出验潮站的平均海面

表 1 粗差剔除前后交叉点不符值 R_{MS}

Table 1 Crossover difference before and after gross error elimination R_{MS}

数据粗差处理	R_{MS}/m	
	Jason-2 卫星	Saral 卫星
剔除前	—	0.618
剔除后	—	0.041
剔除前	0.618	16.353
剔除后	0.041	0.485

表 2 交叉验证结果

Table 2 Cross-validation results

插值算法	标准误差	均方根/m	标准差/m
反距离加权法	0.001	± 0.037	± 0.037
径向基函数法	0.000	± 0.017	± 0.017
克里金插值法	0.001	± 0.018	± 0.018
最小曲率法	0.001	± 0.017	± 0.017

高进行验证,数据对比结果如表 3 所示。

表 3 模型数据与验潮站数据差值 Δ

Table 3 Difference between model data and tidal station data Δ m

站名	Δ	站名	Δ	站名	Δ	站名	Δ	站名	Δ
沙埕港	0.046	鳌江口	0.013	七里屿	-0.010	穿山港	-0.013	大麦屿	-0.025
沥港	0.023	头门岛	0.011	两头洞	-0.011	镇海	-0.016	海盐	-0.026
大门岛	0.023	石浦	0.011	金渔码头	-0.012	岑港	-0.016	旗门港	-0.029
洋沙山	0.021	浪岗山列岛	0.011	秦山码头	-0.012	洞头	-0.019	洞头东	-0.058
黄大岙	0.015	岱山	0.011	鳌头浦	-0.013	南汇咀	-0.021	嘉绍大桥北	-0.059
西码头港	0.015	松门角	0.010	龙湾	-0.013	清江	-0.022	鲜迭	-0.070
茅草山	0.013	定海小沙	0.010	镇海杨公山	-0.013	海礁	-0.024	石塘东	-0.143

由表 3 可知,本模型在验潮站处与验潮站的平均海面高差值中的平均值为-0.002 m,最大差值为 0.046 m,最小差值为-0.143 m,均方根为 ± 0.017 m,表明本模型精度可靠。牛轭港等 115 个站点差值绝对值在 0.010 m 以内,表中未予以显示。

以本文建立的平均海面高模型与国际上具有代表性的 CLS 系列的平均海面高模型对比。考虑到有些点的误差较大,将差值大于 3 倍 R_{MS} 的数据删除以后(剔除 0.33%),本文计算的浙江近海平均海面高模型与 MSS-CNES-CLS11 平均值差值为-0.003 m,均方根差值为 ± 0.070 m,标准差差值为 ± 0.070 m,证明本模型精度是可靠的。

4 结 语

通过分析测高数据在近海区域的特征,研究了一种新的数据粗差剔除方法,经粗差剔除提高近海卫星数据的可用性。经过交叉点平差,进一步削弱了径向轨道误差和海平面时变信号。采用“移去-恢复”法得到较高精度的离散海面高,采用径向基函数法格网化离散海面高,最终建立 2.5'×2.5'格网分辨率的平均海面高模型。将所得模型与验潮站提供的海面高比较,均方根为 ± 0.017 m;与 MSS-CNES-CLS11 比较,标准差为 ± 0.070 m。结果表明本模型正确,且精度可靠。

参考文献:

[1] 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.(LI Jiancheng, JIAN Weipin, ZHANG Lei. High resolution mean sea surface over China sea derived from multi-satellite altimeter data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(1): 40-45.(in Chinese))

[2] 姜卫平, 李建成. 联合多种测高数据确定全球平均海面 WHU2000 [J]. 科学通报, 2002, 47(15): 1187-1191. (JIANG Weipin, LI Jiancheng. Joint variety altimetry data to determine the average global sea level WHU2000 [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2002, 47(15): 1187-1191.(in Chinese))

[3] 李建成,陈俊勇,宁津生,等.地球重力场逼近理论与中国 2000 似大地水准面的确定[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003: 279-281.

[4] 金涛勇,李建成,邢乐林,等.多源卫星测高数据基准的统一研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(3): 92-95,99. (JIN Taoyong, LI Jiancheng, XING Lelin, et al. Research on datum unification of multi-satellite altimetric data[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008(3): 92-95+99.(in Chinese))

[5] 金涛勇, 李建成,姜卫平,等.基于多源卫星测高数据的新一代全球平均海面高模型[J]. 测绘学报, 2011. 40(6): 723-729. (JIN Taoyong, LI Jiancheng, JIANG Weipin, et al. The new generation of global mean sea surface height model based on multi-altimetric data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(6): 723-729.(in Chinese))

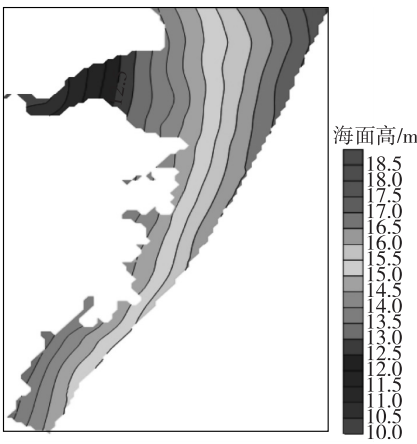


图 5 浙江近海平均海面高模型

Fig. 5 Mean sea surface height model in Zhejiang coastal areas

- [6] 浙江省人民政府.浙江[EB/OL].[2014-10-11].<http://baike.baidu.com/view/4150.htm?fr=aladdin>.
- [7] AVISO/Altimetry.OSTM/Jason-2 Products Handbook [EB/OL].[2011-12-01].<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data.html>.
- [8] AVISO/Altimetry. AVISO and PODAAC user handbook IWAVEFORM and WAVEFORM Jason products [EB/OL].[2012-06-19].<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data.html>.
- [9] CNES.SARAL/AltiKa Products Handbook [EB/OL].[2011-12-01].<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data.html>.
- [10] 周浩,汪海洪,罗志才,等.基于动态聚类分析的卫星测高波形分类[J].大地测量与地球动力学,2011,31(5):101-105. (ZHOU Hao,WANG Haihong,LUO Zhicai,et al. Classification of Satellite Altimeter Waveforms Based on Dynamical Cluster Analysis[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011,31(5):101-105. (in Chinese))
- [11] 翟国君,黄漠涛,谢锡君,等.卫星测高数据处理的方法与理论[M].北京:测绘出版社,2000:105-126.
- [12] 汪海洪,钟波,王伟,等.卫星测高的局限与新技术发展[J].大地测量与地球动力学,2009,29(1):91-95.(WANG Haihong,ZHONG Bo,WANG Wei,et al. Limitations of satellite altimetry and future technology improvements[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009,29(1):91-95.(in Chinese))
- [13] 吕志才,吉渊明,岳建平,等.一种新的确定卫星地面轨迹交叉点方法[J].工程勘察,2014(3):84-87. (LU Zhicai,JI Yuanming,YUE Jianping,et al. A new method to determine the crossovers of satellite ground track [J]. Geotechnical Investigation&Surveying, 2014(3):84-87.(in Chinese))
- [14] 邓凯亮,暴景阳,许军,等.用强制改正法建立中国近海平均海平面高模型[J].武汉大学学报:信息科学版,2008,33(12):1283-1287. (DENG Kailiang,BAO Jingyang,XU Jun,et al. High resolution mean sea surface over china sea obtained with compelling-correction[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008,33(12):1283-1287. in Chinese))

· 简讯 ·

世界环境日

1972年6月5—16日,联合国人类环境会议在瑞典的斯德哥尔摩召开,这是人类历史上第一次在全世界范围内召开的保护人类环境的会议,具有里程碑式的意义,是人类环境保护行动史上划时代的事件。会上,各国与会代表建议联合国大会将联合国人类环境会议开幕日——6月5日定为世界环境日。同年10月,第27届联合国大会接受并通过了这项建议。

世界环境日的意义在于提醒全世界的人们注意全球环境状况的变化,以及人类活动对环境已经造成的危害,要求联合国系统和世界各国政府在每年的这一天开展各种宣传、纪念活动,以强调保护和改善人类环境的重要性和迫切性。联合国环境规划署也将在每年的世界环境日选择一个成员国举行世界环境日纪念活动,发表《环境现状的年度报告书》,确定该年世界环境日的主题。在世界环境日的那天,各国政府和全世界的人们都要举行各种形式的纪念活动,宣传环境保护的重要性。呼吁全体地球公民为维护、改善人类环境而不懈地努力。

2015年世界环境日主题为“可持续消费和生产”,口号为“七十亿人的梦想:一个星球关爱型消费”。中国主题为“践行绿色生活”。今年中国“环境日”主题确定为“践行绿色生活”,旨在通过“环境日”的集中宣传,广泛传播和弘扬“生活方式绿色化”理念,提升人们对“生活方式绿色化”的认识和理解,并自觉转化为实际行动;呼吁人人行动起来,从自身做起,从身边小事做起,减少超前消费、炫耀性消费、奢侈性消费和铺张浪费现象,实现生活方式和消费模式向勤俭节约、绿色低碳、文明健康的方向转变;呼应联合国环境署确定的世界环境日主题,形成宣传合力。

(本刊编辑部供稿)