

# 几种沉积层参数对声线到达结构的影响

张忠兵<sup>1,2</sup>, 马远良<sup>1</sup>, 童立<sup>1</sup>, 倪晋平<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学声学工程研究所, 西安 710072; 2. 西北核技术研究所, 西安 710024)

**摘要:** 本文基于 Bellhop 声线模型研究了沉积层密度、声速、传播损失系数等几种主要参数对声线到达结构的影响, 采用反射系数描述声线与沉积层的相互作用, 仿真研究了声线到达结构随沉积层参数变化的关系, 结果表明: 在水中的声速剖面先验已知的条件下, 几种主要沉积层参数值在一定范围内改变时, 对声线到达结构的影响较小。

**关键词:** 声线到达结构; 沉积层参数; 水声

中图分类号: O422.2 文献标识码: A

## The effect of sediment parameters on acoustic ray arrival structure

ZHANG Zhong-bing<sup>1,2</sup>, MA Yuan-liang<sup>1</sup>, TONG Li<sup>1</sup>, NI Jin-ping<sup>1</sup>

(1. Institute of Acoustic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2. Northwestern Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** In this paper, the effect of sediment density, speed, attenuation of compressional wave on acoustic ray arrival structure is presented. The relationship between the amplitude of reflected ray and sediment parameters is expressed by reflected coefficient. Simulation results based on Bellhop model show that the effect of several main parameters of sediment on the acoustic ray arrival structure is insignificant when the sound speed profile in water is known a priori.

**Key words:** acoustic ray arrival structure; sediment parameter; underwater sound

### 1 引言

目前已有许多海洋声场模型可以用于预报海洋声场, 简正波模型和声线模型是比较常用的两种海洋声场计算模型。简正波模型适用于多种海洋环境, 并且可以较理想地预报声场, 但是简正波模型预报远距离的声传播时需要的计算量较大。用声线模型预报深海中远距离声场传播时的计算量小且效果较好, 但是声线模型预报浅海环境中的声场时, 海底沉积层、海洋深度、声速剖面等因素的影响需要恰当地处理。研究海底沉积层参数对声线到达结构的影响, 有助于利用声线到达结构反演水声环境参数时正确选择发射声源工作频率和接收阵阵型结构以及对沉积层结构参数的初始设定。本文利用声线模型 (Bellhop 程序<sup>[1]</sup>) 研究在典型夏季浅海声速剖面条

件下, 海底沉积层的密度、传播损失系数、沉积层声速等几种参数对声线到达结构的影响, 为声线到达结构快速反演水声环境参数时相关的初始参数选择提供依据。

### 2 沉积层结构以及声线与沉积层的相互作用

#### 2.1 沉积层结构

沉积层是指覆盖在海底上的一层非凝固态物质, 由海洋生物的残骸、泥、砂等物质组成, 其厚度变化范围较大。声波与沉积层相互作用的特征主要由沉积层结构及其特性决定, 许多研究工作者采用理论和实验的方法深入研究了沉积层结构及其声学特性。Hamilton<sup>[2]</sup> 较全面地总结了沉积层的声学特性, 并且将沉积层分为 9 类, 如表 1 所示:

表 1 典型沉积层的类型及特性

类型	粗砂	细砂	特细砂	泥砂	砂泥	泥	砂-泥-粘土	粘泥	泥质粘土
密度( g/cm <sup>3</sup> )	2.034	1.957	1.866	1.086	1.787	1.767	1.583	1.469	1.421
声速( m/s)	1836	1753	1697	1668	1664	1623	1580	1546	1520
K <sub>p</sub> ( dB/m/kHz)	0.479	0.510	0.673	0.692	0.756	0.673	0.113	0.095	0.078

#### 2.2 声线与沉积层相互作用的简化描述

声线入射到沉积层表面时被分为两部分: 声线携带的一部分信号能量透过沉积层表面进入沉积层

收稿日期: 2000-12-05; 修回日期: 2001-06-07

作者简介: 张忠兵(1962), 男, 湖北省荆门市人, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为信号测量、水声信号处理。

表 2 沉积层密度、声速、传播损失系数与反射系数的关系

密度 ( $g/cm^3$ )	1.3000	1.4000	1.5000	1.6000	1.7000	1.8000	1.9000	2.0000	2.1000
反射系数	0.9104	0.9090	0.9082	0.9077	0.9077	0.9079	0.9084	0.9090	0.9099
传播损失系数 ( $dB/\lambda$ )	0.1000	0.2000	0.3000	0.4000	0.5000	0.6000	0.7000	0.8000	0.9000
反射系数	0.9806	0.9617	0.9432	0.9253	0.9079	0.8911	0.8749	0.8593	0.8444
声速 ( $m/s$ )	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950
反射系数	0.7705	0.9928	0.9997	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

内部, 这些信号能量中有一些经过沉积层传播后又回到水中, 回到水中的信号携带的能量很小; 声线携带的另一部分信号能量直接经过沉积层反射回到水中。由于沉积层为含水非固态结构, 因而在声线与海底相互作用的简化模型中可以不考虑切变波声速和切变波衰减对声传播的影响。在海底起伏不大的情况下, 将其看作平坦海底。我们在声线与沉积层相互作用的简化模型中只考虑声线直接经过沉积层反射回到水中的传播, 因此可以用反射系数描述沉积层密度、沉积层声速、沉积层声传播损失系数等几个主要参数对声线的影响。反射系数  $R$  可以表示为<sup>[3]</sup>:

$$R = \frac{m \sqrt{k_0^2 - k_r^2} - \sqrt{k_1^2 - k_r^2}}{m \sqrt{k_0^2 - k_r^2} + \sqrt{k_1^2 - k_r^2}} \quad (1)$$

式中  $m$  为海底沉积层密度  $\rho_1$  与海水密度  $\rho_0$  的比值 ( $m = \rho_1/\rho_0$ ),  $k_0, k_1$  分别为水中和沉积层中的波数,  $k_r = k_0 \cos(\theta)$  为水平波数 ( $\theta$  为水平掠射角)。从上式可以看出, 反射系数是沉积层密度、声速的函数。沉积层压缩波传播损失系数与频率的关系可以表示为  $\alpha_p = K_p f$  ( $f$  表示频率, 单位为  $\text{kHz}$ <sup>[2]</sup>), 将  $\alpha_p$  作为沉积层声速的虚部<sup>[4]</sup>)

$$c = c_b + jc_i \quad (2)$$

式中  $c_b$  为海底声速,  $c_i = (\alpha_p \cdot c_b^2)/\omega$ ,  $\omega$  为信号的角频率, 由此可以看出反射系数也是沉积层压缩波传播损失系数的函数。下面选定某种典型条件进行分析计算。

设水中的声速  $c_w = 1507\text{m/s}$ 、密度  $\rho_0 = 1.0\text{g/cm}^3$ 、信号入射的掠射角固定为  $\theta = 10^\circ$ , 沉积层密度  $\rho_1 = 1.8\text{g/cm}^3$ 、声速  $c_b = 1600\text{m/s}$ 、传播损失系数  $\alpha = 0.5\text{dB}/\lambda$ , 分别改变沉积层的密度、声速、传播损失系数(其中 1 个参数改变时, 其它两个参数保持上面设定的值不变), 根据式(1)计算反射系数。沉积层密度、声速、传播损失系数与反射系数的关系见表 2。

从表 2 可以看出, 沉积层密度在  $1.3\text{g/cm}^3 \sim 2.1\text{g/cm}^3$  的范围内变化时, 反射系数的变化约为

0.3%; 沉积层传播损失系数从  $0.1\text{dB}/\lambda$  变为  $0.90\text{dB}/\lambda$  时, 反射系数的变化约为 13.9%; 沉积层声速在  $1550\text{m/s} \sim 1950\text{m/s}$  的范围内变化时, 反射系数的变化约为 23.0%, 而沉积层声速大于  $1700\text{m/s}$  时, 反射系数没有变化。

声线每经过沉积层一次反射, 它的能量都会被损失掉一部分。当声线经过多次反射后所携带的能量变得很小时, 该声线在接收阵元处对声场的贡献可以忽略不计。声线模型预报声场时是将到达接收点处的所有特征声线对声场的贡献进行累加, 因此, 用反射系数描述声线与沉积层的相互作用可以反映沉积层参数对声线到达结构的影响。

### 3 Bellhop 声线模型

从 Helmholtz 方程出发, 可以导出声线声学的基本方程——传播方程和程函方程<sup>[4]</sup>。传播方程主要描述声线的声压幅度, 程函方程描述声线的到达结构。下面简要地介绍程函方程以及由此导出的声线轨迹方程、传输时间方程。在直角坐标系中, 从 Helmholtz 方程开始, 导出的程函方程为

$$|\nabla\tau|^2 = \frac{1}{c^2(z, r)} \quad (3)$$

式中  $z$  为海深,  $r$  为水平距离,  $c(z, r)$  为点  $(z, r)$  处的声速,  $\tau$  为沿声线的传播时间。

$\nabla\tau$  是与波阵面垂直的向量, 因而可以用微分方程定义声线轨迹方程

$$\frac{d\mathbf{r}}{ds} = c \nabla\tau \quad (4)$$

根据方程(4)导出  $(z, r)$  平面的声线轨迹方程

$$\frac{d}{ds} \left( \frac{1}{c(r, z)} \frac{d\mathbf{r}}{ds} \right) = - \frac{1}{c^2(r, z)} \nabla c(r, z) \quad (5)$$

式中  $r(s), z(s)$  是声线的位置坐标,  $s$  为声线的弧长。

解程函方程(3), 得到沿声线轨迹的传输时间

$$\tau(s) = \tau(0) + \int_0^s \frac{1}{c(s')} ds' \quad (6)$$

Bellhop 声线模型程序采用数值方法求解方程(5)、方程(6)分别得到声线轨迹和声线传输时间。

## 4 沉积层参数对声线到达结构影响的仿真结果

我们选择如图 1 所示典型的夏季浅海声速剖面 (SSP), 水深 115m, 声源深度选为 80m, 接收阵元深度为 80m, 声源和接收阵元相距 50km。在这些参数不变的情况下, 仿真研究几种主要沉积层参数对声线到达结构的影响, 声线到达结构可以用特征声线的数量、到达时间等参量描述。改变沉积层参数, 用 Bellhop 程序跟踪声线可以获得特征声线到达时间和到达阵元的特征声线数量随沉积层变化的关系。

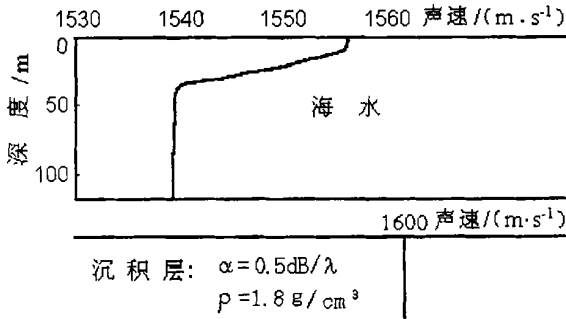


图 1 声速剖面和沉积层参数

Bellhop 程序是一种声线跟踪和预报声场的声线模型程序。我们对其进行适当修改后用于研究沉积层参数对声线到达结构的影响。跟踪计算特征声线时所采用的条件:

- 跟踪声线的范围: 掠射角  $-15^\circ \sim 15^\circ$ , 在此范围内以等间隔掠射角  $\delta\theta = (30/400)^\circ$  跟踪 400 条声线, 跟踪步长 10m;
- 海面边界为空气;
- 海底和海面的起伏度  $\delta = 0\text{m}$ , 即平坦海底和海面;
- 不考虑透过沉积层表面进入海底又折射返回水

中的声线对声场的作用和海底产生声线位移的影响。

- 声速剖面采用图 1 所示的 SSP;
- 声源信号频率  $f = 1000\text{Hz}$ ;
- 声线经过海底和海面多次反射后携带的能量损失大于 95% 时, 则停止对该声线的跟踪。

保持上面给定的条件不变, 改变沉积层密度、沉积层声速、沉积层声传播损失系数 3 个参数中的 1 个时, 其它两种参数取图 1 中对应的沉积层参数。以最先到达接收阵元的特征声线到达时间为参考基准, 计算到达接收阵元的每条特征声线相对于基准特征声线到达时间的差值, 取这些差值的最大值作为最大时间差, 仿真结果如表 3 所示。

从表 3 中可以看出, 沉积层密度在  $1.3\text{g/cm}^3 \sim 2.1\text{g/cm}^3$  的范围内变化时, 特征声线数量的变化为 1、最大到达时间的变化和最大时间差变化都在 90ms 以内; 沉积层传播损失系数在  $0.2\text{dB}/\lambda \sim 0.9\text{dB}/\lambda$  范围内变化时, 特征声线数量的变化为 1、最大到达时间的变化和最大时间差的变化均约为 11ms, 传播损失系数为  $0.1\text{dB}/\lambda$  时, 特征声线数量增加到 11, 最大到达时间以及最大时间差的变化较大; 沉积层声速从 1650m/s 变化到 1950m/s 时, 特征声线数量、最大到达时间以及最大时间差几乎不改变, 而沉积层声速小于 1550m/s 时, 声线到达结构的变化较大。在仿真过程中发现沉积层声速小于 1550m/s 时, 到达接收阵元的特征声线对应的掠射角  $\theta$  很小, 即接近于水平掠射角发射的声线才能到达接收阵元。根据折射定律可以解释这种现象。我们在仿真过程中将水中声速固定为 1539.6m/s (见图 1 海水中的 SSP), 由折射定律得到此时的临界角  $\theta_c = \cos^{-1}(1539.6/1550) = 6.64^\circ$ , 大于该临界角  $\theta_c$  的声线携带的部分能量透过沉积层表面进入海底,

表 3 沉积层参数对声线到达结构影响的仿真结果

密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	1.3000	1.4000	1.5000	1.6000	1.7000	1.8000	1.9000	2.0000	2.1000
特征声线数 (条)	9	9	9	10	10	10	10	10	10
最大到达时间 (ms)	32934	32934	32934	33024	33024	33024	33024	33024	33024
最大时间差 (ms)	458.8	458.8	458.8	546.0	546.0	546.0	546.0	546.0	546.0
传播损失系数 ( $\text{dB}/\lambda$ )	0.1000	0.2000	0.3000	0.4000	0.5000	0.6000	0.7000	0.8000	0.9000
特征声线数 (条)	11	7	7	6	6	6	6	6	6
最大到达时间 (ms)	33213	32614	32614	32625	32625	32625	32625	32625	32625
最大时间差 (ms)	738.1	139.2	139.2	150.62	150.6	150.6	150.6	150.6	150.6
声速 (m/s)	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950
特征声线数 (条)	3	10	11	11	11	11	11	11	11
最大到达时间 (ms)	32500	33021	33213	33213	33213	33213	33213	33213	33213
最大时间差 (ms)	25.05	564.0	738.1	738.1	738.1	738.1	738.1	738.1	738.1

(下转第 161 页)

20 卷 4 期 (2001)

的频率初始量由于是未知的,因而用初始测量值来代替。方位角,仰角和频率的测量是不相关的。初始相对位置 X 方向是 12km, Y 方向是 5km。

图 3、4、5 中参数估计的方差曲线中的-1、-2、-3 分别表示抽样间隔为 5s、10s 和 20s 时得出的估计结果。图 3 表示在 Y 方向的相对距离方差估计。图 4 为相应的总的相对距离的均方差估计曲线。图 5 是目标相对观察台 A 的相对速度的估计标准偏差。从图 3、4 中可以看出,随着时间的推移,数据量不断增大,均方差曲线迅速地减小,向 0 趋近。这是因为测量数据来自方位角、仰角和多卜勒频移等三方面,增大了观测信息量的缘故,这说明伪线性估计方法和最大似然估计方法对目标距离的估计是有效的。即随着观测时间的延长,方差迅速地减少,估计越精确。另外,随着抽样时间间隔的缩短,数据量在相同的时间内增得越多,使方差收敛速度加快,估计效果更好,伪线性估计曲线也向 CRLB 界接近。

## 6 结 论

本文对水下作相对运动的目标与观察器在确定深度的两个不同平面上的三维情形进行了被动 TMA 研究。由于数据来自方位角、仰角和多普勒频移等三方面,增大了观测信息量,改善了一般情况下因水下复杂的环境条件而造成的估计参数不佳的状况。运动参数估计性能较好,这说明伪线性估计方法和最大似然估计方法对运动参数的估计是有效

(上接第 156 页)

反射回到水中的声线经过海底多次反射后携带的能量损失很大,它们到达接收阵元时对声场的贡献可以忽略不计,因此,到达接收阵元的特征声线数也就少。

## 5 结 论

本文采用反射系数描述声线与沉积层的相互作用,通过 Bellhop 声线模型程序研究了沉积层密度、声速、传播损失系数对声线到达结构的影响。仿真结果表明:在水中声速剖面预先已知情况下,当限定跟踪声线的条件不变时,沉积层声速在 1650m/s~1950m/s 范围内对声线到达结构几乎没有影响。沉积层密度变化范围为  $1.3\text{g/cm}^3 \sim 2.1\text{g/cm}^3$  和沉积层传播损失系数的变化范围为  $0.2\text{dB}/\lambda \sim 0.9\text{dB}/\lambda$  时,它们对声线到达结构的影响较小。当海区的沉

的,且运算量增加不大。

另外当仰角为 0 值时,则模型变成基于方位角、频率测量的 TMA 问题,即观察器与目标位于同一平面的二维情形,上述方法仍然适用,且形式更简单,本文就不再作分析。

参考文献:

- [1] Steverc, Nardmoe, ect. Fundamental properties and performance of conventional Bearing-only Target Motion analysis [J]. IEEE Transaction on automatic control. 1984, AG-29 (9): 775-786.
- [2] P. Thomson moron. TMA from bearing and multipath time delays[J]. IEEE Transaction on aerospace and electronic systems, 1997, 33(3): 812-824.
- [3] 胡友峰, 景博等. 一种被动 TMA 的可测性问题分析[J], 声学技术, 2000, 19(1): 13.
- [4] [美国] MD 斯思纳思等. 统计信息处理及其应用[M]. 国防工业出版社, 1982.
- [5] Claude Jaufferet and Denis pillon. Observability in passive target motion analysis[J]. IEEE Transaction on aerospace and electronic systems. 1996, 32(4): 1290-1300.
- [6] 孙仲康等. 单多基地有源无源定位技术[M], 国防工业出版社, 1996.
- [7] Klans buker. A general approach to TMA observability from angle and frequency measurements[J]. IEEE. Transaction on aerospace and electronic systems. 1996. 32(1).
- [8] 张有为编著, 维纳与卡尔曼滤波[M], 国防工业出版社, 1979.

积层结构属于表 1 所列范围的前 7 种类型时,声线到达结构的变化小于 15%, 仿真研究还表明在该类海区采用声线到达结构反演水中声速剖面可以忽略沉积层参数的影响。

参考文献:

- [1] M. B. Porter, H. P. Bucker. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic field[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1984, 82(4): 1349-1359.
- [2] E. L. Hamilton. Geoacoustic modeling of the sea floor[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1980, 68(5): 1313-1340.
- [3] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学[M]. 北京: 科学出版社, 1981. 130-136.
- [4] F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porte, et al. Computational Ocean Acoustics [M]. New York: AIP press, 1993. 149-155.