

合成孔径成像中掩埋目标的深度误差分析

刘 昊^{1,2}, 刘 维¹, 刘纪元¹

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在掩埋目标三维成像过程中, 沉积层底质的不同与掩埋深度的变化, 会使成像结果中目标深度与真实深度出现偏差。针对这一问题, 可以利用下视的面阵合成孔径三维成像算法, 通过构建水下分层模型与声速剖面模型, 对掩埋点目标进行三维成像仿真。通过改变沉积层底质与掩埋深度, 从理论分析与仿真结果研究深度误差的变化。研究表明, 深度误差随沉积层声速和掩埋深度的增加而不断变大。

关键词: 面阵合成孔径声呐; 掩埋目标; 三维成像; 深度误差

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-03-0214-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2015.03.005

The depth error analysis in synthetic aperture sonar imaging of buried target

LIU Hao^{1,2}, LIU Wei¹, LIU Ji-yuan¹

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The difference of the sediment and the change of buried depth would lead to error between the imaging depth and the real depth during the 3D imaging of the buried target. As to this problem, the down-look planar SAS (Synthetic Aperture Sonar) 3D algorithm can be used to image a buried point target by modeling underwater structure and sound velocity profile. The variation of the depth error is analyzed by changing the sediment and the buried depth in simulation. Research shows that the depth error becomes larger with the increase of the sound velocity of sediment and the buried depth.

Key words: planar synthetic aperture sonar; buried target; 3D imaging; depth error

0 引言

面阵合成孔径声呐^[1]是在线阵合成孔径声呐技术的基础上, 有效利用每一帧和每一条轨迹的回波数据形成二维面阵, 从而实现高分辨率的成像结果。除了对特定区域的二维成像外, 下视的面阵合成孔径声呐能够实现三维成像处理。在此基础上利用低频信号的穿透性, 能够实现对掩埋目标的三维成像处理^[2-6]。但在实际应用中, 成像结果往往与实际目标深度存在一定的位置偏差, 从而影响了目标位置的估计与掌握。

当目标被掩埋在沉积层中的情况下, 声波在不同沉积层中的声速不同, 声线由水层进入沉积层时造成了掠射角与传播时间的变化, 声波将发生不同

程度的弯曲, 对成像结果造成影响。本文在已有的两层模型(水—沉积层)基础上, 在两层之间增加声速渐变层, 改进声速瞬变模型的不合理之处, 模拟真实的声波弯曲过程, 实现对掩埋点目标的三维成像处理。

同时, 通过改变沉积层底质与掩埋深度, 对点目标进行多次三维成像结果比较, 从理论与仿真结果分析深度误差的变化, 并讨论可行的解决方法。

1 面阵合成孔径声呐三维成像算法

面阵合成孔径声呐成像算法是基于线阵合成孔径声呐算法实现的, 其成像算法的基本过程可以简单概括为脉冲压缩和徙动校正两个步骤, 脉冲压缩过程与线阵合成孔径声呐相同, 但是徙动算法将转变为三维函数。

对于下视的面阵合成孔径声呐, 假设发射换能器孔径为 d , 发射波束开角 $\theta = \lambda/d$, 在给定的区域内, 合成孔径声呐分别沿 X 和 Y 方向按“己”字形运动, 形成二维面阵, 其运动方式如图 1(a)所示。

收稿日期: 2014-02-25; 修回日期: 2014-05-06

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费(2013418026)、国家自然科学基金青年基金(11204343)和哈尔滨工程大学重点实验室基金(9140C27020112022601)资助项目。

作者简介: 刘昊(1989—), 男, 北京人, 硕士研究生, 研究方向为低频合成孔径声呐掩埋目标成像。

通讯作者: 刘昊, E-mail: liuhao66liuhao@gmail.com

在 X 方向每隔 Δx 的距离进行一次采样, Y 方向上每隔 Δy 为一条轨迹, 可认为轨迹是直线并且互相平行。

面阵合成孔径声呐的目的就是提高分辨率, 使得在三个方向上的分辨率都不依赖于距离, 为 $\delta=d/2$ 。

假设在 $x=0, y=0, z=R_0$ 处有一沉底点目标, R_0 是目标与声呐运动平面的最小距离。当声呐沿图 1(a)所示轨迹运动时, 接收回波可以表示为

$$E_{mn}(t) = a \cdot s(t - \tau_{mn}) \quad (1)$$

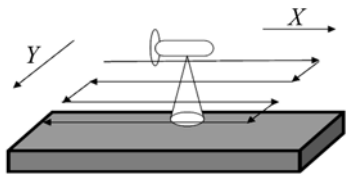
其中, m 为 X 轴坐标; n 为 Y 轴坐标; $s(t)$ 为发射信号; a 为反射系数; $\tau_{mn} = 2R_{mn}/c_0$ 为声呐位于 (m, n) 处时与目标的传播往返延时, c_0 为水中声速, $R_{mn} = \sqrt{(m \cdot \Delta x)^2 + (n \cdot \Delta y)^2 + R_0^2}$ 为目标与声呐距离。

当声呐在各个位置上完成数据采集后, 将形成二维面阵, 进行脉冲压缩处理, 构成三维的数据集合, 如图 1(b)所示, 再通过三维的徙动函数完成成像过程, 对于图像上的每个像素点, 均由各自的双曲面上的所有采样点延时相加求得。

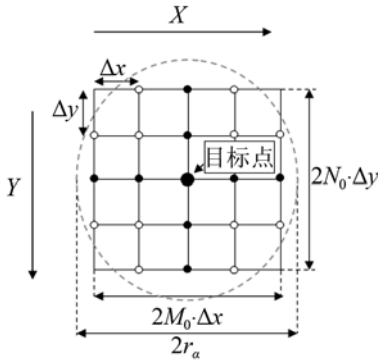
若 f_s 为采样频率, 深度向的采样距离为 $\Delta z = c_0/(2f_s)$, 在深度为 $R_0 = k\Delta z$ 处的像素点的聚焦公式为^[1]

$$S(m_0, n_0, k) = \frac{1}{N_{total}} \left(\sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{n=-N_0}^{N_0} E_{m_0+m, n_0+n}(k_{mn}) \right) \quad (2)$$

其中: $2M_0+1$ 和 $2N_0+1$ 分别为为 X 方向和 Y 方向上的采样位置; $N_{total} = \text{Int}(\pi r_\alpha^2 / (\Delta x \cdot \Delta y))$ 为在每个像素点处聚焦所需的所有采样点, $\text{Int}(x)$ 为小于等于 x 的第一个整数, r_α 为声呐照射半径; $E_{m_0+m, n_0+n}(k_{mn})$ 为



(a) 运动方式



(b) 回波数据

图 1 (a) 运动方式 (b) 回波数据
Fig.1 (a) Motion mode (b) Raw echo data

在 (m_0+m, n_0+n) 位置处的接收信号值; k 是距离向坐标; k_{mn} 为 m_0+m 行、 n_0+n 列的深度向坐标, 代表传播延时 τ_{mn} ^[1]。

$$k_{mn} = \text{round} \left(\frac{2f_s}{c_0} \sqrt{(m \cdot \Delta x)^2 + (n \cdot \Delta y)^2 + \left(\frac{c_0 k}{2f_s} \right)^2} \right) \quad (3)$$

图 2、3 分别为点目标的 XY 面的成像结果与 XZ 面的成像结果, 点目标位于 X 轴与 Y 轴 0 点处, Z 轴深度为 30 m。

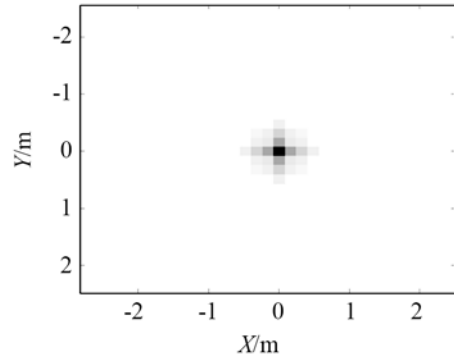


图 2 XY 面的成像结果
Fig.2 Imaging result in X - Y plane

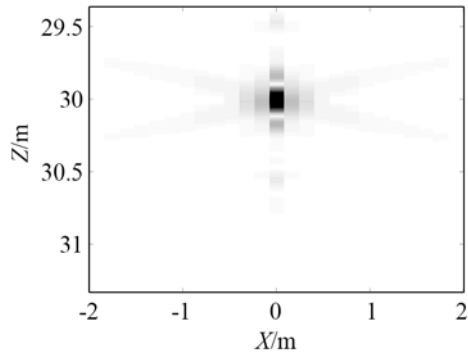


图 3 XZ 面的成像结果
Fig.3 Imaging result in X - Z plane

2 掩埋目标三维成像

当目标位于沉积层中时, 传播时延不仅取决于水中的传播时间, 还取决于沉积层中的传播时间。传统的仿真模型为两层模型, 即水层—沉积层, 假设声速在水层与沉积层间发生瞬变, 存在不合理之处。本文在其中加入渐变层, 利用插值的方法构建渐变层声速, 使声速由水中进入沉积层中为渐变的过程, 从而模拟声线的弯曲情况。

由于声速在水中随着深度等的变化而变化, 根据斯涅尔定律:

$$\frac{\cos(\theta)}{c} = \text{const.} \quad (4)$$

其中, θ 为声线与水平夹角, 即掠射角度。这意味

着如果把水根据深度划分为不同的层，在每个水层中声速 c 各不相同。由于声速 c 的变化，在不同的水层中声线的掠射角也会同时发生变化，导致声线发生弯曲。

由此得到水中的声速模型如图 4 所示。

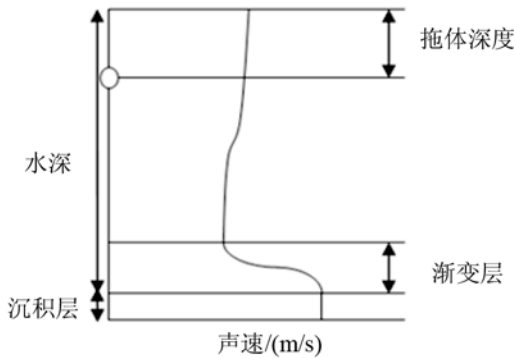


图 4 声速模型
Fig.4 A typical sound velocity model

确定了水下分层模型和声速模型后，下一步就是求取本征声线的过程。从声源出发经过一定路径到达接收点的声线称为本征声线。在这里，求取本征声线的方法采用的是探测法^[7]。

设某声线在声源 (X_s, Y_s, Z_s) 处的掠射角为 α_s ，则其轨迹方程为^[7]

$$x = \int_{Z_s}^Z \frac{\cos(\alpha_s)}{\sqrt{n(z)^2 - \cos(\alpha_s)^2}} dz \quad (5)$$

其中： $n(z) = c(Z_s)/c(Z)$ 为折射率；积分结果 x 表示声源从深度 Z_s 以掠射角 α_s 到达深度 Z 所走过的水平距离。

假设掩埋目标在深度为 Z_{target} ，水平坐标为 (X_{target}, Y_{target}) 处的位置，如图 5 所示，拖体与目标的水平距离为

$$d_{xy} = \sqrt{(X_{target} - X_s)^2 + (Y_{target} - Y_s)^2} \quad (6)$$

根据式(5)，设定起始掠射角度，在每一个分层中，根据每层的深度，可以计算出声线在每个分层中的水平距离。依次计算每个层中的水平距离，将其求和并与 d_{xy} 比较，与 d_{xy} 最接近的一条声线即为本征声线。

在某一层中，声线从深度 Z_s 传播到深度 Z 所需要的时间为^[7]

$$t = \int_{Z_s}^Z \frac{1}{c(z) \sin(\alpha z)} dz \quad (7)$$

若采用数值积分，在反转点附近由于 $\sin(\theta) \approx 0$ ，数值积分容易出现较大误差。为了减小误差，可以假定该点附近的声速梯度是恒定的，声线轨迹是一条弧线，传播时间可以简化为^[7]

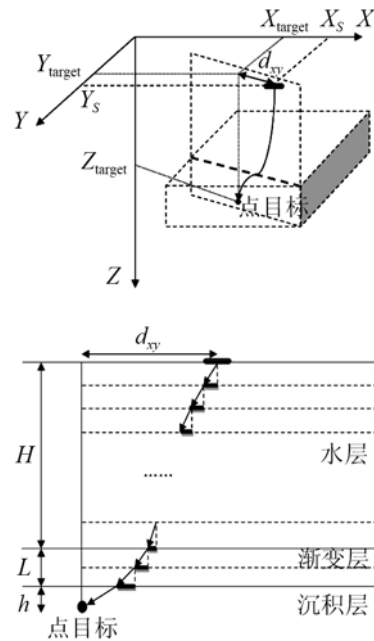


图 5 声线传播过程
Fig.5 Route of sound ray

$$t = \left| \frac{1}{g} \ln \frac{\tan(\pi/4 + \alpha_s/2)}{\tan(\pi/4 + \alpha_z/2)} \right| \quad (8)$$

式(8)中： α_s 和 α_z 分别为深度 Z_s 和深度 Z 的掠射角， g 为声速梯度。

那么每个分层中应用式(7)和式(8)，可以得到声线在每层中经过的时间，将每层的时间求和，可以得到声线到达目标时传播的总延时 τ 。

图 6 是利用掩埋目标成像算法，对水深为 30 m、掩埋深度为 5 m 的点目标处理得到的 XZ 面的成像结果，沉积层为泥质沙土，沉积层中声速约 1620 m/s。从结果可以看到，目标被定位在了 34.5 m 附近，与实际结果有大约 0.5 m 的偏差。

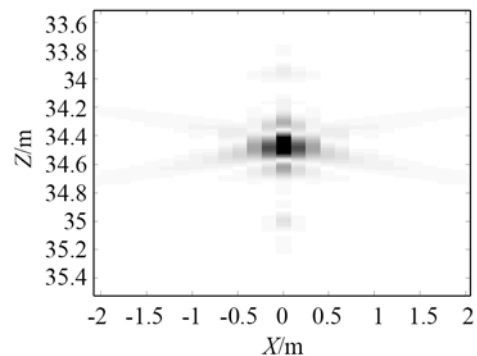


图 6 对掩埋深度 5 m 的点目标 XZ 面成像结果
Fig.6 Imaging result of a buried target at the depth of 5m in X-Y plane

3 误差分析

在上面的仿真过程中可以看到，成像结果的目

标深度与实际深度存在较大的偏差，产生这一偏差的主要原因是：(1) 水中声速随深度的小幅度变化；(2) 声速在沉积层中与水中传播的差异；(3) 掩埋深度的大小。

本文在研究过程中，利用了某湖的实际水中声速进行仿真，图 7 是某湖实测声速随深度变化的曲线。

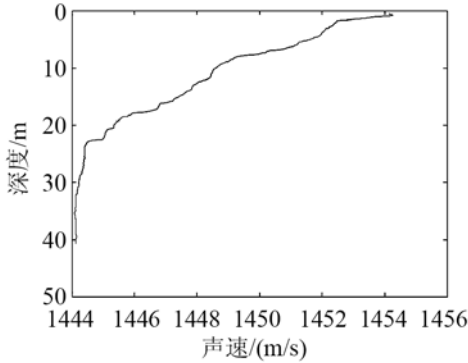


图 7 某湖水中声速变化曲线
Fig.7 The sound velocity profile in Thousand Island Lake

从图 7 可以看到，水中声速随深度的加深而变小，若假设水深为 H ，将水层平均分为 N 层，每层的深度为 $h_i = H/N$ ，每层的声速为 c_i 。当拖体位于目标的正上方时，在水层中的传播时延为

$$\tau_h = \sum_{i=1}^N \frac{h_i}{c_i} \quad (9)$$

而在三维徙动校正过程中，求得的水层中虚时延 $\tau_v = H/c_0$ ， c_0 为假设的水中声速。这就导致在计算水层中传播延时的过程中产生误差。尽管水中声速变化不大，但这微小的误差依然会对最后的成像结果造成影响，使目标深度与真实深度产生偏差。如果能提前测得水中声速的变化，就可根据声速数据对徙动校正进行补偿，从而减小或消除此误差。

其次，由于沉积层中声速较水中声速大，因此声波从发射到掩埋目标的真实时延比同样深度的悬浮或沉底目标的时延要短。在实际成像中假设目标均为悬浮或沉底目标，因此在进行徙动校正时计算出的时延参数 τ 比实际的情况要大，这一误差造成的影响使成像结果的目标深度发生偏移。

根据式(7)，在实际情况下，声波的往返时延为

$$\tau_{\text{real}} = 2 \sum_{i=1}^N \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{1}{c(z) \sin(\alpha z)} dz \quad (10)$$

其中： N 为传播路径中的分层总数； $\sum_{i=1}^N Z_i = H_{\text{real}}$ ， H_{real} 为水层、渐变层与掩埋深度之和，也即目标的实际深度。

根据真实的时延 τ_{real} ，目标将被定位在虚深度：

$$H_{\text{virtual}} = \tau_{\text{real}} \cdot c_0 / 2 \quad (11)$$

目标虚深度 H_{virtual} 与目标真实深度 H_{real} 将产生一定的偏差：

$$\varepsilon_H = H_{\text{virtual}} - H_{\text{real}} = c_0 \cdot \sum_{i=1}^N \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{1}{c(z) \sin(\alpha z)} dz - H_{\text{real}} \quad (12)$$

另外，在三维徙动校正过程中，计算出的虚时延为

$$\tau_{\text{real}} = 2\sqrt{d_{xy}^2 + H_{\text{virtual}}^2} / c_0 \quad (13)$$

其中， d_{xy} 为目标与拖体的水平距离，计算方法见公式(6)。 τ_{virtual} 与 τ_{real} 也存在偏差，由此可见，时延误差主要被沉积层中声速和掩埋深度所影响。图 8 为图 6 情况下 τ_{virtual} 与 τ_{real} 之间偏差的具体情况。

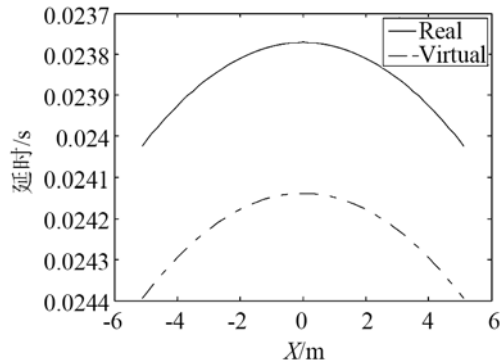


图 8 τ_{virtual} 与 τ_{real} 之间的误差
Fig.8 Error between τ_{virtual} and τ_{real}

固定沉积层为某一种底质，不断改变掩埋深度，当拖体位于目标正上方时，随着掩埋深度增加 Δh ，真实时延增加为

$$\Delta \tau_{\text{real}} = \frac{2\Delta h}{c_1} \quad (14)$$

其中， c_1 为沉积层中声速。时延的变化造成虚目标深度的变化为

$$\Delta H_{\text{virtual}} = \Delta \tau_{\text{real}} \cdot \frac{c_0}{2} = \Delta h \cdot \frac{c_0}{c_1} \quad (15)$$

深度误差为

$$\Delta \varepsilon = \Delta h - \Delta H_{\text{virtual}} = \Delta h \left(1 - \frac{c_0}{c_1} \right) \quad (16)$$

由于 c_1 大于 c_0 ，因此虚目标的深度变化比真实深度变化小，造成随着掩埋深度的增加，深度误差越大。

表 1 为当沉积层底质为泥质沙土(与水中声速比例为 1.0800)时，对水层与渐变层深度均为 30 m，掩埋深度分别为 1、3、5 m 的点目标进行成像处理，得到的结果。

从仿真结果来看，成像结果的深度误差随掩埋深度的增加而不断变大。

表 1 相同沉积层底质不同掩埋深度下的误差
Table 1 Error comparisons between different depths in same sediment

实际深度/m	成像结果/m	误差/m
31	30.9	0.1
33	32.7	0.3
35	34.5	0.5

类似的,当固定掩埋深度、不断变化沉积层底质时,成像深度误差也会发生相应变化。表 2 是几种沉积层底质中声速与水中声速的比例^[10]。

表 2 不同沉积层底质中声速与水中声速比例
Table 2 Sound velocities in different sediment compare to that in water

沉积层底质	与水中声速比例
鹅卵石	1.8000
泥沙砂砾	1.2778
砂质泥沙	1.2241
中等沙土	1.1782
泥质砂砾	1.1396
泥质沙土	1.0800
黏土沙质	1.0364

可见,在不同底质的沉积层中,声速不尽相同。当掩埋体位于目标正上方时,沉积层中声波的时延为

$$\tau_h = 2 \cdot \frac{h}{c_1} \quad (17)$$

其中, h 为沉积层深度。虚目标的掩埋深度为

$$h_v = \tau_h \cdot \frac{c_0}{2} = h \cdot \frac{c_0}{c_1} \quad (18)$$

深度误差为

$$\Delta \varepsilon = h - h_v = h \left(1 - \frac{c_0}{c_1} \right) \quad (19)$$

可见,当掩埋深度不变时,随着沉积层声速 c_1 的增加,虚目标深度与真实深度的误差越大。

表 3 为对水层与渐变层深度为 30 m、掩埋深度为 3 m 的点目标进行成像处理,改变沉积层底质类型得到的结果。

表 3 相同掩埋深度不同沉积层底质下的误差
Table 3 Error comparisons between different sediment at same depth

沉积层底质	与水中声速比	成像结果/m	误差/m
泥沙砂砾	1.2778	32.10	0.90
中等沙土	1.1782	32.37	0.63
泥质砂砾	1.1396	32.50	0.50
泥质沙土	1.0800	32.70	0.30
黏土沙质	1.0364	32.85	0.15

从仿真结果来看,成像结果的深度误差随沉积层中声速的增加而不断变大。

根据上面的理论分析与仿真结果不难看出,造成成像结果深度误差的主要原因就在于沉积层底

质的不同和掩埋深度的变化,如果能够对沉积层底质有预先的判断,则能够根据底质类型即沉积层中声速,构建声速模型,对三维徙动校正过程中的延时计算进行补偿,同时也能较为准确地计算出目标的真实深度,减小误差。

4 结 论

本文对面阵合成孔径声呐三维成像算法进行了描述与仿真实现,利用水层—渐变层—沉积层三层模型,有效地模拟了声线在传播过程中的弯曲现象,对掩埋点目标进行了三维成像。

通过理论分析与仿真研究表明,掩埋目标成像中的深度误差受到底质和掩埋深度的影响,误差随掩埋深度的增加而增大,随沉积层声速的增加而增大。另外,如何根据沉积层底质与掩埋深度对成像声速进行补偿,从而减小深度误差,需要进行进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Belkacem A, Besbes K, Chatillon J, et al. Planar SAS for Sea Bottom and Subbottom Imaging: Concept Validation in Tank[J]. *Oceanic Engineering IEEE Journal of*, 2006, **31**(3): 614-627.
- [2] Breitzke M, Grobe H, Kuhn G, et al. Full waveform ultrasonic transmission seismograms: A fast new method for the determination of physical and sedimentological parameters of marine sediment cores[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101**(B10): 22123-22141.
- [3] Blondel P, Uk W A. A review of acoustic techniques for habitat mapping[J]. *Revista De Acustica*, 2006.
- [4] Scott T E, Abousleiman Y, Musharraf Zaman, et al. Acoustical imaging and mechanical properties of soft rock and marine sediments[J]. *Natural Gas*, 2001.
- [5] Gutowski M, Bull J M, Dix J K, et al. 3D high-resolution acoustic imaging of the sub-seabed[J]. *Applied Acoustics*, 2008, **69**(3):262-271.
- [6] Jonathan M Bull, Martin Gutowski, Justin K. Dix, et al. Design of a 3D Chirp sub-bottom imaging system[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2005, **26**(2-4): 157-169.
- [7] 张维, 杨士莪, 汤云峰, 等. 不平整海底环境下的浅海本征声线求解方法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2011, **32**(12): 1544-1548. ZHANG Wei, YANG Shi'e, TANG Yunfeng, et al. A method of seeking eigen-rays in shallow water with an irregular seabed[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2011, **32**(12): 1544-1548.
- [8] 盛振新, 刘荣忠, 郭锐, 等. 分层海洋中求取本征声线数值方法研究[J]. *微处理机*, 2010, **31**(5): 90-92. SHENG Zhenxin, LIU Rongzong, GUO Rui, et al. A modified method for eigenrays searching in stratified ocean[J]. *Microprocessors*, 2010, **31**(5): 90-92.
- [9] Richard P Hodges. Underwater acoustics—analysis, design and performance of sonar[M]. Wiley, June 10, 2010.
- [10] Finn B Jensen, William A Kuperman, Michael B Porter, et al. *Computational Ocean Acoustics*[M]. Springer Verlag, April, 1997.