

9-1-2020

Digital Water Depth Processing for Multibeam Based on Average Slope of Terrain

Jiacheng Yu

1. Department of Electronics and Information Engineering, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China;;

Xueqiang Xu

2. China South Industries Research Academy, Beijing 100089, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Digital Water Depth Processing for Multibeam Based on Average Slope of Terrain

Abstract

Abstract: According to the characteristic of multibeam bathymetry in which measurement depth is influenced by terrain, *revision algorithm was proposed based on average slope along the horizontal and vertical terrain. Five depth revision factors were obtained, and a depth smooth template was designed. The initial scan depth data were revised by the 5 revision factors, and then the revised depth data were filtered by the template.* Simulation results show that, the depth of measurement error can be reduced greatly after revision, the designed template relative to the conventional Gauss template has higher smooth precision, more adapted to the water depth data filtering. Through two ways, the measurement accuracy has been improved obviously, and seabed terrain accuracy and smoothness both have been better modified.

Keywords

multibeam digital water depth, average slope, revision factor, template filter

Recommended Citation

Yu Jiacheng, Xu Xueqiang. Digital Water Depth Processing for Multibeam Based on Average Slope of Terrain[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(5): 990-996.

基于地形平均斜率的多波束数字水深处理

于家成¹, 徐学强²

(1. 华北科技学院电子信息工程学院, 河北 廊坊 065201; 2. 中国南方工业研究院, 北京 100089)

摘要: 根据多波束系统水深测量受地形影响的特点, 提出了基于沿船体纵横两个方向地形平均斜率的水深校正算法, 给出了 5 个水深校正因子, 设计了水深平滑模板。以 5 个校正因子对初始扫描水深数据进行校正, 以所设计的模板对校正后的数据进行滤波。仿真结果表明: 校正后极大减小了水深测量误差, 所设计的模板相对传统的高斯模板具有更高的平滑精度, 更适应水深数据的滤波, 通过两种处理方式, 测量精度获得了明显提高, 海底地形精度和光滑度都获得了较好的改善。

关键词: 多波束数字水深; 平均斜率; 校正因子; 模板滤波

中图分类号: P229.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 05-0990-07

Digital Water Depth Processing for Multibeam Based on Average Slope of Terrain

Yu Jiacheng¹, Xu Xueqiang²

(1. Department of Electronics and Information Engineering, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China;

2. China South Industries Research Academy, Beijing 100089, China)

Abstract: According to the characteristic of multibeam bathymetry in which measurement depth is influenced by terrain, *revision algorithm was proposed based on average slope along the horizontal and vertical terrain. Five depth revision factors were obtained, and a depth smooth template was designed. The initial scan depth data were revised by the 5 revision factors, and then the revised depth data were filtered by the template.* Simulation results show that, the depth of measurement error can be reduced greatly after revision, the designed template relative to the conventional Gauss template has higher smooth precision, more adapted to the water depth data filtering. Through two ways, the measurement accuracy has been improved obviously, and seabed terrain accuracy and smoothness both have been better modified.

Keywords: multibeam digital water depth; average slope; revision factor; template filter

引言

随着现代电子信号处理技术的发展, 传统的海洋测量手段也从单波束回声探测仪发展为多波束系统, 这是一种由多传感器组成的进行海底地形地貌测绘的复杂系统, 能一次给出与航向垂直的垂面

内几十个甚至上百个海底被测点的水深值, 或者一定宽度的全覆盖水深条带, 从而比较可靠地描绘出海底地形地貌的精细特征^[1-2]。

多波束测深系统所采集的水深数据点成离散分布, 数据量往往十分庞大。为实现大数据量离散深度数据的快速海底数字地形建模和可视化, 国内外研究人员通常采用对离散深度数据进行格网化处理^[3-7], 其实质是对深度数据进行内插, 使离散分布的数据点变为规则栅格分布。虽然这种处理为海底地形建模带来了方便, 但是经处理的深度数据不可避免地损失了一定的地形精度^[3]。



收稿日期: 2013-12-20 修回日期: 2014-12-30;
基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(201103);
作者简介: 于家成 (1967-), 男, 山东, 博士, 副教授, 研究方向为电子测量、运动体建模与仿真; 徐学强 (1977-), 男, 山东, 博士, 工程师, 研究方向为导航、制导与控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 990 •

多波束系统的测深换能器发射的声波具有一个立体波束角, 声波到达海底或碰到不同的介质界面时反射, 再被换能器接收, 接收换能器收到的信号可能是在这个波束角所覆盖的任何水深。正确深度应该是波束角所覆盖区域的中心点水深值, 显然, 它不同于声波覆盖区域的边缘点水深值, 因此产生水深测量误差。此项误差在海底水深变化较大的地方尤为明显^[8-10], 尤其在实测水深较深或海底坡度较大的地形时, 由于存在波束宽度, 往往产生地形图等深线向断面方向前后凸凹、弯曲的情形^[11], 形成虚假地形, 从而使绘制的海底地图与实际地形存在差异^[1]。文献[12]将这种波束宽度对测深的影响表示为 3 种效应: 时移效应、双曲线增伪效应和深度丢失效应。文献[13]基于波束宽度, 建立了水深测量数字改正模型, 但未对波束的这种纵向宽度对测量的影响进行处理。本文以单平面换能器多波束系统为例, 利用已有的离散水深数据通过 **B** 样条内插为规则网格, 形成网格化海底地形。在此基础上, 对波束的立体宽度, 从横向宽度和纵向宽度两个方面对水深测量的影响进行了修正, 为了进一步改善海底地形的平滑程度, 以更符合海底地形的特点, 进而设计了平滑模板对修正后的数据进行了滤波。

1 生成实时扫描地图

1.1 生成扫描区域

多波束条带测深仪的声基阵是由 2 个米尔斯交叉阵组成的“V”形阵, 发射基阵将声信号辐射到海底一个条带状的区域, 接收基阵接收到条带区域的反向散射信号后, 经过空间处理形成多个波束, 可以将不同位置的深度分离出来。所以一次扫描能够获得多个深度数据, 它的工作效率高、波束窄, 约为 2°, 所以地形分辨率高, 能够实现大范围的全覆盖测深^[14-15]。

1.2 多波束数字测深扫描

如图 1 所示, 设沿船体横向(垂直龙骨方向)第 i 个波束投射到海底到换能器所处方向的横向倾角

为 α , 沿船体运动方向(平行龙骨方向)的纵向倾角为 β , 换能器所在位置 P 。设船体从原点开始沿方向 \vec{q} 航行, 航速 V , 采样时间 T , 由于存在纵横两个方向的波束宽度, 第 i 个波束照射的海底离散点形成一个矩形点集 V_i 。

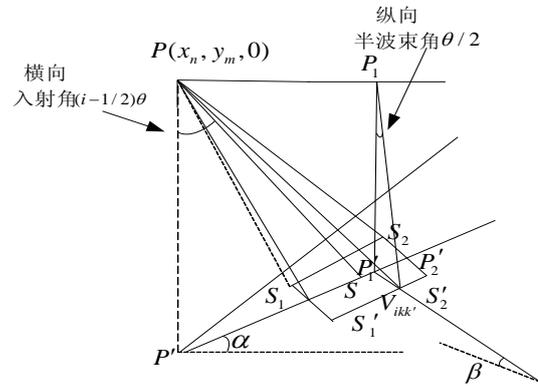


图 1 右舷第 i 个波束立体投射海底示意图

$$V_i = \{V_{ikk'}(x_{ik}, y_{ik'}, z(x_{ik}, y_{ik'})) \mid (i-1)\theta \leq \angle(\overrightarrow{PP'}, \overrightarrow{PV_{ikk'}}) \leq i\theta - \frac{1}{2}\theta \leq \angle(\overrightarrow{P_1P_1'}, \overrightarrow{P_1V_{ikk'}}) \leq \frac{1}{2}\theta\} \quad (1)$$

其中: $V_{ikk'}$ 为第 i 个波束投射到海底面的点; α, β 分别为沿载体横向和纵向的倾斜角; $S_1S_1'S_2S_2'$ 为矩形点集 V_i 所在区域, 则第 i 个波束从换能器到测点的距离为

$$r_i(x_n, y_m) = \min\{D(x_{ik}, y_{ik'}, z(x_{ik}, y_{ik'})) \mid (x_{ik}, y_{ik'}, z(x_{ik}, y_{ik'})) \in V_i\} \quad (2)$$

其中: $D((x_{ik}, y_{ik'}, z(x_{ik}, y_{ik'})) \in V_i) = |PV_{ikk'}|$ 。

第 i 个波束的换能器下水深为

$$Z_i = r_i(x_n, y_m) \cdot \cos(i - \frac{1}{2})\theta \quad (3)$$

距离中心点的水平距离为

$$L_i = r_i(x_n, y_m) \cdot \sin(i - \frac{1}{2})\theta \quad (4)$$

脚印位置为

$$\begin{aligned} x_i &= L_i \cdot \cos \angle(\vec{q}_\perp, ox) \\ y_i &= L_i \cdot \sin \angle(\vec{q}_\perp, ox) \end{aligned} \quad (5)$$

其中: \vec{q}_\perp 为与 \vec{q} 垂直的向量。

2 测深校正

在水深测量中，是以最短距离作为记录长度，由于存在波束宽度及地形的起伏，测得的水深比实际水深浅，如图 2 所示中 α, β 的影响。为了减小测量误差，需要对测得的数据进行地形补偿。

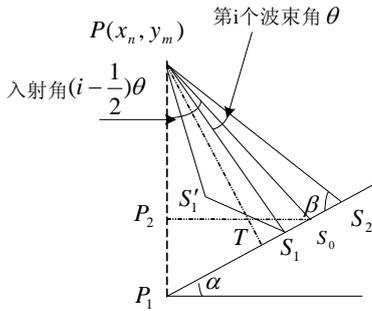


图 2 第 i 个波束投射海底距离关系图

如图 2 所示， $PT \perp$ 坡面， $\alpha < (i-1)\theta$ ，测量波束左侧边缘取得最小值，此时， $\angle TPS_1 = (i-1)\theta - \alpha$ ，第 i 个波束从换能器到测点的记录距离 $r'_i(x_n, y_m) = |PS_1|$ ，记录的水深值为

$$h'_i(x_n, y_m) = r'_i(x_n, y_m) \cdot \cos(i - \frac{1}{2})\theta \quad (6)$$

根据文献[16]，其真实距离为

$$\begin{aligned} r_i(x_n, y_m) &= |PS_0| = |PT| \cdot \sec((i - \frac{1}{2})\theta - \alpha) = \\ &= r'_i(x_n, y_m) \cdot \cos((i-1)\theta - \alpha) \cdot \\ &= \sec((i - \frac{1}{2})\theta - \alpha) \end{aligned} \quad (7)$$

真实水深为

$$h_i(x_n, y_m) = r_i(x_n, y_m) \cdot \cos(i - \frac{1}{2})\theta \quad (8)$$

真实水深与初始扫描水深的关系为

$$\begin{aligned} \frac{h_i(x_n, y_m)}{h'_i(x_n, y_m)} &= \frac{r_i(x_n, y_m)}{r'_i(x_n, y_m)} = \cos((i-1)\theta - \alpha) \cdot \\ &= \sec((i - \frac{1}{2})\theta - \alpha) \end{aligned} \quad (9)$$

当 $\alpha > i\theta$ 时，有

$$\frac{h_i(x_n, y_m)}{h'_i(x_n, y_m)} = \cos(\alpha - i\theta) \cdot \sec(\alpha - (i - \frac{1}{2})\theta) \quad (10)$$

$(i-1)\theta \leq \alpha \leq i\theta$ 时，有

$$\frac{h_i(x_n, y_m)}{h'_i(x_n, y_m)} = \sec(|(i - \frac{1}{2})\theta - \alpha|) \quad (11)$$

如果考虑纵向倾斜角 β ，当 $\beta \geq \frac{\theta}{2}$ 在上式中，将引入乘积因子。对应 $\alpha < (i-1)\theta$ 时，乘积因子为

$$\sqrt{\sin^2((i-1)\theta) + \frac{\cos^2((i-1)\theta)\cos^2(\beta - \theta/2)}{\cos^2\beta}} \quad (12)$$

$\alpha > i\theta$ 时，

$$\sqrt{\sin^2(i\theta) + \frac{\cos^2(i\theta)\cos^2(\beta - \theta/2)}{\cos^2\beta}} \quad (13)$$

$(i-1)\theta \leq \alpha \leq i\theta$ 时，

$$\begin{aligned} &\sqrt{\sin^2(\phi) + \frac{\cos^2(\phi)\cos^2(\beta - \theta/2)}{\cos^2\beta}} \\ &((i-1)\theta < \phi < i\theta) \end{aligned} \quad (14)$$

其中， ϕ 的大小根据沿波束扇面扫描位置与换能器之间的夹角确定。若 $\beta \geq \frac{\theta}{2}$ 时， $\frac{\cos(\beta - \theta/2)}{\cos\beta} \rightarrow 1$ ，则

$$\begin{aligned} &\sqrt{\sin^2((i-1)\theta) + \frac{\cos^2((i-1)\theta)\cos^2(\beta - \theta/2)}{\cos^2\beta}} \approx \\ &= \frac{\cos(\beta - \theta/2)}{\cos\beta} \end{aligned} \quad (15)$$

若 $\beta < \frac{\theta}{2}$ ，纵向接近平坦，波束内将获得最短

距离，此时将引入乘积因子 $\frac{1}{\cos\angle S_1PS'_1}$ 由于

$\angle S_1PS'_1 \approx \beta$ ，因此

$$\frac{1}{\cos\angle S_1PS'_1} \approx \frac{1}{\cos\beta} \quad (16)$$

这样，我们以因子

$$A_1 = \cos((i-1)\theta - \alpha) \cdot \sec((i - \frac{1}{2})\theta - \alpha),$$

$$A_2 = \cos(\alpha - i\theta) \cdot \sec(\alpha - (i - \frac{1}{2})\theta),$$

$$A_3 = \sec(|(i - \frac{1}{2})\theta - \alpha|)$$

来校正沿船体横向(垂直龙骨)倾斜角所引起的测深误差；显然，沿航线方向，地形上倾还是下倾，仅影响波束扫描点的前

后, 但对纵向的测深改变同样, 因此当 $\beta < 0$ 时,

以 $|\beta|$ 代替 β 进行计算。我们以 $B_1 = \frac{1}{\cos|\beta|}$, $B_2 = \frac{\cos(|\beta| - \theta/2)}{\cos|\beta|}$ 来校正沿船体纵向(平行龙骨)

倾斜角所引起的测深误差。

算法描述为: 首先计算第 i 个波束的横向和纵向的倾斜角 $\alpha = \text{tg}^{-1}(\frac{k_{AG} + k_{GB}}{2})$, $\beta = \text{tg}^{-1}(\frac{k_{CG} + k_{GD}}{2})$,

如图 3 所示, 其中, 沿船体横向斜率为

$$k_{AG} = \frac{h_A - h_G}{y_A - y_G} \quad k_{GB} = \frac{h_G - h_B}{y_G - y_B}$$

沿船体纵向斜率为

$$k_{CG} = \frac{h_C - h_G}{x_C - x_G} \quad k_{GD} = \frac{h_G - h_D}{x_G - x_D}$$

其中, α , β 分别为纵向和横向平均斜率的反正切, 以 α , β 校正测量水深的方法为

- if $\alpha < (i-1)\theta$, $|\beta| < \frac{\theta}{2}$, $h_i = h'_i A_1 B_1$;
- if $\alpha < (i-1)\theta$, $|\beta| \geq \frac{\theta}{2}$, $h_i = h'_i A_1 B_2$;
- if $\alpha > i\theta$, $|\beta| < \frac{\theta}{2}$, $h_i = h'_i A_2 B_1$;
- if $\alpha > i\theta$, $|\beta| \geq \frac{\theta}{2}$, $h_i = h'_i A_2 B_2$;
- if $(i-1)\theta \leq \alpha \leq i\theta$, $|\beta| < \frac{\theta}{2}$, $h_i = h'_i A_3 B_1$;
- if $(i-1)\theta \leq \alpha \leq i\theta$, $|\beta| \geq \frac{\theta}{2}$, $h_i = h'_i A_3 B_2$ 。

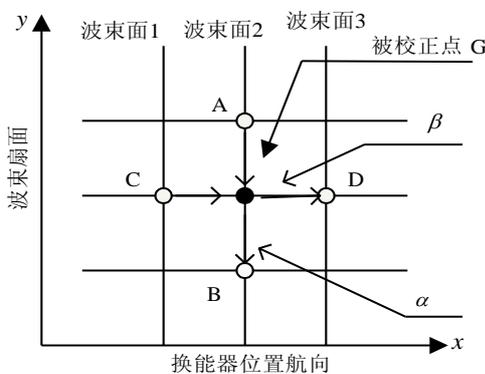


图 3 左舷波束横纵向平均斜率示意图

3 模版滤波

在图像学中, 模板占有重要的地位, 使用模板可以有效的平滑误差, 从而对图像进行滤波, 根据不同的需要, 所用的模板也较多, 在这些模板中, 高斯模板效果较好。但是这些模板在地图滤波中却不易达到理想的效果, 本文针对地图提出一种新的模板, 可以有效的过滤误差, 通过与各种模板的比较可以发现, 该模板较为科学, 滤波效果极为明显, 比高斯模板更为有效。

我们进行模板的设计原则是, 首先认为各点水深值应该保留有该点水深值的多数信息, 因此应该具有较多的权重, 第二既要原水深进行适当平滑, 但又不平滑过重, 否则容易对尖锐部分丢失细节, 导致尖锐地形失真, 因此选择取中间值, 平滑掉尖锐处的 $1/2$, 这样既保持了一定的光滑度, 又兼顾了细节不完全被平滑掉, 模板设计过程如下, 考虑如图 4 所示的一维原信号。

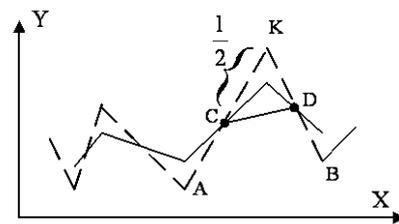


图 4 原信号及理想信号图

图 4 中剧烈变化的虚线部分为原始信号, 设想中间穿越实线为理想信号, 则 K 点的理想值为

$$\hat{y}_K = \frac{1}{2}(y_C + y_D) = \frac{1}{2}(\frac{y_A + y_K}{2} + \frac{y_K + y_B}{2}) = \frac{1}{2}y_K + \frac{1}{4}(y_A + y_B) \quad (17)$$

考虑二维剧烈变化信号, 其单点周围邻点及对角点都将对中点产生影响, 变化区域如图 5 所示。

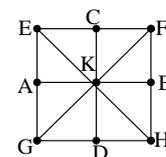


图 5 模板设计图

相应的有

$$\hat{y}_K = \frac{1}{2} y_K + \frac{1}{8} (y_A + y_B + y_C + y_D) \quad (18)$$

由于对角点距中心点与直线上点距中心点距离相差很小,我们把对角点与上下左右两侧上的点分配相等的权值,从而有

$$\begin{aligned} \hat{y}_K &= \frac{1}{2} y_K + \frac{1}{16} (y_A + y_B + y_C + y_D + \\ & y_E + y_F + y_G + y_H) = \\ & \frac{1}{16} (8y_K + y_A + y_B + y_C + \\ & y_D + y_E + y_F + y_G + y_H) \end{aligned} \quad (19)$$

于是得到模板: $\frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 8^* & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$,

常见的高斯模板为: $\frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4^* & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$

相对于高斯模板,所设计的模板更强化了中心位置,比高斯模板的中心位置多 0.25 的权重,地形的横纵向及两对角方向,周围的地形对中心是同等贡献,都为 1/16,相当于一个圆形的模板,对地形而言,周围任何方向对中心点都是同样的地位,而高斯模板加重了上下左右两侧的权重,轻化了两对角方向。所设计模板是以取地形中间均值为基础,更利于总体上减少误差,同时,加重了中心位置的权重,也利于保留地形的尖锐细节。

4 仿真实验

本文以波束数为 16,波束角为 $2^\circ \times 2^\circ$ 的单平面换能器多波束系统为例扫描产生实时地图。在扫描之前,一般先要对原始测深数据进行精密插值,形成 DTM。为了进行扫描,需要利用原始的水深数据生成初始地形,但原始水深数据是基于大网格的,格网间距 463 m 左右,水深 1 000 m 左右。而测船速度低,波束宽度一般从 1.5° (沿船纵向) $\times 1.5^\circ$ (沿船横向)到 $3^\circ \times 3^\circ$; 这样的船速和波束开角覆盖

海底面长宽 30 m 左右,远远小于原始网格间距,这样一个波束的扫描没有超出原始数据的一个网格,为了扫描获得网格点,我们将原始数据进一步 B 样条插值生成扫描地形,用于波束的扫描。之所以选择样条插值,是因为高次插值函数的计算量大,有剧烈振荡,数值稳定性差;而分段线性插值在分段点上仅连续而不光滑(导数不连续)。而样条函数可以同时解决这两个问题,使插值函数既是低阶分段函数,又是光滑的函数。对于像高速飞机的机翼形线,船体放样等型值线,缓慢变化的慢坡地形往往要求有二阶光滑度,使用 B-样条插值拟合的地形更符合实际情况。

设船体沿纬度方向由西向东匀速直线航行 10 秒,船速 6 m/s,采样时间 1 s。在进行地图扫描时,首先把换能器中心归结到最近网格点,以该点为中心,以 $2 \max |z| \cdot \text{tg}(i\theta)$ 为边长建立正方形作为搜索区域,搜索点数为 $\text{int}(\frac{2 \max |z| \cdot \text{tg}(i\theta)}{\text{grid}}) + 1$,

(grid 为网格间距); 得到 $r_i(x_n, y_m)$, 从而得到 Z_i , L_i , 脚印位置 (x_i, y_i) , 按照 \vec{q}_\perp 方向,以足够大矩形区域进行搜索,中间波束脚印位置进行最近网格点归结后作为向外边缘的下一个波束的搜索区域的起点。

先从右舷第一个波束投射区域开始搜索,从换能器所在位置开始沿纬度方向依次增大,直到 $\angle(\overrightarrow{PP1}, \overrightarrow{PVik}) \leq \theta$, 对得到的第一个波束脚印归结到其投射范围内最近纬度网格点,同时将此网格点作为下一个投射波束搜索起点,对右舷第 i 个波束,从第 $i-1$ 个波束归结的网格点依次增大纬度进行搜索,直到 $(i-1)\theta \leq \angle(\overrightarrow{PP1}, \overrightarrow{PVik}) \leq i\theta$ 。在进行搜索运算时,以经纬度网格数为单位,如果以度为单位,容易造成运算积累误差,在搜索完成后,再将网格数换算为经纬度角度数,搜索完成后产生的 16×11 水深数据地图如图 6 所示,由该图可以发现,测船扫描过一段左高又低的慢坡曲面。水深在 $-1\ 000 \sim 1\ 060$ m。

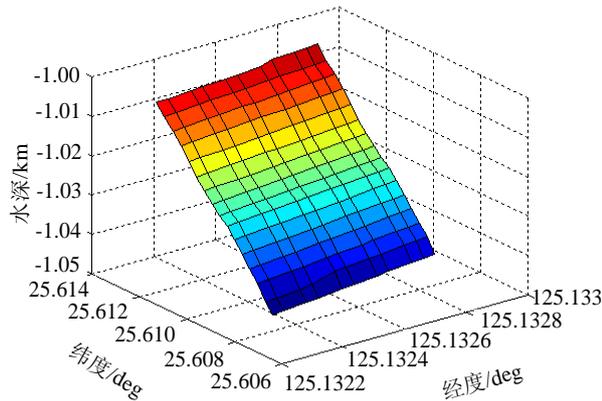
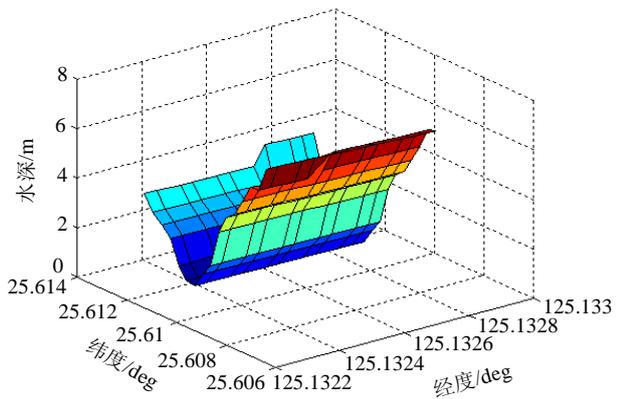
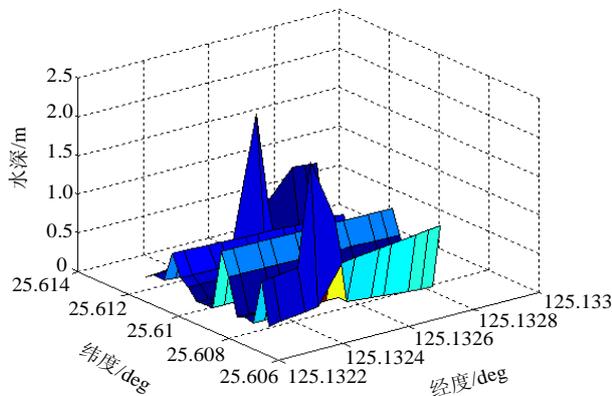


图 6 初始扫描水深地图

进而对所扫描的地图, 以 5 个因子 A_1 , A_2 , A_3 , B_1 , B_2 沿横向纵向进行校正, 校正前后的地图误差曲面如图 7 所示, 校正前地图平均误差 3.455 3 m, 校正后地图平均误差 0.253 1 m。同时可以发现, 中心波束附近改正较好, 边缘波束误差较大, 但总体上校正后的地图误差明显减小了。



(a) 地形校正前



(b) 地形校正后

图 7 水深扫描地图误差曲面

为了进一步减缓地形的尖锐程度, 以更符合海底地形自然起伏特征, 用所设计模板对校正后的数据进一步平滑, 同时为了检验该模板的有效性, 与高斯模板的平滑结果进行对比, 平滑结果与真实地图之间的误差精度如表 1 所示。

表 1 所建地图与真实地图之间误差

	平均误差/m	最大误差/m
设计模板	0.22	1.509 5
高斯模板	0.235	1.366 8

由表 1 中可以发现, 所设计模板相对于高斯模板, 平滑后的平均误差要小, 最大误差要大, 说明总体上误差减小了, 同时对地形尖锐处也予以适度保留, 既平滑了地形全部, 也兼顾了地形的细节, 相对高斯模板, 获得更好的平滑效果, 更符合海底地形的特点, 经过测深校正和滤波平滑两步处理, 地图精度由校正前的 3.455 3 m, 提高到 0.22 m, 进一步减小了地图误差, 提高了水深测量的精度。

5 结论

对水深测量的初始数据进行了分析, 为了产生测量数据, 首先根据多波束测量的特点, 建立了多波束系统水深测量的模型, 用该模型对内插过的规则网格海底地形进行扫描, 以获得初始数据, 进而分析了沿船体横向和纵向的地形倾斜角, 提出了基于地形平均斜率的水深校正算法, 给出了 5 个水深校正因子, 以 5 个校正因子对初始扫描水深数据进行校正, 极大减小了水深测量的误差。为了改善校正后水深数据的光滑程度, 设计了 3×3 模板对校正后的数据进行滤波。仿真表明, 误差在中间波束扫描部分, 改正误差较小, 边缘波束误差较大, 如果波束数增多, 边缘波束的改正误差会增大, 由于是基于地形平均斜率进行校正, 对水深更深的区域, 改正作用更大。经过两种方式的处理, 既提高了海底水深测量精度, 也保持了海底一定的光滑程度, 更符合海底地形的自然特征。

参考文献:

- [1] 刘经南, 赵建虎. 多波束测深系统的现状和发展趋势[J]. 海洋测绘, 2002, 22(5): 3-6.
- [2] 李家彪. 多波束勘测原理技术与方法[M]. 北京: 海洋出版社, 1999.
- [3] 陆丹, 李海森, 魏玉阔, 等. 多波束测深系统中的海底地形可视化技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(2): 450-456.
- [4] Bourillet Jf, Edy C, Rambert F, *et al.* swath mapping system processing: Bathymetry and cartography [J]. Marine Geophysical Researches (S0025-3235), 1996, 18(2): 487-506.
- [5] Jakobsson M, Calder B R, Mayer L A. On the effect of random errors in gridded bathymetric compilations [J]. Journal of Geophysical Research (S2156-2202), 2002, 107(B12): 14-1-14-11.
- [6] Calder B R. On the uncertainty of archive hydrographic data sets [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering (S0364-9059), 2006, 31(2): 249-265.
- [7] 孙岚, 刘雁春, 李明叁. 基于多波束数据的海底地形建模技术[J]. 海洋测绘, 2009, 29(1): 39-41.
- [8] 林琚, 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.
- [9] 方兆宝. DGPS 技术及其在海道测量中的应用研究[D]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1999.
- [10] Chen Y Q, Liu Y C. Correction for the Seabed Distortion caused by the Angular Beamwidth of Echosounders [J]. The Hydrographic Journal, 1997, 84(1): 15-19.
- [11] 褚宏宪, 周小明, 史慧杰, 等. 水深测量误差分析与改正[J]. 物探与化探, 2011, 35(3): 358-362.
- [12] 刘雁春, 陈永奇. 海洋测深的波束角效应及其改正[J]. 海洋测绘, 1999 (2): 20-27.
- [13] Okino, M., Higashi, Y. Measurement of Seabed Topography by Multibeam Sonar Using CFFT [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering (S0364-9059), 1986, 11(4): 474-479.
- [14] 赵会滨, 徐新盛, 吴英姿. 多波束条带测深技术发展动态展望[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2001, 22(2): 41-45.
- [15] Moustier C D. State of the art in swath bathymetry survey systems [J]. International Hydrographic Review (S0020-6946), 1988, 65(2): 25-54.
- [16] 于家城, 宋春雷, 晏磊, 等. 多波束声纳数字测深与改正模型[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(3): 429-433.

《系统仿真学报》荣获“2014 中国最具国际影响力学术期刊”证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心, 以美国汤森路透 Web of Science 收录的 1.2 万余种期刊为引文统计源, 首次研制发布了 2012《中国学术期刊国际引证年报》(CAJ-IJCR 年报)。第一次给出了我国 5600 余种中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标, 并采用了新的国际影响力综合评价指标 CI 对期刊排序, 发布了“中国最具国际影响力学术期刊”(排序 TOP5%)和“中国国际影响力优秀学术期刊”(排序 TOP5-10%), 在国内外学术界产生了较大反响。之后, 2013 年版年报, 将引文统计源期刊扩展到 1.44 万多种。目前, 2014 版国际、国内年报与 TOP5% 和 TOP5-10% 期刊的遴选业已完成, 《系统仿真学报》被列入“2014 中国最具国际影响力学术期刊”行列。

我学报连续 2 年被列入 TOP5% 国内一流的中国最具国际影响力学术期刊, 走向世界, 进入国际一流, 指日可待!