

成像高度计海面动力高度反演特点研究

刘 聪, 姜 浩*

海军潜艇学院, 山东 青岛

收稿日期: 2024年10月15日; 录用日期: 2024年11月28日; 发布日期: 2024年12月6日

摘 要

随着遥感技术的发展, 海面高度的精度和时空分辨率得到了大幅提高, 为获取高精度高分辨率的海面动力高度提供了条件。本文介绍了海面动力高度反演模型, 并从测量特点和反演方法等方面对成像高度计和传统的雷达高度计进行了比较, 并分析了成像高度计在海面动力高度反演精度和时空分辨率上的优势。

关键词

雷达高度计, 成像高度计, 海面动力高度, 平均海平面

Research on the Characteristics of Sea Level Anomaly Inversion Using Imaging Altimeter

Cong Liu, Hao Jiang*

Naval Submarine Academy, Qingdao Shandong

Received: Oct. 15th, 2024; accepted: Nov. 28th, 2024; published: Dec. 6th, 2024

Abstract

With the development of remote sensing technology, the accuracy and spatiotemporal resolution of sea surface height have been greatly improved, which provides conditions for obtaining high-precision and high-resolution sea surface dynamic height. In this paper, the inversion model of sea surface dynamic altitude is introduced, and the imaging altimeter and the traditional radar altimeter are compared from the aspects of measurement characteristics and inversion methods, and the advantages of imaging altimeter in the inversion accuracy and spatiotemporal resolution of sea surface dynamic altitude are analyzed.

*通讯作者。

Keywords

Radar Altimeter, Imaging Altimeter, Sea Level Anomaly, Mean Sea Surface

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人类第一个卫星高度计是 1973 年 Skylab 太空实验室上搭载的 S193, 它的出现证明了卫星测高技术巨大的潜力, 为以后高度计的发展提供了宝贵的经验[1]。经过近 50 年的发展, 卫星高度计的观测范围越来越大, 数据的精度和时空分辨率也在不断提高, 海面高度测量精度已由最初的米级提升到厘米级。1992 年 8 月发射的 Topex/Poseidon (简称 T/P) 卫星高度计, 测量精度达到 2~3 cm, 代表了传统卫星雷达高度计的最高水平。在传统脉冲压缩雷达高度计的基础上发展起来的新一代成像高度计, 结合了小入射角的合成孔径和干涉测量技术, 侧重于高精度宽刈幅的海面高度测量[2]。

海面动力高度是实际海表面相对于平均海平面的偏差, 能够反映海洋动力现象引起的海表面变化, 评价卫星雷达高度计的测高能力时一般使用海面动力高度。

2. 海面动力高度反演模型

如图 1 所示, 高度计所观测的海面为瞬时海面, 其距参考椭球体的距离为瞬时海面高度 SSH_{inst} , 可表示为:

$$SSH_{inst} = MSS + SLA + H_{tide} + H_{IB} + H_{wave} + \Delta h \quad (1)$$

式中, MSS 表示平均海平面到参考椭球体的距离; SLA 表示海平面异常, 也可称为海面动力高度; H_{tide} 表示潮汐高度, H_{IB} 为逆气压效应高度, H_{wave} 为海浪高度, Δh 为高度计测量产生的测量误差。

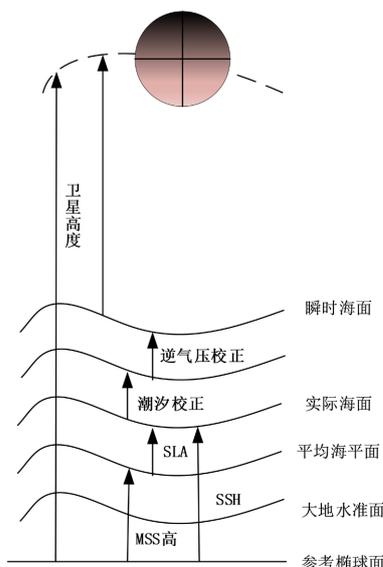


Figure 1. Sea level anomaly inversion model
图 1. 海面动力高度反演模型

瞬时海面高度经过潮汐校正、逆气压效应校正、海况校正以及测量误差校正后, 即可得到实际的海面高度 SSH :

$$SSH = SSH_{inst} - H_{tide} - H_{IB} - H_{wave} - \Delta h \quad (2)$$

而海面动力高度(SLA)可由实际的海面高度(SSH)减去平均海平面(MSS)得到, 而平均海平面高度可由多年的实际海面高度数据平均得到, 所以:

$$SLA = SSH - MSS = SSH_{inst} - H_{tide} - H_{IB} - H_{wave} - \Delta h - \overline{SSH} \quad (3)$$

上式即为海面动力高度反演模型, 无论是基于成像高度计还是雷达高度计的海面动力高度反演, 都遵循这一模型。要求取海面动力高度, 需要先对瞬时海面高度即原始测高数据进行测量误差校正、潮汐校正、逆气压校正等, 得到实际海面高度, 然后根据多年的实际海面高度数据求取平均海平面高, 最后求取海面动力高度。反演模型中各参数介绍如下。

2.1. 海面高度测量误差

(1) 微波在大气介质中传播时会受到水分子、悬浮物以及电子浓度的影响而发生折射、散射。此外, 卫星轨道的径向位置、风浪等均会使高度计的测量产生偏差。雷达高度计测高数据的误差源可大致分为三类: 大气介质误差[3]、径向位置误差以及仪器偏差, 具体误差项如表 1 所示。

Table 1. Height measurement error

表 1. 测高误差

大气介质误差	仪器偏差	径向位置误差
电离层误差	仪器噪声	轨道径向误差
干湿对流层误差	跟踪误差	坐标系误差
逆气压误差	指向误差	-
雨水修正	零点漂移	-
海况影响	-	-

(2) 考虑到成像高度计的特殊设计, 在借鉴雷达高度计误差的基础上还要结合干涉 SAR 的特点。三维成像高度计系统中主要存在三种误差: 斜距测量误差[4]、翻滚误差和系统相位误差[5][6], 斜距测量误差与雷达高度计的测高误差基本一致, 电磁偏差也会产生测距误差, 与雷达高度计一致。成像高度计与雷达高度计唯一的不同, 是假设高度误差校正项在整个刈幅范围内都与天底点误差校正项相同。雷达高度计和成像高度计的测量误差计算应有辅助测量数据支持, 表中列举的误差均可由载荷及平台研制部门提供。

2.2. 潮汐校正

潮汐是引起高度计误差的另一个主要原因, 特别是在近海、沿岸地区。由于太阳、月亮以及其它天体的引力的作用, 地球各点会产生周期性的运动和变化, 总称为潮汐, 是海面高度测量中非常重要的误差来源。由于地球各圈层都受到引潮力直接或间接的作用, 卫星测高观测值中的潮汐影响主要包括海水体直接受到引潮力作用产生的海洋潮汐、固体地球受引力潮作用产生的固体地球潮、固体地球受海洋潮汐涨落的质量变化作用产生的负荷潮汐, 以及地球瞬时自转轴变化(即极移)引起离心力变化产生的极潮。

海洋潮汐、负荷潮校正可通过 CSR3.0、GOT00.2 和 FES2014 模型计算, 固体潮可通过 IERS 中的固体潮模型计算, 极潮也可以用 IERS 模型, 结合势能及潮汐洛夫数的使用计算。

2.3. 逆气压校正

随着大气压力的上升或下降, 海面也会相应地下降或上升。通常情况下: 大气压上升 1mbar, 海面会下降 1 cm 左右, 这种现象称为逆大气压效应, 其引起的海面高度变化可表示为:

$$H_{IB} = -9.948 \times 10^{-3} (P_{am} - 1013.3) \quad (4)$$

式中, P_{am} 为海面大气压, 单位为 mbar; H_{IB} 为大气压引起的海面高度变化, 单位为 m; 1013.3 mbar 为全球海面平均大气压的参考值。因此, 知道沿卫星轨迹的实时大气压 P_{am} 值就可以计算出逆气压效应的影响。

2.4. 平均海平面模型

平均海平面表示在一个较长的时期内(通常为一个潮汐天文周期——18.6 年或更长时间), 滤除了年际、半年际、季节性等周期性的海面高度影响值后的海面高度的平均值。在全球范围内, MSS 的分布和大地水准面基本一致, 两者最大相差数米; 不同点在于, 平均海平面包括了大地水准面和海面地形两部分信息, 因此常被用来分析大地水准面差距, 地壳形变和地球内部动力学机制等; 海洋学者则以平均海平面为基准面计算海面距和研究时变特征。

目前计算 MSS 主要通过长期测高数据的平均来实现, 而测高数据的来源一般有两种, 一是验潮站资料; 二是卫星测高资料。这里主要使用卫星测高数据, 该方式获取的只是卫星沿地面轨迹的离散点, 要建立平滑连续的平均海平面高度模型需要对这些离散点观测值进行正确的网格化平均。网格化时需要考虑数据图形结构和网格分辨率的选取。

3. 成像高度计与雷达高度计海面动力高度反演对比

3.1. 测量特点

(1) 在实际海面高度测量中, 雷达高度计首先发射一束脉冲信号, 然后接收海面反射的回波信号, 通过测量脉冲信号发射和接收间的时间间隔, 即可求出高度计与海平面间的距离。这里雷达高度计采用天底观测机制, 高度计发射的雷达脉冲宽约为 1° , 到达海面后的足迹半径约 3~5 km。测得的海面高度观测值是半径 3~5 km 的圆的平均值, 不能直接表示成三维成像所需的对应像素点的高度值。

(2) 成像高度计通过雷达左右两副间隔一定空间距离的天线(干涉基线)对同一目标点成像, 两幅图像对应像素点之间存在相位差。根据目标点与两副天线的三角几何关系, 经过相位解缠绕等方法对成像高度计获取的两幅图像进行干涉处理, 提取每一个像素点的相位值, 结合高度计轨道高度, 下视角、基线长度计算出目标区域每点对的海面高度。

3.2. 反演方法

3.2.1. 雷达高度计

雷达高度计海面高观测数据是沿着卫星轨道分布的, 且观测时间不同步, 因此需要将时空分布不规则的海面高度数据处理成空间规则分布的网格数据。雷达高度计海面动力高度反演流程如图 2 所示, 具体方法及反演步骤如下。

(1) 径向轨道误差校正

① 在 T/P 卫星之前, 测高数据最大的误差源是径向轨道误差, 因此, 需要先对测高数据进行径向轨

道误差校正处理。不涉及重力场模型的情况下, 有效降低径向轨道误差的方法一般有两种: 交叠平差法和共线平差法。

交叠平差法通过最小二乘法使卫星上升和下降轨道在地面轨迹交点处的海面高测量值之差最小, 从而降低径向误差并解出有关轨道参数; 共线平差法通过最小二乘法使卫星地面重复轨迹上的海面高测量值之差最小。

② T/P 卫星发射后, 由于其轨道精度高, 可以以 T/P 卫星轨道为控制, 先将其它卫星数据的坐标转换到 T/P 卫星采用的 JGM3 轨道参考系中; 然后, 将该卫星的潮汐数据转换为 T/P 卫星所用的 CSR3.0 海潮模型数据; 最后用双星交叠平差法将目标卫星轨道符合到 T/P 卫星轨道上, 以减小径向轨道误差。

(2) 测高数据预处理

对径向轨道误差校正后的测高数据进行预处理, 以消除地球物理环境影响(包括电离层、干湿对流层、逆气压效应、潮汐、电磁偏差等, 详见第 2.1 节), 剔除原始测量数据中的粗差。

(3) 共线轨迹 stacking 处理

预处理过后, 对共线轨迹进行 stacking 处理: 以一固定大小的插值窗口沿卫星轨迹滑动, 利用双线性插值法计算“正常点”处海面高度值, 如果该计算值与“正常点”处测量值的残差大于三倍的误差, 则剔除测量值, 重新计算“正常点”处插值直到满足上述要求或测量点少于 7 个。之后, 共线轨迹上的全部“正常点”值取平均, 该值即是多年平均海平面上的测量值。

(4) 海面高度和平均海平面网格化

以一定距离 r 为搜索半径(需满足搜索半径内至少有 2 条上升和下降轨道通过), 用双二次曲面的最小二乘拟合指定区域, 测高数据采用反距离加权平均处理。

(5) 海面动力高度求取

得到网格化后的海面高度实际值和平均海平面, 利用公式(3)即可得到网格化的海面动力高度。

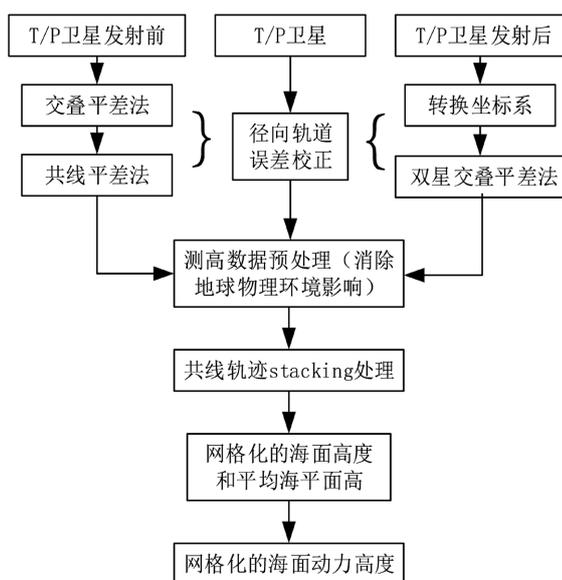


Figure 2. Flow chart of radar altimeter sea level anomaly inversion

图 2. 雷达高度计海面动力高度反演流程图

3.2.2. 成像高度计

成像高度计海面动力高度反演流程如图 3 所示, 具体方法及步骤如下。

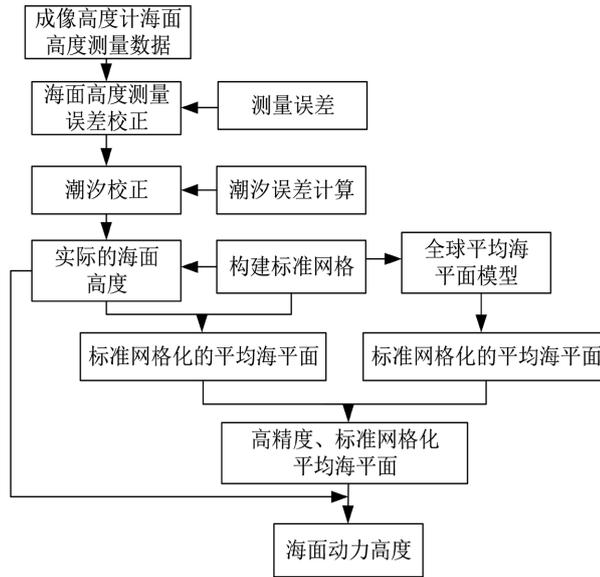


Figure 3. Flow chart of imaging altimeter sea level anomaly inversion
图 3. 成像高度计海面动力高度反演流程图

先对成像高度计的测高数据进行误差校正, 得到长时间序列的海面高度; 再选择合适的潮汐模型做潮汐误差校正; 然后构建标准化网格, 通过空域/时域滤波、位置配准等处理, 对海面高度进行插值、加权平均处理, 建立标准网格化的平均海平面; 对全球平均海平面模型进行最优插值, 生成匹配成像高度计测量网格的平均海平面, 分析两个平均海平面之间的误差, 修正得到高精度的平均海平面高。最后利用标准网格插值后的海面高度和平均海平面高数据, 通过海面动力高度反演模型, 反演海面动力高度。

影响成像高度计海面动力高度反演精度的关键因素在于测高数据的各项误差校正和网格化方法。这里将经过各项校正后测高数据剩余的系统误差和总误差作为权重的一部分, 计算网格点 (x, y) 处的海面高度, 其周围的点由多个轨道测量点组成, 记为 (x_{ki}, y_{ki}) 测源, 其中: $k = 1, 2, \dots$ 代表轨道个数, $i = 1, 2, \dots$ 代表与点 (x, y) 相距一定范围内的各个轨道的测量点数, 同时记点 (x_{ki}, y_{ki}) 处高度计的测量数据为 $f(x_{ki}, y_{ki})$, 则点 (x, y) 处的海洋测高数据 $f(x, y)$ 为:

$$f(x, y) = \sum_k \sum_i P'_{ki}(el) [f(x_{ki}, y_{ki}) - \Delta_k] \quad (5)$$

式中, 常值误差(系统误差):

$$\Delta_k = \frac{\sum_{j=1}^n [f(x_{kj}, y_{kj}) - f_0(x_{kj}, y_{kj})]}{n} \quad (6)$$

总误差:

$$e_k = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n [f(x_{kj}, y_{kj}) - f_0(x_{kj}, y_{kj})]^2}{n-1}} \quad (7)$$

$f_0(x_{kj}, y_{kj})$ 为点 (x_{kj}, y_{kj}) 处的测量数据, $j = 1, 2, \dots, n$ (n 为数据数量)。

$$P'_{ki}(el) = \frac{P'(e_k)P'(l_{ki})}{\sum_k \sum_i P'(e_k)P'(l_{ki})} \quad (8)$$

$$\begin{cases} P'_{ki}(el) = \frac{P'(e_{ki})P'(l_{ki})}{\sum_k \sum_i P'(e_{ki})P'(l_{ki})} \\ P'(e_k) = \frac{P(e_k)}{\sum_k P(e_k)}, P(e_k) = 1 - \frac{e_k}{e_{\max}} \\ P'(l_{ki}) = \frac{P(l_{ki})}{\sum_i P(l_{ki})}, P(l_{ki}) = \frac{1}{l_{ki}}, l_{ki} = \sqrt{(x_{ki} - x)^2 + (y_{ki} - y)^2} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中 $e_{\max} = 3\delta$, δ 为历史统计误差值。

4. 成像高度计海面动力高度反演优势分析

4.1. 反演精度

虽然成像高度计具有一定的观测幅宽, 对于数百上千公里的海洋动力环境而言, 还是不满足要求的。实际应用中, 无论是传统的雷达高度计还是成像高度计, 都需要利用高度计在目标海域获取的多个沿轨海面高度测量数据进行网格化插值融合, 得到大面的海面动力高度。

仿真得到 2020 年 1 月 1 日至 7 日, $5^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 125^{\circ}$ 海域内的成像高度计海面高度观测值(部分如图 4 所示), 按照上述反演流程可计算得到如图 5 所示大面的海面动力高度。

将融合得到的大面海面动力高度与真实的海面动力高度比较, 其标准差为 4.7 cm。而网上公开的同区域同时段的 AVISO 融合产品, 其标准差为 9.57 cm。

4.2. 时空分辨率

(1) 20 世纪 80 年代之前, 传统的海洋雷达高度计每 3/17 天可沿相交轨道重复测量目标点的海面高度, 但幅宽非常小, 约 3~5 km。这会导致地面轨迹间隔过大(200~300 km), 空间分辨率很低(100~150 km)。80 年代后, 随着在轨测高卫星的增多, 兴起了多源高度计数据融合测高技术, 大大提高了雷达高度计的采样精度和空间分辨率(约 25 km)。

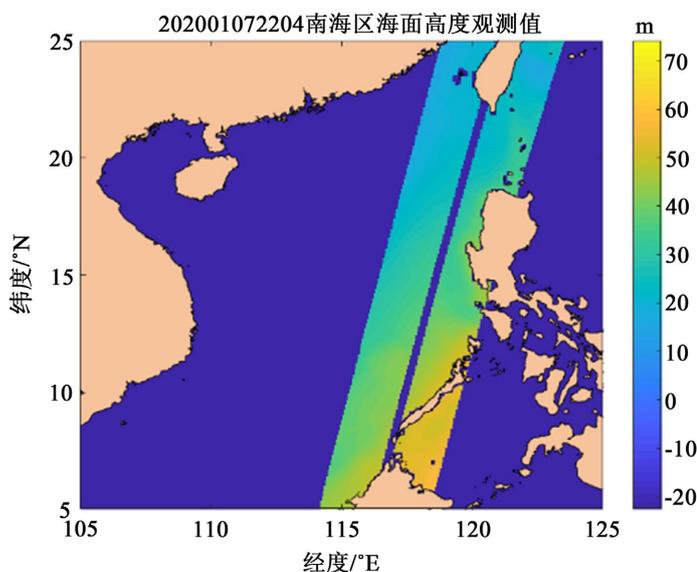


Figure 4. Sea surface height observations on 7 January 2020
图 4. 2020.01.07 海面高度观测值

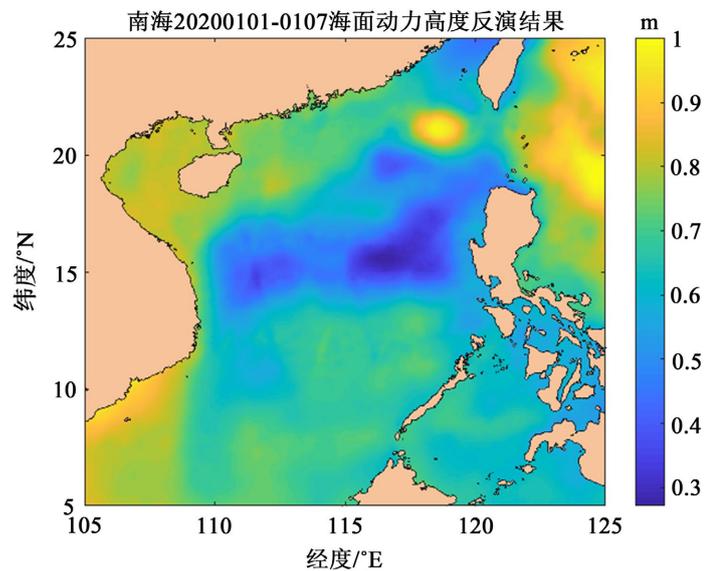


Figure 5. Large-area sea level anomaly from January 1 to January 7, 2020
图 5. 2020.01.01~01.07 大面海面动力高度

(2) 成像高度计的应用将有望实现每 1~3 天对全球海洋“成像”一次, 像元大小小于 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$, 空间分辨率将提升至 10 km。

5. 结论

相较于雷达高度计, 成像高度计无论是在海面动力高度的反演精度上, 还是时空分辨率上都有明显的优势。成像高度计的高测量精度、高时空分辨率和成像技术, 能有效地应用于海洋、陆地冰盖、雪盖及冰川的研究中, 拥有广阔的应用前景。但由于缺乏星载干涉成像高度计实测数据, 国内外多使用仿真数据对其海面动力高度反演模型进行研究, 针对成像高度计实际获取的大范围、高时效的海面高度, 仍需研究更贴合的反演模型。

参考文献

- [1] McGoogan, J.T., Miller, L.S., Brown, G.S. and Hayne, G.S. (1974) The S-193 Radar Altimeter Experiment. *Proceedings of the IEEE*, **62**, 793-803. <https://doi.org/10.1109/proc.1974.9519>
- [2] 杨劲松, 任林, 郑罡. 天宫二号三维成像微波高度计对海洋的首次定量遥感[J]. *海洋学报*, 2017, 39(2): 129-130.
- [3] Ubelmann, C., Fu, L., Brown, S., Peral, E. and Esteban-Fernandez, D. (2014) The Effect of Atmospheric Water Vapor Content on the Performance of Future Wide-Swath Ocean Altimetry Measurement. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **31**, 1446-1454. <https://doi.org/10.1175/jtech-d-13-00179.1>
- [4] 陈洁好, 张云华, 董晓. 天宫二号三维成像微波高度计大气斜距时延校正[J]. *遥感学报*, 2020, 24(9): 1059-1069.
- [5] Li, Z., Wang, J. and Fu, L. (2019) An Observing System Simulation Experiment for Ocean State Estimation to Assess the Performance of the SWOT Mission: Part 1—A Twin Experiment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **124**, 4838-4855. <https://doi.org/10.1029/2018jc014869>
- [6] 刘宗林, 王运华, 赵朝方. 基于成像高度计数据的系统姿态误差估计[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(8): 106-144.