

引用格式: Zhang Yufei, Jiang Xingwei, Ma Chao. The Progress of the Altimeter Calibration based on the In-situ Observation[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(6): 1190-1196. [张宇飞, 蒋兴伟, 马超. 基于现场观测的星载雷达高度计定标方法进展[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(6): 1190-1196.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2019.6.1190

基于现场观测的星载雷达高度计定标方法进展

张宇飞, 蒋兴伟, 马超

(国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

摘要: 综述了截至目前的高度计定标相关进展。简要论述了星载雷达高度计的发展历史, 高度计的主要误差来源, 并以此引出并重点论述了用以校正这些误差来源并获得定标参数的3种基于现场观测的高度计定标方法, 分别为依据GPS浮标、锚系压力验潮仪阵列以及沿岸验潮仪进行现场观测方法。同时论述了高度计定标场的历史发展, 分析了国际高度计定标场的建设现状, 重点介绍了国际上4个主要的业务化高度计定标场: Harvest石油平台、Bass海峡定标场、Corsica岛定标场、Gavdos岛定标场与我国为HY-2定标建设中的珠海万山定标场。通过对定标方法与国际业务化定标场的介绍, 将为我国HY-2系列星载高度计万山定标场建设提供一定的思路。

关键词: 星载雷达高度计; 现场观测; 绝对定标

中图分类号: TP751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2019)06-1190-07

1 引言

从卫星探测海洋动力参数主要依靠微波传感器, 其中星载雷达高度计(本文仅讨论此种类型的高度计, 以下简称高度计)最为成熟。高度计通过对海平面高度、有效波高、后向散射的测量, 可同时获取流、浪、潮、海面风速等重要动力参数^[1]。在高度计问世以前, 海流的观测只能通过调查船与浮标进行, 无法同时获得大范围的观测数据, 而高度计的出现使得大范围高频次的监测全球海平面高度成为了可能^[2]。同时, 随着人们对全球气候变化的重视, 海平面上升作为全球气候变暖的最直接的综合表现之一^[3]也越来越受到人们的关注, 监测全球海平面的高度变化正逐渐成为海洋与气象学者们十分关心的内容, 高度计也逐渐受到重视, 成为遥感技术的一个重要的研究领域。

高度计从提出至发展至今已有50余年, 极大地促进了海洋科学、地球物理和大地测量等诸多领域的发展^[4], 其精度目前已经达到厘米级, 能够很好地

满足人们对海浪、海流等方面研究的需要。高度计作为一个精密的主动式微波雷达, 其在对海面高度进行观测的过程中会受到诸如仪器误差、轨道误差、大气延迟误差、电离层延迟误差、海况误差以及外部地球物理误差等方面的影响^[5-6], 其不确定性较大, 如果没有严格的误差修正项与定标, 将会严重影响高度计的测高精度。因此, 只有修正这些影响因素才能更好地进行高度计定标, 获得更准确的定标参数, 并通过定标来发现系统中可能存在的误差与模型缺陷, 提升数据产品质量, 拓展数据的应用范围。

2 定标方法介绍

高度计的定标分为绝对定标与相对定标两类, 绝对定标是通过对比高度计测量的 SSH_{alt} 与现场测量的对比点 $SSH_{ComparisonPoint}$ 获得真实校正值的方法, 相对定标是通过高度计之间的交叉或自交叉比对进行校正的方法。下文将对基于现场观测的绝对

收稿日期: 2019-03-06; 修订日期: 2019-11-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC1401003)。

作者简介: 张宇飞(1995—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要从事物理海洋学与海洋遥感应用研究。E-mail: 15066836807@163.com。

通讯作者: 蒋兴伟(1959—), 男, 山东莒南人, 博士, 院士, 主要从事海洋遥感应用研究。E-mail: xwjiang@mail.nsoas.org.cn。

定标进行重点讨论。

卫星高度计的绝对定标原理可以做如下解释:通过现场观测在卫星星下点处、卫星过境时刻测量海面绝对高度值,与卫星高度计测量的海面高度进行对比,二者对比的结果即为高度计的偏差或偏移(Bias)^[7]:

$$Bias = SSH_{alt} - SSH_{ComparisonPoint} \quad (1)$$

其中: SSH_{alt} 是由高度计得到的瞬时海面高度, $SSH_{ComparisonPoint}$ 是通过现场观测得到的海面高度。最终得到的Bias正值表示高度计得到的高度比实际海面高,负值相反^[7]。

高度计的绝对定标根据现场定标的观测高度获取方式不同可分为直接绝对定标与间接绝对定标。目前通用现场外定标基本的方法大致有以下4种:①通过在星下点布放的GPS浮标与高度计卫星进行同步观测并进行对比与统计;②通过星下点离岸锚系压力验潮仪进行同步观测;③利用沿岸的验潮仪观测数据,通过大地水准面与潮汐模型将沿岸数据外推到星下点;④通过陆上布放的有源定标器进行定标。其中,依据GPS浮标的观测与有源定标器的观测为典型的直接绝对定标,而典型的间接绝对定标为使用沿岸验潮仪进行观测的定标。

使用有源定标器进行高度计定标可解释为:高度计发射的微波信号通过有源定标器被反射或转发,高度计在接收到回声信号后,即可得到高度计的测量距离。通过高度计精密定轨与地面定位设备,即可得到高度计与有源定标器实际距离。将测量距离与实际距离进行对比,即可得到高度计的测距误差^[8]。使用有源定标器进行定标相比使用海面定标应用较晚,定标基于陆地而不依赖海面观测,不在本文的重点讨论范围。本文将重点讨论依据海面进行的3种绝对定标方法。

2.1 依据GPS浮标确定 $SSH_{ComparisonPoint}$

GPS浮标法是最直接的海面定标方法。其整体思路与陆基的有源定标器法类似,但不需要脉冲转发器。是一种通过直接对比星下点的GPS浮标所测的海面高度与卫星高度计所测的海面高度的差异,得到校正量Bias的方法。目前利用GPS浮标获得海面高度已经在定标方面有了广泛的应用,并取得了良好的结果^[9],且发展10年以来,GPS浮标确定的海面高度已经具有相当高的精度。

高度计卫星测量的海面高度如下^[10]:

$$SSH_{alt} = H - (R + \Delta R_{corr}) \quad (2)$$

其中: H 为卫星质心相对参考椭球面高度, R 为校正仪器误差后的高度计测量的质心距离海面的距离, ΔR_{corr} 为高度计测距修正项,其中分别包括对流层校正 ΔR_{dry} 、 ΔR_{wet} 、电离层校正 ΔR_{iono} 与海况校正 ΔR_{ssb} ^[11-12]。

星下点GPS浮标测量的海面高度如下:

$$SSH_{ComparisonPoint} = H_{Buoy} = H_{ref} + \Delta H \quad (3)$$

其中: H_{ref} 表示岸基GPS基站在国际地球参考框架ITRF2000下的椭球体高度, ΔH 表示GPS浮标相对GPS基站的高度。高度计与GPS基站使用不同参考椭球时需要对其进行校正。GPS基站的绝对坐标值是24 h连续接收数据并与周边的IGS站点联合演算得到的^[7]。这段时间内,GPS基站与GPS浮标同时也会受到实时的固体潮 R_{solid} 与极潮 R_{pole} 的差异影响,GPS浮标还会额外受到负荷潮 $R_{loading}$ 的影响。高度计的高度通过精确定轨(POD)得到,在测量时包含了地球固体潮、极潮与负荷潮。若在GPS基站进行坐标解算时去除了上述三者的影响,则高度计同样需要予以去除。同时,卫星轨道也可能存在1 km左右的漂移,需要额外修正星下点与观测位置的大地水准面的差异 ΔR_{geoid} 。经过上述修正后的 SSH_{alt} 为以下形式:

$$SSH_{alt} = H - R + \Delta R_{corr} - \Delta R_{geoid} - R_{solid} - R_{pole} - R_{loading} \quad (4)$$

此时使用GPS浮标进行绝对定标的定标参数Bias可以写为:

$$Bias = SSH_{alt} - SSH_{ComparisonPoint} = H - R + \Delta R_{corr} - \Delta R_{geoid} - R_{solid} - R_{pole} - R_{loading} - H_{ref} - \Delta H \quad (5)$$

GPS浮标的优点在于其原理简单,容易布施,且远离陆地,通常在10~25 km^[12],高度计受到陆地的影响较小。而其限制因素在于利用GPS浮标进行星地数据匹配时,较高的海况会降低GNSS的解算精度,因此在过高的海况下不适合GPS浮标工作^[13]。

2.2 依据锚系压力验潮仪阵列确定 $SSH_{ComparisonPoint}$

星下点压力验潮仪阵列是一种使用锚系固定在海床上,通过压力来判断验潮仪深度的一种仪器。压力验潮仪只能测量验潮仪距离海面的高度,其所测量的海面高度需要高度基准。因此这种方法海面高度的判断依旧需要星下点的GPS浮标与陆基GPS基准站来作为参考,GPS浮标与验潮仪测量的水深之差的均值可以作为验潮仪的高度基准^[9],即:

$$SSH_{ComparisonPoint} = d_{mooring} + \text{mean}(H_{Buoy} - d_{mooring})^{[11]} \quad (6)$$

其中: $d_{mooring}$ 为压力验潮仪距离海面的水深, $mean(H_{Buoy} - d_{mooring})$ 为长期测量 GPS 浮标高度与水深之差的均值作为验潮仪高度基准。

定标参数可表示为:

$$\begin{aligned} Bias &= SSH_{alt} - SSH_{ComparisonPoint} \\ &= H - R + \Delta R_{corr} - \Delta R_{geoid} - R_{solid} - R_{pole} - R_{loading} - \\ &\quad d_{mooring} - mean(H_{Buoy} - d_{mooring}) \end{aligned} \quad (7)$$

使用星下点压力验潮仪锚泊阵列的优点在于: 不需要水准面模型与潮汐模型对海面进行校正, 只需要 GPS 浮标的长期测量提供参考面, 而该校正是间接测量法精度受限的瓶颈之一。其次, 在通过 GPS 浮标获得压力验潮仪的高度基准后, 相比布设 GPS 浮标需要更少的人工作业^[13]。该方法的缺点在于一段时间后压力验潮仪锚系阵列需要上岸维护, 此时需要其他方法维持定标的连续性^[13]。

2.3 使用沿岸验潮仪确定 $SSH_{ComparisonPoint}$

沿岸验潮仪确定 $SSH_{ComparisonPoint}$ 需要通过潮汐模型与大地水准面模型将沿岸验潮站的海面高度推至星下点的海面高度, 并与高度计测量的海面高度对比, 来得到定标参数 Bias。通过潮汐外推得到的海面高度如下式^[15]:

$$\begin{aligned} SSH_{ComparisonPoint} &= h_{TGBM} - \Delta H_{lev} + (h'_g - h_{gig}) + \\ &\quad (H'_{tide} - H_{tidetg}) + H_{st} + H_{zero} \end{aligned} \quad (8)$$

其中: h_{TGBM} 代表 GPS 基站在国际地球参考框架 ITRF2000 下的椭球体高度, ΔH_{lev} 为 GPS 基站与验潮仪 0 点的高度差。 h'_g 、 h_{gig} 分别为星下点处与验潮

仪处的大地水准面高度。 H'_{tide} 、 H_{tidetg} 分别为星下点的潮高和验潮仪校正点处的潮高。 H_{st} 为固体地球潮与负荷潮。 H_{zero} 为验潮仪 0 点到验潮仪校正点的补偿量。潮差部分 $H'_{tide} - H_{tidetg}$ 根据验潮仪与星下点的不同分潮振幅来确定。这个差异除了潮汐的差异以外, 还包括了沿岸、朝岸、离岸流引起的水位差、风场、大气压引起的水位差^[11]。定标参数可以写为:

$$\begin{aligned} Bias &= SSH_{alt} - SSH_{ComparisonPoint} \\ &= H - R + \Delta R_{corr} - \Delta R_{geoid} - R_{solid} - R_{pole} - R_{loading} - \\ &\quad (h_{TGBM} - \Delta H_{lev} + (h'_g - h_{gig}) + (H'_{tide} - H_{tidetg}) + \\ &\quad H_{st} + H_{zero}) \end{aligned} \quad (9)$$

沿岸验潮仪法的优点在于使用沿岸验潮仪的数据, 布放与维护都非常简单, 而且不易受海况的影响, 此外, 岸基验潮仪在沿海已经大量分布, 能够提供长期稳定的观测数据, 这点是 GPS 浮标所不能比拟的^[13]。其可在高度计集中定标阶段外提供连续的水位观测, 不同站点之间的潮差可以通过潮汐预测程序确定。而其缺点在于由于不是对星下点直接进行测量, 需要有高精度的大地水准面模型与潮汐模型, 尤其在沿岸的浅水分潮上存在相当大的挑战^[8], 因此需要长期稳定的观测以建立较为精确的模型。GPS 浮标与验潮仪数据的一致性是关键性问题, Watson 等的研究显示外推数据与 GPS 浮标进行数据匹配目前也存在亚厘米级的偏差^[11]。

综上所述, 基于现场观测的高度计定标流程如图 1 所示。

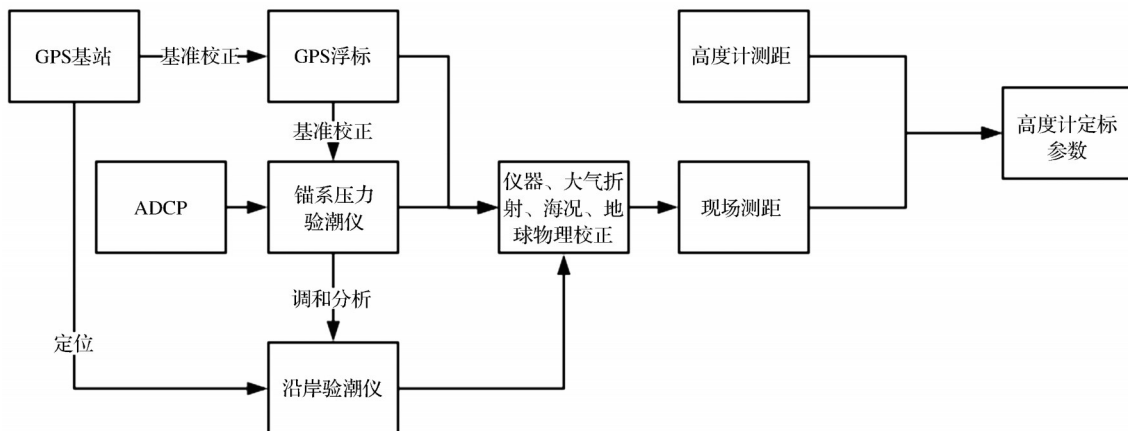


图 1 基于现场观测的高度计定标流程

Fig.1 Altimeter calibration process based on field observation

3 典型的高度计定标场

高度计的专用定标场是实现高度计精确测高

的基本保证, 通常一个高度计定标场会配置诸如上文所述的完备的海面高度观测仪器, 同时配备有海况、风场、气压、水汽、参考框架稳定性等观测仪

器^[13-14],有些定标场还会配置陆源有源定标器来辅助定标,如 Gavdos 岛定标场。早在 1970 年,GEOS-3 与 Seasat 就曾使用 Bermuda 试验场执行定标任务。ERS-1 也曾使用专用的威尼斯 Acqua Alta 平台进行定标。位于西班牙的 Ibiza 岛由于其陆地面积较小,高度计与辐射计均受陆地污染不明显而也在 2004 年被选为 Topex/Poseidon(后简称 T/P)与 Jason-1 的高度计定标场。而随着高度计发展与成熟,世界建成了 4 个业务化定标场对各个高度计进行定标^[13]。分别是 Harvest 石油平台、Bass 海峡定标场、Corsica 岛定标场与 Gavdos 定标场,下文将分别对这 4 个定标场进行详细说明。我国的 HY-2A 也曾使用其中的 Gavdos 岛定标场进行定标,但随着

海洋动力卫星任务的增加,我国对自己建设的定标场的需求也日益增加,最终选定珠海万山作为 HY-2 系列专用的定标场^[13]。目前已经建成与正在建设中的高度计定标场如表 1 所示。

除海面定标以外,也有些学者尝试使用湖面进行定标。Cheng 等^[26-27]曾使用美国伊利湖对 T/P, Jason-1 与 Jason-2 进行定标,Kai-Chien Cheng 的定标结果显示其获得的定标参数 Bias 相比业务化定标场的定标结果显然更小。Cretaux 等^[28-29]也曾对 Envisat、Jason-3、Sentinel-3A 尝试使用吉尔吉斯斯坦的伊塞克湖进行定标,定标结果显示定标参数的误差范围均在 2~4 cm 左右。然而使用湖面进行定标存在许多限制,使用海面进行现场定标仍旧是主

表 1 高度计主要定标场简表

Table 1 A simple table of altimeter calibration fields

定标场	定标卫星高度计
Bermuda 试验场	GEOS-3, Seasat
Acqua Alta 平台 ^[16]	ERS-1
Harvest 石油平台 ^[14, 17]	T/P, Jason-1, Jason-2
Lampedusa 定标场 ^[18]	T/P
Bass 海峡定标场 ^[12, 19]	T/P, Jason-1, Jason-2
Corsica 岛 ^[6, 20]	Envisat, T/P, Jason-1, Jason-2, Saral
Ibiza 岛 ^[21]	T/P, Jason-1
Gavdos 岛(West Crete 岛定标场) ^[22-24]	Envisat, Jason-1, Jason-2, Saral, Cryosat-2, HY-2A, Sentinel-3A, Sentinel-3B, Jason-3 ^[25]
珠海万山定标场(正在建设中) ^[13]	HY-2A, HY-2B

流定标方法。

我国也曾在清澜湾同时对 HY-2A 与 Jason-2 通过 GPS 浮标进行绝对定标,定标结果显示 Jason-2 的 GDR 产品的定标参数为 -2.3 cm, HY-2A 的 IGDR 产品定标参数为 -53.5~-75.6 cm,这些结果与主要业务化定标场的定标结果接近^[30],为我国珠海万山综合定标场的建设提供了基础参考。

下文将简要介绍全球 4 个主要的业务化高度计定标场与我国建设中的珠海万山定标场。

3.1 Harvest 石油平台

Harvest 石油平台于 1992 年正式启用。其平台位于美国加利福尼亚州西海岸离岸 10 km,水深 200 m 处。由于其长期稳定的数据观测,对 T/P、Jason-1、Jason-2 的定标起到了至关重要的作用^[14, 31-32]。Harvest 石油平台是典型的开阔海域环境,高度计微波脉冲几乎不会受到陆地的污染,平台的有效波高为 2~3 m,平均风速为 6 m/s^[17]。平台上安装的主要仪器为 3 个验潮仪、水汽辐射计、水深传感器和气象观测仪器等^[5],由 NOAA 进行负责

管理。完整的仪器设备和长期稳定的维护使得 Harvest 石油平台能够提供独特重要的观测数据。Harvest 的优势首先在于其远离陆地,高度计足印不会受到陆地的影响。其次 Harvest 平台本身足够小以至于不会对高度计测高产生影响。第三,Harvest 石油平台临近加利福尼亚轨道站,其数据可用于平台与高度计卫星的位置的精确测量^[5]。

3.2 Bass 海峡定标场

Bass 海峡定标场是唯一位于南半球的定标场,其位于澳大利亚的东南角,水深 80 m 左右。其同样为 T/P、Jason-1 与 Jason-2 提供高度计定标参数,Bass 海峡定标场也位于这 3 颗高度计卫星的降轨^[5]。与 Harvest 平台不同的是,Bass 海峡定标场最早只使用岸基验潮仪进行定标,以配合 T/P 的在轨测试任务。因此其缺少星下点的观测水位数据,只能进行间接观测定标,而无法进行直接观测。在 Jason-1 发射后,为配合 Jason-1 任务,其增加了 GPS 浮标与锚系阵列,并以锚系阵列定标作为其主要业务化定标方法^[12]。

3.3 Corsica 岛定标场

Corsica 岛定标场位于法国 Corsica 岛南部 50 km 处,最早于 1998 年起用于 T/P 的定标,而后场区又进行了增加以对 Envisat 标定。早期的 Corsica 定标场只配备了 3 台验潮仪,定位在 T/P 与 Jason-1 的地面轨道。并与 2005 年安装了第四台验潮仪,用以监控其余 3 台验潮仪的长期状况。除此之外,Corsica 岛于 2000 年配备了 GPS 浮标其于同年安装了气象站用以帮助验潮仪通过测量大气压进行干大气校正^[13,33]。Bonnefond 等学者为得到精准大地水准面模型,消除大地水准面的影响,对包括 Envisat, Jason-1 的延轨大地水准面进行了精确的测量^[5]。

3.4 Gavdos 岛定标场

Gavdos 岛定标场位于希腊 Crete 岛西南,由 Crete 理工大学进行建立和维护。Gavdos 岛定标场是唯一的位于 Jason 系列卫星交叉点,且比邻于 Envisat, Saral 轨道的定标场。由于该定标场是最新建成的,因此其设备非常完善。除了 GPS 浮标、验潮仪,气象观测设备,大地水准面测量设备,波浪感应器等设备之外^[34-35],其还在岛上安置了首个长期运行的有源定标器(脉冲转发器)^[22]。考虑到其设备如此完善,许多高度计都选择 Gavdos 岛进行标定工作,其中也包括我国的 HY-2A 与 ESA 最新发射的 Sentinel-3 系列^[24]。无论是如今的定标还是将来的定标任务,Gavdos 定标场都有着非常重要的地位。

3.5 珠海万山定标场

万山群岛中的直湾岛正好是 HY-2A 地面轨迹升轨经过的地方,选择的主场区位于群岛南侧 20 km 处。该海域位于珠江口最外侧,平均水深不过 40 m,年平均有效波高不超过 2 m,年平均风速约 6 m/s,观测海况偏差较小,能满足高度计定标需要。根据需求,场区将建设永久性验潮仪、GPS 基站、水汽辐射计、GPS 浮标、ADCP 与有源定标器^[13],建成综合型定标场。目前万山定标场的大地水准面已经完成测量,其测量结果与 EGM2008 相差约 2~3 cm,可以同时满足直接与间接绝对定标的需要。

目前完成了 GNSS 水汽反演技术对对流层校正中的湿大气校正 ΔR_{wet} 的精度检核实验,通过对 Jason-2 卫星的 ΔR_{wet} 项测量与比对,证明了利用中国沿海 GNSS 连续运行站标定湿大气延迟的可能性^[36]。

万山定标场星下点的潮差根据测量与相距 20 km 处沿岸同时最大可能存在 5 cm 的潮差(平均

为 1.61 cm,60% 的时间在 1 cm 以上),因此在使用沿岸验潮仪时可能会存在最大 5 cm 的误差^[13]。在使用沿岸验潮仪间接定标时需要更加精确的潮汐模型。

上述已经提到,较高的海况会降低 GPS 浮标的解算精度,从而产生较大误差。星下点 10 a 来的有效波高分布有 33.63% 的时间在 3 级海况以上,因此适合使用 GPS 浮标进行定标工作^[13]。

4 结 语

随着高度计定标精度需求的不断提高,建立更精细的模型与设施更完善的定标场已经是一种主流趋势。

美国 NASA 与法国 CNES 联合开发的 SWOT 计划于 2021 年 9 月发射,用以检测海洋与陆地水体。其上搭载的宽刈幅高度计 Aviso 可以进行刈幅 120 km 左右的观测^[37]。其由传统的一维,沿轨的剖面测高过渡到二维的宽刈幅干涉测高,其通过合成孔径干涉测量使得空间分辨率提升了一个数量级^[38]。

目前,中国科学院国家空间科学中心研制的三维成像微波高度计(INIRA)采用小角度干涉测量技术、孔径合成技术以及海陆兼容的高度跟踪技术,实现了宽刈幅海面高度测量。其已于 2016 年 9 月 15 日随天宫二号(TG-2)空间实验室发射升空,且其 9 月 22 日回传的图像证明了其对海面观测的可行性^[39]。随着我国 HY-2B 于 2018 年 10 月 25 日的发射成功,未来的 HY-2 系列动力卫星也在计划之中,而高度计定标永远是高度计能否对海面高度进行精准测量的重要且基础的课题,定标场的建设对 HY-2 系列业务化运行与获取高精度产品意义重大。因此,HY-2 系列除了使用国际通用业务化定标场进行定标外,目前我国自主的珠海万山综合定标场的建设也迫在眉睫^[40]。

本文通过分析目前主流的高度计绝对定标方法,全球 4 个业务化定标场与正在建设中的珠海万山定标场的现状,以期为我国基于现场观测的高度计绝对定标提供一些参考。

参考文献(References):

- [1] Feng Shizuo, Li Fengqi, Li Shaojing. Introduction to Ocean Science[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999. [冯士筌,李凤岐,李少菁.海洋科学导论[M].北京:高等教育出版社,1999.]

- [2] Martin S. An Introduction to Ocean Remote Sensing [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [3] Jiang Xingwei, Song Qingtao. Satellite Microwave Measurements of the Global Oceans and Future Missions[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(3): 105-111.[蒋兴伟,宋清涛. 海洋卫星微波遥感技术发展现状与展望[J]. 科技导报, 2010, 28(3): 105-111.]
- [4] Strub P T, James C. Altimeter-derived Variability of Surface Velocities in the California Current System: 2. Seasonal Circulation and Eddy Statistics [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2000, 47(5): 831-870.
- [5] Bonnefond P, Haines B J, Watson C S. Coastal Altimetry [M]. Berlin: Springer, 2011.
- [6] Bonnefond P, Exertier P, Laurain O, *et al.* Absolute Calibration of Jason-1 and Topex/Poseidon Altimeters in Corsica[J]. Marine Geodesy, 2003, 26(3): 261-284.
- [7] Zhai Wanlin, Chen Chuntao, Yan Longhao. The Technology Progress in the Calibration of Satellite Altimeter Using GPS-buoys [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2012, 32(6): 40-43.[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.]
- [8] Hausleitner W, Moser F, Desjonqueres J D, *et al.* A New Method of Precise Jason-2 Altimeter Calibration Using a Microwave Transponder [J]. Marine Geodesy, 2012, 35(Sup.1): 337-362.
- [9] Fund F, Perosanz F, Testut L, *et al.* An Interger Precise Point Positioning Technique for Sea Surface Observations Using a GPS Bouy [J]. Advances in Space Research, 2013(51): 1311-1322.
- [10] Dumont J P, Rosmorduc V, Picot N, *et al.* OSTM/Jason-2 Products Handbook [EB/OL]. https://www.nodc.noaa.gov/media/pdf/jason2/j2_user_handbook.pdf, 2017, 2018.
- [11] Watson C. Satellite Altimeter Calibration and Validation Using GPS Buoy Technology [D]. Tasmania: University of Tasmania, 2005.
- [12] Watson C, White N, Coleman R, *et al.* Topex/Poseidon and Jason-1: Absolute Calibration in Bass Strait, Australia [J]. Marine Geodesy, 2004, 27(1): 107-131.
- [13] Jiang Xingwei, Lin Mingsen, Song Qingjun. On the Construction of China's Ocean Satellite Radar Altimetry Calibration Site [J]. Ocean Development and Management, 2016, 33(5): 8-15.[蒋兴伟,林明森,宋庆君. 中国海洋卫星雷达高度计海上定标场建设初探[J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(5): 8-15.]
- [14] Christensen E, Haines B, Keihm S. Calibration of TOPEX/POSEIDON at Platform Harvest [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 24464-24485.
- [15] White N J, Coleman R, Church J A, *et al.* A Southern Hemisphere Verification for the Topex/Poseidon Satellite Altimeter Mission [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 24505-24516.
- [16] Francis C. The Height Calibration of the ERS-1 Radar Altimeter [C]// In Proceedings of the First ERS-1 Symposium: Space at the Service of Our Environment, Cannes: Groenekenis 1992.
- [17] Haines B J, Dong D N, Born G H, *et al.* The Harvest Experiment: Monitoring Jason-1 and Topex/Poseidon from a California Offshore Platform [J]. Marine Geodesy, 2003, 26(3): 239-259.
- [18] Ménard Y, Jeansou E, Vincent P. Calibration of the Topex/Poseidon Altimeters at Lampedusa: Additional Results at Harvest [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1994, 99(C12): 24487-24504.
- [19] Watson C, Whit N, Church J, *et al.* Absolute Calibration in Bass Strait, Australia: Topex, Jason-1 and Ostm/Jason-2 [J]. Marine Geodesy, 2011, 34(26): 242-260.
- [20] Bonnefond P, Exertier P, Laurain O, *et al.* Absolute Calibration of Jason-1 and Topex/Poseidon Altimeters in Corsica [J]. Marine Geodesy, 2003, 26(3): 261-284.
- [21] Martinez-benjamin J, Martinez-garcia M, Gonzalez lopez S, *et al.* Ibiza Absolute Calibration Experiment: Survey and Preliminary Results [J]. Marine Geodesy - Mar Geodesy, 2004, 27(3): 657-681.
- [22] Pavlis E, Mertikas S. The Gavdos Mean Sea Level and Altimeter Calibration Facility: Results for Jason-1 [J]. Marine Geodesy, 2004(3): 631-655.
- [23] Mertikas S, Donlon C, Féménias P, *et al.* Absolute Calibration of the European Sentinel-3a Surface Topography Mission over the Permanent Facility for Altimetry Calibration in West Crete, Greece [J]. Remote Sensing, 2018, 10(11): 1808. doi:10.3390/rs10111808.
- [24] Mertikas S, Donlon C, Mavrocordatos C, *et al.* Gavdos/west Crete Cal-Val Site: over a Decade Calibrations for Jason Series, Saral/Altika, Cryosat-2, Sentinel-3 and Hy-2 Altimeter Satellites [C]//ESA Living Planet Symposium, 2016.
- [25] Dumont J P, Carrere L, Rosmorduc V, *et al.* Jason-3 Products Handbook [EB/OL]. https://www.nodc.noaa.gov/media/pdf/jason2/j3_user_handbook.pdf, 2017, 2018.
- [26] Cheng K C, Kuo C Y, Tseng H G, *et al.* Lake Surface Height Calibration of Jason-1 and Jason-2 Over the Great Lakes [J]. Marine Geodesy, 2010, 33(S1): 186-203.
- [27] Shum C K, Yeongin Y, Cheng K, *et al.* Calibration of Jason-1 Altimeter over Lake Erie Special Issue: Jason-1 Calibration/validation [J]. Marine Geodesy, 2003, 26(3): 335-354.
- [28] Cretaux J, Bergé-nguyen M, Calmant S, *et al.* Calibration of Envisat Radar Altimeter over Lake Issykkul [J]. Advances in Space Research, 2013, 51(8): 1523-1541.
- [29] Cretaux J, Bergé-nguyen M, Calman S, *et al.* Absolute Calibration or Validation of the Altimeters on the Sentinel-3a and the Jason-3 over Lake Issykkul (Kyrgyzstan) [J]. Remote Sensing, 2018, 10(11): 1679. doi:10.3390/rs10111679.
- [30] Chen C T, Zhu J H, Zhai W L, *et al.* Absolute Calibration of HY-2A and Jason-2 Altimeters for Sea Surface Height Using

- GPS Buoy in Qinglan, China[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2019, 37(5): 1533-1541.
- [31] 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: 91-113.
- [32] Ménard Y, Jeansou E, Vincent P. Calibration of the TOPEX/POSEIDON Altimeters at Lampedusa: Additional Results at Harvest [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 24487-24504.
- [33] Bonnefond P, Exertier P, Laurain O, *et al.* Absolute Calibration of Jason-1 and Jason-2 Altimeters in Corsica during the Formation Flight Phase[J]. *Marine Geodesy*, 2010, 33: 80-90.
- [34] Mertikas S, Daskalakis A, Tziavos I, *et al.* Altimetry, Bathymetry and Geoid Variations at the Gavdos Permanent Calibration Facility [J]. *Advances in Space Research*, 2012, 51(8): 1418-1437.
- [35] Mertikas S, Daskalakis A, Tserolas V, *et al.* Statistical Models and Latest Results in the Determination of the Absolute Bias for the Radar Altimeters of Jason Satellites Using the Gavdos Facility [J]. *Marine Geodesy*, 2010, 33(Sup.1): 114-149.
- [36] Yang Lei, Zhou Xinghua, Xu Qunjun, *et al.* Research Status of Satellite Altimeter Calibration [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(3): 392-407. [杨磊, 周兴华, 徐全军, 等. 卫星高度计定标现状[J]. *遥感学报*, 2019, 23(3): 392-407.]
- [37] Brian K A, Florent L, Aurelien P. Tides and the SWOT Mission: Transition from Science Definition Team to Science Team [EB/OL]. <https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/missions/Swot/WhitePaperSWOTTides.pdf>, 2018.
- [38] Xu Yongsheng, Gao Le, Zhang Yunhua. New Generation Altimetry Satellite SWOT and Its Reference to China's Swath Altimetry Satellite [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(1): 84-94. [徐永生, 高乐, 张云华. 美国新一代测高卫星 SWOT——评述我国宽刈幅干涉卫星的发展借鉴[J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(1): 84-94.]
- [39] Yang Jinsong, Ren Lin, Zheng Gang. The First Quantitative Remote Sensing of the Sea Surface by the TianGong-2 3D Microwave Altimeter [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 39(2): 129-130. [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.]
- [40] Liu Yalong. The Research around Calibration of Altimetry Sea Surface Height and Evaluation of Production of HY-2 [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. [刘亚龙. HY-2 雷达高度计海面高度定标技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.]

The Progress of the Altimeter Calibration based on the In-situ Observation

Zhang Yufei, Jiang Xingwei, Ma Chaofei

(National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100080, China)

Abstract: The satellite radar altimeter calibration progress as of now is mainly summarized in this paper. The paper presents a short history of the altimeter development and the error sources of the altimeter. Then the paper comes to the Three methods of in-situ altimeter absolute calibration for error correction and get the Bias. Those three methods are the GPS buoys observation, the mooring tide gauge observation and the coastal tide gauge observation. The paper also discusses the history of the altimetry calibration and the international situation of the altimeter calibration sites. The 4 service calibration sites in the world including the Harvest Platform, the Bass calibration site, the Corsica Island calibration site and the Gavdos calibration site are introduced. Besides the paper introduces the dedicated calibration site for HY-2 series in Wanshan, Zhuhai. By introducing the methods of absolute calibration and the international calibration sites, the paper provides references for the HY-2 series calibration sites for China.

Key words: Satellite Radar Altimeter; In-situ observation; Absolute calibration