

文章编号: 1671-0576(2021)02-0036-05

干涉高度计海面高度的高精度外定标方法

刘亚奇^{1,2,3}, 张 鹏¹, 苏皎阳^{1,2,3}, 秦 强¹, 卢护林^{1,2,3}

(1.上海无线电设备研究所,上海 201109; 2.上海目标识别与环境感知工程技术研究中心,上海 201109; 3.中国航天科技集团有限公司交通感知雷达技术研发中心,上海 201109)

摘 要: 针对干涉高度计受主天线相位中心高度误差、主天线斜距误差、干涉基线误差等诸多干涉参数误差的影响,测高精度不满足应用要求的问题,结合干涉高度计系统误差特性,提出一种高精度外定标方法。该方法利用干涉参数误差模型,对测量得到的干涉参数进行优化和校准,获取精确的干涉参数,生成更高精度的海面高度。利用试验数据进行算法仿真分析,验证了该方法的有效性。

关键词: 干涉高度计; 外定标; 海面高度

中图分类号: TN959.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0576.2021.02.008

High Precision External Calibration Method for Sea Surface Height of Interference Altimeter

LIU Ya-qi^{1,2,3}, ZHANG Peng¹, SU Jiao-yang^{1,2,3}, QIN Qiang¹, LU Hu-lin^{1,2,3}

(1. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Target Identification and Environment

Perception, Shanghai 201109, China; 3. Traffic Perception Radar Technology

Research & Development Center of CASC, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to solve the problem that the measuring accuracy of interference altimeter is not satisfied with the application requirements due to the influence of interference parameter errors such as the height error of the phase center of the main antenna, the oblique distance error of the main antenna, and the interference base line error, a high precision external calibration method is proposed based on the systematic error characteristics of interference altimeter. The interference parameter error model is used to optimize and calibrate the measured interference parameters to obtain accurate interference parameters, and then a higher precision sea surface height is generated. The validity of the method is verified by the simulation analysis of the test data.

Key words: interference altimeter; external calibration; sea surface height

0 引言

作为全球海洋动力环境观测的主要技术手段,海洋雷达高度计已经成功应用在海洋防灾减灾、海洋资源开发和全球环境变化研究等诸多领域,并发挥了重要的作用^[1-3]。相较于直接观测、底视观测等传统测高技术存在覆盖范围小、空间分辨率低等不足,作为第五代雷达高度计,宽刈幅干涉雷达高度计具备宽刈幅、高空间分辨率、高时间分辨率以及高精度的优点,能够满足日益增长的海洋环境保障需求,是海底地形等环境数据监测的高精度、量化应用的有效技术手段^[4-6]。

宽刈幅高精度干涉雷达高度计获取厘米级精度的海面高度,需要采用基于综合处理的高精度定标技术。高精度外定标技术是雷达高度计确保测量精度的核心关键技术之一。通过修正天线位置、基线长度、基线倾角等不随距离变化的恒定系统性误差,同时,在每个重访周期内修正积累的缓变性系统误差,可以保证干涉高度计系统的性能指标达到要求^[7-9]。

1 高度外定标方法理论研究

1.1 外定标误差来源分析

根据干涉测高原理,计算海面高度需要获取天线高度、雷达斜距、基线倾角、基线长度和干涉相位等数据,这些参数的误差对测高精度均会产生影响^[10]。其中一级误差源包括主天线相位中心高度误差、主天线斜距误差、干涉基线(基线长度和基线倾角)误差以及干涉相位误差^[11]。直接利用干涉雷达高度计测量的海面高度数据来重建海面存在较大误差,重建的海面高度往往达不到要求的精度。为了得到高精度的海面高度重建结果,除了提高干涉雷达高度计的硬件性能及各项参数的测量精度外,还必须对海面高度进行外定标处理,减少或消除系统参数误差对测高精度的影响。

通过对测高误差来源与测高精度修正技术进行分析,干涉雷达高度计参数误差可以分为恒定系统性误差、缓变系统性误差以及随机性误差三大类,如图1所示。恒定系统性误差主要包括主天线相位中心高度误差、主天线斜距误差,同时还包括安装和测量导致的恒定干涉基线误差,以及

系统电延迟等导致的恒定干涉相位误差。基线长度误差和基线倾角误差等干涉基线误差属于缓变系统性误差,在一次数据获取过程中误差量值呈现明显的规律性,其引起的高度误差分别随地距近似呈二次和线性变化。而干涉相位误差主要由系统去相干造成,可以认为主要是随机性误差,其主要特征是变化快,没有明显规律,长期观测均值为零。因此外定标主要考虑主天线相位中心高度误差、主天线斜距误差、干涉基线误差及干涉相位误差中的恒定误差。

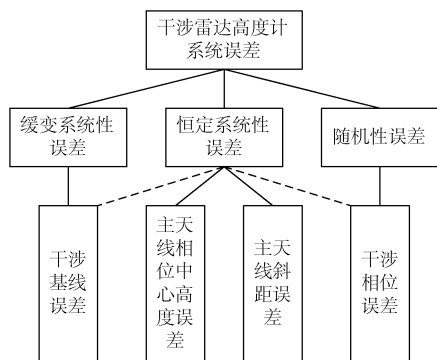


图1 干涉雷达高度计系统误差分类

1.2 外定标方法

结合干涉高度计系统误差特性,外定标处理方案利用地面控制点(ground control point, GCP)基准高度信息和干涉高度计生成的初始海面高度,联合反演干涉参数误差模型,对测量得到的干涉参数进行优化和校准,获取精确的干涉参数,再利用其重建海面高度。

外定标处理过程主要包括定标场选取及定标器布放、地球物理数据及气象数据获取、海面高度测量及高度外定标算法处理等,如图2所示。

在选取定标场后,对定标器的布放进行分析和设计,使得定标器位置布放达到最优,满足宽刈幅成像高度计系统外定标的精度要求。地球物理数据可从国内相关研究机构获取,潮汐数据可从国际验潮网站获取,气象数据可从欧洲气象预报中心(ECMWF)网站查询。定标数据则可通过全球导航卫星系统(GNSS)浮标获取。

通过外定标处理,主天线相位中心高度误差、主天线斜距误差及干涉相位误差等恒定误差可以完全消除,而干涉基线误差引起的高度误差也可

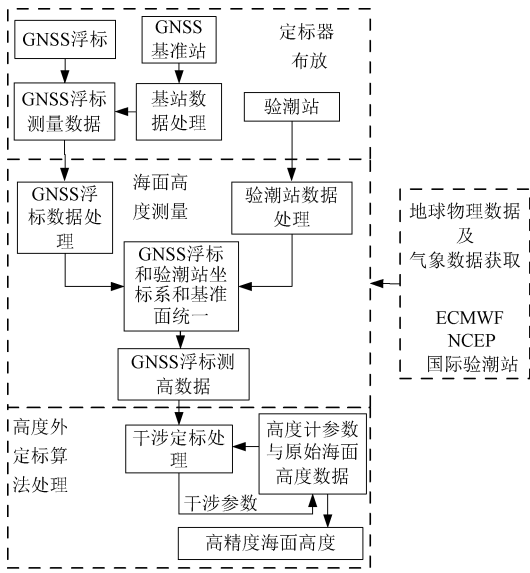


图 2 外定标处理流程图

以部分消除,具体效果与定标点数量和位置分布有关。如果只有一个定标点,则此时消除的误差为该定标点处基线矢量误差引起的高度误差;如果含有多个定标点,则消除的误差为不同定标点所在位置处基线矢量误差引起的高度误差的加权重值。实际上,上述各种误差相互耦合,再加上外部定标数据的不理想,最终系统误差将无法完全消除,但此时的高度精度相比于定标前还是会有所提高。

2 高度外定标算法

基于高度外定标理论研究,提出一种高精度高度外定标算法,利用海面定标点高度信息,通过海况约束和差分处理,实现干涉测高误差的分离,进而分级估计天线相位中心高度误差、天线斜距误差、基线倾角误差、基线长度误差和干涉相位误差等,最终重建高精度海面高度。

高度外定标算法处理可分为四个步骤:首先测量海面定标点高度,然后估计干涉测高误差,再差分分离干涉测高误差,最后分级估计干涉参数误差,进行误差补偿后实现海面高度重建。

海面定标点高度测量是为了消除海况偏差对定标结果的影响,选择在三级海况以下条件下,利用浮标等设备测量海面定标点高度。干涉测高误差获取是基于海面定标点实际高度与测量高度信

息,先进行干涉测高误差的差分分离,进而分级估计干涉参数误差。干涉测高误差差分分离是对海面定标点对的干涉测高误差进行差分处理,消除天线高度误差和斜距误差导致的干涉测高误差。干涉参数误差分级估计是基于差分干涉测高误差构建和解算方程组,获取基线倾角误差、基线长度误差和干涉相位误差。补偿上述干涉参数误差导致的干涉测高误差后,即可基于残余干涉测高误差估计天线高度误差和斜距误差,重建海面高度。

干涉参数恒定误差估计方法具体步骤为:首先利用已知的控制点高度信息获取高度误差向量 ΔH ,然后利用高度误差与各干涉参数的关系构建误差传递矩阵 F ,再利用最小二乘法计算干涉参数误差,最终实现对干涉参数的修正。本方法需要一定数量的定标点,且定标点的分布对算法的稳定性影响较大,一般来说定标点数量越多,定标结果越精确,计算过程多采用循环迭代的处理方式,直至达到理想精度。其中,矩阵 F 的表达式为

$$F = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial h}{\partial B} \right|_1 & \left. \frac{\partial h}{\partial \alpha} \right|_1 & \left. \frac{\partial h}{\partial \phi} \right|_1 & \left. \frac{\partial h}{\partial r} \right|_1 & \left. \frac{\partial h}{\partial H} \right|_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \left. \frac{\partial h}{\partial B} \right|_N & \left. \frac{\partial h}{\partial \alpha} \right|_N & \left. \frac{\partial h}{\partial \phi} \right|_N & \left. \frac{\partial h}{\partial r} \right|_N & \left. \frac{\partial h}{\partial H} \right|_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: h 表示海面高度; B 表示干涉基线长度; α 表示干涉基线倾角; ϕ 表示干涉相位; r 表示斜距; H 表示天线相位中心高度; N 表示定标点数量。

高度误差向量 ΔH 为 $1 \times N$ 维,则干涉参数修正量

$$\Delta X = F^+ \Delta H \quad (2)$$

式中: F^+ 为矩阵 F 的广义逆矩阵。

3 数据处理分析

为验证高精度高度外定标方法的有效性,对海洋区域航过数据进行处理与对比分析。图 3 为海洋区域航过的初始反演高度结果图,格网间距为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 。

在对海洋区域高度精度进行评估时,生成格网间距为 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的反演海面高度结果

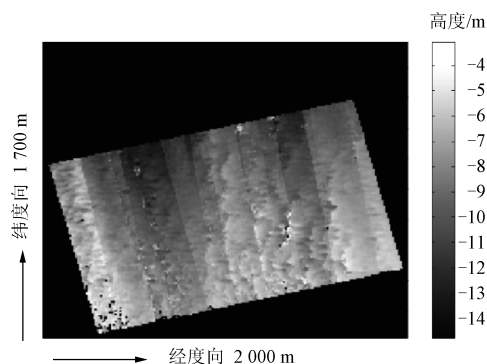


图 3 海洋区域航过初始反演高度结果图 (格网间距 10 m×10 m)

演高度结果,如图 6 所示。

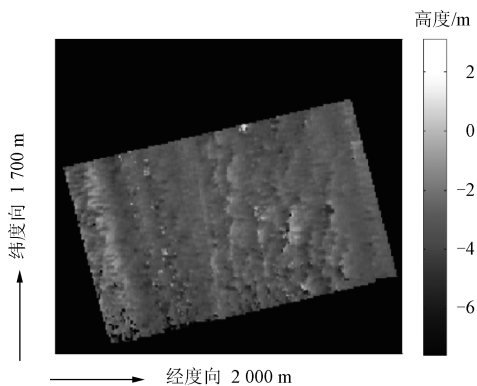


图 6 海洋区域航过外定标后反演高度结果图 (格网间距 10 m×10 m)

图,如图 4 所示。

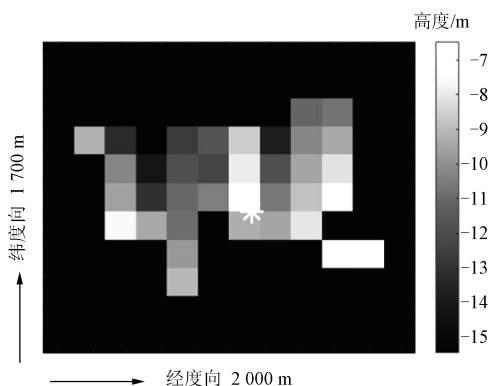


图 4 海洋区域航过初始反演高度结果图 (格网间距 200 m×200 m)

在对外定标后生成的高度结果图进行精度评估时,生成格网间距为 200 m×200 m 的海面高度结果,如图 7 所示。

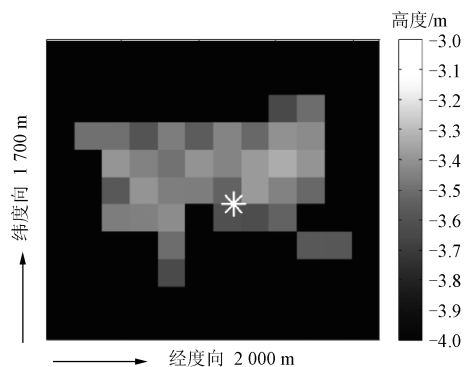


图 7 海洋区域外定标后反演高度结果图 (格网间距 200 m×200 m)

利用 GNSS 浮标数据对高度精度进行评估,浮标位置在图 4 中星号标志处。定标前的航过反演高度误差如图 5 所示。航过的高度误差均方根值为 6.99 m,受风等外部因素的影响,基线倾角测量误差较大,导致高度精度较差。

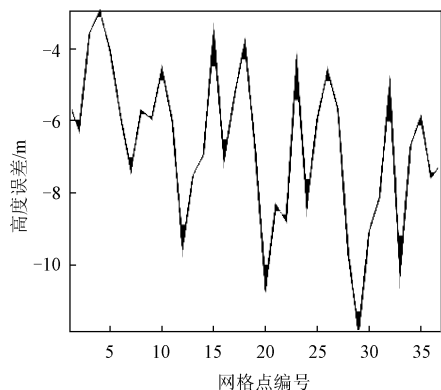


图 5 海洋区域航过初始反演高度误差

进行高精度外定标处理后,重新反演高度结果图,得到定标后格网间距为 10 m×10 m 的反

演高度结果,如图 6 所示。在对外定标后生成的高度结果图进行精度评估时,生成格网间距为 200 m×200 m 的海面高度结果,如图 7 所示。利用浮标数据对定标后高度精度进行评估,浮标位置在图 7 中星号标志处。航过外定标后反演高度误差如图 8 所示。航过的高度误差均方根值为 7.82 cm,实际海面高度测量精度与理论分析结果一致,并且将海面高度测量误差从米级降低至厘米级,充分验证了海面高度的高精度外定标方法的有效性。

4 结论

本文提出一种干涉高度计海面高度的高精度外定标方法,利用海面定标点的高度信息,通过海况约束和差分处理,实现干涉测高误差的分离,进而分级估计干涉参数误差,再重建高精度海面高度,可将海面高度测量误差从米级降低至厘米级。

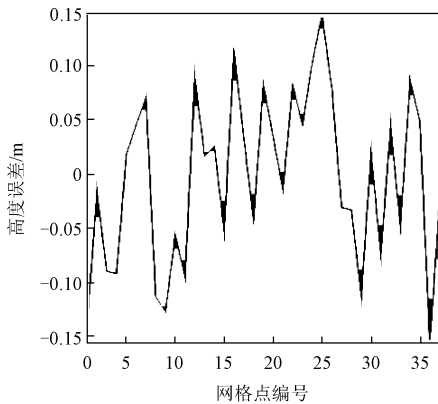


图 8 海洋区域航过外定标后反演高度误差

试验数据处理与分析,充分验证了该方法的有效性。

参考文献

[1] ANDERSEN O B, SCHRROO R. Range and geophysical corrections in coastal regions; and implications for mean sea surface determination [M]// VIGNUDELLI S, KOSTIANOV A G, CIPOLLINI P, et al. Coastal Altimetry. Berlin: Springer-Verlag, 2011: 103-145.

[2] WATSON C, WHITE N, CHURCH J, et al. Absolute calibration in Bass Strait, Australia; TOPEX, Jason-1 and OSTM/Jason-2[J]. Marine Geodesy, 2011, 34(3/4): 242-260.

[3] VERRON J, SENGES P, LAMBIN J, et al. The SAR AL/AltiKa altimetry satellite mission [J]. Marine Geodesy, 2015, 38(S1): 2-21.

[4] HAINES B J, DESAI S D, BORN G H. The harvest experiment: calibration of the climate data record from TOPEX/Poseidon, Jason-1 and the ocean surface topography mission[J]. Marine Geodesy, 2010, 33(S1): 91-113.

[5] MERTIKAS S P, ZHOU X H, QIAO F L, et al. First preliminary results for the absolute calibration of the Chinese HY-2 altimetric mission using the CRS1 calibration facilities in West Crete, Greece[J]. Advances in Space Research, 2016, 57(1): 78-95.

[6] BONNEFOND P, EXERTIER P, LAURAIN O, et al. GPS-based sea level measurements to help the characterization of land contamination in coastal areas[J]. Advances in Space Research, 2013, 51(8): 1383-1399.

[7] 张有广, 林明森. 卫星高度计海上定标场及定标方法研究进展[J]. 海洋通报, 2007, 26(3): 87-92, 116.

[8] 翟万林, 陈春涛, 闫龙浩. 基于 GPS 浮标的高度计海面高度产品检验技术进展[J]. 海洋测绘, 2012, 32(6): 40-43.

[9] 管斌, 孙中苗, 刘晓刚, 等. 双星串飞编队卫星测高模式下高度计相对定标[J]. 测绘学报, 2017, 46(1): 44-52.

[10] 杨双宝. 基于合成孔径技术的高精度雷达高度计技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2007.

[11] 魏克让, 江聪世. 空间数据的误差处理[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 2-9.

(上接第 35 页)

[10] GALLEANI L. The dynamic Allan variance III: confidence and detection surfaces[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(8): 1550-1558.

[11] GALLEANI L, TAVELLA P. The dynamic Allan variance[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(3): 450-464.

[12] GALLEANI L, TAVELLA P. The dynamic Allan

Variance IV: characterization of atomic clock anomalies[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2015, 62(5): 791-801.

[13] 胡峰, 孙国基. Kalman 滤波的抗野值修正[J]. 自动化学报, 1999, 25(5): 692-696.

[14] 周伟静, 沈怀荣. 抗野值抑制发散滤波算法在无人机测风数据处理中的应用[J]. 装备学院学报, 2009, 20(5): 122-126.