

多波束测深波束归位近似转换模型研究

卜宪海¹, 王明伟¹, 阳凡林^{1,2,3}, 孙月文¹

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室, 山东 青岛 266590; 3. 山东科技大学 山东省高校海洋测绘重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要:多波束测深波束位置计算精度取决于波束归位模型优劣。现有波束归位大多采用严密的转换模型, 虽然计算精度高, 但转换繁琐; 少数采用近似的转换模型以简化转换过程, 但由于仅考虑子午线收敛角的影响而忽视了高斯投影时距离变形的影响, 计算精度较低。针对上述问题, 本文提出一种近似转换模型, 顾及投影变形对测量距离的影响, 并给出距离改化近似公式以简化计算过程。实验结果表明, 与严密转换模型相比, 该近似转换模型计算结果平面偏差最大约 1 cm, 满足现有相关测量规范规定的精度要求。

关键词:波束脚印; 位置归算; 近似转换模型; 距离改化

中图分类号: P229

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)05-0028-07

Research on Approximate Conversion Model of Beam Homing in Multibeam Echosounding

BU Xianhai¹, WANG Mingwei¹, YANG Fanlin^{1,2,3}, SUN Yuewen¹

(1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Qingdao, Shandong 266590, China; 3. Key Laboratory of Marine Surveying and Charting in Universities of Shandong, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The accuracy of position calculation of multibeam echosounding depends on beam homing model. The accurate conversion model adopted by most of the existing homing calculations has high precision but a relatively complex process. The approximate conversion model only used by a few homing calculations can simplify the calculation process but has lower accuracy because it only considers the effect of meridian convergence angle but neglects the effect of distance deformation in Gaussian projection. To solve these problems, this paper proposed a new approximate conversion model which not only considered the effect of projection deformation on distance measurement but also gave the distance changing formula to simplify the calculation process. The results show that compared with the accurate conversion model, the calculated plane bias of this proposed conversion model is about 1cm, which meets the accuracy requirements of existing related norms of surveying.

Key words: footprint; position reduction; approximate conversion model; distance correction

多波束测深已成为现代海洋测量中常用的手段之一, 具有测量效率高、覆盖面积广、精度高、自动化和数字化等特点, 将传统测深技术的点、线测量扩展到面测量, 可一次给出与航迹线相垂直的平面内成百上千个波束脚印的水深值^[1-2]。为有效表达水下地形, 将波束脚印表达在地理坐标系下, 多波束测深仪通过借助外

收稿日期: 2016-02-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41376108); 海洋公益性行业科研专项经费资助项目(201305034); 测绘公益性行业科研专项经费资助项目(201512034)

作者简介: 卜宪海(1990—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事海洋测量方面的研究. E-mail: buxianhai2012@163.com
阳凡林(1974—), 男, 湖北荆州人, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋测绘及 GNSS 应用等方面的研究, 本文通信作者. E-mail: yang723@163.com

围辅助设备(GPS、罗经和姿态仪等)和自身测量的波束到达角和声波往返于换能器和波束脚印之间的旅行时来计算波束实际位置。由于实际作业时测量船并不处于一个平衡状态,且声波在海水中传播速度变化明显,如何在这样一个复杂环境下,获取波束脚印精确的地理坐标,一直是多波束数据处理中的一个关键问题^[3]。《海道测量规范》^[4]中规定,水深测量中,定位点的点位中误差大于1:5 000比例尺测图时应不大于图上1.5 mm。

针对这一问题,国内学者取得了不少成果。赵建虎^[5]研究了波束归位时声速、姿态、潮位等方面的影响,并介绍波束脚印归算至大地坐标系的过程;朱小辰等^[6]详细推导了波束从换能器水平坐标系到大地坐标系下的坐标转换过程,并结合算例与CARIS软件进行对比,验证了转换过程的有效性;黄漠涛等^[7]则全面推导了多波束测深系统和机载激光测深系统测点大地坐标的精确计算公式及其相应的精度估算公式;杨绍海^[8]从数学角度推导了波束从换能器坐标系到高斯平面坐标系的近似转换过程。

上述研究成果,可将波束脚印计算模型分为严密转换模型与近似转换模型,其中波束从换能器坐标系到当地水平坐标系,再到大地坐标系下坐标的转换过程为严密转换模型;波束从换能器坐标系经当地水平坐标系后直接到高斯平面坐标系的转换过程为近似转换模型。严密转换模型虽然研究成熟、保证计算精度,但转换过程比较繁琐;杨绍海^[8]给出的近似转换模型虽实现了波束从当地水平坐标系到高斯平面坐标系的转换,但未考虑投影变形对测量距离的影响^[9],带来一定计算误差。因此,本文提出一种近似转换模型,在考虑子午线收敛角影响的同时,给出距离改化公式的简化形式,以减小投影变形的影响,从而提高近似转换模型的计算精度。

1 波束归位模型及计算方法

1.1 坐标系定义

波束归位涉及的坐标系主要包括多波束换能器坐标系、载体坐标系(船坐标系)、当地水平坐标系、局部坐标系、大地坐标系和高斯平面坐标系:①多波束换能器坐标系定义为以换能器阵列中心为坐标原点 O_e ,在换能器阵列平面内,水平向前沿船艏向为 Y_e 轴,水平向右为 X_e 轴, Z_e 轴垂直向上;②载体坐标系坐标原点 O_v 可以任意选取,一般选择测船几何中心或GNSS接收机天线相位中心,其定义为,纵轴 Y_v 方向为船艏方向,横轴 X_v 为过原点 O_v 指向右舷, Z_v 轴垂直于 XOY_v 平面向上;③当地水平坐标系定义与三轴指向的选择顺序有关,主要有东北天(ENU)和北东地(NED)两种形式,其原点 O_L 一般位于GNSS天线相位中心,本文采用东北天定义方式,并规定东方向为 X_L 轴正方向,北方向为 Y_L 轴正方向, Z_L 轴垂直于 XOY_L 平面向上;④局部坐标系与当地水平坐标系的定义相似,两坐标系原点重合,但局部坐标系的纵轴即 Y_L 轴指向瞬时航向,横轴 X_p 垂直于 ZOY_p 面指向船右舷方向;以上坐标系均为右手坐标系,主要坐标系定义如图1所示。

1.2 波束归位计算过程

波束归位主要是对各传感器的观测量集成计算,并通过各传感器坐标系之间的联系,将波束位置从相对坐标变换到绝对坐标的过程。一般先将波束在局部坐标系或当地水平坐标系下表示,然后再转换到大地坐标系或高斯平面直角坐标系下。

1.2.1 严密转换模型

由于声速在海水不同水层中变化明显,因此必须考虑声线弯曲的影响^[10],不宜采用将波束脚印首先表达在换能器坐标系,再变换到载体坐标系,然后到当地水平坐标系下

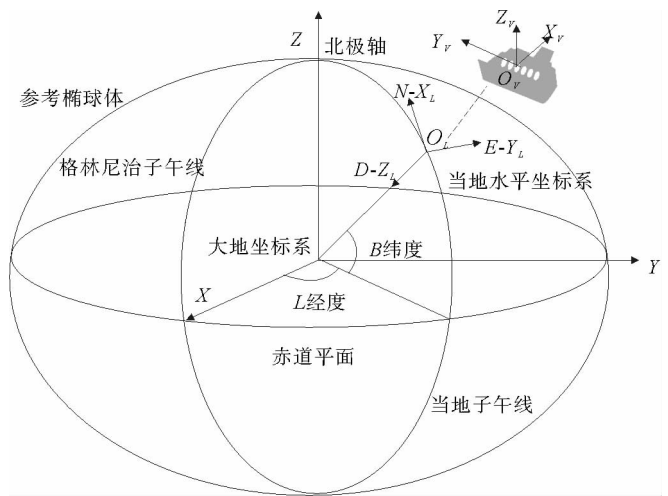


图1 主要坐标系

Fig.1 Main coordinate systems

的模式,而是应通过波束发射角、安装角、姿态角等信息计算实际的波束三维入射角 θ_1 和侧向角 θ_2 (图 2),根据声速剖面进行声线跟踪,直接计算测深点在局部坐标系下的侧向距和航向距,之后再变换到当地水平坐标系。其详细计算过程与公式推导参见文献[11]~[13],这里重点叙述从当地水平坐标系变换至大地坐标系的过程。

假设测深点在局部坐标系中的坐标为 (X_1, Y_1, Z_1) , 此时罗经测得的航向角为 θ_H , 局部坐标系原点(即 GNSS 天线相位中心)在地心地固坐标系下的大地坐标为 (B, L, H) , 其高斯投影平面坐标为 (x_1, y_1) , 则测深点在当地水平坐标系下的坐标 (X_2, Y_2, Z_2) 计算公式为:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_H & \sin\theta_H & 0 \\ -\sin\theta_H & \cos\theta_H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据严密转换模型,首先将当地水平坐标系绕 E 轴(X 轴)逆时针旋转 $90^\circ - B$, 然后绕 U 轴(Z 轴)顺时针旋转 $90^\circ + L$, 此时当地水平坐标系与空间直角坐标系平行^[11], 如图 3 所示。

设测深点在地心地固坐标系下的空间直角坐标为 (X_3, Y_3, Z_3) , 则有以下关系式:

$$\begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_w \cdot \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{oe} \\ Y_{oe} \\ Z_{oe} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $[X_{oe}, Y_{oe}, Z_{oe}]^T$ 为当地水平坐标系原点 O_L (GNSS 天线相位中心)在地心地固坐标系下的空间直角坐标,可根据大地坐标和空间大地直角坐标之间的转换关系得到; \mathbf{R}_w 为关于大地经度和纬度的旋转矩阵。其中:

$$\mathbf{R}_w = \mathbf{R}_B \cdot \mathbf{R}_L, \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_B = \begin{bmatrix} \cos(90^\circ - B) & 0 & -\sin(90^\circ - B) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(90^\circ - B) & 0 & \cos(90^\circ - B) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_L = \begin{bmatrix} \cos(90^\circ + L) & -\sin(90^\circ + L) & 0 \\ \sin(90^\circ + L) & \cos(90^\circ + L) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

最后,通过高斯投影将空间直角坐标 (X_3, Y_3, Z_3) 转成高斯平面坐标 (x, y) 。由此可见,严密转换模型在计算高斯平面坐标时需进行两步转换。

1.2.2 近似转换模型

通常在相对小的范围内,当地水平坐标系与高斯平面直角坐标系之间纵轴的夹角近似为子午线收敛角 γ , 则一点的当地水平坐标可以不经大地坐标,直接转换到高斯投影平面上。以往近似转换模型虽然在此基础上实现了平面坐标的计算,但忽视了在转换过程中投影变形对测量距离的影响,所以应在模型中增加对观测距离的改化计算。由于是在两个平面上进行旋转变换,故近似转换模型相对于严密转换模型具有更强的直观性,如图 4 所示。由此可见,近似模型在计算高

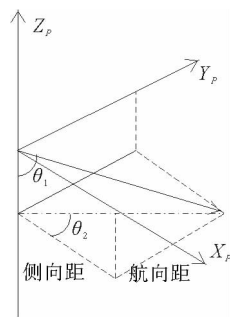


图 2 局部坐标系下波束三维空间

Fig. 2 3D space of beams under local coordinate system

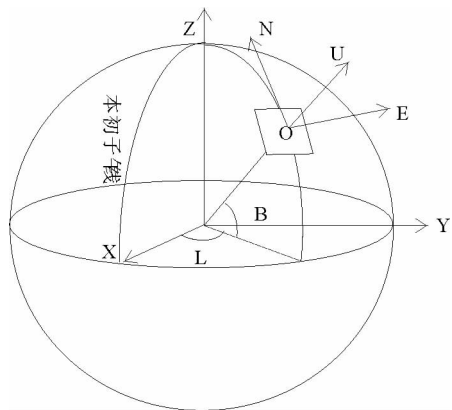


图 3 当地水平坐标系到大地坐标系的转换

Fig. 3 The conversion from local level coordinate system to geodetic coordinate system

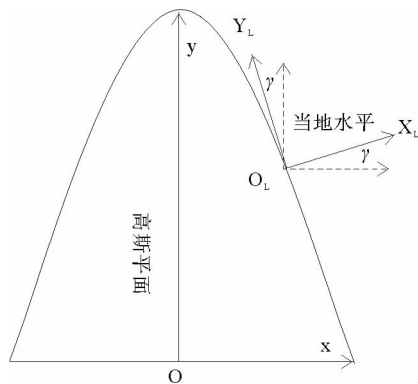


图 4 当地水平坐标系与高斯平面直角坐标系转换

Fig. 4 The conversion from local horizontal coordinate system to Gauss plane rectangular coordinate system

斯平面坐标时与严密模型相比,转换过程仅需一步。

子午线收敛角 γ 的精确推导公式可参见文献[9],在实际水下地形测量中,可按照如下近似公式进行计算:

$$\gamma = \Delta L \cdot \sin B. \tag{6}$$

式中, ΔL 是 GNSS 天线相位中心与中央子午线的经差, B 为某点纬度。

所以,一般情况下若不进行距离改化,根据上述假设数据和公式(1)得到测深点在当地水平坐标系下的坐标 (X_2, Y_2, Z_2) , 则以往近似模型得到该点在高斯投影后近似平面坐标 (x', y') 的计算公式为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\sin\gamma & \cos\gamma \\ \cos\gamma & \sin\gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{bmatrix}. \tag{7}$$

但是,当在深水区域进行多波束探测时,边缘波束侧向距或航向距可达几百米甚至上千米,即使微小的投影变形也将产生较大的计算误差;此外,根据高斯投影变形特点,距离中央经线越远,投影变形越大,当测区所在位置偏离中央经线较远时,即使是在浅水区域进行多波束探测,也能导致边缘波束甚至靠近中央区域的波束在计算平面坐标时产生较大误差。以上两种情况则必须对测量距离进行改化,以满足生产单位的精度需求。

根据文献[9]可得,距离改化的两步公式分别为公式(8)和(9):

$$S = s - s \left(\frac{H_m}{R} - \frac{H_m^2}{R^2} \right) + \frac{s^3}{24R^2}. \tag{8}$$

式中, S 为椭球面上的大地线长度, m ; $s = \sqrt{a^2 - h^2}$, $h = H_2 - H_1$, $H_m = (H_1 + H_2)/2$, 其中 s, h, H_m 均为辅助变量, m ; d 为 GNSS 天线中心至测深点之间的斜距, m ; H_1 和 H_2 分别为 GNSS 天线相位中心和测深点处的大地高, m ; R 为 GNSS 天线相位中心处的椭球半径, m 。

$$D = S \left(1 + \frac{y_m^2}{2R_m^2} + \frac{\Delta y^2}{24R_m^2} \right). \tag{9}$$

式中, D 为高斯投影平面上的距离, m ; R_m 为测区中点的平均曲率半径, m ; y_m 为弦长 D 两端点的横坐标 y_1 和 y_2 的平均值, m ; Δy 为弦长 D 两端点横坐标 y_1 和 y_2 的差值, m 。

然而在实际计算中,公式(8)中测深点处大地高 H_2 和斜距 d 为未知量,需另行推导,且改化公式过于繁琐。考虑到海洋测量的平面定位精度要求,进行第一步距离改化时可忽略大地水准面差距的影响。结合测深点在当地水平坐标系下的坐标 (X_2, Y_2, Z_2) , 给出公式(8)的近似公式:

$$S = \frac{R \sqrt{X_2^2 + Y_2^2}}{R + Z_2}. \tag{10}$$

同理,公式(9)中,GNSS 天线相位中心处的高斯平面坐标 (x_1, y_1) 可由其大地坐标 (B, L, H) 计算得到,而测深点处的横坐标 y_2 为未知量。结合测深点在当地水平坐标系下的坐标 (X_2, Y_2, Z_2) , 给出 y_2 的近似公式:

$$y_2 = y_1 + X_2. \tag{11}$$

然后,根据侧向角 θ_2 , 可得测深点在高斯平面中相对于 GNSS 天线相位中心的坐标偏移量 Δx 和 Δy 为:

$$\begin{cases} \Delta x = D \cdot \cos\theta_2, \\ \Delta y = D \cdot \sin\theta_2. \end{cases} \tag{12}$$

最后,根据公式(7)可得该近似转换模型中测深点的高斯平面坐标 (x'', y'') 的计算公式为:

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\sin\gamma & \cos\gamma \\ \cos\gamma & \sin\gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}. \tag{13}$$

综上所述,改进后的近似转换模型计算步骤如下:

第一步:根据波束发射角、安装角、姿态角等信息,计算实际的波束三维入射角 θ_1 和侧向角 θ_2 , 并利用声速剖面进行声线跟踪,计算测深点在局部坐标系下的坐标 (X_1, Y_1, Z_1) ;

第二步:根据航向角 θ_H 和公式(1)计算测深点在当地水平坐标系下的坐标 (X_2, Y_2, Z_2) ;

第三步:根据公式(6)计算 GNSS 天线中心处近似子午线收敛角 γ 和公式(9)~(12)计算测深点在高斯平面坐标系下相对于 GNSS 天线相位中心的坐标偏移量 Δx 和 Δy ;

第四步:根据公式(13)计算测深点的高斯平面坐标 (x'', y'') ;若不进行距离改化,则可在第二步之后,利

用公式(7)计算近似坐标(x', y')。

2 算例分析

现有 3 组多波束模拟数据,每组含 3 个波束,具体见表 1。假设三组数据的换能器姿态为横摇 3.5° ,纵摇 1.5° ,船航向 35° ;换能器安装偏差角依次为横摇偏差为 4° ,纵摇偏差为 3° ,航向偏差为 5° ,换能器相对于 GNSS 天线相位中心偏移量为 $(0.2 \text{ m}, 0.5 \text{ m}, -2.1 \text{ m})$;为便于计算,假设各波束经历水层为常声速层,声速大小为 $1\,500 \text{ m/s}$;投影方式为高斯 6 度带投影,中央经线为 117° 。

为验证改进后近似转换模型提高数据计算的精度,结合模拟数据,分别将以往近似模型和改进后近似模型的计算结果与严密模型进行对比,对比结果如表 2~7 和图 5~7 所示。

表 1 模拟数据

Tab. 1 Simulated data

组别	波束编号	水深/m	波束发射角/ $^\circ$	波束旅行时/s	GNSS 坐标/ $^\circ$
1	①		0	0.080	(30,120)
	②	60	30	0.093	(30,120)
	③		60	0.160	(30,120)
2	④		60	0.160	(30,118)
	⑤	60	60	0.160	(30,120)
	⑥		60	0.160	(30,123)
3	⑦	430	30	0.630	(30,118)
	⑧	1 700	30	2.660	(30,118)
	⑨	4 100	30	6.330	(30,118)

表 2 第 1 组波束归位计算结果(不含距离改化)

Tab. 2 The result of the first group of data(without distance correction)

m

波束编号	x	y	x'	y'	Δx_1	Δy_1
①	3 323 909.35	789 518.42	3 323 909.35	789 518.43	0.00	0.01
②	3 323 887.82	789 545.43	3 323 887.83	789 545.41	0.01	0.02
③	3 323 845.10	789 599.07	3 323 845.17	789 598.99	0.07	0.08

表 3 第 1 组波束归位计算结果(含距离改化)

Tab. 3 The result of the first group of data(with distance correction)

m

波束编号	x	y	x''	y''	Δx_2	Δy_2
①	3 323 909.35	789 518.42	3 323 909.35	789 518.42	0.00	0.00
②	3 323 887.82	789 545.43	3 323 887.82	789 545.43	0.00	0.00
③	3 323 845.10	789 599.07	3 323 845.10	789 599.07	0.00	0.00

表 4 第 2 组波束归位计算结果(不含距离改化)

Tab. 4 The result of the second group of data(without distance correction)

m

波束编号	x	y	x'	y'	Δx_1	Δy_1
④	3 320 472.85	596 561.22	3 320 472.86	596 561.21	0.01	0.01
⑤	3 323 845.10	789 599.07	3 323 845.17	789 598.99	0.07	0.08
⑥	3 335 259.91	1 079 525.84	3 335 260.14	1 079 525.52	0.23	0.32

表 5 第 2 组波束归位计算结果(含距离改化)

Tab. 5 The result of the second group of data(with distance correction)

m

波束编号	x	y	x''	y''	Δx_2	Δy_2
④	3 320 472.85	596 561.22	3 320 472.85	596 561.22	0.00	0.00
⑤	3 323 845.10	789 599.07	3 323 845.10	789 599.07	0.00	0.00
⑥	3 335 259.91	1 079 525.84	3 335 259.90	1 079 525.83	0.01	0.01

表 6 第 3 组波束归位计算结果(不含距离改化)

Tab. 6 The result of the third group of data(without distance correction)

波束编号	x	y	x'	y'	Δx_1	Δy_1
⑦	3 320 410.22	596 619.65	3 320 410.25	596 619.63	0.03	0.02
⑧	3 320 008.52	597 040.37	3 320 008.73	597 040.15	0.21	0.22
⑨	3 319 281.83	597 801.46	3 319 282.84	597 800.41	1.01	1.05

表 7 第 3 组波束归位计算结果(含距离改化)

Tab. 7 The result of the third group of data(with distance correction)

波束编号	x	y	x''	y''	Δx_2	Δy_2
⑦	3 320 410.22	596 619.65	3 320 410.22	596 619.65	0.00	0.00
⑧	3 320 008.52	597 040.37	3 320 008.52	597 040.37	0.00	0.00
⑨	3 319 281.83	597 801.46	3 319 281.83	597 801.46	0.00	0.00

通过上述表 1~7 和图 5~7,并结合实验数据可以发现:

1) 从第一组数据可见,在不进行距离改化时,①~③波束坐标差值 Δx_1 和 Δy_1 随波束角的增大而逐渐增大,当水深为 60 m 时,边缘波束平面坐标在 x 和 y 方向上的误差可达 8 cm 左右,其原因是边缘波束侧向距与航向距较大,产生的投影变形也随之变大;增加距离改化后,计算精度提高至毫米级,接近于严密转换模型的计算结果;

2) 从第二组数据可见,在不进行距离改化时,④~⑥波束坐标差值 Δx_1 和 Δy_1 随着 GNSS 天线相位中心经度的增大而逐渐变大,⑥号波束在 x 和 y 方向上的误差明显扩大至分米级,这一点符合高斯投影变形特点,即距中央子午线越远,投影变形越大;增加距离改化后,虽然④与⑤两波束计算精度提高至毫米级,但⑥号波束在 x 和 y 方向上存在 1 cm 的误差,这是由距离改化近似公式的系统误差所致;

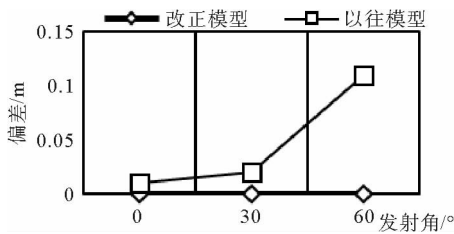


图 5 两近似模型与严密模型平面偏差随发射角变化曲线

Fig. 5 Plane bias curves of the two approximate models and accurate model with variable launch angles

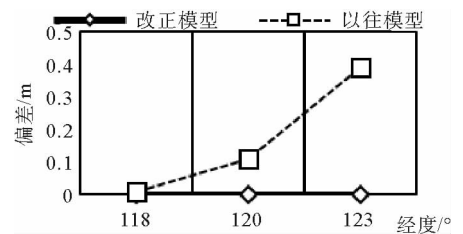


图 6 两近似模型与严密模型平面偏差随经度变化曲线

Fig. 6 Plane bias curves of the two approximate models and accurate model with variable longitudes

3) 从第三组数据可见,在不进行距离改化时,即使在投影变形较小的情况下,靠近中央波束区域的⑦~⑨波束坐标差值 Δx_1 和 Δy_1 也随水深的增大而逐渐增大至米级,当水深为 1 500 m 左右时,在 x 和 y 方向上的误差达分米级,当水深为 4 000 m 左右时,在 x 和 y 方向上的误差达米级;增加距离改化后,计算结果接近于严密转换模型;

4) 从④~⑨波束坐标差值 Δx_1 和 Δy_1 、 Δx_2 和 Δy_2 的对比中可见,水深对距离改化近似公式的系统

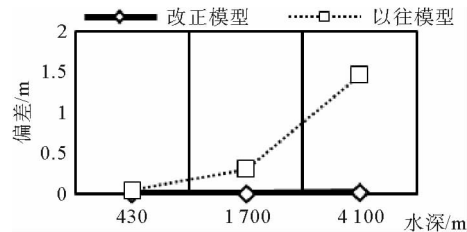


图 7 两近似模型与严密模型平面偏差随深度变化曲线

Fig. 7 Plane bias curves of the two approximate models and accurate model with variable depths

误差影响不大,而中央经线的选择对距离改化近似公式的系统误差影响则较大,因此,在运用该模型进行计算时,应合理选择投影方式;

5) 从图 5 至图 7 可见,增加距离改化后的近似模型可明显提高波束脚印坐标的计算精度;其平面位置精度可提高至 1 cm 以内。

3 结论

本文通过考虑投影变形对以往多波束测深波束归位近似转换模型在计算平面坐标时的影响,增加距离改化以缩小此影响带来的误差,得到如下结论:

1) 以往近似转换模型与严密转换模型相比,平面坐标计算误差本质上与水深、中央经线位置成正相关,测区水深值越大,距离中央经线越远,误差值越大;

2) 改进后的近似转换模型可明显提高计算精度,与严密转换模型相比,平面位置偏差可减小至约 1 cm,满足《海道测量规范》的精度要求;

3) 中央经线的选择是影响距离改化近似公式系统误差的主要因素,因此,在实际应用中,应合理选择投影方式。

参考文献:

- [1] 赵建虎,沈文周,吴永亭,等. 现代海洋测绘[M]. 武汉:武汉大学出版社,2011.
- [2] 阳凡林,韩李涛,王瑞富,等. 多波束声纳水柱影像探测中底层水域目标的研究进展[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2013,32(6):75-83.
YANG Fanlin, HAN Litao, WANG Ruifu, et al. Progress in object detection in middle and bottom-water based on multibeam water column image[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2013,32(6):75-83.
- [3] 阳凡林,卢秀山,李家彪,等. 多波束勘测运动传感器偏移的改正方法[J]. 测绘学报, 2010,35(7):816-820.
YANG Fanlin, LU Xiushan, LI Jiabiao, et al. Correction of imperfect alignment of MRU for multibeam bathymetry data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010,35(7):816-820.
- [4] GB12327-1998. 海道测量规范[M]. 北京:中国标准出版社,1999.
- [5] 赵建虎,刘经南. 多波束测深系统的归位问题研究[J]. 海洋测绘, 2003,23(1):6-8.
ZHAO Jianhu, LIU Jingnan. Problems on the conformity to the real sounding points from the multi-beam sounding system [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2003,23(1):6-8.
- [6] 朱小辰,刘雁春,肖付明,等. 多波束测深波束脚印位置归算模型研究[J]. 海洋测绘, 2011,31(5):24-27.
ZHU Xiaochen, LIU Yanchun, XIAO Fuming. The research of footprint location determination model of multibeam echosoundings[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2011,31(5):24-27.
- [7] 黄谟涛,翟国君,谢锡君,等. 多波束和机载激光测深位置归算及载体姿态影响研究[J]. 测绘学报, 2000,29(1):82-88.
HUANG Motao, ZHAI Guojun, XIE Xijun, et al. The influence of carrier's attitude and the position reduction in multibeam echosounding and airborne laser depth sounding[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2000,29(1):82-88.
- [8] 杨绍海,张彦昌. 多波束测量中海底测点三维坐标计算方法研究[J]. 气象水文海洋仪器, 2011,37(2):1-3.
YANG Shaohai, ZHANG Yanchang. Study on coordinate calculation of seabed point on multi-beam surveying[J]. Meteorological Hydrological and Marine Instruments, 2011,37(2):1-3.
- [9] 张大海,王宝山,赵长胜,等. 应用大地测量学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2011.
- [10] 赵建虎,刘经南. 多波束测深及图像数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2008.
- [11] 何林帮,刘经南,张红梅,等. 顾及姿态角的多波束声线精确跟踪方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015,34(1):1-6.
HE Linbang, LIU Jingnan, ZHANG Hongmei, et al. A precise multibeam sound ray tracking method taking into account the attitude angle[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015,34(1):1-6.
- [12] 金绍华,翟京生,刘雁春,等. 海底入射角对多波束反向散射强度的影响及其改正[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 36(9):1081-1084.
JIN Shaohua, ZHAI Jingsheng, LIU Yanchun, et al. Influence of seafloor incidence angle on multibeam backscatter intensity and corrected method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007,36(9):1081-1084.
- [13] 张会霞,朱文博. 三维激光扫描数据处理理论及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2012.