doi: 10.3969/j.issn.1003-2029.2022.01.002

复杂海域高精度海底地形测量关键问题研究

王双喜,肖 强,孙雪洁

(92899 部队, 浙江 宁波 315200)

摘 要:为实现复杂海域高精度海底地形测量,本文研究了软质海底无依托验潮站的布设、远距离 GNSS PPK 测量,GNSS 同步法确定验潮站深度基准面大地高和区域无缝垂直基准的构建等关键问题。以苏北浅滩海域为例,通过一系列关键技术的应用,解决了远距离大范围潮汐复杂海域的高精度海底地形测量问题,实际应用结果表明:基线距离在 92 km 时,GNSS PPK 大地高的解算精度优于 10 cm;与 GNSS 同步法计算出的深度基准面大地高进行对比分析,距离在100 km 内,结果互差小于 5 cm,两者精度具有一致性;区域无缝垂直基准模型的精度优于 5 cm,综合精度优于 10 cm。本文提出的方法可以满足远距离复杂海域的高精度海底地形测量的需要。

关键词:海底地形;复杂海域; GNSS PPK; 深度基准面大地高; 垂直基准

中图分类号: P229.1; P228.1 文献标识码: A 文章编号: 1003-2029 (2022) 01-0007-06

苏北浅滩海域辐射状沙洲群,滩阔槽深、地形 独特,属于强潮区。影响此区域的潮流系统有东海 的前进波、黄海的旋转波和苏北的沿岸潮流,这些 不同流系在前进的过程中达到某一谐振状态,刚好 与浅滩沙脊地形配合,在潮流水道里迅速形成海水 堆积, 堆积速度过快, 超出某一限度时, 极易引起 局部流速骤增、水位急涨的现象,简称"怪潮"[1]。 "怪潮"极易引发严重的海难伤亡事故,对苏北沿 海地区的生产安全构成了非常严重的威胁[2]。"怪 潮"海域的预警和研究离不开高精度海底地形数 据,但在苏北浅滩这种潮汐性质比较复杂的区域, 应用常规水深测量方法无法进行有效的潮位改正, 主检比对、相邻图幅拼接误差会非常明显。进行常 规水深测量时,潮位处理的精度取决于验潮站的布 设密度和分布情况。为了应对"怪潮",原国家海 洋局建立了多个海洋观测平台和桩基潮位站闯。而 在这种潮汐性质非常复杂的区域,这些验潮站很难 满足高精度水深测量的要求。

在远距离进行高精度海底地形测量研究方面, 国内外相关研究主要集中在基于全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 动态后 处理技术(Post Processed Kinematic, PPK)进行潮 位观测和无验潮水深测量上。赵建虎等四基于 PPK 技术对潮位观测和垂直基准面转换方法进行了研 究, 在基线距离 100 km 范围内, 基于深度基准的 全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 潮 位精度优于 10 cm。魏荣灏等[5]基于 PPK 定位技术 对杭州湾河口水下地形测量进行了实际应用, 定位 精度满足实际工作需要。汪连贺^[0]联合 GPS 和惯性 测量单元 (Inertial Measurement Unit, IMU) 姿态, 得到瞬时水位的精确高程,验潮距离 100 km 内, 精度优于10 cm。但在苏北浅滩这些远离海岸区域 实施测量,面临更多的挑战。短时间 GNSS PPK 潮 位无法实现当地多年平均海面的精确传递,故不能 直接使用 GNSS 验潮,需要在苏北浅滩这种无依托 的软质海底设立验潮站,采用自动验潮仪和 GNSS

收稿日期: 2021-09-27

作者简介: 王双喜 (1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事海洋测量数据处理研究。E-mail: wxiang120@163.com

PPK 同步的方法进行深度基准面大地高的测量。此外,各种测量手段和方法获取的海底地形大地高需要转换到深度基准面上,因此还需要在苏北浅滩"怪潮"海域建立一个无缝的垂直基准转换模型,通过海洋垂直基准转换获得高精度的海底地形。

1 关键问题研究

1.1 软质海底无依托验潮站的布设

自容式压力式验潮仪以其轻便灵活、无须设置验潮井等优势在海洋测绘中得到了广泛应用。以TGR-2050验潮仪为例,其观测精度可达 1 cm 以内。自动验潮仪通过检测海水的压力变化来计算海面的波动。实测水下固定位置的压力,将绝对压力值再减去同一时刻的大气压值就可以得到该验潮点的水压值^四。

苏北浅滩底质大部分是属于沙泥性质,相对比较松软,而且远离海岸无依托。在无依托海域设置验潮站,针对不同的海底底质和水深情况往往有着不同的验潮站布设方法。但需要慎重选择抛投地点,并采取必要的保护措施,保证验潮站的自身安全稳定和潮位数据的准确获取。

在较浅(低潮水深在 3 m 以内)的软基海域一般布设桩基式验潮站。长桩杆埋入海底,在桩杆底部绑定安装自容式验潮仪。其他海域可以用抛投式方法布设海上定点验潮站。抛投式潮位站一般选择在海底平坦、海流较小的海域,尽量避开航道和渔网区。抛投式验潮站一般固定安装在基座上,为了有效保护验潮站基座安全,基座通过足够长的缆绳与铁锚连接,基座沿 4 个方向展开分别设置防沉板。此外,抛投式潮位站需设置警示浮筒和网位仪,采用锚拖式方法进行回收。

1.2 GNSS 同步法确定验潮站深度基准面大地高

高精度的动态大地高测量一般采用实时动态定位技术(Real-Time Kinematic, RTK)、PPK 或精密单点定位技术(Precise Point Positioning, PPP),RTK 需要通过电台实时传递差分信息,作业距离在15 km 以内^[8]。远距离时可以采用 PPK 或 PPP,PPK 测量的基本原理与 RTK 相同,只是不需要实时传递差分信息,移动站只接收 GNSS 信息,事后进行

差分处理,作业距离可以达到 100 km 甚至更远^[9]。而 PPP 测量模式不受作业距离限制,但动态情况下 PPP 大地高测量精度低于 RTK 和 PPK,特别是大地高方向的精度稍差。随着北斗卫星定位技术的成熟,远距离 PPK 测量时,利用 GPS、GLONASS(Global Navigation Satellite System)和北斗三模 GNSS接收机,再应用精密卫星轨道和钟差,就能得到更高精度的三维坐标。

实际海底地形测量应用时以参考椭球面作为测量基准获取的数据最终应转换成深度基准面下的水深,这需要构建深度基准面和参考椭球面的垂直基准转换模型[10-12]。而对于每个验潮站来说,则需要获得其深度基准面的大地高。针对苏北浅滩海域这种远离岸边的验潮站,可以通过测量船锚定方法,在验潮站附近用 GNSS PPK 技术并综合自动验潮仪数据进行深度基准面大地高测量。具体过程如下。

- (1) 自动验潮仪与长期站同步观测,推算出当地多年平均海面 MSL 和深度基准面 L。
- (2) 锚定情况下通过远距离 GNSS PPK 获取大地高 h。
- (3) 对测船姿态进行改正,对高程信息进行滤波。
- (4) GNSS PPK 测量的瞬时水位 H_w 与自动验潮 仪潮位进行比对,计算得到该验潮站的深度基准面大地高。

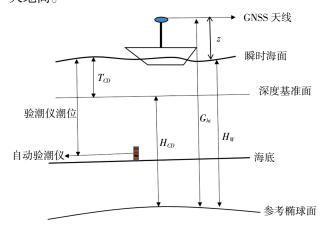


图 1 GNSS 同步法确定深度基准面大地高

测量船锚定情况下通过姿态传感器和 GNSS 数据进行 PPK 解算,获得该验潮站的瞬时水面信息。 GNSS 同步法如图 1 所示,通过 PPK 解算能够准确测定 GNSS 天线的大地高,天线到水面的天线高可 以在码头靠泊时通过全站仪测量得到。因此瞬时水 面的大地高计算公式如下。

$$H_W = G_{ht} - z \tag{1}$$

式中, H_W 为瞬时海面的大地高; G_{ht} 为GNSS 天线大地高;z为GNSS 天线到海水面的高差。

与自动验潮仪潮位数据进行对比,可以获取深 度基准面的大地高,计算公式如下。

$$H_{CD} = H_W - T_{CD} \tag{2}$$

式中, H_{co} 为验潮站深度基准面大地高; T_{co} 为自动验潮仪以深度基准面为基准的潮位。经滤波得到的 GNSS 潮位信息能够正确反映海上定点验潮站的潮位信息, 从而验潮站就能获得基于参考椭球面和深度基准面的两种基面的潮位观测值。直接比较潮位序列即可确定基面的关系,即深度基准面大地高。

$$H_{CD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(T_{CNSS}^{i} - T_{CD}^{i} \right)$$
 (3)

式中,n 表示潮汐序列的总个数; T_{CNSS} 表示GNSS 潮位。

为了保证精度, GNSS 同步法需要连续观测 4 h 以上, 观测时间至少要有一个低平潮或者高平潮过程, 最好进行完整潮汐周期对比。自动验潮仪布设期间应该进行两次 GNSS 同步观测, 然后将计算得到的深度基准面大地高进行对比,消除各种系统误差影响。

1.3 复杂海域无缝垂直基准模型的构建

以苏北浅滩为例,浅滩面积大,局部地形水深相对较浅,低潮时大面积干出。如果只采用水深测量方法则效率较低,只能抢在高潮时进行测量,还容易造成船只搁浅产生事故,人员安全无法保证。在大面积干出滩进行测量时,可以采用气垫船和机载 LIDAR(Light Detection And Ranging)测量手段,并辅以人工测量进行验证。在重点航道,地形复杂的深水区域可以采用多波束无验潮水深测量,其他区域可以高潮时段进行单波束无验潮水深测量。这些测量手段和方法的共同点是实际获得的测量数据为海底地形的大地高,因此需要构建连续无缝的垂直基准模型^[13],以保证每个测量点的大地高能够转换到深度基准面上,而且还可以进行无缝连接。

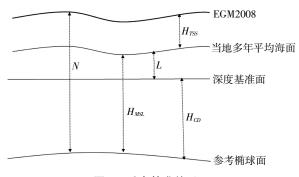


图 2 垂直基准关系

如图 2 所示,测量数据的参考基面为参考椭球面,根据平均海面与地球重力场模型 EGM2008 大地水准面模型相近似的特征,可以采用移去恢复法,根据 EGM2008 模型,通过验潮站深度基准面大地高构建出复杂海域无缝垂直基准模型,具体步骤如下。

- (1) 先确定复杂海域包括验潮站在内的所有测量范围。
- (2) 在测量区域建立深度基准面规则格网,格网大小根据实际的潮汐性质来确定,通过各验潮站的深度基准面 *L* 值在网格点进行插值。
- (3) 测区范围内建立一个大地水准面差距 N 的格网文件。
- (4) 建立海面地形的插值模型,通过 GNSS PPK 测量和当地多年平均海面计算,求出当地多年平均海面计算,求出当地多年平均海面的大地高 H_{NS} ,并与大地水准面差距 N 进行比较,得到海面地形 H_{NS} 如下。

$$H_{TSS} = N - H_{MSL} \tag{4}$$

(5) 建立整个测区的深度基准面大地高模型, 深度基准面大地高 *H_{cr}* 的计算公式如下。

$$H_{CD} = N - H_{TSS} - L \tag{5}$$

2 实例分析

2.1 技术方案

实验区域选择苏北浅滩海域,本区域包含各种海底地形,包括"怪潮"容易产生海域、大面积干出滩、港口和航道等。为了得到高精度的海底地形,本文通过以上关键问题技术研究,制定了一套针对"怪潮"海域的海底地形测量作业的技术方案。为了构建大范围测量海域的垂直基准转换模型,共

布设 6 个抛投式无依托海上验潮站,测区已有 6 个长期验潮站。验潮站都采用 TGR-2050 自容式验潮仪,并与长期验潮站同步观测 1 个月。验潮仪布设24 h 后采用锚定法进行第一次 GNSS 同步观测,验潮仪回收前再进行第二次 GNSS 同步观测,观测时长 4 h 以上,其中包含低平潮或高平潮,长期站也进行两次 GNSS 同步观测。自动验潮仪回收后,所有数据都稳定有效,没有出现明显的沉降和位移。

2.2 精度分析

GNSS 接收机采用双频多模接收机,GNSS PPK 测量采用双基站模式,最远基线长度为 94 km。为了验证远距离 GNSS PPK 解算的精度,设计了两种验证方案:一是用两个基准站(相距 62 km)中的一台当流动站进行处理;二是利用三台接收机,流动站与基站相距 92 km 左右,与另一个已知控制点相距 5 km 以内。控制点的坐标先通过静态相对测量进行解算获得毫米级的三维定位精度,以此控制点作为基准站进行短距离动态解算,解算结果认为是真值,再评估远距离 GNSS PPK 解算结果的精度。观测数据采用 Waypoint 软件进行处理,远距离时下载 IGS(International GNSS Service)精密星历参与解算。两种方案计算出的大地高对比情况如图3 和图 4 所示。

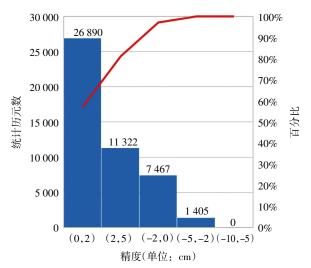


图 3 远距离静态测量时动态处理结果对比

以初始坐标为参考,评估静态情况下的动态处理的精度,统计结果显示大地高差值 Δh 的误差区间为 [-0.08 m, 0.12 m],集中分布在 5 cm 以内,中误差为 ± 0.032 m;以近距离解算结果为真值,评

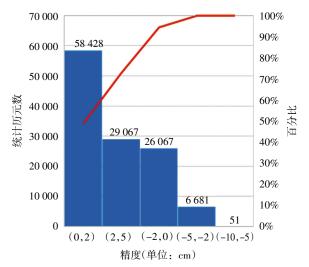


图 4 远距离动态测量结果对比

估动态模式的精度,统计结果显示大地高差值 Δh 的误差区间为 [-0.13 m, 0.14 m],集中分布在 10 cm 以内,中误差为±0.045 m。两种情况的大地高精度都在 10 cm 以内,80%以上在 5 cm 以内。静态测量时精度要明显高于动态测量,这是由于静态测量时的 PPK 解算中的滤波算法精度更高,此外远距离动态测量时只能与近距离测量结果进行对比,近距离 PPK 测量本身也会存在一定的误差。

采用同步法进行验潮站深度基准面大地高推算时, GNSS PPK 采用的两个基准站分别位于测区南北, 两站相距 62 km。解算时为提高精度采用双基站模式,以其中1个基站3次24h精密单点定位解算的平均值作为初始坐标,另外一个基准站用静态相对测量进行解算。12个验潮站分别进行了两次GNSS 同步观测,经综合计算后的GNSS PPK潮位与基于深度基准面潮位进行对比,结果如表1所示。

表 1 GNSS 同步法两次结果对比

站名	同步时间/h	基站 1 距离/km	基站 2 距离/km	差值/cm
海安	6	21	46	2.0
小洋口	6	34	28	2.9
王家槽	6	29	52	2.1
大沙	16	43	30	1.8
竹根沙	16	49	60	2.5
东北尖	16	60	25	3.2
黄沙洋	5	79	51	3.5
火星沙	5	70	31	4.1
北凌新闸	6	15	45	3.3
太阳沙	6	78	50	3.5
冷家沙	6	94	42	4.5
洋口港	6	53	29	3.2

从表 1 可以看出,两次 GNSS 同步测量的结果相差在 5 cm 以内,具有很好的一致性。同步时间较长的验潮站,深度基准面大地高的精度也相对较高。此外,验潮站站间距离对垂直基准关系的计算也有一定的影响,验潮站与基准站相距较远时,深度基准面大地高的精度相对较低。但站间距离在100 km 范围内,内符合精度仍优于 5 cm。

为了验证外符合精度,在小洋口长期验潮站架设了 GNSS 天线进行静态测量,通过长期站已知的各基面关系,直接推算出长期站的深度基准面大地高,经计算两者仅相差 1.8 cm。结果表明,直接计算的精度与 GNSS 同步法基本一致,满足相应规范精度要求。

为了验证构建的垂直基准模型精度,小洋口等 10 个验潮站参与垂直基准模型计算,模型格网设置 为 2 km。利用黄沙洋和火星沙两个验潮站作为检查站。经模型插值计算得到的两个检查站的深度基准 面大地高与实际测量值进行对比,两站分别相差 3.9 cm 和 2.1 cm。结果表明,无缝垂直基准模型的精度在 5 cm 以内,考虑到远距离 GNSS 的测量精度,其综合精度优于 10 cm。

为了验证最终海底地形测量成果的精度,选取测区 1:25 000 的水深成果图,分别采用常规水位改正方法和本文方法进行水位改正处理,水深成果主检测线交叉点不符值共检测 1 758 个点,对比如表 2 所示。

从表 2 可以看出,采用常规水位方法时,水深测量精度不符合规范要求,这是由于潮汐性质的差异较大,而验潮站布设密度不足所引起。而以参考椭球为测量和数据处理的基准,应用本文方法进行水深改正时得到的最终水深成果具有较高的精度,

表 2 水深成果主检测线交叉点不符值对比分析

不符值范围/m	常规水位改正/%	本文方法改正/%	
0 ~ 0.1	10.5	86.3	
0.1 ~ 0.2	20.3	13.5	
0.2 ~ 0.3	16.5	0.2	
0.3 ~ 0.4	18.2	0	
> 0.4	34.5	0	

能够满足在复杂海域实施海底地形测量的精度规范 要求。

3 结 论

本文通过苏北浅滩测量实践进行研究,重点解决了复杂海域潮位改正和垂直基准转换中存在的问题,结合实际应用得到的主要结论如下。

- (1) 在软基海底布设无依托海上验潮站时,浅 水海域采用桩基式,较深海域采用抛投式能够获得 较为稳定的潮位数据。
- (2) GNSS PPK 基线距离在 92 km 时,大地高的解算精度优于 10 cm,能够满足测量规范精度要求。
- (3) 通过对 12 个验潮站 GNSS 同步法计算出的深度基准面大地高进行对比分析,基线距离小于 100 km 时,两次 GNSS 同步测量的结果互差在 5 cm 以内,两者精度具有一致性。
- (4) 通过构建垂直基准模型可以对整个测区水深数据进行无缝转换,无缝垂直基准模型的精度优于 5 cm,考虑到远距离的 GNSS 测量精度,综合精度优于 10 cm。

本文针对苏北"怪潮"海域这种特殊海底地形测量进行研究分析,技术方案与精度评估结论对其 他潮汐复杂海域的海底地形测量也有一定的参考 价值。

参考文献:

- [1] 刘刻福. 苏北浅滩"怪潮"灾害监测预警技术研究[M]. 北京:海洋出版社,2015.
- [2] 吴萍, 王丽琳, 龚茂珣, 等. 苏北浅滩"怪潮"灾害监测预警综合服务关键技术研究[J]. 海洋预报, 2015, 32(6): 94-99
- [3] 袁捷. 激流怪潮发生机理研究与预警统计模式研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [4] 赵建虎,董江,柯灏,等. 远距离高精度 GPS 潮汐观测及垂直基准转换研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40 (6): 761-766.
- [5] 魏荣灏,陈佳兵,徐达.基于 PPK 无验潮的水下地形测量技术研究[J].海洋技术,2021,40(1):57-62.
- [6] 汪连贺. 基于 GPS PPK 技术的远距离高精度验潮方法研究[J]. 海洋测绘, 2014, 34(4): 24-27.

- [7] 肖付民,孙新轩,边刚,等.自容式压力验潮仪水位观测值影响因素与改正[J].海洋测绘,2014,34(2):35-37,75.
- [8] 李素江, 董江, 裴文斌, 等. RTK 三维水深测量精度分析及试验验证[J]. 海洋测绘, 2012, 32(5): 22-24, 38.
- [9] 赵建虎,王胜平,张红梅,等.基于 GPS PPK/PPP 的长距离潮位测量[J].武汉大学学报(信息科学版),2008,33(9):910-913.
- [10] 王双喜,许家琨,缪世伟.海洋测绘中无缝深度基准的构建[J].海洋测绘,2010,30(5): 14-16.
- [11] 暴景阳,许军,于彩霞.海洋空间信息基准技术进展与发展方向[J].测绘学报,2017,46(10):1778-1785.
- [12] 暴景阳,许军,崔杨.海域无缝垂直基准面表征和维持体系论证[J].海洋测绘,2013,33(2):1-5.
- [13] 王双喜,缪世伟,许家琨,等.多波束无验潮水深测量中垂直基准模型构建[J].海洋测绘,2016,36(1):48-50,62.

Research on Key Problems of High-precision Seabed Topographic Survey in Complex Sea Area

WANG Shuangxi, XIAO Qiang, SUN Xuejie (92899 Troops, Ningbo 315200, China)

Abstract: In order to realize high-precision seabed topographic survey in the complex sea area, the key problems such as the layout of soft seabed unsupported tide gauge, long-distance GNSS PPK survey, he determination of Depth Datum Geodetic Height of tide gauge by GNSS synchronous method and the construction of regional seamless vertical datum are studied. Taking the northern Jiangsu shoal as an example, through the application of a series of key technologies, the problem of high-precision seabed topographic survey in long-distance and large-scale tidal complex sea areas is solved. The practical application results show that when the baseline distance is 92 km, the solution accuracy of GNSS PPK geodetic height is better than 10 cm; the geodetic height of depth datum calculated by GNSS synchronous method is compared and analyzed. Within 100 km, the difference between the results is less than 5 cm, and the accuracy of the two is consistent; the accuracy of regional seamless vertical datum model is better than 5cm and the comprehensive accuracy is better than 10cm. The method proposed in this paper can meet the needs of high-precision seabed topographic survey in long-distance complex sea areas.

Key words: seabed topography; complex sea area; GNSS PPK; geodetic height of depth datum; vertical datum