



单波束测深仪水深粗差检测与修正新算法及其效果

刘 力, 孙再刚, 简 波, 胡其武, 张乐君
(长江航道测量中心, 湖北 武汉 430010)

摘要: 单波束测深仪是现代海洋测量尤其是内河水下地形测量中的主要测量仪器。即使在声速设定正确的前提下, 单波束测深仪的观测值仍然会有各类型的粗差。针对其原始水深值粗差处理问题, 创新性地提出“地形链”的概念, 设计了一种新的针对单波束测深仪水深观测值的粗差检测与修正算法, 针对长江流域的单波束测深数据进行处理, 结果表明算法对各类粗差有明显的检测和修正效果。

关键词: 地形链; 单波束; 水深; 粗差; 算法

中图分类号: U 612. 2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)11-0055-05

Performance of novel algorithm of gross error detection and correction of water depth of single beam bathymeter

LIU Li, SUN Zai-gang, JIAN Bo, HU Qi-wu, ZHANG Le-jun
(Changjiang Waterway Survey Center, Wuhan 430010, China)

Abstract: The single beam bathymeter is an important equipment of underwater terrain surveying in the ocean and especially in the river. Even though the speed value of the sound is set correctly, the depth value may still be the gross error as result of other measurement factors. This article originally presents the concept of terrain chain and a novel algorithm of water depth gross error detection and correction based on the terrain chain concept. The performance of processing several water depth dataset collected by a single beam bathymeter in the Changjiang River shows the obvious effect on gross error detection and correction.

Keywords: terrain chain; single beam bathymeter; water depth; gross error; algorithm

水下地形测量需要综合处理定位、测深、潮汐观测以及包括延迟改正、吃水改正、姿态改正等因素在内的数据。水深数据是水下地形测量中最重要的数据源之一。测深装置从原始的测杆、测绳、水压式测深仪、绳索式测深仪逐步发展起来^[1]。20 世纪 20 年代出现了单波束回声测深, 单波束回声测深仪的出现对人类探索水下世界具有划时代的意义。其原理是通过换能器向水下发射声波, 再经换能器接收回波。根据声速及往返的时间计算水深。20 世纪 70 年代, 又在单波束的

基础上研制了多波束测深仪, 能一次获取与航迹垂直平面内一条一定宽度的水深条带, 具有测量范围大、速度快和精度高的特点, 将传统的测深技术对水下的点、线测量发展到面测量。相较于单波束测量仪, 多波束测量仪价格要昂贵得多, 一台多波束的价格往往可以买几十台单波束, 使用中还需要高精度的姿态仪调配使用, 数据量及后期处理工作量也相对较大。另外, 由于其测量宽度与水深成正比, 在内河测深中其测量宽度的优势也相对减弱。因此, 虽然多波束仪在海洋深

收稿日期: 2014-09-09

作者简介: 刘力 (1985—), 男, 博士, 工程师, 从事航道测绘、工程测量、GIS 等研究。

水测量中优势巨大,但在内河航道测深中,单波束测深仪仍然是最为普及的现代水深测量装置。

单波束水下地形测量时,利用 RTK 技术来实现导航定位,测量船依据预先设定好的计划线航行,单波束测深仪以设定的频率不断地测得原始水深值,并通过潮位改正、吃水改正、延时改正、姿态改正等,得到水下点的高程^[2-3]。

由于单波束测深仪利用声波进行测量,即使在声速设定正确的条件下,原始的水深观测值也常受以下几个方面影响而产生粗差:一是发射脉冲遇到浮游生物、悬浮物和悬空管道等物体时,测深仪的发射脉冲不到水底而被这些水中物体反射回来,造成所测水深的错差,水深值表现为突然变浅甚至为零值(吃水深度);二是由于设备多次发射、潜水混响及发射余振影响,水深值表现为大幅突变加深。此外,由于船的尾流、水中气泡的影响,大大削弱了回波的强度,增大了额外干扰,也对观测值有不同程度的影响^[4]。

原始的水深粗差值往往表现为较大的深度突变,必须进行剔除和数值的恢复。传统的解决水深数据粗差的方法一般是靠有经验的专业人员,用手工的方式,通过比较数值的大小或分析水深的变化趋势等手段进行判别处理,但效率较低。另外,也有一些水深异常的自动处理算法,如中值滤波法、深度门技术、趋势面分析法等^[5-6],但仍各有不足。如趋势面分析法除涉及多项式阶数选取、门限选择外,还要求测线布设较密。中值滤波法等常规滤波对连续异常处理能力较差,且正常点易受粗差影响。

本文基于地形连续性的特点提出一种以所谓地形链为基本处理单元的新算法,成功检测到多种水深异常值,并进行线性插值修复。算法实现和运算过程简单、粗差检测效果明显。

1 算法思想

基于地形连续性的特点,提出地形链的概念,设置地形链的一个属性为权重值,用它来标定该地形链为真实地形或假水深。

1) 地形链的定义。连续的水深观测值的集合 C 称之为一条地形链,其中任意点与相邻两点的水深值 H 差异都没有超过一个限值或者满足其他用户定义的限制规则。

2) 地形链的属性。地形链的起始水深点序号为 S ,地形链的终止水深点序号为 E ,地形链的权值为 P ,地形链的长度为 L ,其中 $L = E - S + 1$,一般来说,地形链的长度 L 越长,该地形链的可靠性也就越大,其为真实地形的可能性也就越大。

3) 地形链的权值确定原则。当地形链中含有异常水深值如零值时,地形链权值 $P = 0$;地形链中的点确定都为真实水深点时,设定权值 $P = 2$;权值为零的地形链经过插值修正,地形链权值设为 $P = 1$ 。

2 算法步骤及流程

算法流程框架如图 1 所示,具体的算法步骤如下:

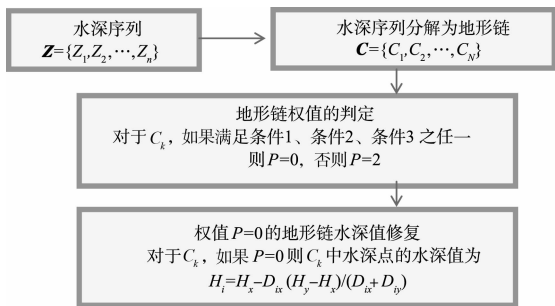


图 1 算法流程框架

1) 原始的长度为 n 的水深采集点序列 $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$ 。对于每一个水深采集点,包含水深值 H 、坐标向量 $G(G_x, G_y)$ 等信息。

2) 水深采集点序列的地形链分解:即利用水深采集点的水深值 H 进行分析、通过阈值判定等原则分割为 N 个地形链 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ 。具体来说,作为起始条件,第一个水深序列点 Z_1 归属于地形链 C_1 ;对于当前地形链 C_k ,设其最后一个水深序列点 Z_i 为当前水深序列点,其水深值 H_i 为当前水深值。如果下一个序列点 Z_{i+1} 的水深值 H_{i+1} 与当前水深值 H_i 之差的绝对值小于阈值 T_0 或者当地形链 C_k 当前长度大于等于 2 时,下一个

序列点 Z_{i+1} 的水深值 H_{i+1} 与在考虑地形一阶变化趋势的预测值之差的绝对值小于阈值 T_0 , (如取 $T_0=0.3$) 即 $|H_{i+1} - H_i| < T_0$ 或 $|H_{i+1} - [H_i + (H_i - H_{i-1})]| < T_0$, 则下一个水深序列点 Z_{i+1} 属于当前地形链, 否则当前地形链终止于 Z_i 且下一个水深序列点 Z_{i+1} 开始新的地形链 C_{k+1} 。

3) 地形链权值判断: 利用地形链的长度 L 、地形链中的水深值及其与相邻地形链中水深值的关系等判定地形链的权值。设 H_x 代表左侧参考水深值, 当找到该地形链左侧的权值 $P=2$ 的地形链 C_x 时, 令 H_x 等于 C_x 最后一个水深点的水深值, 否则令 H_x 等于 C_k 的第一个水深序列点的水深值。设 H_y 代表右侧参考水深值, 当找到该地形链右侧的地形链 C_y , 其中 C_y 的长度 L 要满足 $L > L_0$ (可取 L_0 满足 $L_0 > 3$, 如 $L_0 = 10$ 即可, 过长的地形链虽然更可靠, 但却容易丢掉距离近的地形链), 取其第一个水深点的水深值 H_y , 否则令 H_y 为 C_k 的最后一个水深序列点的水深值。具体来说, 对于地形链 C_k , 如果满足以下条件, 则地形链权值 $P=0$, 否则定权 $P=2$ 。条件①: 当地形链的长度小于 3 时, 可以认为此链的长度过短, 可靠性较低, 定地形链权值 $P=0$ 。条件②: 当地形链 C_k 长度不小于 3 时, 设其起点序号为 S_k , 终点序号为 E_k , 其序号为 $[(E_k + S_k) / 2]$ ($[\]$ 表示去尾法取整) 序列点的水深值为 H_M , 若存在 $|H_M - H_0| > T_1$, 其中 H_0 为参考水深值, $H_0 = (H_x + H_y) / 2$, T_1 为异常跳变点判定阈值 (相对前文 T_0 一般较大, 如 $T_1 = 3$), 则定地形链权值 $P=0$ 。条件③: 当地形链 C_k 长度不小于 3 时, 设其前 3 个水深序列点的水深值为 H_a 、 H_b 、 H_c , 若存在一个水深值 $H \in \{H_a, H_b, H_c\}$, 满足 $|H - 2H_x| < T_0$ 或者 $|H - 3H_x| < T_0$, 则地形链定权值 $P=0$ 。

4) 对地形链权值 $P=0$ 的水深点的修复: 利用两侧权值不为零的地形链中的水深点的坐标 G 和水深 H 信息, 利用距离加权进行线性插值, 得到权值为零点的地形链中各点水深值。具体来说, 对于权值 $P=0$ 的地形链 C_k , 其起点序号为 S_k , 令 $X=S_k$, 其终点序号为 E_k , 令 $Y=E_k$; 若寻找到

C_k 左侧第一个 $P \neq 0$ 的地形链 C_L 后, 则令 X 等于 C_L 的终点序号 E_L , 即 $X=E_L$; 若寻找到 C_k 右侧第一个 $P \neq 0$ 的地形链 C_R 后, 则令 Y 等于 C_R 的起点序号 S_R , 即 $Y=S_R$; 对于 C_k 中的点 Z_i , 其与 Z_x 和 Z_y 的平面距离 $D_{ix} = \|G_i - G_x\|$, $D_{iy} = \|G_i - G_y\|$, 其中 $\|\cdot\|$ 为 Euclidean 范数, 则 Z_i 点的水深值为 $H_i = H_x + D_{ix}(H_y - H_x) / (D_{ix} + D_{iy})$, 最后标记地形链 C_k 的权 $P=1$ 。

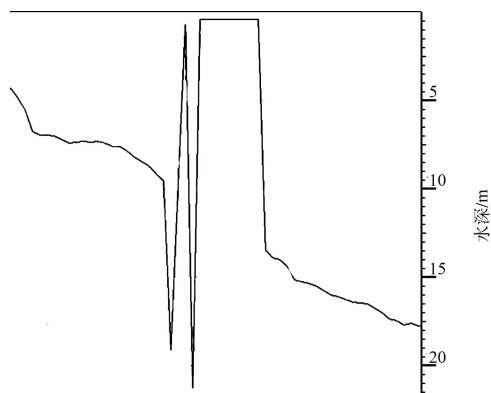
3 滤波效果和分析

为检测算法的效果, 本文利用长江流域红花碛河段水下地形测量中利用 HY-1600 进行 1:500 水下地形图测量时, 水深采样频率为 5 Hz, 换能器吃水深度 0.45 m, 以采集的水深数据作为试验数据, 分别用中海达水深测量数据处理商业软件中的两种滤波算法以及本文算法进行效果对比分析。中海达商业软件中的两种算法为中值滤波法和加权平均法。

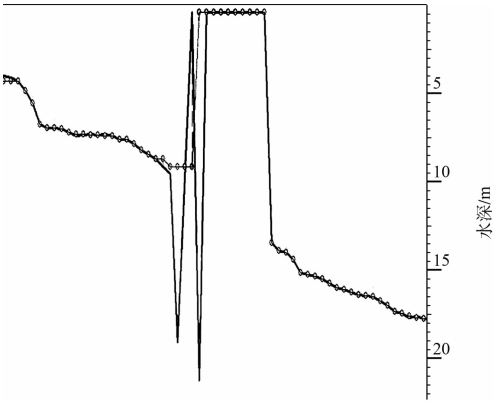
中值滤波法: $h_i = \text{med}\{H_k, k \in [i-M, i+M] \cap [1, N]\}$, $i \in [1, N]$, 其中 $2M+1$ 为中值滤波的窗口大小, N 为水深序列长度, $\text{med}\{\cdot\}$ 为序列取中值操作。

加权平均法: $h_i = [A_1, A_2, \dots, A_{2M+1}] \times [H_{i-M}, \dots, H_i, \dots, H_{i+M}]^T$, $i \in [1, N]$, 对于不在观察序列中的点, 水深值补为零值, 且其中 $2M+1$ 为中值滤波的窗口大小, A 为对应的权值, 且 $\sum A = 1$, N 为水深序列长度。

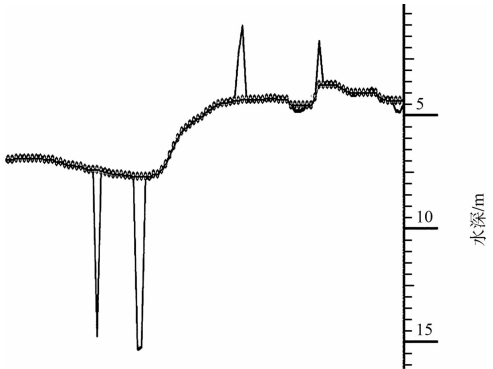
本文选用几处典型的粗差异异常数据进行了效果分析 (图 2、3)。



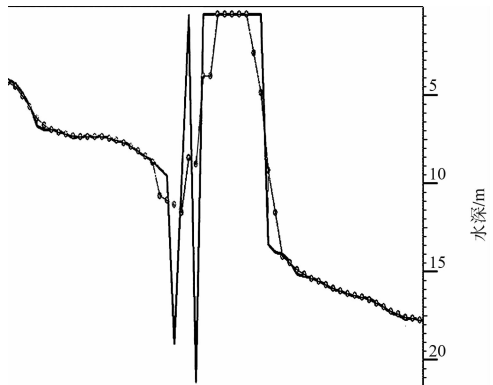
a) 原始水深序列



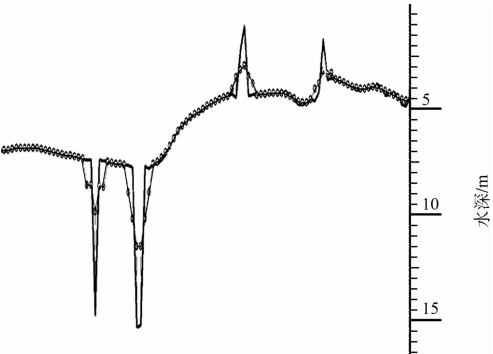
b) 中值滤波法处理序列，窗口大小9



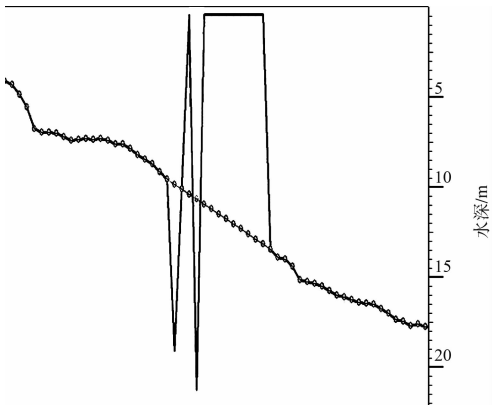
b) 中值滤波法处理序列，窗口大小9



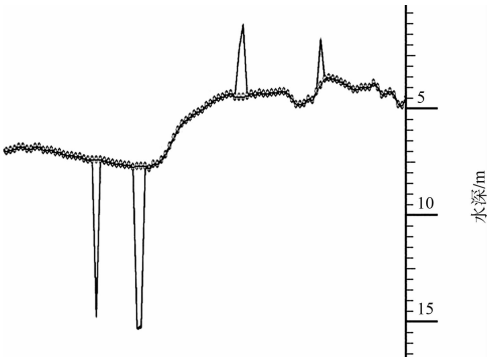
b) 加权平均滤波，权值比1:1:2:1:1



c) 加权平均滤波，权值比1:1:2:1:1

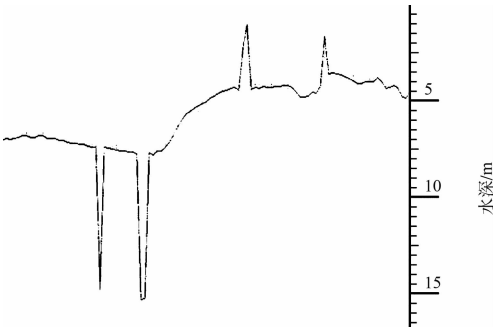


d) 本文算法



d) 本文算法

图2 水深粗差检测与插值效果比较 1



a) 原始水深序列

图3 水深粗差检测与插值效果比较 2

图2a)表示原始水深序列，水深序列中有明显起伏的异常水深，其中两处向下的跳变为典型的2倍水深异常，而两处向上跳变（其中一处持续较长）为典型的零水深异常（水深值仅为吃水深度值）。几种算法中中值滤波法有一定的处理效果，对两处跳变进行了较为成功的判断和仅为合理的滤波，但由于其中一处异常持续时间长，中值滤波法受窗口大小的固有限制无法很好处理，效果一般。加权平均法具有抵制异常点的功能，但一方面会对临近异常点的正常水深产生影响，

另一方面对于持续较长的连续异常抵制能力也较差。而本文算法成功地检测到了这几种异常水深值并进行了合理的修正。

图 3a) 表示原始水深序列, 水深序列中有明显的起伏的异常水深, 其中两处向下的跳变为典型的 2 倍水深异常, 而两处向上跳变极有可能为悬浮物或气泡等产生的假水深。几种算法中中值滤波法有一定的处理效果, 对两处跳变进行了较为成功的判断和仅为合理的滤波。加权平均法具有抵制异常点的功能, 但临近异常点的正常水深值会产生影响。而本文算法成功地检测到了这几种异常水深值并进行了合理的修正。

4 结论

本文算法在检测异常粗差水深方面效果明显。能有效处理多倍水深、零水深等突然跳变, 对于粗差值连续出现多个时的抵制效果明显优于其他算法。区别于常规滤波法, 本算法对于判定为正确的观测值不予修改, 避免了受错误观测值的影响。类

似于其他各类算法, 如中值滤波要设置窗口大小值, 加权平均要设置权值, 本文算法也不可避免地涉及到地形链判定阈值等阈值的设定, 应依经验设定, 但这类阈值往往依测量区域和水深采样参数的确定而具有一定的稳定性, 选定后无须频繁更改。

参考文献:

[1] 刘树东, 田俊峰. 水下地形测量技术发展述评[J]. 水运工程, 2008(1): 11-15.

[2] 欧阳永忠, 陆秀平, 孙纪章, 等. GPS 测高技术在无验潮水深测量中的应用[J]. 海洋测绘, 2005(1): 6-9.

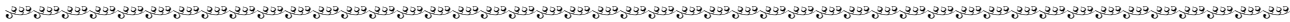
[3] 梁武南, 杨保岑, 舒晓明. 一体化单波束精密测深方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2013(3): 27-29.

[4] 杨梦云. 影响单波束测深仪测量精度的因素及消除措施[J]. 人民长江, 2012(21): 42-44.

[5] 林琿, 吴立新, 方兆宝, 等. 水深测量的误差因子分析[J]. 海洋测绘, 2005, 25(2): 1-5.

[6] 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.

(本文编辑 武亚庆)



· 消 息 ·

上航局中标江苏通州湾围垦工程项目

日前, 上航局中标江苏通州湾腰沙围垦二期通道工程施工项目 (SG-1 标段), 中标价 2.12 亿元, 工期 12 个月。

该项目位于江苏省南通市规划通州湾港区内, 工程内容主要包括: 建设东西向、南北向通道各 1 条, 呈 “L” 型垂直状, 通道长度 4 525 m, 其中东西向通道 3 025 m、南北向通道 1 500 m, 通道堤身主体结构采用土工织物充灌砂袋与吹填砂相结合的斜坡堤结构。东西向通道北侧、南北向通道东侧挡浪墙顶高程为 11.4 m, 东西向通道南侧、南北向通道西侧挡浪墙顶高程为 10.5 m, 堤顶高程为 10.0 m。东西向通道设置双向四车道, 车行道宽度 16 m; 南北向通道设置双向二车道, 车行道宽度 8 m。

通州湾腰沙围垦项目完工后, 将形成一个中型港区, 具备建设 70 个 5 万 ~ 10 万吨级泊位及承接电力、煤炭、物流、装备制造等临港产业的能力, 对通州湾整体开发具有深远意义。

(摘编自 《中国交通建设网》)