



# 一种基于常梯度模板插值的声线跟踪算法

赵建虎<sup>1</sup> 张红梅<sup>2</sup> 吴 猛<sup>1</sup>

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学动力与机械学院,湖北 武汉,430072

**摘要:**常梯度声线跟踪在计算波束脚印位置时精度高,但过程复杂、效率低,应用于深海测量时尤为严重,因此提出了一种基于常梯度声线跟踪模板的波束点插值计算方法。首先研究了基于常梯度声线跟踪模板进行波束点位插值计算的理论基础,发现通过模板差值可以确定波束足迹;然后提出了基于常梯度模板插值的声线跟踪算法,主要包括常梯度声线跟踪模板构建、过跟踪和欠跟踪算法、吃水影响及补偿模型,并在此基础上,将该算法应用于浅水、中水和深水声线跟踪计算。实验结果表明,该方法在确保跟踪精度的同时,可以大幅度提高计算效率。

**关键词:**常梯度声线跟踪;波束脚印;模板插值;计算效率

中图分类号:P229

文献标志码:A

声线跟踪是水下测距和测深数据处理中的关键技术。波束历经不同温度、盐度的水层时声速不同,导致入射角不为零,波束传播路径发生变化,给波束点位确定带来不便。尤其在深海数据处理中,波束数多、声线跟踪的深度层多,计算效率成为关注的重点。

波束海底落点相对换能器的水平位移和水深主要借助声线跟踪获得<sup>[1-13]</sup>。声线跟踪以声速剖面(sound velocity profile, SVP)提供的水层、测量时间为条件逐层跟踪波束,最终确定波束海底落点坐标。根据声速在不同水层中的变化假设,声线跟踪常采用常声速和常梯度声线跟踪法。常声速声线跟踪法假设层内声速为常值,认为声线在水层内直线传播,在整个水柱中折线传播。该方法实施简单,但假设与实际存在一定偏差,计算误差较大。常梯度声线跟踪法假设声速在层内随水深线性变化,声线在层内和整个水体中以弧线传播。该假设严密,保证了声线跟踪精度。文献[14]提出了一种常梯度声线跟踪中平均声速计算的改进方法,通过更加严密的层内平均声速计算剩余层的垂直位移和水平位移,提高了声线跟踪精度。上述方法均采用了分层追加的思想,算法复杂,计算耗时较长,尤其在计算深海、双探头多

波束测深数据时效率更低。为了提高计算效率,文献[15]提出了一种典型的SVP简化模型,将整个水层简化为线性变化的三部分,其计算结果的可靠性取决于水底地形起伏状况;文献[16]提出了一种声速剖面自动分类方法,能够有效保留SVP特征点,对于SVP简化具有指导意义;文献[17]提出了一种基于道格拉斯-普克(Douglas-Peucker)算法的声线跟踪自适应分层方法,通过设定阈值,重复寻找并保留不在阈值范围内的特征点,同时舍去存在线性特性的声速剖面层,在测深应用中能较好地兼顾精度和效率;文献[18]中提出了等效声速剖面法,依据相对面积差理论寻找等效声速剖面,代替实际声速剖面声线跟踪,其精度依赖于等效剖面的选取;文献[19]基于等效剖面思想提出了一种SVP自适应分层方法,简化了SVP;文献[20]提出了一种等效声速梯度的迭代算法,通过对给定等效声速梯度进行多次迭代,逼近真实的等效声速梯度。上述方法的简化原则不同,计算精度也不同,且精度均存在一定程度的降低,其适用性尚需进一步的验证。

因此,本文提出了一种基于常梯度声线跟踪模板插值的波束点位计算方法,能够在确保跟踪精度的同时,大幅度提高计算效率。

收稿日期:2019-09-02

项目资助:国家科技重大专项资助项目(2016YFB0501703);上海市海洋局科研项目(2020-01);交通部科研项目。

第一作者:赵建虎,博士,教授,主要从事海洋测绘研究。jhzhao@sgg.whu.edu.cn

通讯作者:吴猛,硕士。2015282140135@whu.edu.cn

## 1 声线跟踪模板插值原理

根据层内常梯度声线跟踪算法可以得到波束在第*i*层传播经历的水平位移*y<sub>i</sub>*和时间*t<sub>i</sub>*,计算如下:

$$\begin{cases} y_i = \frac{\cos\theta_{i-1} - \cos\theta_i}{pg_i} \\ t_i = \frac{R_i(\theta_i - \theta_{i+1})}{C_{Hi}} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $C_{Hi}$  为第*i*层的 Harmonic 平均声速;  $\theta_{i-1}$  和  $\theta_i$  分别为第*i*层上、下界面的入射角;  $p$  为 Snell 常数;  $g_i$  为对应声速梯度;  $R_i$  为声线曲率半径。若波束经历*N*层, 则波束海底点坐标(*X*, *Y*, *Z*)为:

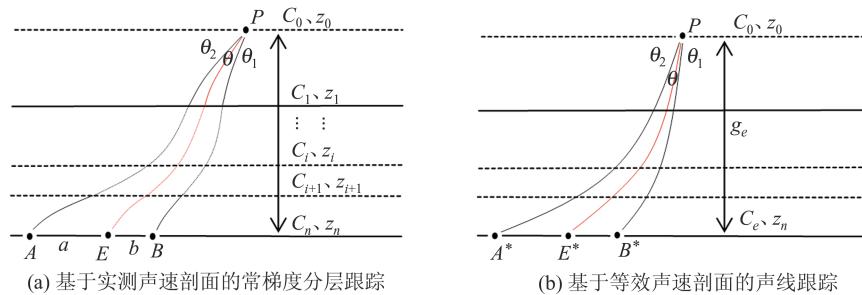


图1 两种声线跟踪方法  
Fig. 1 Two Kinds of Sound Ray Tracking Methods

利用等效声速剖面法, 令真实声速剖面在 $z_n$ 层的等效声速为 $C_e$ , 等效声速剖面的声速梯度为 $g_e$ , 可得到 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 两波束在 $z_n$ 层上落点 $A^*$ 、 $B^*$ 的水平位移量和时间。具体计算如下:

$$\begin{cases} y_A^* = \frac{C_0(\cos\theta_2 - \cos\theta_2')}{g_e \sin\theta_2} \\ t_A^* = \frac{C_0(\theta_2' - \theta_2)}{g_e^2(z_n - z_0) \sin\theta_2} \ln \left[ \frac{C_e}{C_0} \right] \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} y_B^* = \frac{C_0(\cos\theta_1 - \cos\theta_1')}{g_e \sin\theta_1} \\ t_B^* = \frac{C_0(\theta_1' - \theta_1)}{g_e^2(z_n - z_0) \sin\theta_1} \ln \left[ \frac{C_e}{C_0} \right] \end{cases} \quad (4)$$

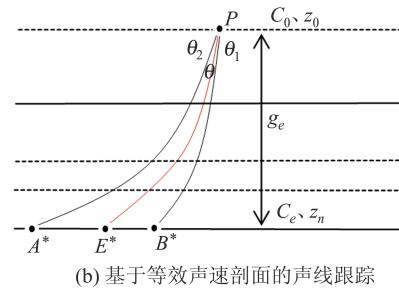
$$\begin{cases} r_x = \frac{y_E - y_B}{y_A - y_B} = \frac{(y_E^* - y_B^*) + (\Delta y_E - \Delta y_B)}{(y_A^* - y_B^*) + (\Delta y_A - \Delta y_B)} \approx \frac{y_E^* - y_B^*}{y_A^* - y_B^*} = \frac{C_0(\cot\theta - \cot\theta_1) - C_e(\cot\theta' - \cot\theta_1')}{C_0(\cot\theta_2 - \cot\theta_1) - C_e(\cot\theta_2' - \cot\theta_1')} \\ r_t = \frac{t_E - t_B}{t_A - t_B} = \frac{(t_E^* - t_B^*) + (\Delta t_E - \Delta t_B)}{(t_A^* - t_B^*) + (\Delta t_A - \Delta t_B)} \approx \frac{t_E^* - t_B^*}{t_A^* - t_B^*} = \frac{(\theta' - \theta)\csc\theta - (\theta_1' - \theta_1)\csc\theta_1}{(\theta_2' - \theta_2)\csc\theta_2 - (\theta_1' - \theta_1)\csc\theta_1} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $y$ 、 $y^*$  分别为基于实际声速剖面、基于等效声速剖面常梯度声线跟踪所得落点的水平位移; 对应的传播时间为  $t$ 、 $t^*$ ;  $\theta'$  为  $\theta$  经折射后在  $z_n$  处的波束入射角。

$$X = 0, Y = \sum_{i=1}^N y_i, Z = \sum_{i=1}^N \Delta z_i \quad (2)$$

式中,  $\Delta z_i$  为第  $i$  层的水层厚度。

如图1所示, 经安装偏差和姿态改正后, 换能器  $P$  发射初始入射角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  波束, 利用式(1)、式(2)通过层内常梯度声线跟踪算法, 可计算其海底点  $A$ 、 $B$  坐标,  $C_{i-1}$ 、 $C_i$  分别为经历第  $i$  层上、下界面的声速。若有波束  $\theta$  ( $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ ), 且能够根据  $A$  和  $B$  确定波束  $\theta$  在  $z_n$  层上落点位置的某种内插关系, 则对于实现海量波束在水深值为  $z_n$  层的快速定位具有重要作用。从式(1)可以看出, 波束点在  $z_n$  层上落点的水平位移和时间、角度相关, 因此波束  $\theta$  落点可根据  $A$ 、 $B$  得到内插关系, 从而获得其落点  $E$  的水平位移量和时间。



式中,  $\theta_2'$ 、 $\theta_1'$  分别为  $\theta_2$ 、 $\theta_1$  经折射后在  $z_n$  处的波束入射角。

如图1所示,  $\Delta y_A$ 、 $\Delta y_B$ 、 $\Delta y_E$  分别为两种算法的水平位置偏差,  $\Delta t_A$ 、 $\Delta t_B$ 、 $\Delta t_E$  为对应的时间偏差。由等效声速剖面声线跟踪原理可知, 等效声速剖面代替实际声速剖面产生的位置偏差  $\Delta y_A$ 、 $\Delta y_B$  和  $\Delta y_E$  本身就较小, 再次较差  $\Delta y_A - \Delta y_B$ 、 $\Delta y_A - \Delta y_E$  的结果会更小(客观情况下不足1 cm), 这一微小量给计算带来的影响可以忽略; 同样, 传播时间偏差之差  $\Delta t_A - \Delta t_B$ 、 $\Delta t_A - \Delta t_E$  的影响( $1 \times 10^{-6}$  s)也可以忽略。由此可近似认为当  $\theta_1$  和  $\theta_2$  间夹角较小时,  $y_A - y_B \approx y_A^* - y_B^*$ ;  $y_E - y_B \approx y_E^* - y_B^*$ , 则可得到  $r_x$  和  $r_t$  的近似关系如下:

$$\begin{cases} r_x = \frac{y_E - y_B}{y_A - y_B} = \frac{(y_E^* - y_B^*) + (\Delta y_E - \Delta y_B)}{(y_A^* - y_B^*) + (\Delta y_A - \Delta y_B)} \approx \frac{y_E^* - y_B^*}{y_A^* - y_B^*} = \frac{C_0(\cot\theta - \cot\theta_1) - C_e(\cot\theta' - \cot\theta_1')}{C_0(\cot\theta_2 - \cot\theta_1) - C_e(\cot\theta_2' - \cot\theta_1')} \\ r_t = \frac{t_E - t_B}{t_A - t_B} = \frac{(t_E^* - t_B^*) + (\Delta t_E - \Delta t_B)}{(t_A^* - t_B^*) + (\Delta t_A - \Delta t_B)} \approx \frac{t_E^* - t_B^*}{t_A^* - t_B^*} = \frac{(\theta' - \theta)\csc\theta - (\theta_1' - \theta_1)\csc\theta_1}{(\theta_2' - \theta_2)\csc\theta_2 - (\theta_1' - \theta_1)\csc\theta_1} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知, 对于任意入射角为  $\theta$  的波束, 其在某一水层上落点的坐标可借助其邻波束  $\theta_1$  和  $\theta_2$  ( $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ ), 根据上述比例关系内插得到, 具体计算如下:

$$\begin{cases} x = 0 \\ y_E = r_x(y_A - y_B) + y_B \\ t_E = r_t(t_A - t_B) + t_B \end{cases} \quad (6)$$

若波束跟踪时间  $t_E$  等于测量时间  $t$ , 则波束落点在换能器坐标系下的坐标为  $(0, y_E, z_n)$ 。

## 2 波束点位模板插值计算方法

## 2.1 波束点位的模板插值

利用实测 SVP 的水层数  $N$  和层间距, 预设一定波束角间隔的波束, 利用基于实测声速剖面层内常梯度声线跟踪方法可计算波束在各层落点的水平位移、传播时间, 形成声线跟踪模板, 如图 2 所示。

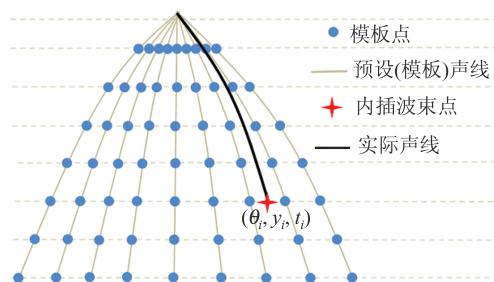


图2 模板内插计算波束点坐标

Fig. 2 Determination of Beam Footprint by Template-Interpolation

根据式(6)对处于预设波束入射角内的波束进行内插,可获得其在对应层上的水平位移和传播时间,最终得到该波束点在换能器坐标系下的坐标。

## 2.2 过跟踪和欠跟踪

由图2可知,波束传播到某层时间不一定等于观测时间,会出现如图3所示的过跟踪和欠跟踪问题( $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ )。

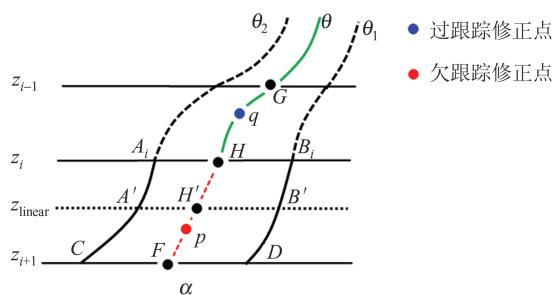


图3 过跟踪和欠跟踪

Fig.3 Over-Tracking and Under-Tracking

在  $A_iB_i$  界面,  $\theta$  波束在该界面落点(内插点  $H$ )的时间  $t_H$  与  $\theta_1$  和  $\theta_2$  波束在界面传播时间存在

关系  $t_{B_i} < t_H \leq t_{A_i}$ , 与该波束测量时间  $t$  则存在如下关系: (1)  $t_H = t$ , 则  $E$  点在换能器下的坐标为由  $A_i, B_i$  点模板内插得到的坐标; (2)  $t_H < t$  且  $t_F > t$ , 欠跟踪, 需增加欠跟踪量; (3)  $t_H > t$  且  $t_G < t$ , 过跟踪, 需扣除过跟踪量。

### 2.2.1 欠跟踪

如图3所示,首先根据模板内插出该波束在 $z_i$ 和 $z_{i+1}$ 层落点H和F的水平位移和传播时间,计算如下:

$$\begin{cases} y_H = r_x (y_{A_i} - y_{B_i}) + y_{B_i} \\ t_H = r_t (t_{A_i} - t_{B_i}) + t_{B_i} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} y_F = r_x(y_C - y_D) + y_D \\ t_F = r_t(t_C - t_D) + t_D \end{cases} \quad (8)$$

在  $z_i$  至  $z_{i+1}$  层内, 根据  $t_H$ 、 $t_F$  和  $t$ , 通过时间线性内插得到该波束在海床上实际落点  $p$  的坐标  $(0, y_p, z_p)$ , 具体计算如下:

$$\begin{cases} y_p = k \times (y_F - y_H) + y_H \\ z_p = k \times (z_{i+1} - z_i) + z_i \\ k \approx (t - t_H) / (t_F - t_H) \end{cases} \quad (9)$$

如图4所示,欠跟踪还存在另外一种情况,即使波束到了声速剖面最深层,其落在模板内插点E的时间仍小于观测时间 $t$ 。由于此时已经没有模板层,可认为波束在延伸层声速等于声速剖面最后一层 $z_n$ 界面声速 $C_n$ 。增补层内波束的落点坐标可利用常声速声线跟踪方法获得,计算如下:

$$\begin{cases} y_p = y_n + (t - t_n) C_n \sin \theta_n \\ z_p = z_n + (t - t_n) C_n \cos \theta_n \\ \theta_p = C_n \sin \theta_n / C_n \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $t$  为波束真实的传播时间;  $y_n, z_n$  为波束在最后一层深度模板上插值得到的波束落点在换能器坐标系下的水平、垂直坐标;  $(0, y_p, z_p)$  为该波束海底点坐标。

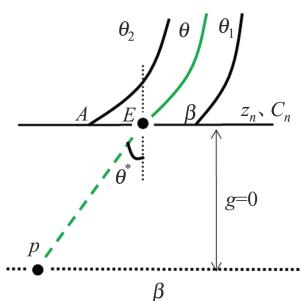


图4 声速剖面最深层的欠跟踪

Fig.4 Under-Tracking of the Deepest Layer of the Sound Velocity Profile

### 2.2.2 过跟踪

对于过跟踪的情况,采用的方法与欠跟踪类似,不同的是需要扣除过跟踪部分。如图3所示,需要采用模板内插得到G、E两点的水平位移量和传播时间,根据真实观测时间t以及 $t_G$ 、 $t_E$ ,采用时间线性内插方法,获得波束实际海底落点坐标 $(0, y_q, z_q)$ 。

### 2.2.3 插值层间距选取

根据 $t_E$ 、 $t_F$ 和t进行时间线性内插可以得到该波束在海床上实际落点p的坐标(见图3),该方法的精度取决于 $z_i$ 和 $z_{i+1}$ 的层间距。为了论证不同层间距对插值精度的影响(系数k取近似值的损失量),设置模板深度间隔分别为1 m、5 m、10 m和50 m。利用常梯度声线跟踪法和模板插值法获得波束脚印坐标,生成相应的数字高程模型(digital elevation model, DEM),并统计模板插值法的精度(相同网格点处的深度较差)以及计算耗时,结果如表1所示。

由表1可知,模板深度间隔越小,插值精度越高。由于模板插值法在插值过程中同时固定了层上界落点和层下界落点,有效地约束了插值偏差,因此适当增加模板深度间隔也不会造成精度的大幅度损失。另外,比较不同深度间隔模板下的计算效率可以看出,深度间隔变化产生的计算效率差异不大(二分法快速定位插值区域)。

表1 模板插值法在4种模板间隔下的精度和效率

Tab.1 Accuracy and Efficiency of Template-Interpolation Method in Four Different Template Intervals

模板深度间隔/m	偏差范围/cm	标准差/cm	1 000 ping 数据计算耗时/s
1	-1.3~0.5	0.07	0.67
10	-1.8~0.6	0.08	0.54
20	-1.8~0.7	0.10	0.59
50	-3.0~3.1	0.45	0.56

在实际工作中,为了更好地控制精度,可以在 $z_i$ 和 $z_{i+1}$ 层间进行线性加密,加入虚拟声速剖面层 $z_{\text{linear}}$ ,通过提供新的模板点 $A'$ 和 $B'$ 以及落点 $E'$ 缩短线性内插层间距,提高插值精度。

### 2.3 吃水影响补偿

一个声速剖面对应一个固定模板,假设多波束换能器均在模板的第一个水层发射波束,则借助模板内插可得到该波束在海底落点的坐标。瞬时变化的换能器吃水打破了该假设,导致换能器所处水层不断变化,给本文算法的高效应用带来了问题,为此有必要对时变吃水影响进行补偿,获得波束在模板开始水层面的入射角和传播时间。

如图5所示,换能器T所处水层为 $z_{\text{draft}}$ ,声速为 $C_{\text{draft}}$ ,发射波束入射角为 $\theta_{\text{draft}}$ , $T_0$ 是利用折射定律将该波束向海面延伸与模板第一个水层面的交点,对应声速为 $C_0$ 。借助常梯度声线跟踪法对换能器动吃水补偿,补偿后的波束初始入射角变为 $\theta_0$ ,跟踪时间变为t,计算公式如下:

$$\begin{cases} \theta_0 = \arcsin\left(\frac{C_0 \sin \theta_{\text{draft}}}{C_{\text{draft}}}\right) \\ t = t_0 + \sum \Delta t_i \\ y = y_0 - \sum \Delta y_i \end{cases} \quad (11)$$

式中, $t_0$ 和t分别为换能器实际发射波束到海底的传播时间和补偿吃水后的传播时间,对应的水平位移分别为 $y_0$ 和y; $\sum \Delta y$ 和 $\sum \Delta t$ 分别为吃水带来的水平位移和时间补偿量。虽然时变吃水影响需要对每一个波束补偿,但耗时非常小,可以忽略不计。经吃水补偿后,可认为波束从插值模板第一层发射,消除了吃水对本文方法的影响。

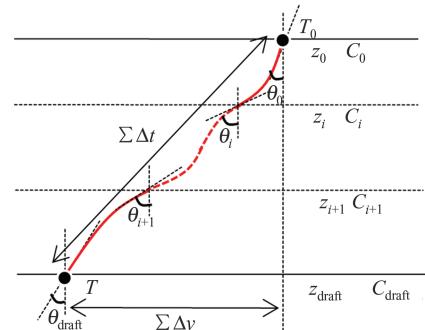


图5 动吃水改正示意图

Fig.5 Diagram of Dynamic Draft Correction

## 3 模板插值计算流程

基于§2的研究,基于模板插值的波束海底落点坐标计算流程如图6所示。首先设计一定角度间隔的虚拟波束,并利用实际声速剖面,根据层内常梯度声线跟踪算法计算得到各虚拟波束在各深度层落点的水平位移和传播时间,形成内插模板;然后对实测波束进行吃水补偿,将波束外延至模板第一层,获得波束入射角和总传播时间;最后根据波束到海底的传播时间,以及相邻波束在各水层模板落点的时间,开展实际波束点在内插水层的传播时间和水平位移,并在此基础上,判断是否存在过跟踪或欠跟踪问题,进行相应的处理,最终获得波束在海底的落点坐标。

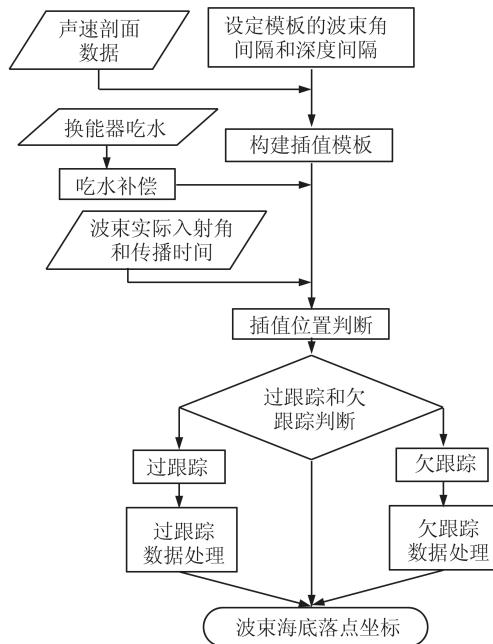


图 6 模板插值法流程图

Fig. 6 Flowchart of Template-Interpolation Method

## 4 实验及分析

为了检验本文算法的精度和效率,利用以色列近海、西太平洋关岛附近、马里纳亚海沟3个水域平均水深分别为12 m、500 m、1 000 m和5 000 m的4组多波束测深数据开展实验。首先利用西太平洋关岛附近水域的EM122多波束2个测线的测深数据进行实验。其中测线Ⅰ共1 216 ping数据,平均水深500 m左右;测线Ⅱ共247 ping,平均水深1 000 m。两个测线每ping波束数均为432个。借助公共开源软件MB-system开展数据处理,获得测线Ⅰ的海床DEM如图7所示。

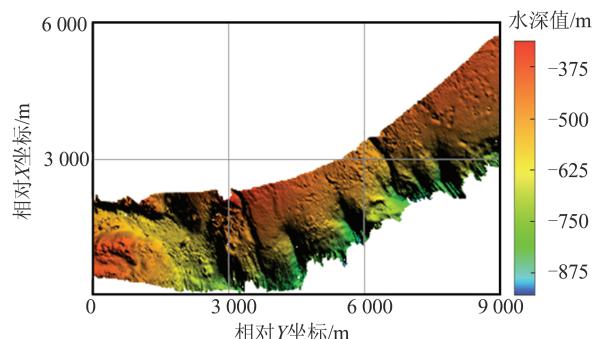


图 7 测线Ⅰ处理后地形图

Fig. 7 Seabed Topographic Map of Line I

然后利用本文算法进行数据处理,步骤如下:(1)以1°为角间隔按照§2.1方法构建内插模板;(2)根据波束入射角、传播时间及吃水变化,借助§2.2和§2.3中的方法内插获得各波束在海底

落点的位置;(3)通过归位计算获得海床DEM。以层内常梯度声线跟踪算法的MB-system处理所得的数据为基础,将得到的DEM作为参考,求得本文算法所得DEM与参考DEM的相同网格点水深较差,并统计其结果,图8(a)给出了1°为角间隔的DEM较差。最后设置模板角间隔为2°和5°,重复上述实验得到的海床DEM较差如图8(b)、8(c)所示。可以看出,随着角间隔增大,本文算法精度有所下降,尤其是边缘波束精度,其中角间隔5°时最大偏差达到20 cm,标准差达到2.1 cm,相比于1°模板,其精度降低了20倍。

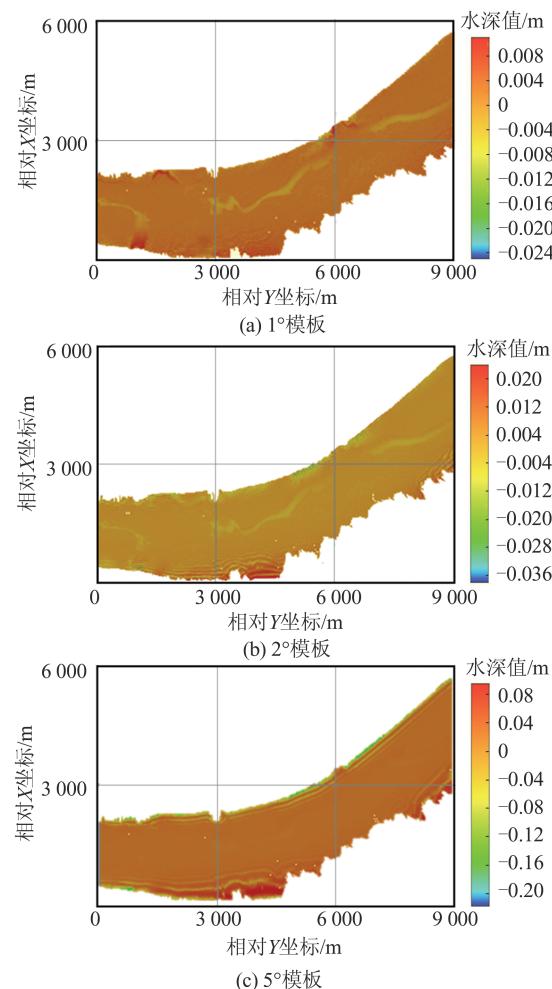


图 8 波束角间隔1°、2°、5°模板下的DEM较差

Fig. 8 DEM Differences in the Templates of 1°, 2° and 5°

由图8可知,偏差分布在-2.5~0.8 cm之间,标准差为0.1 cm。本文算法与MB-system采用的归位计算方法精度相当,表明本文算法确定波束海底点坐标具有较高的精度。统计3个模板下的计算耗时分别为0.651 s、0.635 s、0.634 s。可以看出,改变模板角间隔并不会显著降低耗时。顾及精度,建议仍采用1°角间隔模板开展数据处理。

为验证上述结论的普适性,利用测线Ⅱ开展实验。图9(a)为利用MB-system处理后的DEM地形,图9(b)、9(c)和9(d)为模板角间隔分别为1°、2°和5°时所得海床DEM与图9(a)的较差结果。对这些DEM较差进行统计,得到三者偏差

的标准差分别为0.5 cm、1.8 cm和12 cm;统计三者的计算耗时分别为0.639 s、0.632 s和0.622 s。统计结果与上述结论相同,进一步表明本文算法取得了与基于严密层内常梯度声线跟踪算法一致的计算精度。

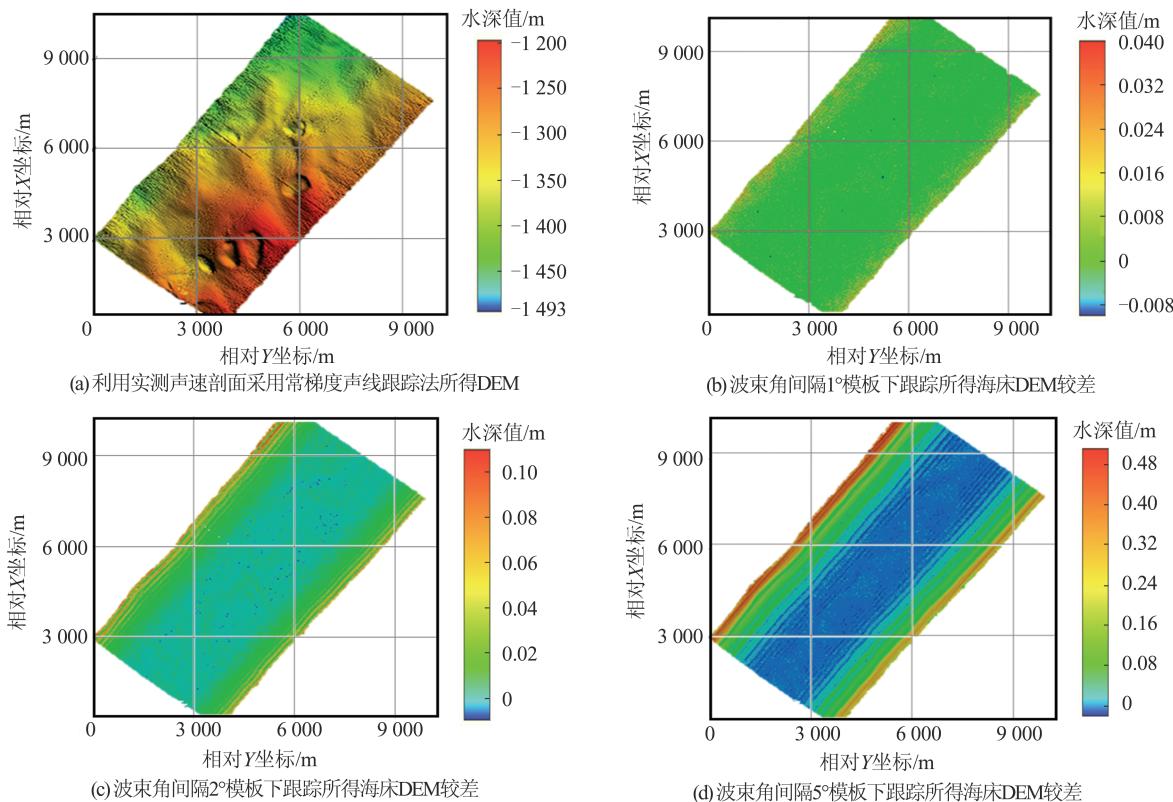


图9 测线Ⅱ DEM 及不同波束角间隔模板下所得海床 DEM 较差

Fig. 9 DEM of Line II and DEM Differences in the Templates of 1°, 2° and 5°

为了分析本文算法的声线跟踪效率,对3个测区不同水深(12 m、500 m、1 000 m和5 000 m)的多波束测深数据基于上述相同过程进行处理,统计各自的计算精度和耗时,如图10和表2所示。

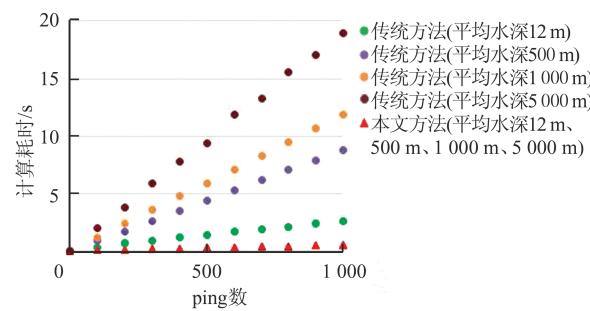


图10 声线跟踪计算耗时

Fig. 10 Computing Time of Different Sound Ray Tracking Methods

由图10、表2可知,传统层内常梯度声线跟踪法的计算耗时随水深增加快速增加,而本文算法计算耗时不随水深变化,计算精度随水深的增加略有

下降,但相对水深,这种影响可以忽略不计。可见,本文算法有效地克服了传统方法的不足,确保了声线跟踪精度,显著地提高了计算效率。

表2 模板插值法在4个测区相对常梯度声线跟踪法的计算精度和效率

Tab.2 Accuracy and Efficiency of the Proposed Method in Four Areas

平均水深/m	计算精度/cm	效率提高的倍数
12	0.1	3.5
500	1.1	16.0
1 000	5.2	23.0
5 000	10.6	35.0

## 5 结语

针对传统层内常梯度声线跟踪法的不足,本文提出了一种基于常梯度声线跟踪模板插值的波束点坐标计算方法,利用基于常梯度分层跟踪

形成的模板,通过插值计算,实现波束点坐标的快速确定,从而显著提高了声线跟踪的效率,且计算耗时几乎不受深度的影响,为深海多波束测深、远距离测距提供了一种快速计算方法。在实际应用中,建议基于实测声速剖面给出的层厚度、层数,采用入射角间隔为 $1^{\circ}$ 或 $0.5^{\circ}$ 的角间隔构建插值模板,不但可以确保波束声线跟踪精度,而且能保证计算效率。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao Jianhu, Liu Jingnan. Multi-beam Sounding and Image Data Processing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008(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)
- [2] Sun Qiang, Li Mingsan, Wang Hongyan, et al. Comparison and Analysis of Ray-tracking Methods for Multi-beam Sounding System[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2015, 35(2): 48-51(孙强, 李明叁, 王洪燕, 等. 多波束测深系统声线跟踪方法对比分析[J]. 海洋测绘, 2015, 35(2):48-51)
- [3] Qi Na, Tian Tan. Ray Tracing in Multi-beam Swath Bathymetry [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2003, 24(3):245-248(齐娜, 田坦. 多波束条带测深中的声线跟踪技术[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(3):245-248)
- [4] Zhao Jianhu. Research on the Depth and Image of Multi-beam Processing Methods[D]. Wuhan: Wuhan University, 2002(赵建虎. 多波束深度及图像数据处理方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2002)
- [5] He Limbang, Zhao Jianhu, Zhang Hongmei, et al. A Precise Multibeam Sound Ray Tracking Method Taking into Account the Attitude Angle[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2015, 36(1):46-50(何林帮, 赵建虎, 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, 36(1):46-50)
- [6] Wang Chunli. Analysis and Removal Technology of Multibeam Bathymetric Artifacts Arosed by Ray Refraction [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009(王春丽. 声线折射引起的多波束测深假象分析与消除技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009)
- [7] Yang Fanlin, Zhao Jianhu, Zhou Fengnian, et al. Accurately Determining DOA and TOA in Multi-beam Sonar Sounding[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(3): 218-220(阳凡林, 赵建虎, 周丰年, 等. 多波束声纳测深瞬间到达角和旅行时的精确确定[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(3): 218-220)
- [8] Yang Fanlin, Lu Xiushan, Li Jiabiao, et al. Precise Positioning of Underwater Static Objects Without Sound Speed Profile[J]. *Marine Geodesy*, 2011, 34(2):138-151
- [9] Wang Haidong. Research on the Theories and Algorithms of Processing the Bathymetry Outlier in Multi-beam Echosounder System [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2010(王海栋. 多波束系统测深异常处理理论与方法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2010)
- [10] Xiong Chuanliang, Li Jianjun, Yan Xincun, et al. Optimal Selection of Sampling Interval on Multi-beam Bathymetry[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2017, 37(4):47-50(熊传梁, 李建军, 娄新村, 等. 多波束测量声速剖面采样间隔优化选取[J]. 海洋测绘, 2017, 37(4):47-50)
- [11] Zhu Xiaochen, Liu Yanchun, Xiao Fumin, et al. Rigorous Model of Multibeam Echosounding System Sounding Velocity Correction [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2011, 31(1): 1-3(朱小辰, 刘雁春, 肖付民, 等. 海道测量多波束声速改正精确模型研究[J]. 海洋测绘, 2011, 31(1):1-3)
- [12] Sun Wenchuan, Bao Jingyang, Jin Shaohua, et al. Inversion of Sound Velocity Profiles by Correcting the Terrain Distortion [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(3): 349-355(孙文川, 暴景阳, 金绍华, 等. 多波束海底地形畸变校正与声速剖面反演[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(3): 349-355)
- [13] Li Shengxue, Wang Zhenjie, Nie Zhixi, et al. A Self-adapting Division Ray-Tracing Method in the Long Baseline Acoustic Positioning [J]. *Marine Science Bulletin*, 2015, 34(5):491-498(李圣雪, 王振杰, 聂志喜, 等. 一种适用于深海长基线定位的自适应分层声线跟踪法[J]. 海洋通报, 2015, 34(5):491-498)
- [14] Lu Xiuping, Bian Shaofeng, Huang Motao, et al. An Improved Method for Calculating Average Sound Speed in Constant Gradient Sound Ray Tracing Technology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(5):590-593(陆秀平, 边少峰, 黄漠涛, 等. 常梯度声线跟踪中平均声速的改进算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(5):590-593)
- [15] Yang Fanlin, Li Jiabiao, Wu Ziyin, et al. A Post-Processing Method for the Removal of Refraction Artifacts in Multibeam Bathymetry Data [J]. *Marine Geodesy*, 2008, 30(3):235-247
- [16] Hu Jia, Li Mingsan, Sun Qiang. Classification of Sound Speed Profile with Gradient Difference [C].

- The 22nd National Comprehensive Symposium on Ocean Surveying and Mapping, Taiyuan, China, 2010(胡佳,李明叁,孙强. 基于梯度差的声速剖面自动分类方法[C]. 全国第二十二届海洋测绘综合性学术研讨会, 太原,2010)
- [17] Zhang Zhiwei, Bao Jingyang, Jin Shan. A Self-adapting Division Method for Ray-Tracing of Multi-beam Echosounding [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2018, 38(1): 23-42(张志伟, 暴景阳, 金山. 一种多波束测深声线跟踪自适应分层方法[J]. 海洋测绘, 2018, 38(1):23-42)
- [18] Geng X, Zielinski A. Precise Multibeam Acoustic Bathymetry [J]. *Marine Geodesy*, 1999, 22 (3): 157-167
- [19] Zhang Jucheng, Zheng Cuie, Sun Dajun. A Self-adapting Division Method for Ray-Tracing Positioning [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013, 34(12):1 497-1 501(张居成, 郑翠娥, 孙大军. 用于声线跟踪定位的自适应分层方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(12):1 497-1 501)
- [20] Xin Mingzhen, Yang Fanlin, Yan Xunpeng, et al. An Equivalent Sound Velocity Profile Iterative Algorithm [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2015, 35(5):28-31(辛明真, 阳凡林, 闫循鹏, 等. 一种等效声速梯度的迭代计算方法[J]. 海洋测绘, 2015, 35(5):28-31)

## A Sound Ray Tracking Algorithm Based on Template-Interpolation of Constant-Gradient Sound Velocity

ZHAO Jianhu<sup>1</sup> ZHANG Hongmei<sup>2</sup> WU Meng<sup>1</sup>

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

**Abstract:** Multi-beam echo sounder(MBES) is the best equipment for underwater topographic survey nowadays. This kind of equipment can accurately determine the position of sounding point relative to transducer by measuring the round-trip time and angle of acoustic wave. However, due to the change of temperature and salinity in the water, the sound velocity varies with depth, which leads to the sound wave does not travel along a straight line in the water. The refraction of sound wave in the water conforms to Snell's law. In order to accurately determine the sound propagation track and obtain the precise coordinate of sounding points, constant-gradient acoustic line tracking algorithm is most commonly used. However, constant-gradient ray-tracking algorithm often suffers from complicated processing and low efficiency when facing massive bathymetric data, especially in deep sea. Therefore, a sound ray tracking algorithm based on template-interpolation of constant-gradient sound velocity is proposed in this paper to improve the post-processing efficiency of MBES bathymetric data. Firstly, the principle of our proposed algorithm is studied and the conclusion that the beam footprint can be determined by the template interpolation is verified. Then, the proposed algorithm in this paper, which mainly includes the construction of constant-gradient sound ray tracking template, over-tracking and under-tracking algorithms, draft influence and compensation models, is used in the experiments of shallow-water, middle-water and deep-water measurements. The experimental results show that our proposed algorithm can greatly improve computational efficiency while ensuring tracking accuracy.

**Key words:** constant-gradient sound ray tracking; beam footprint; template-interpolation; computational efficiency

**First author:** ZHAO Jianhu, PhD, professor, specializes in hydrographic surveying and charting. E-mail: jhzha@sgg.whu.edu.cn

**Corresponding author:** WU Meng, master. E-mail: 2015282140135@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Science and Technology Major Project (2016YFB0501703); Scientific Research Project of Shanghai Municipal Oceanic Bureau(2020-01); Scientific Research Project of Ministry of Transport of the People's Republic of China.

**引文格式:** ZHAO Jianhu, ZHANG Hongmei, WU Meng. 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.DOI:10.13203/j.whugis20180405(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.DOI:10.13203/j.whugis20180405)