

HY-2 卫星高度计定标方法初探

崔聪聪^①, 王其茂^①, 唐军武^②, 周武^①

(^① 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; ^② 国家海洋技术中心, 天津 300112)

摘要: 为确保高度计数据的可用性和有效性, 发射后需对高度计进行绝对定标。本文首先结合卫星高度计的应用领域, 提出了我国 HY-2 的定标需求, 进而介绍了国内外现有的验潮站定标、海上石油平台定标、GPS 浮标定标等 3 种高度计定标法, 并分析了各种定标法的优缺点。在此基础上, 提出了适用于我国 HY-2 卫星高度计定标法, 并简单介绍了具体的实施方案和数据处理方法。该方法为 HY-2 的定标方案的确定具有一定的参考价值和指导意义。

关键词: HY-2 卫星; 卫星高度计; 绝对定标

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2012.01.023

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2012)119-0116-05

Preliminary Discussion about the Method of HY-2 Altimeter Calibration

CUI Cong-cong^①, WANG Qi-mao^①, TANG Jun-wu^②, ZHOU Wu^①

(^① National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081;

^② National Ocean Technology Center, Tianjin 300112)

Abstract: Altimeter data plays very important role in the research of marine dynamic environment forecast, global climatic changes, and so on. In order to ensure the availability and validity of altimeter data, it is necessary to implement external calibration after altimeter launched. In this paper, firstly based on the application field of altimeter, the calibration of HY-2 is proposed. Then three different calibration methods; the method using tide gauges, offshore oil platform method and GPS buoy method and the advantages and disadvantages of each method are discussed. Finally this paper puts forward a new calibration method for HY-2; the method of combining tide gauge and GPS buoy, and simply presents the embodiment and data processing algorithm. This method has a certain reference value and the guide meaning for the HY-2 calibration campaign.

Key words: HY-2; altimeter; absolute calibration

1 引言

自 70 年代 skylab 上搭载的第一颗高度计开始, 世界各国相继发射了一系列的高度计卫星。经过近 40 年的发展, 卫星高度计的观测技术越来越成熟, 从低精度、单维度向着高精度、多维度、海陆兼容方向发展, 极大提高了人类对海洋变化的认识。

我国经济近年来的迅猛发展, 加之广大科研人

员的前期研究积累, 我国发射的 HY-2 卫星是我国第一颗海洋动力环境卫星, 其主载荷为雷达高度计、微波散射计、扫描微波辐射计和校正微波辐射计, 并选用激光反射阵列 (SLR)、DORIS 接收机和 GPS 接收机作为定轨设备。其主要科学目标为: 监测和探测海洋动力环境, 包括海面风场、海面高度场、浪场、海洋重力场、大洋环流、海表温度场、大气水汽、大气液态水含量等重要海洋大气参数, 将填补我国

收稿日期: 2011-01-14 修订日期: 2011-03-03

基金项目: 863 计划海洋遥感定标检验技术研究 (2008AA09A403)。

作者简介: 崔聪聪, 女, 硕士, 主要从事卫星高度计定标研究。

E-mail: congcong@mail.nsoas.gov.cn

— 116 —

海洋微波遥感研究的空白,提高海洋动力环境预报的水平,为国民经济建设和国防建设服务,并为海洋科学研究、全球气候变化提供实测数据。

卫星高度计测高的原理是高度计向下发射脉冲,经海面散射返回高度计形成回波信号,通过测量回波时间,可计算出高度计到海面的距离,定轨设备可以提供高度计到参考椭球的距离,两者相减即可得到海平面到参考椭球的高度,即海面高度。卫星高度计的测高精度,从最初的 1m,发展到目前的 2.5cm(Jason-2 卫星)^[2],取得了质的飞跃,这其中与卫星发射前后的定标工作有着密不可分的关系。发射前,需要对高度计进行整机、子系统、部件等各个级别的精确标定,进而改进高度计的设计;发射后,需要对所有的地面处理算法、输出产品进行定标和真实性检验,达到产品误差分析和质量控制的目的,而这些都需要通过与外部实测数据的对比分析而实现。HY-2 高度计对测高精度的指标要求非常严格,为实现这一指标,精确的定标工作是必不可少的。

本文探讨了国内外现有的卫星高度计发射后的海面高度绝对定标方法,进而提出适合我国 HY-2 高度计卫星海面高度绝对定标方案。

2 高度计定标方法

卫星高度计过境时,在现场进行同步观测,将卫星观测的海面高度和实测的海面高度进行比较,获得海面高度绝对定标偏差,进而对高度计的系统偏差进行修正。目前,国内外高度计海面高度绝对定标方法主要有 3 种:验潮站定标、海上石油平台定标、GPS 浮标定标。

2.1 验潮站定标

验潮站定标是基于已有的验潮站潮位资料进行定标,验潮站通常建设在靠近海洋的大陆沿岸或者岛屿上,与高度计星下点不重合,即验潮站测量点和高度计星下点存在一定的地理位置差异,因此,在定标时需首先消除两者的地理位置差异,再进行绝对比对。

定标前首先要对卫星测量的误差源进行校正,校正的误差包括:大气干湿对流层校正、电离层校正、海况偏差校正等。定标时,卫星高度计的观测数据一般为临时地球物理数据(IGDR,经 MOE 定轨得到的数据产品)或地球物理数据(GDR,经 POE 定轨得到的数据产品),由于验潮站测量点和卫星高度计测量点有一定的距离,还需要对两者测量值进

行地球物理改正,消除地理效应引起的误差。地球物理改正包括:潮汐改正(包括海洋潮汐、负荷潮、固体潮、极潮 4 项)、逆气压改正等。验潮站定标方法原理如图 1 所示:

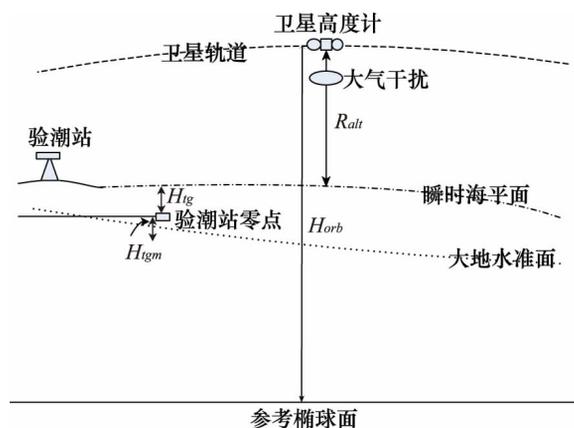


图 1 验潮站定标示意图

(1) 高度计数据处理

卫星高度计经过验潮站附近的定标点时,获得的观测高度值为 R_{alt} ,由于高度计发射的电磁波信号在空气中传播必须经过大气层,而大气层会对电磁波信号产生延迟效应,带来延时误差,需要进行修正,包括大气干湿对流层改正 H_{atm} 和电离层改正 H_{ion} 。其次,由于海况会产生海面散射场的非高斯效应,从而引起海况偏差 H_{ssb} ,也需要进行改正。高度计测量值改正后的结果为:

$$H_{range} = R_{alt} + H_{atm} + H_{ion} + H_{ssb} \quad (1)$$

结合轨道高度 H_{orb} ,并对其进行地球物理改正 H_{geo} ,然后减去星下点的大地水准面高度 H_g ,卫星高度计测量的瞬时海面相对于大地水准面的高度为:

$$SSH_{alt} = H_{orb} - H_{range} + H_{geo} - H_g \quad (2)$$

(2) 验潮站数据处理

卫星过境时,验潮站同步进行潮位观测,验潮站测量的瞬时潮位为 H_{ig} ,验潮站测量零点相对于水准面的高度为 H_{igg} ,并进行地球物理改正 $H_{ig,geo}$,从而获得的验潮站测量的瞬时海面相对于大地水准面高度为:

$$SSH_{sta} = H_{ig} + H_{igg} + H_{ig,geo} \quad (3)$$

(3) 卫星数据与实测数据比较

验潮站数据和高度计数据经过(1)、(2)两步的匹配后,就可以进行比较,从而得到卫星高度计海面高度绝对偏差:

$$H_{bias} = SSH_{sta} - SSH_{alt} \quad (4)$$

使用验潮站定标方法,可以有效降低有效波高对

海平面数据引入的误差。法国科西嘉(Corsica)定标场^[3]采用了验潮站定标方法,该定标场被作为 Topex/Poseidon、Jason-1、Jason-2 在欧洲的专用定标场。科西嘉定标场采用 Aspretto 和 Sénétosa 双站点定标,在 Aspretto 空军基地使用 SLR(FTLRS)、GPS 和 DORIS 进行观测,设立标准参考点,在 Sénétosa 布放 3 个验潮仪,并设立 GPS 基站。考虑到陆地信号会对高度计信号造成干扰,其把试验场地选在距 Sénétosa 南部 40km 处海域。为了将验潮站数据和高度计数据进行匹配,采用海上 GPS 技术确定验潮站和卫星下点之间的大地水准面。

国外高度计卫星一般会选取两到三个站点作为专用定标场,但是专用定标场的数据对于探测高度计测量系统稳定性的价值并不大,而多个验潮站组成的定标网络可以稳定可靠地监测系统年漂移情况。因此,选择多个验潮站组成验潮站网络,可以对专用定标场起到补偿的效果,对验潮站和高度计测量值的相关性进行分析。董晓军等人^[4]利用英国多个验潮站组成网络对 Topex/Poseidon 进行绝对定标,最终 Topex 和 Poseidon 的定标精度分别是 2cm 和 3cm。

2.2 海上石油平台定标

海上石油平台定标是在卫星高度计地面轨迹的海上石油平台进行同步观测,比较两者观测的海面高度,从而实现对卫星高度计的绝对定标。海上石油平台定标场设置在卫星下点,可以有效避开陆地对卫星信号的干扰。海上石油平台的定标原理图如图 2 所示:

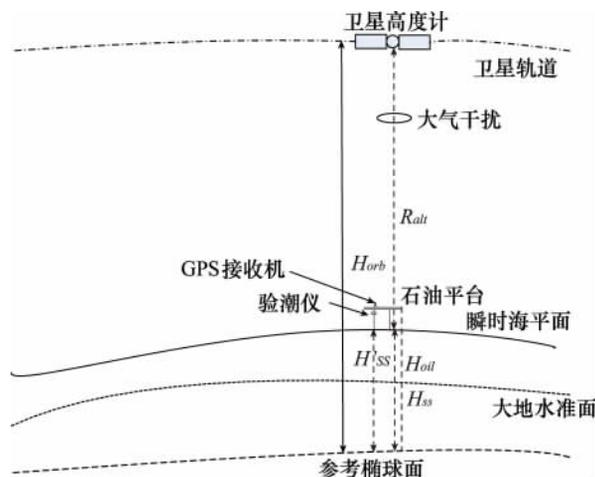


图 2 海上平台定标原理图

卫星高度计数据处理参考验潮站方法描述的方法, H_{orb} 为卫星的轨道高度,卫星到海面距离经过修正后的值为 R_{alt} ,因此,高度计获取的海表面高度为:

$$SSH_{alt} = H_{orb} - R_{alt} \quad (5)$$

在卫星下轨迹上设置海上平台,在平台上安置 GPS 接收机进行同步观测,可以确定平台的高度 H_{oil} ,使平台测量和卫星测量在同一参考系下,GPS 观测还可以起到监测平台漂移的目的。在平台安置验潮仪,测量平台到海面的距离 H_{tide} ,两者相减即可获得平台下方海面的高度:

$$SSH_{oil} = H_{oil} - H_{tide} \quad (6)$$

因此,通过海上平台获得的卫星高度计海面高度偏差为:

$$H_{bias} = SSH_{oil} - SSH_{alt} \quad (7)$$

海上石油平台定标方案对于定标场的大地水准面模式是否精确无任何要求,可以消除陆地信号对卫星数据的干扰,省去了不必要的误差,对于定标精度的提高有显著性的意义。但是,海上石油平台的运行维护成本较高,而且平台的生产活动会对试验结果具有一定的影响。

NASA 采用海上石油平台 Harvest^[5],作为 Topex/Poseidon、Jason 专用定标场,位于卫星升轨的 Pass43 轨迹上,平台上安装了 3 个验潮仪,用于测量潮位数据;安装了 GPS 接收机,用于和陆地上的基站联测,监测平台漂移,利用双频技术修正电离层延迟;此外,平台上还安装了水汽辐射计、气象观测仪器等,用于校正湿对流层路径延迟等。

2.3 GPS 浮标定标

前面两种方法,虽然定标精度比较高,但是所需的成本也比较高,机动性差,GPS 浮标定标方法恰恰弥补了这种不足。GPS 浮标的定标原理如图 3 所示:

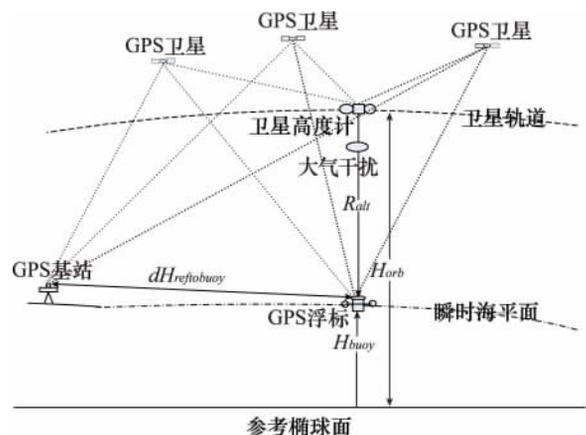


图 3 GPS 浮标定标原理图

GPS 浮标定标(图 3)是在卫星下点设置 GPS 浮标同步观测瞬时海平面进行定标。卫星高度计数据处理参考验潮站方法描述的方法, H_{orb} 为卫星的

轨道高度,卫星到海面距离经过修正后的值为 R_{alt} ,因此,高度计获取的海表面高度为:

$$SSH_{alt} = H_{orb} - R_{alt} \quad (8)$$

由于 GPS 浮标在海表面,所以其高度就是海面高度, GPS 基站测量的高度为 H_{ref} , 基站与 GPS 浮标之间的距离差值为 $dH_{ref\ to\ buoy}$, 通过 GPS 浮标测量的海面高度为:

$$SSH_{buoy} = H_{buoy} = H_{ref} + dH_{ref\ to\ buoy} \quad (9)$$

因此,通过 GPS 浮标获得的卫星高度计海面高度偏差为:

$$H_{bias} = SSH_{buoy} - SSH_{alt} \quad (10)$$

由于 GPS 单点定位精度一般在 5m 左右,不能满足定标精度要求,为提高定位精度,采用动态差分定位^[6]模式对浮标进行定位,定位精度可达厘米级。动态差分模式可采用常规 RTK 作业模式(在陆地上或海岛上设置基准站, GPS 浮标作为流动站)或网络 RTK 模式(定标区域距离 CORS 网络应不大于 80km)。GPS 浮标定标一般适用于中低海况(最大三到四级海况),因为在高海况条件下海浪会引起 GPS 浮标倾斜或撞击天线顶部,造成信号时间序列损失或者相位中心失真,降低定位精度。

Christopher Watson 和 Neil While 等^[7]在澳大利亚的巴斯海峡为 Topex/Poseidon 和 Jason-1 高度计做了绝对定标,位于卫星升轨的 Pass088 轨迹上,研究得到 Topex/Poseidon 和 Jason-1 的绝对定标偏差分别为 $-10 \pm 19\text{mm}$ 和 $+131 \pm 21\text{mm}$,与 NASA 和 CNES 定标场的结果一致。

3 HY-2 高度计的定标场和定标方案

HY-2 高度计提出的测高精度是 $\pm 5\text{cm}$,为实现这一指标,精确的定标工作是必不可少的。随着 HY-2 高度计的发射日期日益临近,需提出适合我国情况的定标方案,从而保证高度计的数据质量,发挥最大的应用潜力。

3.1 方法选取

对于 HY-2 高度计,不建议采用海上石油平台定标方法。海上平台的建设维护成本很高,不可能建立专门的平台作为定标使用,而国内停止生产的平台是不会保留的,只能选择正在生产的海上石油平台。对于正在生产的海上石油平台,平台的生产活动会对试验进行造成比较大的干扰,存在诸多安全方面的限制,直升飞机是海上平台采用的唯一交通方式,交通存在不便,试验中所需运行维护费用比较高。考虑到这些因素,因此, HY-2 高度计不建议

采用海上石油平台定标方法。

在采用常规的验潮站进行定标时,仅靠单个验潮站定标,不能满足高度计绝对定标的精度要求,须多个验潮站联合定标。而采用 GPS 浮标定标,单点定位精度不能满足定标要求,而一般的定标区域离陆地较远,无法使用陆地上的 CORS 网络数据,因此采用此方法定标时需架设临时基准站。但采用常规的 RTK 定标,基准站与浮标的距离不能超过 20km,因此临时基准站应架设在试验区域内临近卫星下点的海岛上。如果两种方法结合使用,应该会获得较高的精度。

结合我国实际情况,建议采用验潮站和 GPS 浮标组合定标法对我国卫星高度计进行海面高度绝对定标。首先在临近的海岛上建立验潮站,同时再建立 GPS 长期跟踪站,该站用做 GPS 定标的基准站,与布设在海上的 GPS 浮标进行同步观测,实现 GPS 定标,在此基础上,组合验潮站与 GPS 定标结果,实现 HY-2 高度计定标。

3.2 实施方案

(1) 验潮站的筛选与数据采集方案

验潮站距离卫星下点一般在 10km~60km,若距离太远,验潮站数据和高度计数据匹配中会产生较大的偏差;若距离太近,高度计和校正辐射计(用于改正高度计的水汽延迟)会受到陆地信号的干扰,影响高度计和辐射计的测量精度。由于数据处理时,需要剔除两者之间的水准面差异,验潮站与卫星轨迹之间的大地水准面模式要相对精确,考虑上述要求,选择满足要求的验潮站进行试验。试验中,需要获得验潮站的潮位数据,验潮站要按照要求设计测量的时间间隔。

(2) GPS 浮标布设与采集方案

首先在验潮站附近建立 GPS 长期跟踪站,设置 1s 采样率和 0° 卫星截止高度角。结合定标区域情况,若存在多个小岛,可选择另外两个小岛上架设临时基准站,与长期跟踪站形成一个较好的图形条件。在此条件下,首先在临时基准站点上架设 GPS,与 GPS 长期跟踪站同步观测 24 小时。

在定标时,首先预估卫星下点位置,提前 1 小时在预估的卫星下点所在区域布设 GPS 浮标,在临时基准站点上架设 GPS 接收机,进行同步观测,直到卫星过境 1 小时后,停止观测,其中 GPS 接收机都设置为 1s 采样率和 0° 卫星截止高度角。

在数据采集过程中,海流会使浮标产生漂移,因此需利用测量船牵引浮标^[8],将其控制在以高度计

的星下点为圆心,半径为 2km 的圆内。在牵引过程中,测量船不能太靠近浮标,以避免轮机对测量点的干扰。

3.3 数据处理

(1) 验潮站数据处理

潮位数据和高度计数据采集时间存在差异,需利用内插方法将验潮站海面高转换到高度计过境时间。此外,验潮站与高度计星下点存在空间上差异,需进行大地水准面差异和地球物理差异改正(海潮、固体潮、极潮、逆气压效应等)。经时间和空间改正后,将验潮站数据与高度计测量数据进行比较,获取高度计海面高偏差 $bias_{tide}$ 。验潮站和 GPS 长期跟踪站之间要进行水准联测。

(2) GPS 数据处理

首先基于 GPS 长期跟踪站与临时基准站同步观测数据,利用 GPS 数据处理软件(Gamit、Bernese 等),求解临时基准点的坐标。再利用 3 个基准站与浮标同步观测的数据求解浮标各历元的坐标值^[9]。因解算的浮标坐标是天线相位中心的坐标,需利用天线相位中心到海平面的距离,求得各历元的海平面高度。将海平面高度与高度计数据进行对比,可获得高度计海面高度偏差 $bias_{buoy}$ 。

(3) 高度计绝对定标偏差

基于验潮站和 GPS 浮标计算得到的海面高偏差 $bias_{tide}$ 和 $bias_{buoy}$ 获取高度计的绝对定标偏差,首先需对两种定标法进行定权,定权方法可采用单验

潮站与 GPS 定标的先验精度进行定权或根据验潮站和浮标与高度计星下点的距离及数据时间进行定权,或者两种方法联合定权。高度计的绝对定标偏差计算公式如下:

$$bias_{alt} = p1 * bias_{tide} + p2 * bias_{buoy} \quad (11)$$

其中: $bias_{tide}$ 和 $bias_{buoy}$ 分别为验潮站定标和 GPS 浮标定标获得的高度计海面高度偏差, $p1$ 和 $p2$ 分别为两种定标法的权值。

4 结束语

海上石油平台因其高额的运行维护费用,加之试验中存在的诸多限制, HY-2 高度计在进行定标方法设计时,建议不选择海上石油平台进行定标。如果使用单个验潮站定标,系统误差会比较大,很难满足精度要求;如果使用多个验潮站组成的网络,需要统一起算基准,据了解国内验潮站没有进行基准面统一,所以验潮站网络不能满足绝对定标要求,只能用于高度计数据与实测数据的相对比较。如果使用 GPS 浮标,在高海况情况下, GPS 浮标会受到海浪、风等影响,精度大大降低。为了使定标结果尽量精确,使 HY-2 卫星充分发挥作用,建议采用验潮站和 GPS 浮标相结合的定标方法。本文对验潮站和 GPS 浮标相结合的定标方法实际操作进行了详细的描述,确保该方法能够达到 HY-2 卫星高度计的要求,同时也能够满足可行性要求。本文只是对于方法的描述,后续将开展误差预估和试验结果评价研究。

参考文献

- [1] OSTM/Jason-2 Products Handbook[Z]. 2008.
- [2] P. Bonnefond, P. Exertier, et al. Absolute calibration of Jason-1 and TOPEX/Poseidon altimeters in corsica special issue; Jason-1 calibration/validation[J]. Mar. Geod., 2003(26):261-284.
- [3] Xiaojun DONG, et al. Absolute calibration of the TOPEX/POSEIDON altimeters using UK tide gauges, GPS, and precise, local geoid-differences[J]. Mar. Geod., 2002(25):189-204.
- [4] Christensen E J, et al. Calibration of TOPEX/POSEIDON at platform harvest[J]. Geophys. Res., 1994, 99(12):24465-24485.
- [5] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉大学出版社, 2005.
- [6] CHRISTOPHER W, et al. TOPEX/Poseidon and Jason-1: Absolute calibration in bass strait, Australia[J]. Mar. Geod., 2004(27):107-131.
- [7] Kai-chien Cheng. GPS buoy campaigns for vertical datum improvement and Radar altimeter calibration[C]//Division of Geodesy and Geospatial Science, 2004:3-62.
- [8] 蔡艳辉. 差分 GPS 水下定位系统集成关键技术研究[D]. 辽宁工程技术大学, 2007.