

# 基于 BELLHOP 模型的宽带信号波形预报

谢 骏, 笮良龙, 唐 帅, 范培勤

(海军潜艇学院, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 为解决信号级声纳仿真系统的水声传输信道宽带信号波形预报问题, 采用射线模型的基本原理, 推导了基于射线的宽带水声信道响应函数。并在 Pekeris 环境条件下, 分析比较了基于 BELLHOP 射线模型的时域宽带模型与基于 BDRM 模型的频域宽带模型波形预报结果。结果表明, 水声信道具有典型的时域数字滤波器特征, 其本质是对脉冲信号进行延迟、加权和求和, 这种延迟求和会导致系统频域幅度响应函数呈现“梳状滤波器”形状。在一定条件下, 射线模型与简正波模型具有同等计算精度, 由于射线模型通过一次计算就能得到所有本征声线的幅度和延迟, 相对于简正波模型来说, 计算效率更高。同时利用射线模型, 能够方便地选择接收特定角度出射的本征声线。

**关键词:** 射线模型; 宽带传播模型; 波形预报

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3096(2012)11-0062-05

水声传播通常主要采用窄带传播模型, 即从频域波动方程(赫姆霍兹方程)出发, 求解的是某一频率的声压场<sup>[1-2]</sup>。随着声纳孔径的增大, 工作频率越来越低, 水声领域也越来越多地采用宽带技术, 宽带波形预报是实现信号级声纳仿真系统的核心技术之一。

本文主要讨论基于 BELLHOP 模型建立时域宽带模型的基本原理, 在此基础上, 重点分析 Pekeris 环境下脉冲声传播波形预报问题, 并将波形预报仿真结果与 BDRM 频域宽带波形预报模型的仿真结果进行分析比对。

## 1 宽带传播模型

宽带技术主要采用频域傅立叶合成法或时域法, 如图 1 所示。傅立叶合成法是在频率范围内, 以  $\Delta f$  为间隔(例如  $\Delta f$  可以为 1Hz)的若干离散频率上多次执行现有的传播模型。然后通过适当的加权平均处理(即内插后置处理器), 将所得到的带宽内各个频率的传播损失加起来, 从而获得相当于整个频带的传播损失。原则上, 通过频域范围内对各个 CW 解进行傅立叶综合, 频域波动方程就能处理宽带信号。Jensen<sup>[3]</sup>总结了适合于海洋中低频声脉冲传播实际建模的波动理论技术, 强调了利用现有 CW 传播模型(基于简正波和抛物型方程近似)的傅立叶合成方法, 进行脉冲传播预报的计算效率问题。Jensen<sup>[4]</sup>进

一步研究了这些问题, 将重点放在有泄漏的海面波导中的声传播。Futa 和 Kikuchi<sup>[5]</sup>研究了利用有限差分时域(FDTD)方法解决浅海中声脉冲传播问题。张仁和等<sup>[6-7]</sup>对脉冲信号波形预报进行了研究, 主要基于 WKBJ 和 BDRM 理论。由于海底底质参数对信号波形预报影响很大, 近年来主要开展了大量海底底质参数反演的实验研究<sup>[8-9]</sup>。McDonald 和 Kuperman<sup>[10]</sup>提出了对宽带线性脉冲在波导中的传播进行模拟的方法, 这是另一大类技术中的一个例子, 称为时域方法<sup>[11]</sup>。在最新的研究中, Porter<sup>[12]</sup>提出了时间步进 FFP, 用于建模声脉冲信号在海洋中的传播。Collins<sup>[13]</sup>使用 TDPE 模型研究基于脉冲传播的沉积层散射效应。Orchard 等<sup>[14]</sup>提出三维 TDPA(时域抛物近似)模型, 仿真三维海洋环境中的声脉冲传播。

## 2 基于射线的时域宽带模型

对于柱对称系统, 射线方程写为:

$$\frac{dr}{ds} = c\zeta(s), \quad \frac{d\zeta}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial c}{\partial r} \quad (1)$$

收稿日期: 2011-11-14; 修回日期: 2012-08-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)

作者简介: 谢骏(1976-), 男, 安徽颍上人, 副教授, 博士, 研究方向为声纳环境效应仿真、水中目标特性分析, 电话: 13210087626, E-mail: xiejun688@tom.com

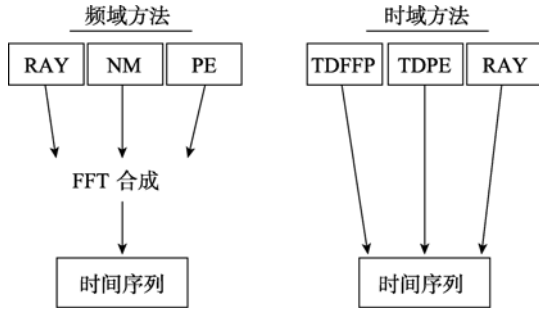


图 1 宽带传播模型

Fig. 1 Broadband propagation model

$$\frac{dz}{ds} = c\zeta(s), \quad \frac{d\zeta}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial c}{\partial z} \quad (2)$$

这里  $r(s)$  和  $z(s)$  是柱坐标系的射线坐标,  $s$  是沿射线的弧长,  $c(s)[\xi(s), \zeta(s)]$  是沿射线的正切对。

$z(s)$ ,  $r(s)$ ,  $\xi(s)$  和  $\zeta(s)$  的初始条件是:

$$r(0) = r_s, \quad z(0) = z_s, \quad \xi(0) = \frac{\cos \theta_s}{c_s}, \quad \zeta(0) = \frac{\sin \theta_s}{c_s}$$

这里  $\theta_s$  是发射角,  $r_s, z_s$  是源位置,  $c_s$  源处声速。于是, 射线传输时间为

$$\tau = \int_{\Gamma} \frac{ds}{c(s)}, \quad \text{这个积分是沿着 } z(s), r(s) \text{ 的曲线。}$$

射线跟踪主要任务是通过求解射线方程求得射线坐标。幅度和声压可通过求解动力学方程得到, 这在文献[15]中有详细描述。

设单个本征声线所作贡献的单频表达式为:

$$H(l, \omega) = A(l)e^{i\omega\tau(l)} \quad (3)$$

式中  $A(l)$  是由声线管横截面积决定的幅度,  $\tau(l)$  是沿声线路径的相位延迟:

$$\tau(l) = \int_0^l \frac{1}{c(l')} dl' \quad (4)$$

进一步假设损失与频率无关, 因而幅度项  $A(l)$  也与频率无关。对于中心频率为  $f_0$  的窄谱声源, 我们可以根据对频率  $f_0$  得到的损失来计算  $A(l)$ 。另一方面, 如果损失与频率有简单关系, 只要微小的修改就可以继续进行下面的推导。

如前所述, 时域解可以通过傅立叶合成得到, 即

$$p(l, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) H(l, \omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (5)$$

式中  $S(\omega)$  是声源的谱。代入  $H(l, \omega)$  的声线表达式得

$$p(l, t) = A(l) \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{-i\omega[t-\tau(l)]} d\omega \quad (6)$$

也就是

$$p[l, t + \tau(l)] = A(l) \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (7)$$

现在我们可以把谱积分看成是逆傅立叶变换, 故有

$$p[l, t + \tau(l)] = A(l)s(t) \quad (8)$$

不失一般性, 上式可写成如下形式

$$p(l, t) = A(l)s[t - \tau(l)] \quad (9)$$

显然, 某号声线的接收信号就是声源信号波形按幅度按照  $A(l)$  加权, 并伴有  $\tau(l)$  延迟的结果。因此有

$$p(t) = \sum_{l=1}^N A(l)s[t - \tau(l)] \quad (10)$$

如果声源为  $\delta$  脉冲, 上式变为

$$p(t) = h(t) = \sum_{l=1}^N A(l)\delta[t - \tau(l)] \quad (11)$$

上式即为水声信道的系统响应函数,  $N$  为有效声线的个数。对其求傅立叶变换得到:

$$H(\omega) = \sum_{l=1}^N A(l)e^{-i\omega\tau(l)} \quad (12)$$

从射线声学角度, 根据(11)式水声信道信号处理系统的结构可用图 2 表示:

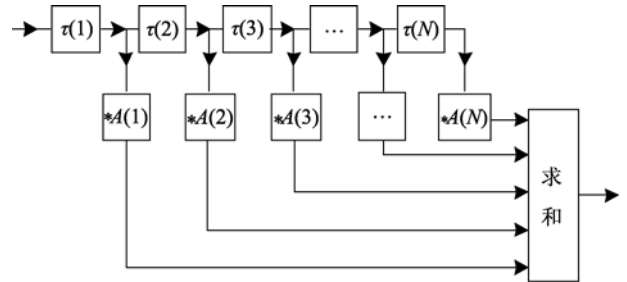


图 2 基于射线的水声信道传输系统结构图

Fig. 2 Underwater acoustic channel transmission system structure diagram based on ray model

根据数字信号处理知识可知, 图 2 对脉冲信号进行延迟、加权和求和过程是典型的时域数字滤波器设计过程<sup>[16]</sup>, 而且这种延迟求和会导致系统频域幅度响应函数呈现“梳状滤波器”形状, 实际上水声信道响应函数的确是呈现“梳状滤波器”结构的<sup>[17]</sup>。这主要由于本征声线掠射角是离散的, 在一个连续的时空中, 声传输过程被表征成了离散化的数字系统。

### 3 仿真结果分析

讨论两层液体介质的 Pekeris 环境模型脉冲声传播问题, Pekeris 环境模型参数为: 海水深度 100 m,

海水声速 1 500 m/s, 海水密度 1.0 g/cm<sup>3</sup>, 海底声速 1 680 m/s, 海底密度 1.8 g/cm<sup>3</sup>, 吸收系数 0.6 dB/λ, 声源深度 10 m, 接收深度 10 m。

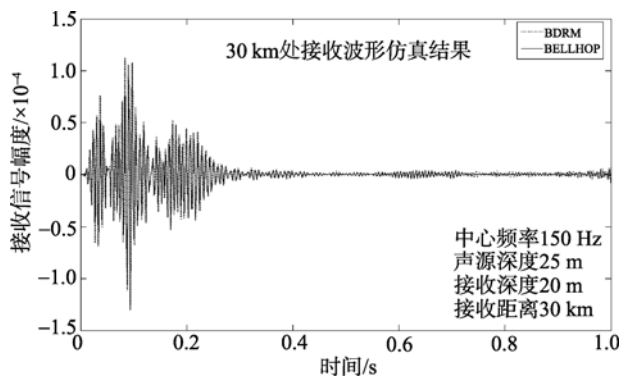
脉冲信号为

$$s(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sin \omega_c t \left( 1 - \cos \frac{1}{4} \omega_c t \right), & 0 < t < 4/f_c \\ 0, & 0 \end{cases} \quad (13)$$

其中  $f_c$  为中心频率。

基本射线模型采用 Bellhop 模型, 它是一种高效的射线跟踪程序, 由 Michael Porter 采用 Fortran 语言编写。Bellhop 是二维声射线跟踪模型, 波导界面可以是水平不变的, 也可以是水平变化的。模型输出为射线坐标、传播时间、幅度、本征声线、声压或传播损失(相干、非相干和半相干)。声压计算基于高斯射线束理论<sup>[15,18]</sup>, 可采用不同的近似, 主要有几何波束<sup>[19]</sup>; 射线中心坐标波束; 笛卡儿坐标波束; 高斯射线束近似<sup>[20]</sup>。

图 3 是在 Pekeris 环境模型条件下 BDRM 与 BELLHOP 仿真中心频率 50 Hz, 带宽 50 Hz, 在 30 km 处接收脉冲波形, 两波形相关系数为 80.3%。



从图 3 中可以看出, 两模型预报波形主要在第二个波包后沿差异较大, 前沿主要是高频的贡献, 后沿更多是低频的贡献, BELLHOP 对较低频率声线的预报有较大误差。为进一步验证这一想法, 将信号中心频率调整到 150 Hz, 带宽 50 Hz, 图 4 中 30 km 处接收波形仿真结果, 接收波形相关系数高达 99%; 22 km 处接收波形仿真结果, 接收波形相关系数为 86.4%, 相关系数变小的原因是两模型计算时误差引起的。

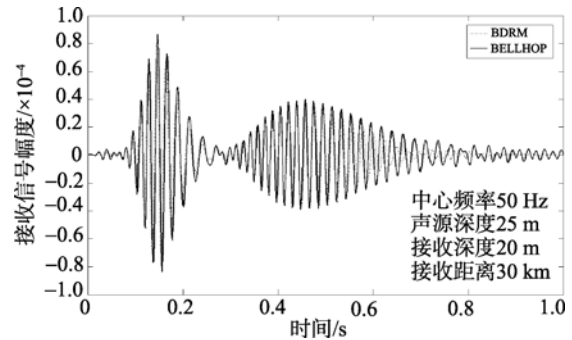


图 3 BDRM 与 BELLHOP 仿真接收波形对比

Fig. 3 Receiving waveform comparison based on BDRM and BELLHOP model

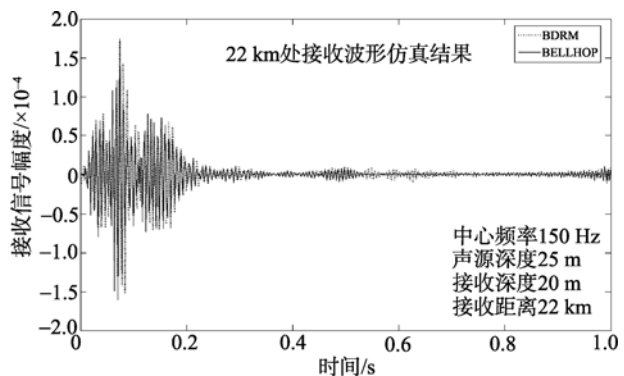


图 4 不同接收距离接收波形仿真结果

Fig. 4 Receiving waveform simulation results of different receiving distances

在一定条件下, 射线模型与简正波模型具有同等计算精度, 由于射线模型通过一次计算就能得到所有本征声线的幅度和延迟, 相对于简正波模型来说, 能够很方便快速的构造出信道传输函数。同时利用射线模型, 能够方便的选择仅接收特定角度出射的本征声线, 图 5 是中心频率 50 Hz, 带宽 50 Hz 脉冲在 30 km 处对不同角度出射声线的接收波形仿真结果。

## 4 结论

以信号级声纳仿真系统的需求为牵引, 在对

射线模型的基本原理分析的基础上, 推导了基于射线的时域宽带传播模型, 从射线声学角度理解水声信道, 其本质是对脉冲信号进行延迟、加权和求和, 是典型的时域数字式“梳状滤波器”。仿真结果分析表明, 在一定条件下, 射线模型与简正波模型具有同等计算精度, 由于射线模型通过一次计算就能得到所有本征声线的幅度和延迟, 相对于简正波模型来说, 能够更快速地构造出信道传输函数, 同时能够更直观地控制声纳垂直接收角的仿真。

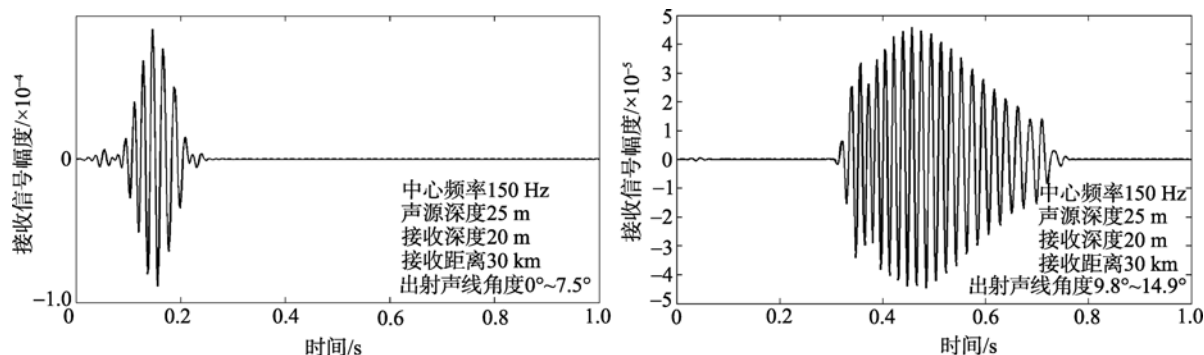


图5 不同角度出射声线的接收波形仿真结果图

Fig. 5 Receiving waveform simulation results of different angles outgoing sound ray

## 参考文献:

- [1] 杨士莪. 水声传播原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1990.
- [2] 布列霍夫斯基. 分层介质中的波(中译本)[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [3] Jensen F B. Wave theory modeling: a convenient approach to CW and pulse propagation modeling in low-frequency acoustics[J]. IEEE J Oceanic Eng, 1988, 13(1): 186-197.
- [4] Jensen F B. CW and pulse propagation modeling in ocean acoustics[C]//Moura J M F, Lourtie I M G. Acoustic Signal Processing for Ocean Exploration. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993: 3-20.
- [5] Futa K, Kikuchi T. Finite difference time domain analysis of bottom effect on sound propagation in shallow water[J]. Acoust Sci Technol, 2001, 22: 303-305.
- [6] 何怡, 张仁和, 朱业. 水下声道中脉冲传播的 WKBZ 简正波方法[J]. 声学学报, 1994, 19(6): 418-424.
- [7] 朱业, 张仁和. 负跃层浅海中的脉冲声传播[J]. 中国科学(A 辑), 1996, 26(3): 271-279.
- [8] 张学磊, 李整林, 张仁和. 利用船辐射噪声反演海底吸收[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 994-995.
- [9] 李整林, 鄢锦, 李风华, 等. 由简正波群延时及幅度反演海底参数[J]. 声学学报, 2002, 27(6): 487-491.
- [10] McDonald B E, Kuperman W A. Time domain formulation for pulse propagation including nonlinear behavior at a caustic[J]. J Acoustic Soc Amer, 1987, 81(5): 1406-1417.
- [11] Kuperman W. A models of sound propagation in the Ocean[J]. Nav Res Rev, 1985, 37(3): 32-41.
- [12] Porter M B. The time-marched fast-field program (FFP) for modeling acoustic pulse propagation[J]. J Acoustic Soc Amer, 1990, 87(5): 2013-2023.
- [13] Collins M D. The time-domain solution of the wide-angle parabolic equation including the effects of sediment dispersion[J]. J Acoustic Soc Amer, 1988, 84(6): 2114-2125.
- [14] Orchard B J, Siegmann W L, Jacobson M J. Three-dimensional time-domain paraxial approximations for ocean acoustic wave propagation[J]. J Acoustic Soc Amer, 1992, 91(2): 788-801.
- [15] Porter M B, Bucker H P. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields[J]. J Acoust Soc America, 1987, 82(4): 1349-1359.
- [16] Karrenberg U. 信号处理的交互式多媒体教程[M]. 李秀梅, 肖泳, 毕国安, 译. 北京: 清华大学出版社, 2008: 263-267.
- [17] 惠俊英, 生雪莉. 水下声信道[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 37-39.
- [18] Jensen F, Kuperman W, Porter M, et al. Computational Ocean Acoustics[M]. New York: Springer, 1994: 126-128.
- [19] Porter M B, Liu Yong-chun. Finite-element ray tracing[C]//Lee D, Schultz M H. Proceedings of the International Conference on Theoretical and Computational Acoustics. Singapore: World Scientific, 1994: 947-956.
- [20] Weinberg H, Keenan R E. Gaussian ray bundles for modeling high-frequency propagation loss under shallow-water conditions[J]. J Acoustic Soc America, 1996, 100(3): 1421-1431.

# Broadband waveform prediction based on BELLHOP model

XIE Jun, DA Liang-long, TANG Shuai, FAN Pei-qin

(Naval Submarine Academy, Qingdao 266071, China)

**Received:** Nov., 14, 2011

**Key words:** ray model; broadband propagation model; waveform prediction

**Abstract:** To solve the problem of broadband signal waveform prediction under underwater acoustic transmission channel for signal-level sonar simulation system, through the analysis of the basic principle of ray model, and deduced broadband underwater acoustic channel response function based on ray model. In the Pekeris environment conditions, waveform prediction results were analyzed and compared which on the basis of time-domain BELLHOP broadband ray model and frequency-domain BDRM broadband normal mode model. The results showed that underwater acoustic channel had typical time-domain digital filter characteristics, its essence was the pulse signals were delayed, weighted and summarized, this led to the system frequency domain amplitude response function appeared “comb filter” shape. Under certain conditions, ray model and normal mode model had the same accuracy. Compared with normal mode model, the ray model was more efficient, because just one calculation was needed for all the eigenrays amplitude and delay. Using ray model can conveniently choose a particular grazing angle eigenrays.

(本文编辑: 刘珊珊)