

常梯度声线跟踪中平均声速的改进算法

陆秀平^{1,2} 边少锋¹ 黄谟涛² 翟国君²

(1 海军工程大学电气与信息学院,武汉市解放大道 717 号,430033)

(2 海军海洋测绘研究所,天津市友谊路 40 号,300061)

摘要:在对多波束测深常用声线跟踪算法进行分析的基础上,提出了一种改进的声线跟踪算法,即沿声线传播的圆弧路径进行积分来求取层内的平均声速,进而推导了严密的多波束测深波束脚印位置的计算公式。理论推导表明,常用的声线跟踪算法的平均声速是将声线的圆弧传播路径当作对应弧段弦时的改进算法平均声速的近似解。实验表明,改进的声线跟踪算法比常用的声线跟踪算法更严密。

关键词:声线跟踪算法;平均声速;波束脚印

中图分类号:P229.2

由于海水介质温度、盐度和压力的变化,导致声波传播的速度分布不均匀。声波传播产生折射,折射效应使得声线的传播路径不再是直线,而是一条连续的曲线,其弯曲程度(声线的曲率半径)与声速分布相关^[1]。声线弯曲意味着声波从换能器发射点到接收点的传播时延大于声波直线传播的传播时延,声线越弯曲,传播时延越大,如采用近似的恒定声速,即将声线假设成一条直线,必然带来测深误差和对应海底点的位置误差^[2-8]。为得到多波束测深系统波束脚印的准确位置,需沿波束的传播路径逐层追踪声线,计算波束脚印相对换能器的水平位移和深度,此过程即称为声线跟踪^[7]。本文通过分析发现,常用的声线跟踪算法在求取平均声速时将声波假设为直线传播^[9],与声波沿弧线传播的实际不符,带有一定的近似性,为此,提出了一种改进的声线跟踪算法。

1 常用的声线跟踪算法

根据声速的传播规律,分别用 C 和 θ 代表声波在垂直深度为 z 时的速度和方向,则第 i 层内声速的变化梯度 g_i 的计算式可表示为:

$$g_i = (C_{i+1} - C_i) / (z_{i+1} - z_i) \quad (1)$$

声波的传播方向和速度满足 Snell 法则,在

声速常梯度变化情况下,波束在第 i 层内的实际传播轨迹为一连续的、对应一定曲率半径 R_i 的弧段。 $R_i = |1/pg_i|$, p 为 Snell 常数。

声线跟踪算法的声速函数采用 Harmonic 平均声速。假设声速在第 i 层内以常梯度 g_i 变化,其层内($z \in [z_i, z_{i+1}]$)的声速函数 $C^i(z)$ 表示为:

$$C^i(z) = C_i + g_i(z - z_i) \quad (2)$$

根据 Mayer(1996)的观点,声速在第 i 层的传播时间为^[9]:

$$t_i = \int_{z_i}^{z_{i+1}} dz / C^i(z) \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)求积分得:

$$t_i = (1/g_i) \ln(C_{i+1}/C_i) \quad (4)$$

假设波束经历整个水柱 $[z_0, z]$ (N 层)的时间为 T_V ,其表达式为:

$$T_V = \sum_{i=1}^N t_i = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{g_i} \ln \frac{C_{i+1}}{C_i} \right) \quad (5)$$

已知声线传播的垂向距离 $z - z_0$ 和经历整个水柱(N 层)的时间 T_V ,即可求得整个水柱中的 Harmonic 平均声速 C_H :

$$C_H = (z - z_0) T_V^{-1} = (z - z_0) \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{g_i} \ln(1 + \frac{g_i \Delta z_i}{C_i}) \right)^{-1} \quad (6)$$

如图 1 所示,波束在第 i 层经历的弧段长度

收稿日期:2012-03-15。

项目来源:国家 863 计划资助项目(2009AA121405);国家重大专项基金资助项目(9201502)国家自然科学基金资助项目(41074002, 61071006)。

为 $\Delta S_i = R_i(\theta_{i+1} - \theta_i)$, 第 i 层声线的垂直位移 Δz_i 、水平位移 Δx_i 和传播时间 t_i 为^[7]:

$$\begin{cases} \Delta z_i = R_i \sin \theta_{i+1} - R_i \sin \theta_i = z_{i+1} - z_i \\ \Delta x_i = \left| \frac{1}{p g_i} \right| (\sqrt{1 - (p C_i)^2} - \sqrt{1 - (p C_{i+1})^2}) \\ t_i = \frac{R_i(\theta_{i+1} - \theta_i)}{g_i \Delta z_i} \ln \left[\frac{\sin \theta_{i+1}}{\sin \theta_i} \right] \end{cases} \quad (7)$$

在分层声线跟踪时,除整层计算外,需要依据传播剩余时间判断剩余层的计算:声线在第 i 层内传播时,声线是否在该层内 r 点处结束,此时剩余时间 $t_r = t_{\text{all}} - \sum_{j=1}^{i-1} t_j$, t_{all} 代表总的传播时间。

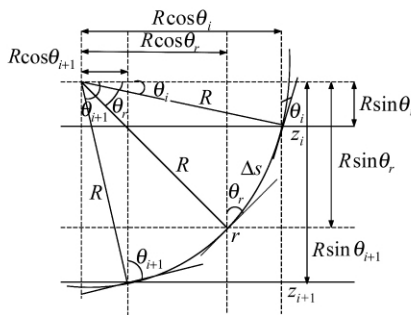


图 1 声线跟踪示意图

Fig. 1 Sketch Map of Sound Ray Tracing

依据上述分析法,可得到其对应的垂直位移 Δz_r 、水平位移 Δx_r 和传播时间 t_r 为:

$$\begin{cases} \Delta z_r = R_i \sin \theta_r - R_i \sin \theta_i \\ \Delta x_r = R_i \cos \theta_i - R_i \cos \theta_r \\ t_r = \frac{(\theta_r - \theta_i)}{g_i (\sin \theta_r - \sin \theta_i)} \ln \left[\frac{\sin \theta_r}{\sin \theta_i} \right] \end{cases} \quad (8)$$

由于结束点 r 处的 θ_r 未知,为获取 Δz_r 和 Δx_r ,需要依据已知的剩余时间 t_r 来计算 θ_r ,但依据式(8)的第三式难以得到 $\theta_r = f(t_r)$ 的严密公式,而需用迭代法进行逼近计算^[10],过程比较繁琐,不符合海量多波束测深数据的计算要求,而且存在一定的截断误差。

完成上述整层与剩余层水平、垂直位移量的计算后,若整个水柱共分成 N 层,则总的声线水平距离 x 和垂直距离 z 等于 $(N-1)$ 个分层 Δx_i 和 Δz_i 的叠加和再加上最后一层的 Δx_r 和 Δz_r ,即

$$x = \sum_{i=1}^{N-1} \Delta x_i + \Delta x_r, z = \sum_{i=1}^{N-1} \Delta z_i + \Delta z_r \quad (9)$$

对式(6)进行分析可知,常用的跟踪算法中 Harmonic 平均声速 C_H 的求取只与水柱垂直厚度和声速变化有关,形式上看只适用于声线垂直传播的情形,而实际上该式也适用于声线斜向直

线传播时的计算,这是因为声线在斜向直线传播时 θ 为常值,可在计算过程中被约减,但这与声线沿弧线传播的实际不符,带有一定的近似误差。

2 改进的声线跟踪算法

在声速常梯度情况下,声波经过圆弧微元 ds 所需要的时间为 $dt = ds/C$,则声波从 S_i 深度点传播到 S_{i+1} 深度点所需要的时间 t_{i+1} 可表示为:

$$t_{i+1} = \int_{S_i}^{S_{i+1}} ds/C \quad (10)$$

如图 1 所示,声线的垂向微元 dz 与 ds 的关系为 $ds = dz/\cos \theta$, θ 为波束在圆弧微元 ds 处的掠射角,代入式(10)得:

$$t_{i+1} = \int_{z_i}^{z_{i+1}} dz/(C \cos \theta) \quad (11)$$

由于声速以恒定声速梯度 g_i 传播,根据式(1),式(11)可写为:

$$t_{i+1} = \frac{1}{g_i} \ln \left[\frac{C_{i+1}}{C_i} \frac{1 + \sqrt{1 - \sin^2 \theta_i}}{1 + \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{i+1}}} \right] \quad (12)$$

基于 Snell 定理,式(12)可转化为:

$$t_{i+1} = \frac{1}{g_i} \ln \left[\tan \frac{\theta_{i+1}}{2} / \tan \frac{\theta_i}{2} \right] \quad (13)$$

假设波束经历整个水柱的时间为 T'_V ,则有:

$$T'_V = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{g_i} \ln \left(\tan \frac{\theta_{i+1}}{2} / \tan \frac{\theta_i}{2} \right) \right) \quad (14)$$

利用声线传播的距离 $(S - S_0)$ 和经历整个水柱弧段路径的时间 T'_V ,即可求得整个水柱弧段路径中的平均声速 C'_H :

$$C'_H = (S - S_0) T'^{-1}_V = R(\theta - \theta_0) \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{g_i} \ln \left(\tan \frac{\theta_{i+1}}{2} / \tan \frac{\theta_i}{2} \right) \right)^{-1} \quad (15)$$

当声线完整经过第 i 层后进入第 $i+1$ 层时, Δz_i 和 Δx_i 的计算同式(7), t_i 为:

$$t_i = \frac{R_i(\theta_{i+1} - \theta_i)}{C_{Hi}} = \frac{1}{g_i} \ln \left(\tan \frac{\theta_{i+1}}{2} / \tan \frac{\theta_i}{2} \right) \quad (16)$$

对于改进的声线跟踪算法,根据式(14)可得到其对应的垂直位移 Δz_r 、水平位移 Δx_r 同式(8),传播时间 t_r 为:

$$t_r = \frac{1}{g_i} \ln \left(\tan \frac{\theta_r}{2} / \tan \frac{\theta_i}{2} \right) \quad (17)$$

依据式(17),容易得到 $\theta_r = 2 \arctan (e^{t_r g_i} \tan(\theta_i/2))$,则根据式(9)就可以求出总的声线水平距离 x 和垂直距离 z 。

3 两种算法的比较

将式(17)与式(7)的计算式相比较可知,常用

的声线跟踪算法与改进的声线跟踪算法的不同在于求取时间 t_i 时使用的平均声速不同,前者用的是 C_H ,后者用的是 C'_H 。

取第 i 层的平均声速进行分析,依据式(11)和式(15)可知:

$$C'_{Hi} = (S_{i+1} - S_i) T'^{-1}_{iV} = (S_{i+1} - S_i) / \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{dz}{C \cos \theta}$$

(18)

如果将声线的圆弧路径近似取为该弧段的弦,则弧段各微元处的掠射角 θ 相同,式(18)可转化为:

$$C'_{Hi} = (z_{i+1} - z_i) / \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{dz}{C}$$

(19)

又由式(4)和式(6)可知,常用的声线跟踪算法的平均声速为:

$$C_{Hi} = (z_{i+1} - z_i) / \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{dz}{C}$$

(20)

比较式(19)和式(20)可知,常用声线跟踪算法的平均声速只是改进声线跟踪算法平均声速的近似解,它将声线的圆弧路径近似取为该弧段的弦。

由于两种算法使用的平均声速不同,计算得到的整层传播时间 t_i 也不同,依据 t_r 的计算式,

在总时间保持不变的情况下,两种算法计算得到的尾层的剩余时间则不同,这样必将导致两种算法计算得到的波束脚印的空间位置产生差异,其差异大小随波束入射角、声速和深度的变化而变化。

4 数值计算与分析

为定量比较改进声线跟踪算法与常用声线跟踪算法计算结果的差异,设计如下数值仿真计算实验。设声速剖面第 i 层上采样点的深度取常值 z_i ,对应采样点的声速取常值 C_i ,当波束入射角 θ 、第 i 层的下采样点深度 z_{i+1} 和声速 C_{i+1} 变化取值时,分别按常用声线跟踪算法和改进声线跟踪算法计算波束在 i 层内的传播时间 t_1 和 t_2 。为直观表达两种方法的计算结果对传播位移的影响,采用海水中的标准声速值 $\bar{C}=1\ 500\text{ m/s}$ 计算两种方法之间波束脚印的垂直位移差,即 $\Delta s=\bar{C}(t_1-t_2)$ 。各参数具体取值为: $z_i=0\text{ m}$, $C_i=1\ 480\text{ m/s}$, θ 分别取 5° 、 20° 和 60° ; $z_{i+1}(n)=10+n\times 20$, $n=0,\cdots,9$, $C_{i+1}(n)=1\ 495+n\times 15$, $n=0,\cdots,4$ 。对应于以上参数取值的计算结果见表 1。

表 1 入射角 $\theta=5^\circ$ 、 20° 、 60° 时两种算法之间的深度差/cm
Tab. 1 Distance Difference Between the Two Methods at $\theta=5^\circ, 20^\circ, 60^\circ/\text{cm}$

θ	$C_{i+1}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	z_{i+1}/m									
		10	30	50	70	90	110	130	150	170	190
5°	1 495	0.000 1	0.000 2	0.000 3	0.000 5	0.000 6	0.000 7	0.000 9	0.001 0	0.001 1	0.001 3
	1 505	0.000 3	0.000 8	0.001 3	0.001 8	0.002 4	0.002 9	0.003 4	0.004 0	0.004 5	0.005 0
	1 520	0.000 6	0.001 8	0.003 0	0.004 1	0.005 3	0.006 5	0.007 7	0.008 9	0.010 1	0.011 2
	1 535	0.001 0	0.003 1	0.005 2	0.007 3	0.009 4	0.011 5	0.013 6	0.015 7	0.017 8	0.019 9
	1 550	0.001 6	0.004 9	0.008 1	0.011 4	0.014 6	0.017 9	0.021 1	0.024 4	0.027 7	0.030 9
20°	1 495	0.001 2	0.003 7	0.006 1	0.008 5	0.011 0	0.013 4	0.015 9	0.018 3	0.020 7	0.023 2
	1 505	0.004 9	0.014 6	0.024 3	0.034 0	0.043 8	0.053 5	0.063 2	0.072 9	0.082 7	0.092 4
	1 520	0.010 9	0.032 7	0.054 6	0.076 4	0.098 2	0.120 0	0.141 8	0.163 7	0.185 5	0.207 3
	1 535	0.019 3	0.058 0	0.096 7	0.135 4	0.174 1	0.212 8	0.251 4	0.290 1	0.328 8	0.367 5
	1 550	0.030 1	0.090 4	0.150 7	0.211 0	0.271 2	0.331 5	0.391 8	0.452 1	0.512 4	0.572 6
60°	1 495	0.054 3	0.162 8	0.271 4	0.379 9	0.488 5	0.597 0	0.705 6	0.814 2	0.922 7	1.031 3
	1 505	0.227 0	0.681 0	1.135 0	1.589 0	2.042 9	2.496 9	2.950 9	3.404 9	3.858 9	4.312 9
	1 520	0.535 6	1.606 9	2.678 2	3.749 4	4.820 7	5.892 0	6.963 2	8.034 5	9.105 8	10.177 0
	1 535	1.002 1	3.006 4	5.010 7	7.015 0	9.019 3	11.023 6	13.027 9	15.032 2	17.036 5	19.040 8
	1 550	1.654 5	4.963 6	8.272 7	11.581 7	14.890 8	18.199 9	21.509 0	24.818	28.127 1	31.436 2

由表 1 可知,随着入射角、下采样点声速和深度的增大,两种算法计算得到的时间差所对应的垂直位移差随之增大。当入射角分别为 5° 、 20° 、 60° ,下采样点声速和深度分别为 $1\ 550\text{ m/s}$ 和 190 m 时,两种算法对应的最大位移差分别为 0.03 cm (可以忽略不计)、 0.57 cm (依然很小)、

31.43 cm (不能忽略)。以上计算结果说明,使用常用声线跟踪算法计算中央区域(θ 值较小)的波束脚印位置时,其解算结果是可信的,但对于边缘波束,其位置误差较大,可达 dm 级。该成果对进一步提高多波束测深数据的质量具有重要意义。

参 考 文 献

[1] 尤立克. 水声原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社,1983

[2] 张宝成,徐雪仙. 声速不均匀修正对水声定位系统测距精度的影响[J]. 声学与电子工程, 1992(4):7-11

[3] 赵建虎, 刘经南. 精密多波束测深系统位置修正方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002(5): 473-476

[4] 丁继胜, 周兴华, 唐秋华, 等. 多波束勘测声速剖面场的 EOF 表示方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007,32(5): 446-449

[5] 齐娜. 多波束测深仪方案论证及测深侧扫成像研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2002

[6] 齐娜, 田坦. 多波束条带测深中的声线跟踪算法

[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(3): 245-248

[7] 孙革. 多波束测深系统声速校正方法研究及其应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007

[8] Sylvie D. Sonar Images and Swath Bathymetry Simulations for Environment Restitution Through Acoustical Ray Tracing Techniques[C]. The 4th European Conference on Underwater Acoustics, Rome, Italy,1998

[9] 赵建虎. 多波束测深及图像数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008

[10] 孙万卿. 浅海水深定位算法及应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007

第一作者简介:陆秀平,工程师,博士生,主要从事海底地形测量与数据处理成图技术研究。

E-mail:lxp0828@126.com

An Improved Method for Calculating Average Sound Speed in Constant Gradient Sound Ray Tracing Technology

LU Xiuping^{1,2} BIAN Shaofeng¹ HUANG Motao² ZHAI Guojun²

(1 College of Electrical and Information Engineering, Naval University of Engineering, 717 Jiefang Road, Wuhan 430033, China)
(2 Navel Institute of Hydrographic Surveying and Charting, 40 Youyi Road, Tianjin 300061, China)

Abstract: Based on the research and analysis on the current computational models of sound ray tracing, a set of more precise computational formula are derived. The basic principle of the method is that the average sound speed is calculated using the integral of the sound line arc infinitesimal, then a precise beam footprint position formula is obtained. The theoretical analysis shows that the average speed of the traditional ray tracing technology is the approximate solution of the improved sound ray tracing technology when the circular path of the sound ray is taken as chord of the arc. The experimental result shows that the improved sound ray tracing arithmetic is more precise and practical than the traditional sound ray tracing technology.

Key words: sound ray tracing arithmetic; average speed; beam footprints

About the first author: LU Xiuping, engineer, Ph.D candidate, majors in hydrographic surveying data processing.
E-mail: lxp0828@126.com

下期主要内容预告

▶ 遥感技术估算森林生物量的研究进展

▶ 正则化滤波在反演地表光谱反照率中的应用

▶ 城市道路复杂网络结构化等级分析

▶ GPS 长趋势变化与大地震的关系

▶ 空间体对象间三维拓扑构建研究

▶ 大型工程中的 WMS 数据获取与集成应用方法

(李德仁,等)

(崔生成,等)

(栾学晨,等)

(张 燕,等)

(李 霖,等)

(韩元利,等)