

浅海爆炸声传播损失及简正波分离实验研究*

刘立勇, 王婷婷

南海舰队海洋水文气象中心, 广东 湛江 524001

摘要: 文章简要介绍了浅海声传播损失的研究背景和基本理论方法。通过 1/3 倍频程滤波对浅海爆炸宽带信号的不同频段在浅海的传播损失情况进行了分析, 描述了浅海环境对声传播损失的影响; 同时在不知道先验信息的条件下, 利用垂直阵声压数据成功地进行了简正波分离, 并与理想条件下 Kraken 简正波模型计算出的结果进行了比较分析。

关键词: 浅海; 垂直阵; 传播损失; 简正波

中图分类号: P733.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2011)03-0046-05

Research on transmission loss of explosive sound in shallow water and normal mode extraction

LIU Li-yong, WANG Ting-ting

Naval Oceanographic Hydrometeorological Centre of South China Sea Fleet, Zhanjiang 524001, China

Abstract: The paper presents research background and basic theory and method of acoustic transmission loss in the shallow water. The effects due to sound transmission loss by shallow water environment are described through analyzing the transmission loss with explosive sound signal at different frequency range filtered by third octave. With no priori knowledge, the normal modes are successfully extracted from the sound pressure data derived from the vertical liner receiver arrays (VLAs). The comparison of normal modes extracted and calculated by Kraken Mode Model is also presented.

Key words: shallow water; vertical liner receiver array (VLA); transmission loss; normal mode

水声传播规律是海洋声学的基本课题, 是研究海洋环境噪声、空间相关、海洋混响等问题的基础。水声系统的性能与声波在海洋中的传播有关, 传播损失是对水下声传播特性的一种定量描述, 是水声系统的重要参数之一。了解和掌握水下声场的复杂多变的规律, 并做出合乎要求的快速精确的预报, 对水下目标的探测和现代声纳的设计、操作和使用都有重要意义。

建立快速精确的海洋声场计算模型一直是海洋声学的一个重要课题, 简正波理论在海洋声学中作为一种比较主要的计算方法, 得到了广泛的应用, 目前已有相当多的简正波计算程序。近年来, 随着对脉冲声传播、浅海地声反演、匹配场定位等问

题的深入研究, 在计算速度与精度方面对声场理论提出了越来越高的要求。

1 基本理论与方法

1.1 传播损失

海水介质是一种不均匀的非理想介质, 由于介质本身的吸收、声传播过程中波阵面的扩展及海水中各种不均匀性的散射、海底的影响等原因, 声波在传播过程中, 声传播方向上的声强度将会逐渐减弱。引起声强在介质中传播衰减的原因主要为扩展损失、吸收损失和散射。在海洋介质中, 存在泥沙、气泡、浮游生物等悬浮粒子以及介质不均匀性, 引起声波散射和声强衰减。海水界面、海底对声波的

收稿日期: 2009-07-24; 修订日期: 2010-10-22。孙淑杰编辑

作者简介: 刘立勇(1982—), 男, 山东省潍坊市人, 助理工程师, 从事海洋水文方面的研究。E-mail: llyswc@163.com

*衷心感谢中国海洋大学信息科学与工程学院的王好忠老师在本文写作中给予的指导和帮助。

散射,也是引起这类衰减的重要原因。

传播损失^[1]TL定量地描述了声波传播一定距离后声强度的衰减变化,它定义为

$$TL=10 \lg \frac{I_1}{I_r} \quad (1)$$

式中, I_1 是离声源声中心 1m 处的声强度; I_r 是距声源 r 处的声强度。上式定义的传播损失 TL 总为正值。

1.2 波动方程的简正波解

在均匀的理想流体媒质中,小振幅声波的三维波动方程^[2]为

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2)$$

式中, p 为声压, c_0 为声速, t 为传播时间, ∇^2 为拉普拉斯算子。在稳定的简谐声源产生的稳态声场中,波动方程简化为^[2]

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (3)$$

式中, $k = \omega / c_0$ 为波数,其中 ω 为简谐振动的角频率。

当声传播水平距离不是特别远时,往往把海洋看作分层媒质。研究声波在海洋媒质中传播的主要方法有简正波理论和射线理论,前者把声场表示为许多简正波的和,在浅海远程情况,一般只有前几号甚至只有第一号简正波起重要作用。

简正波解是波动方程的一种精确积分解,它通常假定海洋信道为柱面对称的分层介质,由理论推导可知声波的简正波解^[3]表达式为

$$p_{ij} = p(z_i, \omega_j) = \frac{\sqrt{2\pi} e^{i\pi/4}}{\rho(z_s)} \sum_{n=1}^{N_M} \phi_n(z_s) \phi_n(z_i) \frac{e^{ik_n(\omega_j)r_0}}{\sqrt{k_n(\omega_j)r_0}} \quad (4)$$

其中 $p(z_i, \omega_j)$ 为深度 z_i 处角频率为 ω_j 的声压; $\rho(z_s)$ 为声源所在深度处介质密度; $\phi_n(z_s)$ 为正交的声源所在深度 z_s 处的简正波函数; $\phi_n(z_i)$ 为计算深度 z_i 处的简正波函数; N_M 是有效简正波的号数; $k_n(\omega_j)$ 为 n 号简正波的波数; r_0 为距声源处的水平距离。简正波函数满足下式:

$$\int_0^H \frac{\phi_n(z) \phi_m(z)}{\rho(z)} dz = \delta_{mn} \quad (5)$$

H 为传播介质从表至底的整体深度, n, m 代表简正波号数,只有当 $n=m$ 时 $\delta_{mn}=1$, 其余 $\delta_{mn}=0$ 。

在 ω_1 至 ω_n 内如果没有新的简正波模式出现,则不同深度和不同频率的复频域信号组成矩阵

$$P = \begin{pmatrix} p(z_1, \omega_1) & p(z_1, \omega_2) & \dots & p(z_1, \omega_{N_f}) \\ p(z_2, \omega_1) & p(z_2, \omega_2) & \dots & p(z_2, \omega_{N_f}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p(z_{N_z}, \omega_1) & p(z_{N_z}, \omega_2) & \dots & p(z_{N_z}, \omega_{N_f}) \end{pmatrix} \quad (6)$$

$N \times M$ 复数矩阵 A 的 SVD 分解(singular value decomposition, 奇异值分解)^[4]为

$$A = USV^\dagger \quad (7)$$

其中符号“ \dagger ”表示矩阵的共轭转置矩阵。 S 是一个元素从大到小排列的实数对角矩阵。矩阵 U 和 V 的列向量满足正交归一条件

$$\sum_{i=1}^N U_{in} U_{im}^* = \sum_{i=1}^M V_{in} V_{im}^* = \delta_{nm} \quad (8)$$

其中符号“ $*$ ”表示复数共轭。因为 S 是对角矩阵,则 A 的每一个元素可写为

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^N U_{ik} S_{kk} V_{kj}^* \quad (9)$$

根据奇异值向量的正交条件和简正波解特征向量的正交条件的相似性可以对 P 矩阵做 SVD 分解,得到 3 个矩阵 U, S, V , 分别与 Φ, Λ_f, F 对应。

将简正波解代入 P 矩阵可得

$$P = e^{i\pi/4} \Phi \Lambda_f F \quad (10)$$

其中

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{\rho(z_s)}} \begin{pmatrix} \phi_1(z_1) & \phi_2(z_1) & \dots & \phi_{N_M}(z_1) \\ \phi_1(z_2) & \phi_2(z_2) & \dots & \phi_{N_M}(z_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi_1(z_{N_z}) & \phi_2(z_{N_z}) & \dots & \phi_{N_M}(z_{N_z}) \end{pmatrix}$$

$$F = \begin{pmatrix} \frac{e^{ik_1(\omega_1)r_0}}{\sqrt{N_f k_1(\omega_1)r_0}} & \frac{e^{ik_1(\omega_2)r_0}}{\sqrt{N_f k_1(\omega_2)r_0}} & \dots & \frac{e^{ik_1(\omega_{N_f})r_0}}{\sqrt{N_f k_1(\omega_{N_f})r_0}} \\ \frac{e^{ik_2(\omega_1)r_0}}{\sqrt{N_f k_2(\omega_1)r_0}} & \frac{e^{ik_2(\omega_2)r_0}}{\sqrt{N_f k_2(\omega_2)r_0}} & \dots & \frac{e^{ik_2(\omega_{N_f})r_0}}{\sqrt{N_f k_2(\omega_{N_f})r_0}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{e^{ik_{N_M}(\omega_1)r_0}}{\sqrt{N_f k_{N_M}(\omega_1)r_0}} & \frac{e^{ik_{N_M}(\omega_2)r_0}}{\sqrt{N_f k_{N_M}(\omega_2)r_0}} & \dots & \frac{e^{ik_{N_M}(\omega_{N_f})r_0}}{\sqrt{N_f k_{N_M}(\omega_{N_f})r_0}} \end{pmatrix}$$

$$\Lambda_f = \frac{\sqrt{2\pi N_f}}{\sqrt{\rho(z_s)r_0}} \begin{pmatrix} \phi_1(z_s) & & & 0 \\ & \ddots & & \\ 0 & & & \phi_{N_M}(z_s) \end{pmatrix}$$

定义参数:

$$n_{\text{rot}} = \frac{r_0}{2\pi} \left\{ \left[k_n(f_{\text{max}}) - k_m(f_{\text{max}}) \right] - \left[k_n(f_{\text{min}}) - k_m(f_{\text{min}}) \right] \right\} \quad (11)$$

上式中 r_0 为距声源处水平距离, f_{\min} 和 f_{\max} 代表带宽的最小和最大频率, k_n, k_m 代表 n 号和 m 号简正波的水平波数。只有当 n_{rot} 非常大的时候矩阵 F 才近似正交, r_0 较大的时候容易满足, 这就是远场条件, 同时这两个频率之间不能有新的简正波号数。

2 实验分析

2.1 实验简介

实验区域水平距离大概覆盖 35 海里, 沿一条纵深线设立 A、B、H1、H2、H3、C、H4、D 等 8 个站点, 水深变化在 35—55m, 存在非常强的跃层, 跃层上界在 25m 深左右, 如图 1 所示。

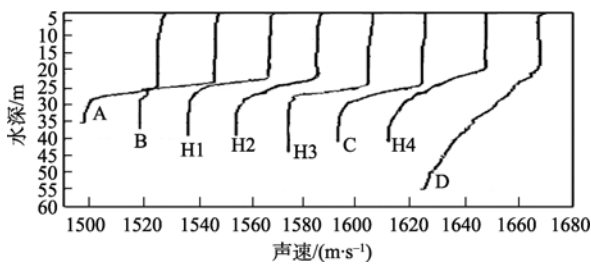


图 1 各不同站点(A, B, H1, ..., D)的声速剖面图
Fig. 1 Sound-speed profiles along different sections

从图中可知, A—C 之间海区存在明显的跃层。实验以手榴弹的爆炸声作为信号源, 采集数据用的垂直阵(VLAs)包含 12 个水听器单元, 基本等间隔排放, 采集数据时表面的单元受环境的影响干扰较大。

2.2 数据的初步处理

在离爆炸源 5 链(1 链=185.2m)距离处接收到的声信号的时域特征(采样频率为 1.2×10^4 Hz)如图 2、频谱特征如图 3 所示。从图中可以看出, 手榴弹的爆炸信号存在 2 个较大的波动(手榴弹爆炸时存在 2 次脉冲), 能量主要集中在低频段, 而且能量随频率的变化并不连续, 即在某些频率上有极少能量或没有能量分布, 这可能是由声信道频率特性如干涉吸收等引起的。

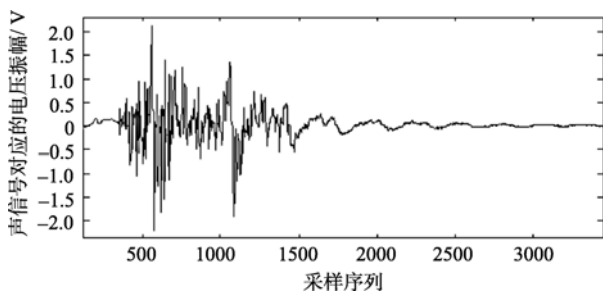


图 2 信号的时域波形
Fig. 2 Signal wave in time range

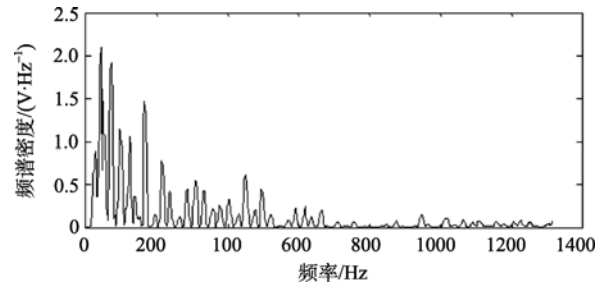


图 3 信号的频域波形
Fig. 3 Signal wave in frequency range

300Hz 为中心频率的 1/3 倍频程滤波后的结果见图 4, 由滤波后的信号波形包络可以看出, 可以对窄带信号进行简正波分离。

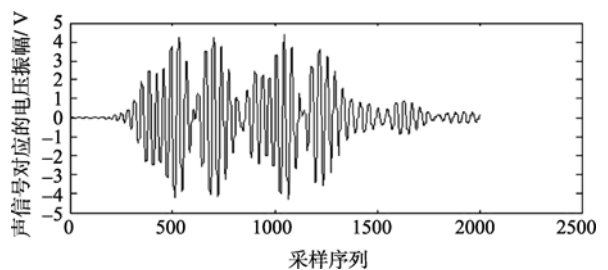


图 4 跃层以上的波形图
Fig. 4 Signal wave above thermal layer

2.3 传播损失数据处理结果

在与接收阵距离分别为 3、5、10、20、50、70、100、150、200、300、350 链的位置投放共 11 枚手榴弹作为信号源, 爆炸源在跃层下边附近处。取 300Hz 和 900Hz 分别作为低频段和高频段的代表频率的中心频率值, 取中心频率 1/3 倍频程段的功率密度的和, 然后归一化, 进行不同频段的传播损失分析, 声强度随距离的变化如图 5 所示。

2.4 传播损失结果分析

从处理结果看, 在远距离, 声强度在跃层以上的衰减比跃层以下大 10dB 左右。前 20km, 在 300Hz 时, 跃层以上及跃层以下衰减 25dB 左右, 跃层位置衰减为 20dB 左右; 900Hz 时, 跃层以上及跃层以下衰减 30dB 左右, 跃层位置衰减为 35dB 左右。在距 B 点约 28km 处(H3 点)出现异常现象, 可能是因为在此位置海水深度增大, 更高阶的简正波被激发起来, 提高了声场的强度, 另外这点附近还受暖水团(实验同时有 CTD 观测)的影响。导致第 10、11 个点衰减出现异常的主要原因是海洋深度的变化, 从图 5 中可以看出, 远处传播主要为低频成分, 有明显衰减, 高频成分在离声源较近处已有较大衰减, 在远处的衰减不明显; 第 2、3 个点有时衰减很小甚至

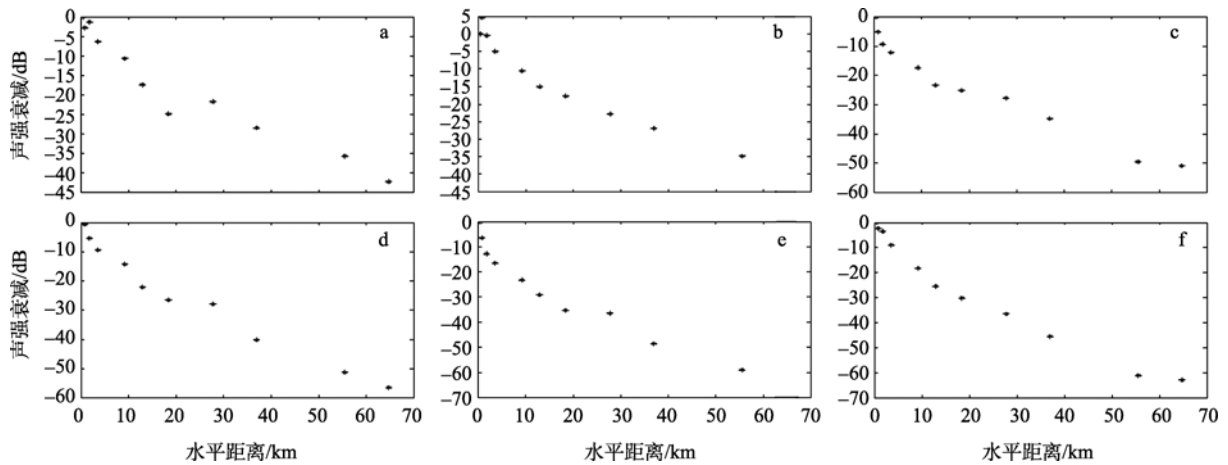


图 5 300Hz 和 900Hz 声信号在不同位置的传播损失图

a. 300Hz 跃层以下衰减图; b. 300Hz 跃层位置衰减图; c. 300Hz 跃层以上衰减图; d. 900Hz 跃层以下衰减图; e. 900Hz 跃层位置衰减图; f. 900Hz 跃层以上衰减图

Fig. 5 Transmission loss (300 and 900Hz at different layers)

增加, 分别发生在低频时的跃层及其下部位置、高频时的跃层上部。造成这种现象的原因可能为各爆炸源的爆炸强度及频谱分布不尽相同, 且前几个点距离很近, 衰减较小, 这种现象出现位置的差异同时说明不同的频率成分穿越跃层的能力不同。

3 简正波分离

3.1 简正波分离的结果

对 1.2 中 Φ 矩阵对应的列的实部进行归一化处理, P 矩阵满足如下条件。1)频率: 在 287—330Hz 频段内等间隔取样 30 个频率点; 2)深度: 不等间隔分布的 8 个深度; 3)密度: 常数, 等于 $1.03g \cdot mL^{-1}$; 4) P 是一个 8 行 30 列的矩阵; 与 Kraken 计算的结果作比较。图 6 为实验分离与 Kraken 计算出的简正波

对比图, 海底比较平滑, 底质为细砂。

3.2 结果分析

这仅是简正波波函数实部的对应情况。 P 矩阵没有做归一化处理, 做 SVD 后有一定偏差, 但影响不是很大。分离的结果中, 2 号简正波是主成分, 其次是 1 号、3 号、4 号、5 号, 这与实际情况是相符合的, 这也说明爆炸源的位置正好是 2 号简正波最大能量的激发深度; 1 号简正波的峰值与 Kraken 计算的结果有一定的偏差, 这是因为水听器阵非等间隔采样, 对简正波深度分布函数的正交归一化没有进行修正, Kraken 计算时假定密度为常数, 海底为平坦砂质海底, 海面假定为平整海面, 这与实际情况有一定偏差, 因此使计算结果有较大偏差。

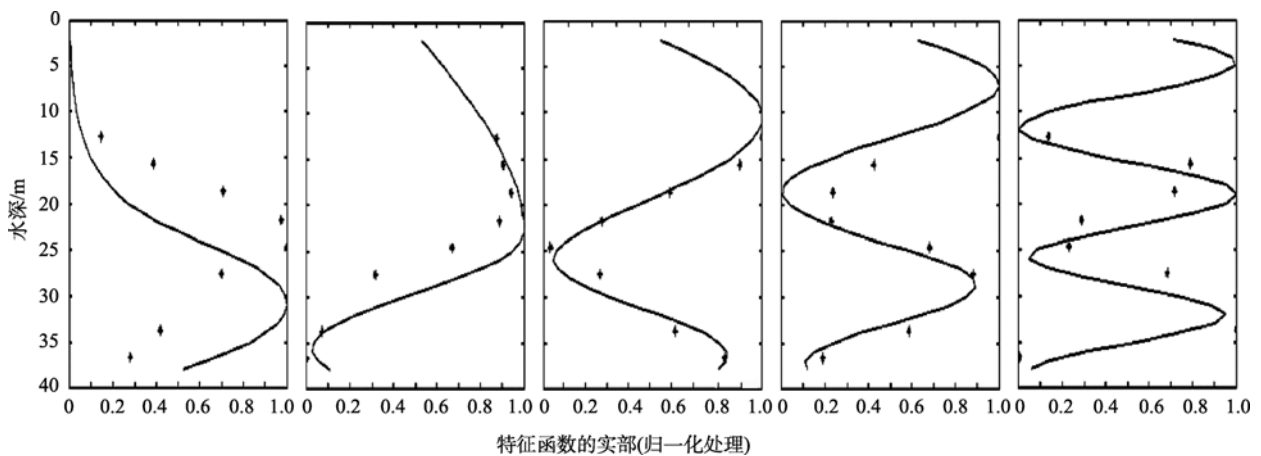


图 6 1—5 号简正波模式图

实线部分为应用 Kraken 程序计算出的简正波特征函数的实部归一化所画出的简正波图形(从左至右依次为 1—5 号),散点线为应用实验数据的矩阵分解计算得出的图形

Fig. 6 The first- to fifth-order modes of propagation

4 总结

本文主要做了两部分的工作。第一部分是传播损失的数据处理,通过 1/3 倍频程滤波对浅海爆炸宽带信号的不同频段在浅海的传播损失情况进行分析。从结果中基本能描述浅海环境对声传播损失的影响,但也存在一些不能解释的问题,例如,前几个点的传播损失异常在不同频率下不一致的现象,有待于进一步的思考解决。第二部分是对利用垂直阵的数据采用 SVD 分解方法提取简正波。该

简正波分离方法在不知道先验信息的条件下,仅通过垂直阵所测得的声压数据就能很好地分离出简正波,但不能分离水平波数和声速剖面,怎样匹配^[5]水平波数和声速剖面需要进一步解决。假如能在获得声场的分布数据以后,反演得出声场的特征函数、特征值、声速剖面以及海底海面参数,将十分有意义。另外本文只对一个站点的数据做了简正波分离,若对本次实验的各个站点做同样的分离,则可以做水平方向的比较,从中得出一些有用的信息。

参考文献

- [1] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 69-169.
- [2] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2002: 16-19.
- [3] 布列霍夫斯基. 海洋声学[M]. 北京: 海洋出版社, 1985: 146-152.
- [4] NEILSEN T B, WESTWOOD E K. Extraction of acoustic normal mode depth functions using vertical line array data[J]. J Acoust Soc Am, 2002, 111: 748-756.
- [5] HURSKY P, HODGKISS W S, KUPERMAN W A. Matched field processing with data-derived modes[J]. J Acoust Soc Am, 2000, 109: 1355-1366.