



疏浚工程测深数据自动处理技术*

刘 宏, 刘 辉

(上海达华测绘科技有限公司, 上海 201208)

摘要: 针对疏浚工程测量实时潮位获取难、测深数据处理时效性低、水深成果与疏浚系统不能直传直用而影响对疏浚施工指导的及时性等问题, 采用理论研究、模型验证和现场测试方法, 进行基于北斗云潮位的实时潮位接收与处理、多源测深数据自动滤波、自动质检、自组网多链路通信等研究, 提出疏浚工程中测深数据的高效自动化处理技术。多个项目实测结果表明, 测深数据自动化处理成果精度与人工处理相当, 自动处理效率大幅提升。对于一天外业工作量, 单波束测深数据处理 5 min 内完成, 效率提升 94%; 多波束测深数据处理 60 min 内完成, 效率提升 87%。通过测深数据实时处理和实时质量控制、测深成果实时生成及与挖泥船疏浚控制系统之间的实时传输, 实现了疏浚过程中水下地形的即测即得, 可为提高疏浚施工作业效率和智能化水平提供技术支撑。

关键词: 疏浚工程; 水深测量; 自动滤波; 实时潮位改正; 自动化质检; 成果直传

中图分类号: U616+.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0224-09

Efficient and automatic processing technology of depth measurement data in dredging engineering

LIU Hong, LIU Hui

(Shanghai Dahua Surveying & Mapping Technology Co., Ltd., Shanghai 201208, China)

Abstract: In response to the problems such as the difficulty in obtaining real-time tide levels during dredging projects, low timeliness in processing depth measurement data, inability to directly transmit and use depth measurement results with the dredging system, and the impact on the timeliness of guidance for dredging construction, theoretical research, model verification, and field testing methods are adopted to conduct studies on real-time tide level reception and processing based on the Beidou cloud tide level, automatic filtering of multi-source depth measurement data, automatic quality inspection, and self-organizing network multi-link communication. Thus, the efficient and automatic processing technology for depth measurement in dredging engineering is proposed. The results of multiple project measurements show that the accuracy of the automated processing results of depth measurement data is comparable to that of manual processing, and the efficiency of automatic processing has been greatly improved. The processing of single-beam depth measurement data for a day's fieldwork can be completed within 5 min, with an efficiency improvement of 94%, and the processing of multi-beam depth measurement data can be completed within 60 min, with an efficiency improvement of 87%. The development of real-time quality control and processing of depth measurement data, real-time generation of depth measurement results, and real-time transmission between the depth measurement results and the dredging control system of the dredger has enabled the immediate acquisition of underwater topography during the dredging process, providing technical support for improving the efficiency and intelligence level of dredging construction.

Keywords: dredging engineering; water depth measurement; automatic filtering; real-time correction of tide level; automatic quality inspection; direct transmission of result

收稿日期: 2025-01-02

***基金项目:** 中交上航局技术研发项目(SHJKJ2022010)

作者简介: 刘宏(1981—), 男, 工程硕士, 正高级工程师, 研究方向为海洋测绘、工程测量。

疏浚施工作业中, 需要及时掌握挖泥前后的水深变化情况, 特别是在工程的扫浅阶段, 施工船更需要快速明确浅点的位置和深度^[1]。即时性的水深测量成果可以辅助疏浚船作业, 针对特定的浅点进行疏浚作业, 有效地减少盲挖工作量, 对提高疏浚工程施工效率、降低施工成本以及节能减排均有非常明显的促进作用。然而, 目前国内在测深数据处理方面, 以事后潮位改正和人机交互数据处理为主要手段, 一天 8 h 的外业潮位数据需要进行内业处理, 单波束约需 2 h, 多波束约需 8 h。

影响水深测量成果即时提交的因素主要有 4 点:

1) 精确的实时潮位。只有测量船能够在外业测量的同时获取实时潮位, 才能完成即时性的水深成果数据, 且潮位精度一般不应低于 10 cm。2) 外业中实时潮位的接收与录入。在测深数据采集软件中能够接收特定格式的实时潮位数据并将数据录入到集成化的原始数据文件中。3) 全自动化测深数据处理系统。原始数据包含有大量的假回波和杂波信号, 如全部依靠人工判读处理, 无疑会严重地影响测深数据的处理速度。4) 水深成果与疏浚系统的互联互通。需要将最终得到的水深测量成果提供给挖泥船的疏浚操作系统, 直传直用。

本文针对制约疏浚工程水深检测成果即时提交的 4 因素, 开展相关研究, 构建高效处理系统, 具备北斗实时潮位数据的接收、处理、全自动化水深数据处理和质检、水深成果与疏浚系统互联互通功能, 实现水深测量成果测完即得、测完即用, 从而有效地提升疏浚工程的施工效率。

1 基于北斗云潮位的实时潮位获取与处理

开发北斗实时潮位信息服务云平台, 融合长期潮位站数据、全球潮汐模型数据、区域潮汐模型精化数据, 可根据船舶动态位置自动计算最优的潮位改正数值, 并通过北斗短报文通信链路为全球的施工和测量船舶播发实时潮位数据^[2]。

1.1 全球潮位数据的获取

基于全球潮汐模型计算全球海域任意位置的潮位数据, 全球潮汐模型将全球按照等间隔(如 0.125°、0.250°、0.500°、0.625°)划分成格网, 在每个格网节点上, 不同全球潮汐模型提供了数量不等的多个分潮的调和常数数据, 具体存储是以每个分潮的全球格网节点的数据为一个文件。涉及的全球潮汐模型有 DTU10^[3]、FES2014^[4]。全球潮汐模型提供了全球范围内平均格网点的调和常数信息, 在使用上述信息计算潮位数据时, 需要经过精化处理, 才能最后获取目标位置的潮位值。

1.2 区域精化潮汐模型

利用区域内已有的单个或者多个长期水位站的基本潮汐参数, 对区域内的全球潮汐模型格网基本潮汐参数进行约束修正, 修正内容包含 L 值(某一位置深度基准面相对于平均海平面的差值)修正和调和常数修正^[5]。

L 值修正以长期验潮站的 L 值为参考, 将全球 L 值模型与之比较, 偏差为 L 。调和常数修正基本思想为, 基于验潮站的实际观测数据, 直接对潮汐模型中各分潮的正弦和余弦分量施加扰动。具体而言, 利用具有长期可靠观测记录的验潮站(长期站)所确定的精确调和常数, 对依赖于该长期站数据的局部或区域潮汐模型中相应分潮的正、余弦分量进行修正。通过这种方式, 构建一种约束机制, 最终实现对该潮汐模型中分潮振幅和迟角的系统性修正^[6]。

依托北斗潮位云平台获取全球实时潮位数据, 在北斗实时潮位平台自身数据质量控制机制的功能之上, 研究一套实时潮位接收、融合与快速自动滤波系统, 并将潮位数据与测深数据采集系统融合与处理, 实现测深数据采集与实时潮位数据的兼容, 将北斗实时潮位数据接入到测深采集系统中, 实现水深实时潮位改正^[7]。

2 多源测深数据自动处理与自动质检

2.1 原始观测数据快速滤波

水深测量所需要的数据采集设备包括回声测深

仪、定位设备、姿态和航向设备、声速设备以及实时潮位设备。这些设备所产生的数据流组合形成测深作业的数据来源,即原始数据,包含 5 类,分别为回声测深数据、GNSS(global navigation satellite system, 全球导航卫星系统)定位数据、船体姿态数据、声速剖面数据和实时潮位数据^[8]。原始数据的质量直接关系到最终得到的测深成果的质量,因此,对原始数据做质量控制滤波是测深数据自动化处理的前提条件。

2.1.1 测深数据滤波

对不同的测深设备采用不同的滤波方法^[9]。单波束回声测深仪一次获取的是一个单点的水深数据,主要采用卡尔曼滤波法和线地形拟合滤波法处理;多波束回声测深仪一次可获取一条线地形的水深数据,故可采用单 Ping 地形拟合滤波和多 Ping 地形拟合滤波法处理(Ping 指单次或周期性的声波脉冲信号);对于复杂的海底地形情况,还可采用增加曲面滤波^[10-11]和 CUBE 滤波法处理。

1) 卡尔曼滤波。卡尔曼滤波首先基于以下假设:观测噪声和模型噪声都是高斯的;状态转移函数和观测函数都是线性的^[12]。则由 $k-1$ 时刻到 k 时刻,系统状态预测方程为:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{A}\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \quad (1)$$

系统状态观测方程为:

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}\mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}_k$ 为系统状态向量; $\mathbf{A}$ 为状态转移矩阵; $\mathbf{u}_k$ 为系统输入向量; $\mathbf{B}$ 为输入增益矩阵; $\mathbf{w}_k$ 为服从正态分布的过程噪声,其均值为 0,协方差矩阵为 $\mathbf{Q}$; $\mathbf{Z}_k$ 为观测向量; $\mathbf{H}$ 为测量矩阵; $\mathbf{v}_k$ 是服从正态分布的测量噪声,其均值为 0,协方差矩阵为 $\mathbf{R}$ 。初始状态以及每一时刻的噪声 $\mathbf{X}_0, \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_k, \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_k$ 都被认为是互相独立的。

卡尔曼滤波分为预测和校正 2 个阶段。在预测阶段,滤波器使用上一状态的估计,做出对当前状态的预测。如下式:

$$\hat{\mathbf{x}}'_k = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_k \quad (3)$$

$$\mathbf{P}'_k = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (4)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}'_k$ 为预测值; $\hat{\mathbf{x}}_k$ 为卡尔曼估计值; $\mathbf{P}'_k$ 为预测误差协方差矩阵; $\mathbf{P}_k$ 为卡尔曼估计误差协方差矩阵。

而在校正阶段,滤波器利用对当前状态的观测值修正在预测阶段获得的预测值,以获得一个更接近真实值的新估计值。如下式:

$$\hat{\mathbf{z}}_k = \mathbf{Z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}'_k \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}'_k \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}'_k \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}'_k + \mathbf{K}_k \hat{\mathbf{z}}_k \quad (7)$$

$$\mathbf{x}_k = \hat{\mathbf{x}}'_k + \mathbf{K}_k \mathbf{Z}_k \quad (8)$$

更新协方差估计:

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}'_k \quad (9)$$

式中: $\mathbf{x}_k$ 为真实值; $\mathbf{K}_k$ 为卡尔曼增益; $\hat{\mathbf{z}}_k$ 为测量余量; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

2) 线地形拟合滤波。对线地形测深数据进行条带滤波的算法思想:根据深度数据的分布特征,设置基值窗口的大小 N ,从当前条带的第 1 个 Ping 开始,每 N 个 Ping 为 1 组,对起始 Ping 和结尾 Ping 分别计算其代表值(考虑使用附近均值),用 2 个代表值拟合得到该基值窗口内的地形变化总体趋势,作为地形基值;设置细节窗口的大小 n ,在每个基值窗口内,从当前窗口的第 1 个 Ping 开始,每 n 个 Ping 为 1 组,计算该组 Ping 的深度平均值,用每个 Ping 的深度值与该平均值的差值作为局部地形的细节变化,将该差值与前述拟合出的地形基值叠加,作为最终的滤波结果。

3) 趋势面滤波。趋势面滤波将两条相邻测线的中央波束位置视为正确地形^[13],以对应 Ping 的中央波束点为依据,拟合得到当前 2 个 Ping 及其延伸区域的地形变化总体趋势,作为地形基值;设置细节窗口的大小 n ,在每个基值窗口内,从当前 Ping 的第 1 个 Beam 开始,每 n 个 Beam(波束)为 1 组,计算该组 Beam 的深度平均值,用每个 Beam 的深度值与该平均值的差值作为局部地形的细节变化,将该差值与前述拟合出的地形基值叠加,作为最终的滤波结果。

多波束测深数据进行条带拼接时, 可能会因声速误差或安装偏差表现出公共区域地形趋势不一致的现象, 见图 1。为此, 可以基于趋势面滤波来减少这种情况, 趋势面滤波的基本原理为: 获取海底地形的拟合曲线(长波项), 获取边缘波束测深点的变化趋势(短波项), 削弱波束点测深系统性误差, 见图 2。

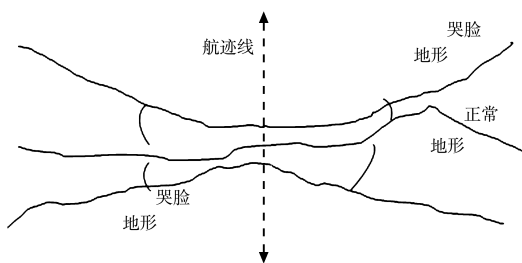
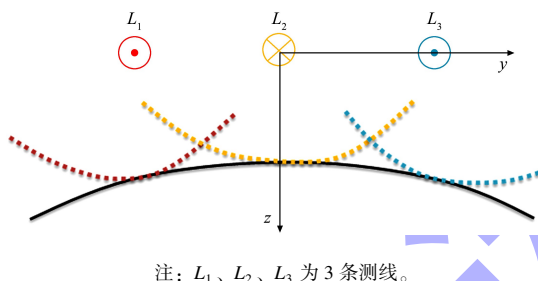


图 1 声速误差引起的地形不一致现象

Fig. 1 Terrain inconsistency caused by sound velocity error



注: L_1 、 L_2 、 L_3 为 3 条测线。

图 2 趋势面波法

Fig. 2 Trend surface wave method

4) CUBE 自动滤波。CUBE 自动滤波是基于规则格网估计各格网节点最优水深的滤波方法^[14], 主要内容如下。

①不确定度的传递。在根据水深确定的格网节点搜索范围内, 将测点水平和垂直不确定度传递到待估格网点上:

$$\sigma_{ij}^2 = \sigma_{vj}^2 \left[1 + \left(\frac{\sigma_{ij} + S_H \sigma_{H,j}}{\Delta_{\min}} \right)^a \right] \quad (10)$$

式中: σ_{ij} 为测深点到待估格网点的平面距离; $\sigma_{H,j}$ 为测点水平; σ_{vj} 为垂直不确定度; S_H 为水平不确定度的影响因子, 默认为 1.96; a 为地形起伏影响因子, 默认为 2; $\Delta_{\min}$ 为格网大小。

②多重估计。在完成第 1 步工作之后, 需要基于卡尔曼滤波方法建立估计方程进行多重估计。

③选择最优估计。最后一步是基于一定的原

则选择最优估计, 其原则主要是选取估值纳入点数最多的一个估值为最优估值; 在待估格网点周围一定范围内, 寻找单个估计值的格网点水深为参考水深, 寻找待估格网节点估值中与该参考水深最接近的估值作为最优估值。

2.1.2 其他数据滤波

1) GNSS 数据滤波。需对 GNSS 平面和高程解进行质量控制, GNSS 定位数据异常主要表现为平面坐标的“跳变”, 在时间序列上, 按照动态测量时出现的频次可分为个别点异常、短时异常及较长时间异常, 分别采用线性内插法、卡尔曼滤波法、借助罗经数据位置递推法; 高程数据采用基于 Heave(涌浪参数)短时异常修正算法的卡尔曼滤波。

2) 姿态和航向数据滤波。对于姿态传感器和罗经高频输出的姿态数据(横摇、纵摇、涌浪 Heave)和方位数据、高频输出的动态数据, 可使用多项式高阶拟合法做动态滤波。自动数据处理情况下通常采用滑动平均发现异常, 并利用有效的姿态和方位数据, 内插异常时刻的姿态和方位数据。

3) 声速数据滤波。声速直接影响着单波束测深精度, 需要对声速数据进行滤波处理。声速数据滤波采用人工或自动两种滤波方法^[15]。人工滤波根据声速剖面曲线变化的光滑性, 对于异常导致的曲线“尖刺”进行平滑; 自动滤波基于相同的原理, 采用滑动平均的方法进行滤波。通过滑动平均后, 可滤掉数据中频繁的随机起伏, 显示出平滑的变化趋势, 同时还可得出随机误差的变化过程, 从而估计出其统计特征量。

2.2 测深数据自动处理

将前述的 5 类经过滤波处理的原始数据做综合自动处理, 最终形成一定距离间隔的水下地形点的三维位置信息。测深数据综合处理流程包含各类偏差的探测与改正、水深点归算、船体姿态改正、声速改正、潮位改正、基准转换等步骤^[16-17]。

2.2.1 偏差探测及修正

测深作业的偏差包括设备安装偏差和不同来

源设备的时间不同步偏差。设备安装偏差主要是姿态设备的安装偏差,它会导致所测量的船体姿态数据与实际船体姿态数据存在系统性的偏差;时间不同步偏差包含定位设备测深设备时间不同步、计算机与 GNSS 时间不同步等。这些偏差均需

要在测量前或数据处理前得到妥善的处理与改正,否则会影响测深成果的精度。

2.2.2 测深数据综合处理

测深数据综合处理主要包括涌浪改正、姿态改正、吃水改正、声速改正和潮位改正,见图 3。

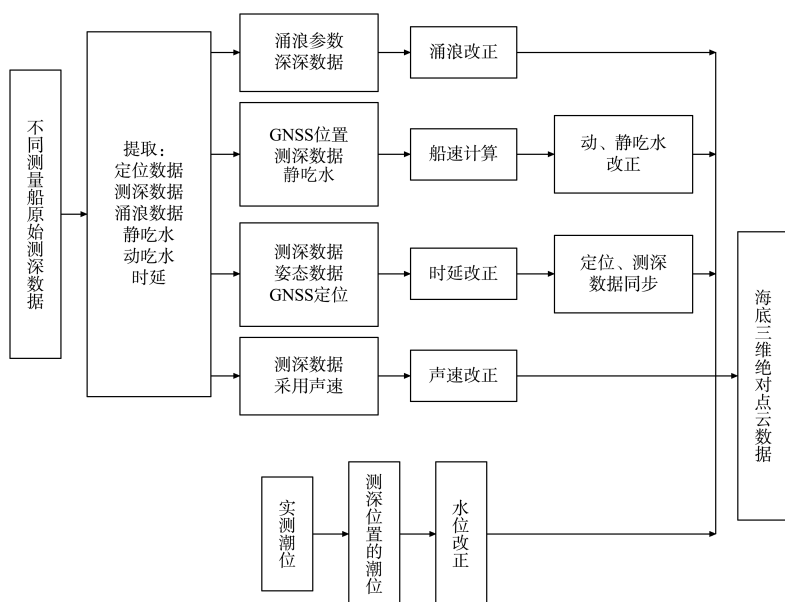


图3 测深数据综合处理流程

Fig.3 Comprehensive processing flow of depth measurement data

2.2.3 测深点云滤波

经过数据处理,可获得每个测深点的三维坐标 (x, y, z) ,基于连续测深点,可形成断面地形,根据断面地形变化趋势,对其中的测深点三维数据进行再滤波。对于断面地形,可采用地形趋势线滤波方法,构建趋势线模型:

$$f(l) = z(l) = a_0 + a_1 l + a_2 l^2 \quad (11)$$

对于区域地形,可采用地形面滤波方法,构建趋势面模型:

$$f(x, y) = z(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 x^2 + a_5 y^2 \quad (12)$$

基于以上模型,借助 2σ 或 3σ 原则滤波法对粗差进行滤除,该原则如下式所示:

$$\begin{cases} (z_i - f(l_i)) \leq kS & \text{接受} \\ (z_i - f(l_i)) > kS & \text{标定} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $k=2$ 或 3 ; z_i 为测深点 $i(x_i, y_i)$ 的深度; $a_0 \sim a_5$ 为系数; S 为根据 i 点邻域内测点深度确定的均方差。

2.3 自动化质检

测深数据处理中的质检要素须包含坐标框架、测线符合指标、主检一致性指标,本文自动化质检模块主要根据以上内容构建。

2.3.1 坐标框架

测深项目坐标框架指标一般包含椭球框架、高斯投影参数、7参数转换参数等内容,这些内容被记录在原始测深数据文件中,系统在对测深原始数据文件解析过程中,读取并记录这部分内容,并在质检报告中记录。

2.3.2 测线符合指标

测深作业一般会提前规划好计划测线,测量船舶按照计划测线航行并测量相关数据。在实际测量作业中,由于船舶驾驶水平、避障、碍航物等因素的影响,实际航行轨迹会偏移计划测线,但只要不超过测量规范要求的偏移量即可。偏移量即实际轨迹线相比计划测线的偏移距离,系统

根据轨迹点至计划测线的垂足距离确定偏移距离, 见图 4。

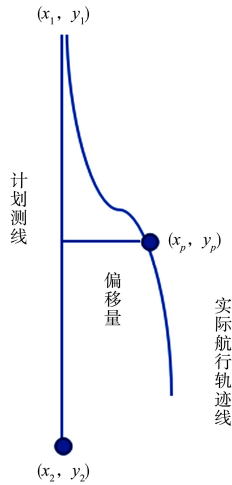


图 4 偏移量计算

Fig. 4 Offset calculation

偏移量计算公式:

$$d = \frac{2\sqrt{[(s_1+s_2+s_3)/2] \times [(s_1+s_2-s_3)/2]}}{s_3} \cdot \frac{2\sqrt{[(s_3+s_2-s_1)/2] \times [(s_1+s_3-s_2)/2]}}{s_3} \quad (14)$$

$$\begin{cases} s_1 = \sqrt{(x_1 - x_p)^2 + (y_1 - y_p)^2} \\ s_2 = \sqrt{(x_2 - x_p)^2 + (y_2 - y_p)^2} \\ s_3 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \end{cases} \quad (15)$$

式中: d 为偏移量; s 为两点之间的距离; (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 为计划测线两端点坐标, (x_p, y_p) 为实际航行点坐标。偏移量指标判断规则是最大偏移量不能超过测线间距的 $1/2$ 。

2.3.3 主检一致性指标

对计划线和检查线测深结果在相同位置进行比较, 根据交叉点处水深的不符值, 开展系统自身测深精度的评估。对同一测线进行往返或同向测量, 根据相同位置不同测深结果, 求取不符值, 对测深结果进行精度评定。

精度评估采用的模型为:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta Z_i - \Delta \bar{Z})^2 / (n - 1)} \quad (16)$$

式中: Z_i 为两个不同源的测深结果的不符值;

$\bar{Z}$ 为不符值平均数; n 为样本数; σ 为测深结果的标准偏差。

3 水深成果与疏浚系统直传直用

测深成果为包含水深数据的文本文件, 直传即将文本文件从测量船通过通信链路传输至疏浚船舶的疏浚系统服务器中, 并保存在特定的系统目录下, 使得疏浚作业系统可以直接调取水深数据文件并可视化地呈现于疏浚作业系统中。

在常规的疏浚作业区域中, 可以采用移动网络、卫星网络和数字电台 3 种通信链路传输数据。

1) 移动网络, 成本低, 设备简单, 但在某些疏浚作业区域中存在移动网络覆盖不到的情况; 2) 卫星网络, 成本高、设备复杂, 覆盖范围广泛; 3) 数字电台, 成本中等, 设备简单, 点对点通信, 通信距离 $1 \sim 10$ km。

3 种通信方式中, 移动网络在海上的覆盖性最差; 卫星网络费用昂贵且设备安装调试复杂; 数字电台为点对点通信, 可以满足测量船向疏浚船传输文件的需求, 且设备成本低, 易于安装调试。数字电台通过 TCP (transmission control protocol, 传输控制协议) 通信的方式实现测量船与疏浚船的网络通信, 某些数字电台还可以组网, 实现一对多的通信链接, 以测量船为中心点、设置为服务端, 疏浚船为目标节点、设置为客户端, 可以实现一条测量船同时向多条疏浚船传输数据的需求, 见图 5。

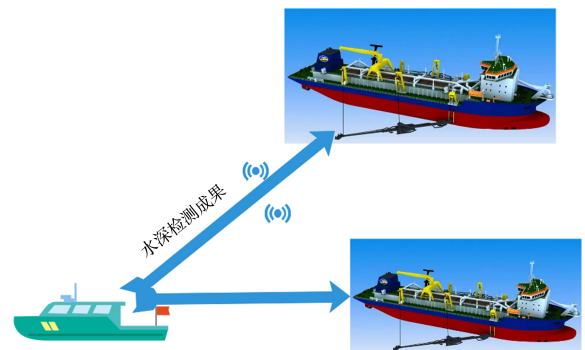


图 5 测量船与疏浚船数据直传

Fig. 5 Real-time data transmission between survey vessel and dredging vessel

4 测试验证

4.1 单波束测试

在 2024 年长江口北槽航道维护疏浚测量中, 单条船测量时间平均约 10 h, 数据量包括 97 条测线文件, 总大小 150 M, 云处理耗时 4 min 50 s。

云端与客户端建立通信链接并完整地接收到原始数据以后, 再建立对应该客户端的自动处理线程, 自动处理完成以后, 将水深成果和质检报告完整地返给客户端。

处理成果包括水深成果和质检报告, 软件支持用户对水深处理成果进行二次编辑。质检报告内容包括工程的数学基础、声速改正结论、潮位改正结论、自动滤波结论以及主测线与检查线比对结果、测线符合性结论。

本项目主检比对结果统计见表 1, 互差在 0~0.1 m 的占比 53%, 互差在 0.1~0.2 m 的占比 36%, 0~0.2 m 总占比达到 89%, 0~0.4 m 总占

比达到 98%, 符合水运工程测量规范要求^[18]。

表 1 主测线与检查线比对结果
Tab. 1 Comparison results between master test line and inspection line

互差/m	数量/个	占比/%
0~≤0.1	153	53
0.1~≤0.2	102	36
0.2~≤0.4	27	9
>0.4	6	2

与人工处理结果的比较情况: 为进一步研究全自动处理模式的可靠性, 本测试对同一组原始数据进行传统人工处理, 并得到最终的水深成果。自动处理与人工处理得到的水深成果的对比见图 6。由图可知, 差值大于 0.5 m 的水深点数占比 0.6%; 差值 0.2~0.5 m 的水深点数占比 2.5%; 差值 0~0.2 m 的水深点数占比 96.9%; 差值 0~0.1 m 的水深点数量占比 82.8%。

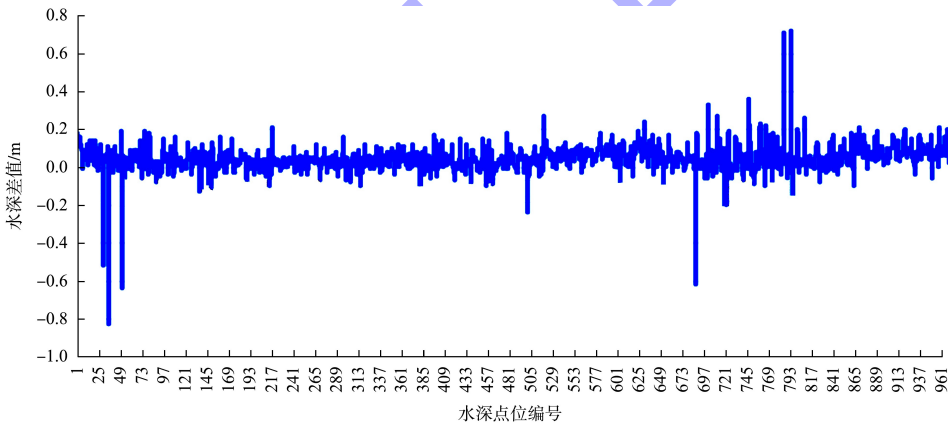


图 6 自动处理与人工处理结果差值分布
Fig. 6 Distribution of difference between automatic and manual processing results

4.2 多波束测试

先后在灌河口航道、苏北运河、南汇 LNG 码头、

吴淞锚地项目进行测试, 平均外业测量时间 300 min, 数据量 5 G, 自动处理平均时长约 42 min, 见表 2。

表 2 多波束自动处理与人工处理成果比对结果
Tab. 2 Comparison results between multi-beam automatic and manual processing results

项目	外业时长/min	人工处理时长/min	自动处理时长/min	互差 0.2 m 以下占比/%	互差 0.2 m 以上占比/%
灌河口航道	240	210	30	95.36	4.64
苏北运河	240	250	48	98.59	1.41
南汇 LNG 码头	300	290	40	96.03	3.97
吴淞锚地	420	400	50	97.69	2.31

经测试验证, 测深数据自动化处理成果精度与人工处理相当, 符合水运工程测量规范要求。疏浚工程测深数据自动处理效率大大提升。对于 8 h 外业工作量, 单波束测深数据处理时长小于 5 min, 效率提升 94%; 多波束测深数据处理时长小于 60 min, 效率提升 87%, 时间大幅缩小。

5 结论

1) 本文研发了基于北斗云潮位的实时潮位获取、处理及与测深数据融合的方法, 可实现全球任意海区测深作业水深的实时潮位改正, 为测深数据实时处理提供了前提条件。

2) 提出基于数据流变化特点的原始观测数据快速自动滤波方法和基于地形变化渐变性的多源测深数据自动处理方法, 实现了多源原始观测数据的实时、高质量处理, 显著提高了数据处理效率。实测表明, 在与人工处理精度相当的情况下, 自动处理效率提升近 90%。

3) 研究融合自组网多链路通信、测深数据实时处理和质量控制、测深成果实时生成及与挖泥船疏浚控制系统之间的实时传输, 可以实现水深成果与疏浚系统互联互通, 疏浚过程中水下地形测完即得、测完即用。

4) 本文提供了一种测深数据高效自动处理技术, 使得疏浚船舶获取水深检测数据的时间大为缩短, 单波束测深成果的提交时间提升至分钟级、多波束测深成果提交时间提升至小时级, 从而可以提高疏浚作业的效率和质量, 减少疏浚施工作业成本。

参考文献:

- [1] 弓宝江, 张大伟, 杨正军. 大型耙吸船航道扫浅施工工艺[J]. 水运工程, 2022(3): 193-196.
- GONG B J, ZHANG D W, YANG Z J. Technology on

dredging shallow point by trailing suction hopper dredger[J]. Port & waterway engineering, 2022 (3): 193-196.

- [2] 赵贤, 肖东. 连云港港 30 万吨级航道二期工程 H1.2 标段沿海远距离潮位实时播报系统研究[J]. 水运工程, 2019(11): 114-117.

ZHAO X, XIAO D. Real-time broadcast system of coastal long-distance tide in H1.2 standard section of Lianyungang 300,000-ton waterway phase II project[J]. Port & waterway engineering, 2019(11): 114-117.

- [3] 黄辰虎, 陆秀平, 欧阳永忠, 等. 远海航渡式水深测量水位改正方法研究[J]. 海洋测绘, 2013, 33(5): 10-14.

HUANG C H, LU X P, OUYANG Y Z, et al. Waterlevel correction in bathymetric survey along the open-sea route [J]. Hydrographic surveying and charting, 2013, 33(5): 10-14.

- [4] 邬红涛. 基于全球潮汐模型的东海海域潮汐性质空间分布[J]. 海岸工程, 2021, 40(4): 269-276.

WU H T. Spatial distribution of tidal properties in the East China Sea based on the global tidal model [J]. Coastal engineering, 2021, 40(4): 269-276.

- [5] 刘辉, 姚翔. 调和常数法加密潮位及其精度分析[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(10): 163-164.

LIU H, YAO X. Harmonic constant method for encrypting tidal levels and its accuracy analysis [J]. China water transport(the second half of the month), 2019, 19(10): 163-164.

- [6] 朱志辉, 贾俊强, 王恒. 潮位推算技术在盘锦长航道水深测量中的应用[J]. 水运工程, 2023(S2): 99-103.

ZHU Z Y, JIA J Q, WANG H. Application of tide level calculation technology in bathymetry of long Panjin Channel[J]. Port & waterway engineering, 2023 (S2): 99-103.

- [7] 刘辉, 刘宏, 汪波, 等. 基于虚拟潮位站技术的云潮位服务研究与应用[J]. 海洋测绘, 2024, 44(2): 22-26.

LIU H, LIU H, WANG B, et al. Research and application on cloud tide service based on virtual tide station

- technology [J]. Hydrographic surveying and charting, 2024, 44(2): 22-26.
- [8] 王小龙, 朱文泉, 李亚东, 等. 高精度水深测量的误差影响因素及控制措施[J]. 水运工程, 2022(S2): 103-107.
WANG X L, ZHU W Q, LI Y D, et al. Influencing factors of errors in high precision bathymetry and control measures[J]. Port & waterway engineering, 2022 (S2): 103-107.
- [9] 张红梅, 赵建虎. 河床演变野外采集源数据滤波方法研究[J]. 泥沙研究, 2004(3): 34-40.
ZHANG H M, ZHAO J H. Research on filter methods for field data of riverbed evolution [J]. Journal of sediment research, 2004(3): 34-40.
- [10] 王敏, 李玉宁. 多波束滤波理论与实践效果分析[J]. 水运工程, 2023(S2): 20-23.
WANG M, LI Y N. Theory and practical effects of multi-beam filtering [J]. Port & waterway engineering, 2023(S2): 20-23.
- [11] 史书强, 舒晓明, 李炜. 基于自适应多分辨率曲面的多波束滤波方法研究[J]. 水运工程, 2022(1): 53-58.
SHI S Q, SHU X M, LI W. Multi-beam filtering method based on adaptive multi-resolution surface [J]. Port & waterway engineering, 2022(1): 53-58.
- [12] 陈铁鑫, 张坚樑, 张沈阳, 等. 卡尔曼滤波模型在水深测量中的应用[J]. 浙江水利科技, 2007(2): 37-38.
CHEN T X, ZHANG J L, ZHANG S Y, et al. Application of Kalman filter model in bathymetry [J]. Zhejiang hydrotechnics, 2007(2): 37-38.
- [13] 董江, 任立生. 基于趋势面的多波束测深数据滤波方法[J]. 海洋测绘, 2007, 27(6): 25-28.
DONG J, REN L S. Filter of MBS sounding data based on trend surface [J]. Hydrographic surveying and charting, 2007, 27(6): 25-28.
- [14] 郑永新, 张红梅, 赵建虎. 二次 CUBE 滤波算法及在边坡乱石区测深数据处理中的应用[J]. 测绘学报, 2018, 47(11): 1549-1557.
ZHENG Y X, ZHANG H M, ZHAO J H. Second CUBE filtering algorithm and its application in sounding data processing of slope riprap area [J]. Actageodaetica et cartographica sinica, 2018, 47(11): 1549-1557.
- [15] 赵建虎, 张红梅, 吴猛. 一种基于常梯度模板插值的声线跟踪算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(1): 71-78.
ZHAO J H, ZHANG H M, WU M. A sound ray tracking algorithm based on template-interpolation of constant-gradient sound velocity [J]. Geomatics and information science of Wuhan University, 2021, 46(1): 71-78.
- [16] 龙佳威, 赵建虎, 刘传杰, 等. MRU 位置偏差二次探测及多波束异常条纹地形消除方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(5): 785-793.
LONG J W, ZHAO J H, LIU C J, et al. Secondary detection of MRU position deviation and terrain elimination of multi-beam abnormal stripe [J]. Geomatics and information science of Wuhan University, 2024, 49(5): 785-793.
- [17] 毕自军, 赵建虎, 郑根, 等. 顾及传播曲面的多波束波束脚印高精度快速归位算法[J]. 测绘学报, 2021, 50(5): 695-705.
BI Z J, ZHAO J H, ZHENG G, et al. High-precision and quick algorithm for multibeam sounding coordinates considering the propagation surface [J]. Actageodaetica et cartographica sinica, 2021, 50(5): 695-705.
- [18] 水运工程测量规范: JTS 131—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
Specifications for port and waterway engineering survey: JTS 131-2012[S]. Beijing: China Communications Press, 2012.

(本文编辑 王传瑜)