

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.05.019

基于 EGM 模型的多波束无验潮测深技术应用

江 林^{1,2}, 陈振宇^{1,2}, 胡云朋^{1,2}, 董 迪³, 梁 湛^{1,2}, 刘 晃^{1,2}

(1. 国家海洋局南海调查技术中心, 广东 广州 510300; 2. 国家海洋局南海维权技术与应用重点实验室, 广东 广州 510300; 3. 国家海洋局南海规划与环境研究院, 广东 广州 510300)

摘 要:多波束水深测量中受潮汐因素的影响, 测量垂直基准是变化的, 具有瞬时性。传统多波束测量, 需在测区内设立一个或多个验潮站进行同步水位观测, 最终将水深归算到深度基准面上。针对多波束水深测量中垂直基准转换的复杂性问题, 文中基于地球重力场模型, 结合测区内实测的 GNSS/水准数据, 通过插值算法建立了测区范围内似大地水准面精化模型, 构建了多波束无验潮水深测量的垂直基准转换模型。通过实例表明, 该方法有效地消除了潮汐、动态吃水及涌浪等因素影响, 直接获取深度基准面的水深值, 提高工作效率, 可满足近岸多波束水深测量的工作需求。

关键词:水深测量; 无验潮; 多波束; EGM2008 模型

中图分类号: P229 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-2029(2019)05-0104-05

近海洋调查多波束水深地形测量中, 所获取的水深资料最终需要归算到深度基准面上。深度基准面是按照潮汐性质确定的一种特定基面, 测量时, 考虑到潮时差和潮差比等潮汐参数变化对水面高度的影响, 需设立适当数量的验潮站用于水位控制^[1]。所设立的验潮站还需周边水准点进行联测, 精准测量验潮站至似大地水准面之间的距离, 即正常高, 通过正常高与深度基准对应的关系, 最终将水深资料归算到验潮站的理论最低潮面。这种方法具有一定缺点: (1) 需要专门的人员测量水位或者到相关部门获取测量时段的水位数据; (2) 验潮站水尺零点需应用水准联测的方法确定其高程, 对于近岸工作区获取精确水准点资料非常困难, 极大地增加了工作成本。

目前, 国内外已经在无验潮测深技术领域开展了广泛的研究, 大部分研究都验证了 GNSS 技术结合单波束测深技术可很好地提高测深精度, 虽然此类方法综合考虑了潮汐、涌浪、测量船瞬时姿态等外部因素带来的误差, 但无验潮作业中高程转换大部分是基于多项式拟合的方法, 该方法对高程控制

点分布、地形起伏和作业范围对测量的精度会有影响。因此, 本文提出考虑重力异常的无验潮测量模式, 将地球重力场模型 (Earth Gravitational Model 2008, EGM2008) 应用于多波束无验潮测深中, 可改变传统多波束水深测量的作业模式。通过 EGM2008 模型, 结合沿岸实测的 GNSS/水准数据, 建立大地高与深度基准面转换模型, 该模型可将多波束系统测量得到的高精度 GNSS 高程和水深数据归算到深度基准面上, 实现了高效、高精度的多波束无验潮测深。

1 EGM2008 地球重力场模型

2008 年, 美国国家地理空间情报局发表了其最新研制成果——EGM2008 模型。EGM2008 模型与早期出现的模型相比, 更加复杂、精度更高, 将全球高程异常精度提高了 3~5 倍^[2-3], 而且在地形起伏越大的测区, 由该模型所得到的高程异常的精度提高越明显^[4]。

EGM2008 模型计算的高程异常在我国大陆的总精度为 ± 20 cm, 在东部沿海地区精度为 ± 10 cm^[5-8]。

收稿日期: 2019-04-30

基金项目: 国家海洋局南海分局海洋科学技术局长基金资助项目 (1627); 海洋公益性行业科研专项资助项目 (201305028); 海洋环境安全保障专项资助项目 (2017YFC1405502)

作者简介: 江林 (1986-), 男, 硕士, 注册测绘师, 工程师, 主要从事海洋测绘和软件开发研究。E-mail: jmugis@163.com

近海海洋调查一般地形较为平坦,平坦区域总体精度较高。因此,在近岸海洋测量中可利用沿海地区现有 GNSS/水准资料结合 EGM2008 模型,构建似大地水准面精化模型,满足近岸水深测量的需要。

EGM2008 模型高程异常计算公式为^[9-10]:

$$\xi_M = \frac{GM}{rv} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n \left(\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda \right) \cdot \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \quad (1)$$

式中: GM 为地心引力常数; a 为椭球长半径; $\bar{C}_{nm}$ 和 $\bar{S}_{nm}$ 为完全规格化位系数; $\bar{P}_{nm}(\cos\theta)$ 为完全规格化 Legendre 函数; r 为 GNSS 水准点的地心向径; v 为正常重力。利用该公式,可以实现大地高与高程基准之间的转换。

为实现的大地高向正常高系统转换,准确计算测区的高程异常是关键。高程异常指的是该点大地高与正常高的差值。在测量过程中需综合考虑潮位站与水准点分布情况、沿海区域地形变化趋势、已有高程异常分布情况等因素。

2 基于 EGM2008 模型的多波束无验潮测深方法

多波束测深是一个复杂的综合测量系统,主要由多波束声学系统、多波束采集系统、数据处理系统和外围辅助传感器等组成。一个波束在水中发射后,其声波是球形等幅度传播的,是没有方向性。多波束技术利用声波的相长干涉与相消干涉原理,可以使波束的指向性提高,相对于单波束提高了测量精度。但是海上测量受到船只动态吃水、船姿、潮位等因素影响垂直方向的精度,制约了获取水深数据的精度。

多波束无验潮测量原理是首先利用 GNSS、多波束测深系统获取参考椭球面下的海底地形数据;其次,结合测量得到测区周边高程点的 GNSS/水准数据,通过 EGM2008 模型求得高程转换参数;最后,将参考椭球面下的海底地形数据,通过似大地水准面模型精化转换为所需的正常高或深度基准下的三维坐标数据。无验潮模式可有效地消除潮位、动态吃水和涌浪的影响,同时还能避免了验潮站水位改正模型的误差影响,多波束无验潮测量系统示意图如图 1 所示。

由图 1 可知,获取椭球面的海底地形计算公式为:

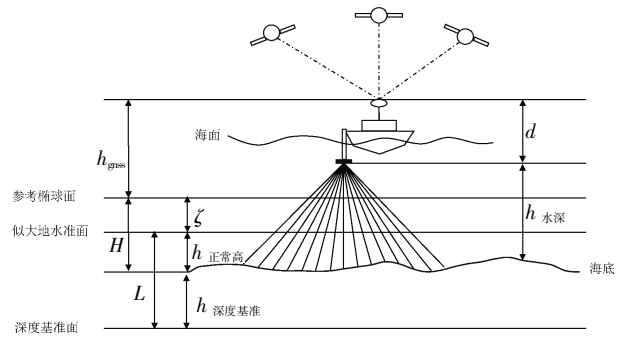


图 1 多波束无验潮测量系统示意图

$$H = h_{\text{正常高}} + \zeta = h_{\text{水深}} - (h_{\text{gms}} - d) \quad (2)$$

式中: H 为基于参考椭球面的海底地形高程; $h_{\text{正常高}}$ 为基于似大地水准面的海底地形高程; ζ 为测量点的高程异常值; $h_{\text{水深}}$ 为多波束测深仪测量得到的水深值; h_{gms} 为 GNSS-RTK 测量得到基于参考椭球面的高程值; d 为 GNSS-RTK 至多波束测深仪的固定偏差值。

多波束测量系统得到测量点的瞬时水深和定位信息,由式(2)可得,基于似大地水准面的海底地形高程 $h_{\text{正常高}}$ 计算公式为:

$$h_{\text{正常高}} = h_{\text{水深}} - (h_{\text{gms}} - d) - \zeta \quad (3)$$

根据测区验潮站的潮汐性质,可知正常高与深度基准之间关系 L ,由式(3)可得,计算 $h_{\text{深度基准}}$ 的公式为:

$$h_{\text{深度基准}} = h_{\text{正常高}} - L = h_{\text{水深}} - (h_{\text{gms}} - d) - \zeta - L \quad (4)$$

为了高精度地获取海底面的水深,垂直基准面的转换是关键,即求出公式中的 ζ 值,其转换分为两个步骤来实现,即从大地高到正常高,然后再到深度基准。对于大地高到正常高的转换,通常采用基于似大地水准面模型的几何修正法。由于局部区域 EGM2008 模型与实际大地水准面间难以保证紧密吻合,这种偏差主要是由于重力数据或水准点比较

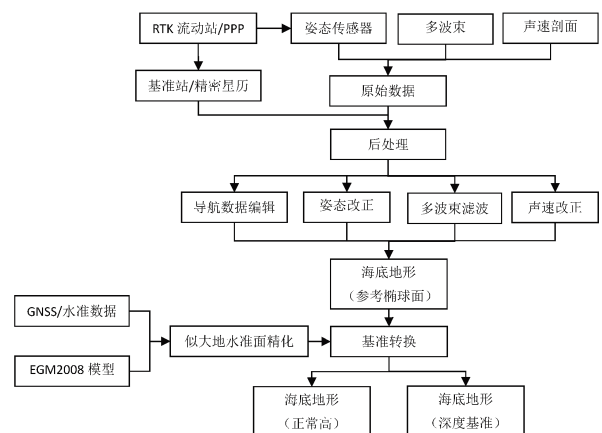


图 2 多波束无验潮测量系统工作流程图

稀少或分布不均匀所致,这种偏差能够采用与位置相关的几何方法进行修正。深度基准面是根据长期验潮资料建立的,可利用水准联测,获得深度基准面相对于似大地水准面的高程。从而得到大地高至深度基准面之间的基准转换关系。多波束无验潮测量系统工作流程图如图 2 所示。

多波束采集将多波束形成的数字信号,外围设备采集的定位信息、姿态数据、声速传播特性等信息综合形成了测量原始数据。多波束数据后处理,通过专用数据处理软件对获取的外业测量原始数据进行处理,经导航数据编辑、姿态改正、声速改正、多波束数据滤波后,可获得基于参考椭球面的海底数据。采用 EGM2008 模型和实测测区范围内 GNSS/水准数据,建立大地高与深度基准或正常高的垂直基准转换模型。基于参考椭球面的海底地形数据经模型转换后,可直接得到基于深度基准或正常高的海底三维坐标,有效地消除了潮位、动态吃水和涌浪等因素影响,提高效率。

3 基于 EGM2008 模型的多波束无验潮应用

3.1 研究区概况

本次研究区域位于广州市长洲岛东侧,进行基于高精度、高分辨率的 EGM2008 模型的无验潮测深技术试验研究。平面坐标采用 2000 国家大地坐标系,深度基准采用当地理论最低潮面。多波束测量系统为 RESON T50P,定位系统采用中海达 K18 分体式 RTK,姿态传感器采用 HYDRINS 惯导系统,声速测量采用 AML 声速剖面仪。通过对比常规人工验潮与基于 EGM2008 模型下的无验潮多波束测深两次测量结果,对本文提出的测量方法进行精度评估。

3.2 软件编制

目前公布的 EGM2008 模型的空间分辨率为

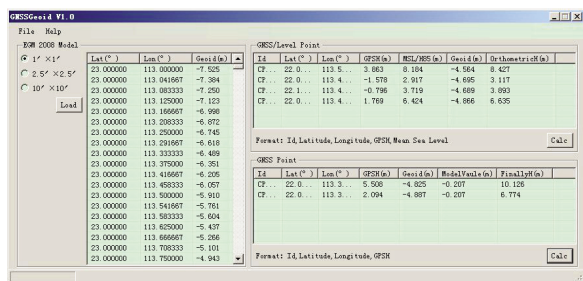


图 3 计算 GNSS 点的模型值并显示

10'×10', 2.5'×2.5', 1'×1', 通过自主编程的方式,采用 CSHARP 语言和 FORTRAN 语言混合编程,读取全球超高阶地球重力场模型,实现了 EGM2008 模型格网数据的提取,结合实测的 GNSS/水准点数据,通过格网内插和曲面内插来构建区域高程精化模型,对待精化的水深点高程进行平差校正或曲面拟合。计算 GNSS 点的模型值显示界面如图 3 所示。

3.3 精度评估

对本文提出的基于 EGM2008 模型的多波束无验潮测量方法,成果精度评估分为两个部分:(1) GNSS/水准点控制点高程精化精度评估;(2) 对常规人工验潮与基于 EGM2008 模型的无验潮水深精度分析。

3.3.1 GNSS/水准点检核 本次研究分别选取空间分辨率为 1'×1' 和 2.5'×2.5' 的 EGM2008 模型参与计算精化高程。内符合精度采用参与模型计算的 4 个 GNSS/水准点进行精度评估,外符合精度采用未参与模型计算的 2 个 GNSS/水准点作为外部检核点,获取检核点的高程异常值,精化后似大地水准面模型内插出的检核点的精化高程与已知水准数据进行比较,检验 EGM2008 模型的精度和实际的应用效果。GNSS/水准点检核点精度分析情况详见表 1。

表 1 GNSS/水准点检核点精度分析表

序号	水准 高/m	EGM2008 精化		较差/cm		备注
		高程/m				
		1'×1'	2.5'×2.5'	1'×1'	2.5'×2.5'	
1	8.184	8.220	8.219	-3.6	-3.5	参与模型 计算
2	2.917	2.910	2.910	0.7	0.7	参与模型 计算
3	3.719	3.686	3.686	3.3	3.3	参与模型 计算
4	6.424	6.428	6.429	-0.5	-0.5	参与模型 计算
5	10.128	10.126	10.132	0.2	-0.4	外部检 核点
6	6.737	6.744	6.778	-0.7	-4.1	外部检 核点

在本次实验中,对模型精度进行分析:(1) 内符合精度,依据计算高程精化参数的 GNSS/水准点的较差标准差评估模型精度,由表 1 可知,采用 1'×1' 空间分辨率的 EGM2008 模型计算出的精化高程,

较差值在 $-3.6\sim+3.3$ cm之间,较差标准差 2.48 cm,采用 $2.5'\times 2.5'$ 空间分辨率的EGM2008模型计算出的精化高程,较差值在 $-3.5\sim+3.3$ cm之间,较差标准差 2.44 cm。(2)外符合精度,利用未参模型计算的独立检核点的较差中误差来评估模型精度。由表1可知,采用 $1'\times 1'$ 空间分辨率的EGM2008模型计算出的精化高程,较差值在 $-0.7\sim+0.2$ cm之间,较差中误差为 ± 0.45 cm,采用 $2.5'\times 2.5'$ 空间分辨率的EGM2008模型计算出的精化高程,较差值在 $-4.1\sim-0.4$ cm之间,较差中误差为 ± 1.85 cm。计算出的精化高程采用EGM2008模型空间分辨率 $1'\times 1'$ 优于 $2.5'\times 2.5'$,但 $1'\times 1'$ 模型计算量大,实际应用中应综合考虑。

3.3.2 水深精度分析 水深精度评估采用常规人

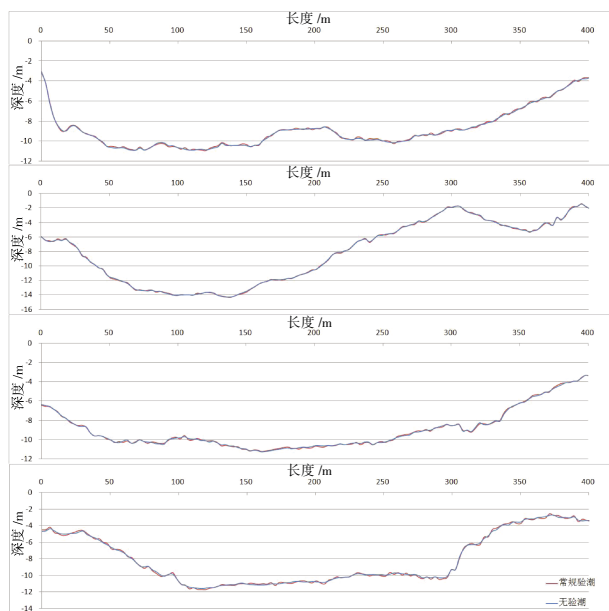


图4 水深比对剖面

工验潮与基于EGM2008模型下的无验潮多波束测深两次测量结果,在研究区内选取具有代表意义4条剖面进行比对分析,各剖面如图4所示。

从图4可以看出,常规人工验潮与基于EGM2008模型的无验潮水深剖面趋势基本一致,但两条剖面不完全重合,常规人工验潮受到船舶动态吃水、涌浪和测量水位读数等因素影响,剖面上出现小抖动,基于EGM2008无验潮水深剖面较为平滑,更能反应真实的海底地形。两种模式下重合点高差在0~20 cm以内,满足水深测量在浅水区域(0~20 m)极限误差 ± 30 cm的要求。这表明,本文提出的基于EGM2008模型的多波束无验潮技术方法满足海洋工程的精度要求。

4 结论

多波束测深系统因其全覆盖、高效率、高精度等优点而在近年来的水深测量中得到广泛应用。无验潮模式是水深测量的发展趋势,可有效地消除潮位、动态吃水和涌浪的影响,同时还能避免验潮站水位改正模型的误差影响。本文基于地球重力场模型EGM2008,结合测区内实测GNSS/水准数据,通过插值算法建立了测区范围内似大地水准面模型,解决了多波束无验潮水深测量中垂直基准模型的构建,从而获取高精度的基于理论最低潮面的海底地形点的三维坐标值。在实际应用中,无验潮模式与人工验潮模式进行比对,精度满足工程建设和海洋调查需求。但受GNSS-RTK差分信号的距离限制,有一定的局限性,可采用精密单点技术或后处理差分技术,扩大适用范围。

参考文献:

- [1] 陆秀平,边少峰,黄辰虎,等.黄浦江航道多波束测深数据处理研究[J].海洋测绘,2011,31(3):4-7.
- [2] Gruber T. Evaluation of the EGM2008 gravity field by means of GPS leveling and sea surface topography solutions[J]. Newton's Bulletin, 2009(4):3-17.
- [3] Jekeli C, Yang H J, Kwon J H. Evaluation of EGM08—globally and locally in South Korea[J]. Newton's Bulletin, 2009(4):38-49.
- [4] 张兴福,刘成,刘红新.利用GPS/水准数据检核EGM2008重力场模型的精度[J].测绘通报,2009(2):7-9.
- [5] 章传银,郭春喜,陈俊勇,等. EGM2008地球重力场模型在中国大陆适用性分析[J].测绘学报,2009,38(4):283-289.
- [6] 杨金玉,张训华,张菲菲,等. EGM2008地球重力模型数据在中国大陆地区的精度分析[J].地球物理学进展,2012,27(4):1298-1306.
- [7] Yao Y B, Wang J. Research and realization of seamless splicing of quasi-geoid[J]. Geo-spatial Information Science, 2010, 13(1):56-59.
- [8] 田斌,李进,申文斌.基于EGM2008和SRTM模型确定的新疆地区似大地水准面及其精度评估[J].测绘科学,2009,34(SI):5-6.
- [9] 魏子卿,王刚.用地球位模型和GPS/水准数据确定我国大陆似大地水准面[J].测绘学报,2003,32(1):1-5.
- [10] Hofmann-Wellenhof B, Moritz H. Physical geodesy second edition[M]. New York: SpringerWien New York, 2006.

Application of Multibeam Non-Tidal Sounding Technology Based on EGM

JIANG Lin^{1,2}, CHEN Zhen-yu^{1,2}, HU Yun-peng^{1,2}, DONG Di³, LIANG Zhan^{1,2}, LIU Huang^{1,2}

1. *South China Sea Marine Survey and Technology Center, Guangzhou 510300, Guangdong Province, China;*

2. *Key Laboratory of Technology for Safeguarding of Marine Rights and Interests and Application, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, Guangdong Province, China;*

3. *South China Sea Institute of Planning and Environmental Research, Guangzhou 510300, Guangdong Province, China*

Abstract: In multibeam bathymetry, the vertical datum is variable and instantaneous, influenced by tides. In traditional multibeam bathymetry, researchers should set up one or more tide stations in the survey area, to synchronously observe the water level, and reduce the water depth to the chart datum. Due to the complexity of vertical datum conversion in multibeam bathymetry, this paper proposes a vertical datum conversion model for multibeam non-tidal sounding, by building the quasi-geoid model with interpolation method in the survey area, with the EGM and the GNSS/leveling data. This method can directly obtain the bathymetric value of depth datum and meet the demand of offshore multibeam bathymetry. In terms of error, this method can effectively eliminate the effects of tides, dynamic draft, surging waves or other factors, which can improve work efficiency.

Key words: bathymetry; non-tidal sounding; multibeam; EGM2008