

浅海负跃层海底单参数模型研究

赵 梅^{1,2}, 胡长青¹

(1. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032; 2. 中国科学院大学, 北京 100190)

摘要: 海底反射特性在浅海声传播中起着决定性的影响。用小掠射角下海底反射损失随掠射角变化率 F_{dB} 构建单参数模型可很好地描述浅海海底特性。对单参数模型进行深入研究和改进, 建立了在浅海负跃层条件下描述水下声场的海底单参数模型, 并利用数值仿真和海上实验数据, 对浅海负跃层海底单参数模型水下声场预报的正确性进行了验证。

关键词: 海底单参数模型; 浅海负跃层; 声场预报

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-02-0103-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.02.001

Research on the single parameter seabed model for underwater acoustics field prediction in thermocline shallow water

ZHAO Mei^{1,2}, HU Chang-qing¹

(1. Shanghai Acoustic Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The sound propagation in shallow water is dominated by the seabed reflection properties. The slope of bottom loss versus grazing angle F_{dB} (dB/radian) was proposed as the single parameter to describe the characteristics of sea bottom. Accordingly, a single parameter seabed model was established. In this paper, further research on the single parameter seabed model is conducted. Through the improvement, this advanced single parameter model could be applied to predicting underwater acoustics field in thermocline condition. The improved model's applicability to underwater acoustics field prediction in thermocline shallow water is proved by numerical simulation and experimental data.

Key words: single parameter seabed model; thermocline shallow water; acoustics field prediction

0 引 言

人们通常通过建立地声模型来研究海底性质。对于地声模型的建立, 从理论上讲, 一方面, 海底沉积环境复杂和区域环境相差明显, 实际的海底不可能由任何单一的地声模型来确定。过于精细的模型往往在某种类型海底下与实验符合较好, 其他环境下就不再适用。而一般化的简单模型在一定程度上可以简化沉积物本身的复杂性和区域的特殊性, 具有较好的普适性; 另一方面, 根据获取海底信息的目的, 海底参数反演需要用尽可能简单的等效模型, 反演出等效海底参数用于预报海洋中的声场^[1]。由此可见, 对简化的地声反演模型进行研究的重要性不亚于复杂模型。

从实际应用来讲, 理解和评估海洋中的声传播, 至少需要用到沉积层的密度、声速和声衰减系数等参数, 某些复杂的模型还需要弹性系数以及分层信息等, 为获取这些物理量, 以匹配场^[2]为代表的一系列反演办法都是多维地声模型上的多参数反演。这种多维反演过程可看作是对多维参数的求解, 不仅加大了海上测量的复杂程度, 信号处理比较复杂, 而且各个参数的敏感性以及参数间的耦合常常令操作者在效率和稳健性上进退维谷。绝大多数多维反演都需要整合测量数据和事后处理, 难以在日常海上作业中即时使用。

国内外许多声学工作者, 如 Etter^[3]、尚尔昌^[4]等均提到在大量实测数据中浅海声场有一个显著的特征: 小掠射角下海底反射损失随掠射角变化率 F_{dB} (dB/rad)呈近似线性。近年来我们提出用该单个参数 F_{dB} 来表示海底反射性质, 构建单参数模型描述海底声学特性, 对水下声场进行预报, 并设计了一些时域反演方法, 取得了一些阶段性成果^[5-7], 但仍存在一定的局限性。

收稿日期: 2015-01-08; 修回日期: 2015-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11174323)。

作者简介: 赵梅(1984—), 女, 江苏泰兴人, 博士研究生, 研究方向为水声技术。

通讯作者: 赵梅, E-mail: zhaomei@mail.ioa.ac.cn

在之前的研究中,单参数模型描述水下声场的理论是在浅海可以近似为均匀水层的前提下建立的,然而在实际运用中,大部分声场环境为非均匀浅海,当声速剖面为强跃层时,之前建立的单参数模型描述声场理论将不再适用^[8]。本文在前期的单参数模型研究基础上,基于平滑平均理论进行推导,得到了在浅海负跃层条件下用单参数 F_{dB} 表示水下声场的关系表达式,并利用数值仿真以及实验数据进行了验证,扩展了单参数模型描述水下声场的适用范围。

1 单参数模型简介

根据大量观测数据中小掠射角下反射损失随掠射角似线性增长的规律,提出以小掠射角下反射损失随掠射角的变化率 $F_{dB}(\text{dB/radian})$ 作为描述海底性质的单参数。定义单参数 F_{dB} 与海底反射损失 BL 及掠射角 φ 的关系表示为

$$BL = F_{dB} \cdot \varphi \quad (1)$$

由于超过临界角的反射声衰减非常快,一定距离后对浅海声场的影响可以忽略,浅海声场主要由小掠射角下的反射声控制,所以单参数模型在方便快速反演的同时能较好地描述声场。

声源声强 I_0 在距离 r 处的声强 I 的单参数表达式^[2]为

$$I = \int_0^N \frac{\lambda I_0}{H^2 r} \exp\left(-\frac{l^2 \lambda^2 r F}{8H^3}\right) \quad (2)$$

式中: l 为简正波号数; H 为海深; λ 为波长; 有效简正波数 $N = 2H/\lambda$, 且

$$F = F_{dB} / (10 \lg e) \quad (3)$$

场强表达式(2)中,波长 λ 为一常数,因此计算波长 λ 时只能使用海水平均声速,即海水视为等声速剖面,该式无法应用于非均匀海水情况。下面将研究在负跃层条件下可描述水下声场的单参数模型理论。

2 浅海负跃层单参数模型理论推导

负跃层声场具有明显的深度结构,它的深度结构不像负梯度那样具有随深度连续变化的特性。由于跃层下往往是梯度很小的近等温层,因此将其简化抽象为两个均匀层组成的理想跃层。本文主要讨论“强跃层”情况。对于理想跃层,按照极点分布有两类简正波,第 I 类简正波($k_0 < k_l < k_0'$),我们称为“层下波”,第 II 类简正波($k_l < k_0$),我们称为“穿

透波”,如图 1 所示。 k_l 、 k_0 和 k_0' 分别为理想跃层简正波水平波数、跃层上层简正波水平波数和跃层下层简正波水平波数。

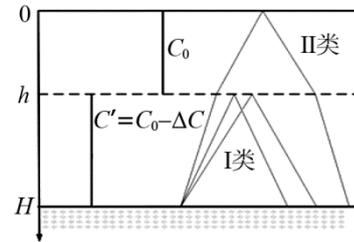


图 1 理想负跃层环境

Fig.1 Ideal model for thermocline environment

我们从平滑平均声场理论出发,推导在浅海负跃层条件下,“层下波”和“穿透波”用单参数 F 描述的场强表达式。

在理想负跃层条件下,对远场有主要贡献的主导简正波可以表示为:

$$I(r, z, z_0) = \begin{cases} I_1 + I_2, & h < (z, z_0) < H \\ I_2, & (z, z_0) < h \end{cases} \quad (4)$$

式中: I_1 为“层下波”平均场强; I_2 为“穿透波”平均场强; (z, z_0) 代表声源或接收深度的较小值; H 为海深; h 为上均匀层厚度。从该式可以看出,当声源和接收器均位于下方水层时,声场场强包括层下波场强和穿透波场强。当声源和接收器任意一个位于上方水层时,只有穿透波场强。

对于“层下波”,情况类似均匀水层,声强为 I_0 的点源在距离 r 处激发的层下波平均声强 I_1 的简正波声场经过平滑平均处理可以表示为

$$I_1 = \frac{\lambda_0 I_0}{H^2 r} \sum_{l=1}^{l_1} e^{-2\beta_l r} \quad (5)$$

经过一系列与文献[5]中均匀水层类似的推导过程,最终得到层下波平均声强 I_1 的表达式为

$$I_1 = \frac{\lambda_0 I_0}{\tilde{H}^2 r} \sum_{l=1}^{l_1} \exp\left(-\frac{l^2 \lambda'^2 r F}{8\tilde{H}^3}\right) \quad (6)$$

其中: $\tilde{H} = H - h$; β_l 对应 l 号简正波的衰减系数; l 为主导简正波号数, λ' 为下均匀层波长, λ_0 为声源所在层的波长。 l_1 是“层下波”有效简正波数目:

$$l_1 = \frac{2\tilde{H}}{\lambda_0} \sqrt{\frac{2\Delta c}{c_0}} \quad (7)$$

其中,上下两个均匀层声速之差 $\Delta c = c_0 - c'$; c_0 为上均匀层声速; c' 为下均匀层声速。

对于“穿透波”,考虑到穿透跃层前后“声线管”截面较大,理想跃层情况下,声强为 I_0 的点源在距离 r 处激发的穿透波平均声强 I_2 的简正波声场经过平滑平均处理可以表示为

$$I_2(r, z, z_0) = \begin{cases} \left(\frac{\lambda_0 I_0}{r}\right) \sum_{n=1}^{n^*} A_n^{UP} \cdot A_n^{UP} \cdot e^{-2\beta_{l_1+n} r}, & 0 < z_0 < h, 0 < z < h \\ \left(\frac{\lambda_0 I_0}{r}\right) \sum_{n=1}^{n^*} A_n^{UP} \cdot A_n^{DW} \cdot e^{-2\beta_{l_1+n} r}, & h < z_0 < H, 0 < z < h, \text{ or } h < z < H, 0 < z_0 < h \\ \left(\frac{\lambda_0 I_0}{r}\right) \sum_{n=1}^{n^*} A_n^{DW} \cdot A_n^{DW} \cdot e^{-2\beta_{l_1+n} r}, & h < z_0 < H, h < z < H \end{cases} \quad (8)$$

其中： z_0 为声源深度； z 为接收深度； λ_0 为声源所在层的波长； n 为主导简正波号数； n^* 为“穿透波”有效简正波数目：

$$n^* = \frac{2h}{\lambda_0} \sqrt{\varphi_{cr}^2 - \left(\frac{2\Delta c}{c_0}\right)^2} \quad (9)$$

φ_{cr} 为穿透波碰海底的临界角； β_{l_1+n} 为 l_1+n 号简正波的衰减系数，它可以由反射系数和 l_1+n 号简正波对应的跨度 S_{l_1+n} 计算获得：

$$\beta_{l_1+n} = -\frac{\ln|V|}{S_{l_1+n}} \quad (10)$$

$$S_{l_1+n} = \frac{2(H-h)}{\sqrt{\left(\frac{2\Delta c}{c_0}\right)^2 + \left(\frac{n\lambda_0}{2h}\right)^2}} + \frac{4h^2}{n\lambda_0} \quad (11)$$

从而

$$\beta_{l_1+n} = \frac{F \sqrt{\frac{2\Delta c}{c_0} + \left(\frac{n\lambda_0}{2h}\right)^2}}{4\tilde{H} + \frac{8h^2}{\sqrt{\frac{2\Delta c}{c_0} + \left(\frac{n\lambda_0}{2h}\right)^2}} + n\lambda_0} \quad (12)$$

就“穿透波”而言，它碰海底的最小角度为 $\sqrt{\frac{2\Delta c}{c_0}}$ ，又由于大掠射角的反射衰减很大，对声场有效的简正波都存在于临界角内，因此，在“穿透波”中只有那些 n 较小的才占重要位置。

当 n 不是很大，满足条件(13)和(14)时

$$\sqrt{\frac{2\Delta c}{c_0}} \gg \frac{n\lambda_0}{2h} \quad (13)$$

$$\frac{2\Delta c}{c_0} \gg \frac{n\tilde{H}\lambda_0}{4h^2} \quad (14)$$

穿透波 l_1+n 号简正波的跨度 S_{l_1+n} 可表示为

$$S_{l_1+n} = \frac{2\tilde{H}}{\sqrt{\left(\frac{2\Delta c}{c_0}\right)^2}} + \frac{4h^2}{n\lambda_0} \quad (15)$$

从而

$$\beta_{l_1+n} = \frac{F \left(\frac{\Delta c}{c_0}\right)}{2\tilde{H} + \frac{4h^2}{n\lambda_0} \sqrt{\frac{2\Delta c}{c_0}}} \quad (16)$$

经过上述理论推导，得到简正波衰减系数 β 的

单参数表达式(16)。将式(16)代入到式(8)中，进而得到“穿透波”平均声强 I_2 用单参数表示的最终表达式：

$$I_2(r, z, z_0) = \begin{cases} \left(\frac{\lambda_0 I_0}{r}\right) \sum_{n=1}^{n^*} A_n^{UP} \cdot A_n^{UP} \cdot \exp\left(-\frac{\left(\frac{\Delta c}{c_0}\right)rF}{\tilde{H} + \frac{2h^2}{n\lambda_0} \sqrt{\frac{2\Delta c}{c_0}}}\right), & 0 < z_0 < h, 0 < z < h \\ \left(\frac{\lambda_0 I_0}{r}\right) \sum_{n=1}^{n^*} A_n^{UP} \cdot A_n^{DW} \cdot \exp\left(-\frac{\left(\frac{\Delta c}{c_0}\right)rF}{\tilde{H} + \frac{2h^2}{n\lambda_0} \sqrt{\frac{2\Delta c}{c_0}}}\right), & h < z_0 < H, 0 < z < h, \text{ or } h < z < H, 0 < z_0 < h \\ \left(\frac{\lambda_0 I_0}{r}\right) \sum_{n=1}^{n^*} A_n^{DW} \cdot A_n^{DW} \cdot \exp\left(-\frac{\left(\frac{\Delta c}{c_0}\right)rF}{\tilde{H} + \frac{2h^2}{n\lambda_0} \sqrt{\frac{2\Delta c}{c_0}}}\right), & h < z_0 < H, h < z < H \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{其中, } \begin{cases} A_n^{UP} = \frac{1}{h + \tilde{H} \sqrt{\left(\frac{n\lambda_0}{2h}\right)^2 / \left(\frac{2\Delta c}{c_0}\right)}} \\ A_n^{DW} = \frac{\sqrt{\left(\frac{n\lambda_0}{2h}\right)^2 / \left(\frac{2\Delta c}{c_0}\right)}}{h + \tilde{H} \sqrt{\left(\frac{n\lambda_0}{2h}\right)^2 / \left(\frac{2\Delta c}{c_0}\right)}} \end{cases} \quad (18)$$

联合式(3)、式(4)、式(6)、式(17)和式(18)，即可得到浅海负跃层条件下，单参数模型表示水下声场的最终表达式。

3 负跃层单参数模型数值仿真验证

3.1 模拟海洋环境

采用半无限大均匀液态海底模型，海底参数的设置源自典型的东海沉积数据，海水声速剖面为强跃层，理想负跃层上均匀层厚度为 35 m，海深为 80 m，中心频率为 200 Hz，忽略海水声衰减(值为 0)，海水密度、声速剖面及海底密度、声速和声衰减等仿真环境参数设置如图 2 所示。

以半无限大液态海底模型为基础，用 Hamilton 吸收-频率关系的 ρ 、 c 、 α 液态海底的瑞利反射损失物理机制考虑海底基本参数压缩波波速 c_1 、密度 ρ_1 以及衰减系数 α (dB/ λ)之间相互耦合的关系，通过文献[5]中的数学近似， F_{dB} 可以表示为

$$F_{dB} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{c}{c_1}\right)^2 \frac{\rho_1 \alpha}{\rho(1 - \left(\frac{c}{c_1}\right)^2)^{3/2}} \quad (19)$$

其中： c 和 ρ 是海底附近的海水声速和密度。

利用公式(19)计算得到海底单参数 F_{dB} 在 200 Hz 时值为 0.82 dB/rad。

海水 $H=80\text{ m}$ $C'=1500\text{ m/s}$	$C_0=1520\text{ m/s}$ $\rho=1.025\text{ g/cm}^3$
液态半无限 海底	$C_p=1650\text{ m/s}$ $\rho=1.92\text{ g/cm}^3$ $\alpha=0.12\text{ dB}/\lambda$

图2 仿真环境
Fig.2 Simulation environment

3.2 浅海负跃层单参数模型声场预报仿真结果

通过计算机数值仿真，来验证负跃层条件下改进后的单参数模型描述水下声场理论的准确性。

根据负跃层单参数模型描述水下声场理论，联合式(3)、式(4)、式(6)、式(17)和式(18)，代入模拟环境参数以及相应的海底单参数 F_{dB} 值来仿真计算图2环境下负跃层单参数模型声场，预报结果如图3所示。

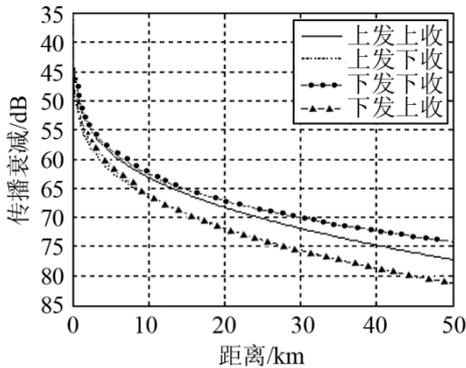


图3 负跃层单参数模型预报声场计算机仿真结果
Fig.3 Transmission losses in thermocline shallow water predicted by the single parameter seabed model

通过图3中负跃层单参数模型声场数值预报结果可以看出，在浅海负跃层条件下，声源、接收位置位于跃层上下的不同，声传播衰减相差会很大。下发下收时的声传播衰减最慢，上发下收或下发上收时的声传播衰减最快。

将负跃层海底单参数模型计算出的传播衰减结果与相同环境下平滑平均声场理论以及 RAM 算法数值计算结果进行比较，图4(a)、4(b)、4(c)和4(d)分别为负跃层条件下，上发上收、上发下收、下发上收和下发下收时三种仿真模型传播衰减计算结果比较图。

从图4可以看出，浅海负跃层条件下，完善后的单参数模型仿真结果与平滑平均声场理论以及 RAM 算法计算结果符合很好，说明本文给出的负

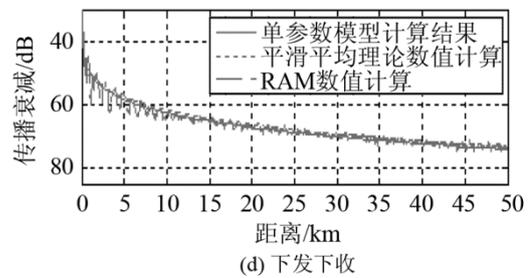
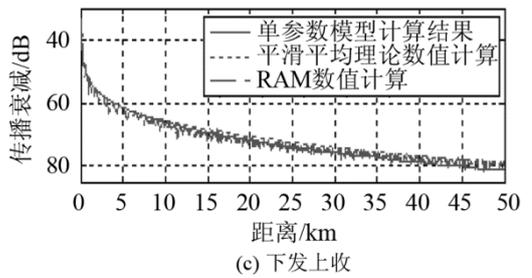
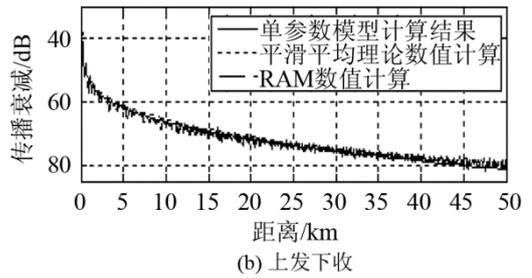
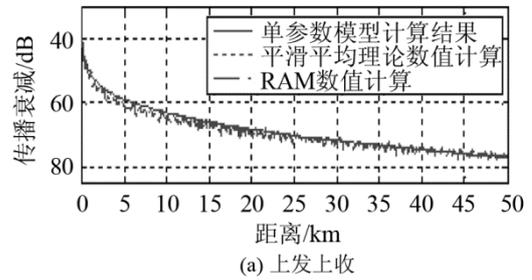


图4 不同模型计算机仿真结果比较
Fig.4 Transmission losses predicted by three computation models (single parameter model, smooth averaged sound field model, RAM model)

跃层单参数模型在仿真条件下可以很好地描述水下声场。

4 负跃层单参数模型实验验证

4.1 实验简介

本文所用实验数据来自 2002 年夏季青岛海域的声传播实验。实验设备布置如图5所示。传播实验海域海深为 43.3 m，海底底质为砂质底中的细砂。海水声速剖面如图6所示。

实验采用“科学一号”和“金星二号”双船作

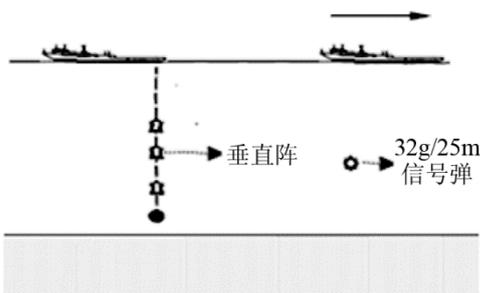


图 5. 实验设备布置图
Fig.5 Equipment disposal in experiment

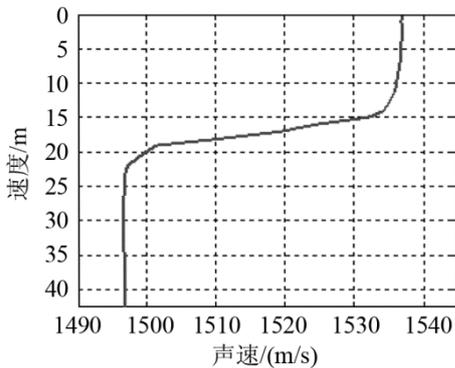


图 6 2002 年青岛实验海域声速剖面
Fig.6 Sound speed profile in the 2002 Qingdao Sea Experiment

业，科学一号船为接收船，到达第 5 站点 (35°24.79' N, 121°29.90'E) 处抛锚，船下挂 16 元垂直水听器阵接收声信号。垂直阵阵元间隔为 2 m，覆盖了从 6.7~36.8 m 深的大部分海域。金星二号船为发射船，直线航行过程中投放 25 m 深度爆炸的 38 g 信号弹，并记录投弹时刻发射船与接收船之间的距离。

4.2 实验数据验证

利用实验数据对负跃层单参数模型描述水下声场的正确性进行验证。实验中，声源爆炸深度为 25 m，位于温跃层下方。接收深度覆盖跃层上下大部分海深范围。

根据负跃层单参数模型计算水下声场时，海底声学参数选用 Hamilton 给出的大陆架和大陆坡沉积层细砂质底时对应的沉积物声学参数，海底声速为 1759 m/s，海底密度为 1.962 g/cm³，海底声吸收系数为 0.523，海底声衰减随频率(kHz)呈一次方关系。利用式(19)计算得实验海底单参数 F_{dB} 在 200 Hz 时值为 0.36 dB/rad，在 1000 Hz 时值为 2.71 dB/rad。传播衰减实验值采用 1/3 倍频程平均，取 16 元垂直水听器阵中分别位于跃层上方和下方的不同水听器接收到的结果。图 7 和图 8 分别为中心频率 200 Hz 和 1000 Hz 时负跃层条件下完善后的单参数模型计算的声传播衰减与实验值的比较图，从图 7 和图 8 可以看出，位于跃层下方的不同深度上

的水听器接收到的声传播衰减实验值与理论预报结果符合较好，位于跃层上方的不同深度上的水听器接收到的声传播衰减实验值分布较为离散，但是其趋势总是在单参数模型计算的理论预报结果附近均匀分布，从而验证了本文推导的负跃层单参数模型描述水下声场的正确性。

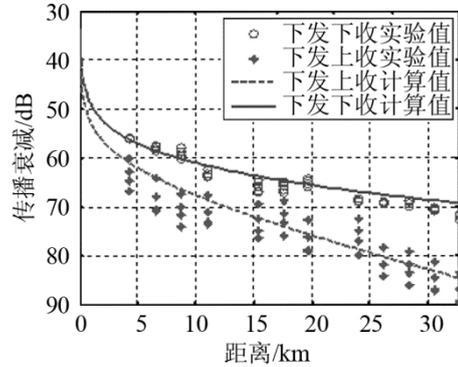


图 7 中心频率 200 Hz，单参数模型理论计算值和实验值的比较
Fig.7 The comparison between theoretical and measured values of TL, for the center frequency of 200 Hz

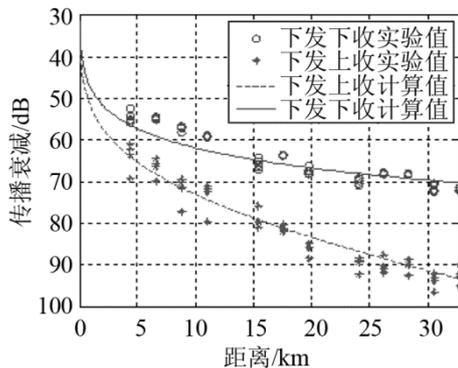


图 8 中心频率 1000 Hz，单参数模型理论计算值和实验值的比较
Fig.8 The comparison between theoretical and measured values of TL, for the center frequency of 1000 Hz

从图 7 和图 8 可以看出，位于跃层上和跃层下的水听器接收到的声传播衰减实验值与理论预报结果符合较好，从而验证了本文推导的负跃层单参数模型描述水下声场的正确性。

5 结论

本文基于平滑平均理论进行推导，得到了浅海负跃层条件单参数表示水下声场的关系表达式。数值仿真和实验数据验证结果表明，改进后的单参数模型可以用于浅海负跃层条件下的水下声场预报，扩展了单参数模型的应用范围，为单参数反演方法的设计提供了新的思路。

致谢：感谢中国科学院声学研究所声场声信息重点实验室为本文模型的验证提供海上实验数据。

参 考 文 献

- [1] Chapman M F. What are we inverting for? in Inversion problems in underwater acoustics[M]. New York: Springer, 2011: 1-5.
- [2] 杨坤德. 水声阵列信号的匹配场处理[M]. 西安: 西北大学出版社, 2008: 2-5.
YANG Kunde. Matched field process acoustic array signal[M]. Xi'an: Northwestern University Press, 2008: 2-5.
- [3] Etter P C. Underwater acoustic modeling and simulation[M]. 3rd Edition, T & FG Spon Press, 2003.
- [4] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 175-261.
WANG Dezhaoh, SHANG Erchang. Underwater acoustics[M]. Beijing: Science Press, 1981: 175-261.
- [5] 屈科, 胡长青, 赵梅. 浅海海底单参数快速反演模型研究[J]. 声学技术, 2011, 31(2): 152-155.
QU Ke, HU Changqing, ZHAO Mei. Single parameter rapid inversion model of shallow water[J]. Technical Acoustics, 2011, 31(2): 152-155.
- [6] 屈科, 胡长青, 赵梅. 利用传播损失反演海底单参数[J]. 声学学报, 2013, 38(4): 472-476.
QU Ke, HU Changqing, ZHAO Mei. Single parameter inversion using transmission loss in shallow water[J]. Acta Acustica, 2013, 38(4): 472-476.
- [7] 屈科, 赵梅, 胡长青. 浅海海底特性及单参数反演研究[J]. 声学技术, 2011, 30(3): 100-102.
QU Ke, ZHAO Mei, HU Changqing. Study on shallow water seabed characteristic and single parameter inversion[J]. Technical Acoustics, 2011, 30(3): 100-102.
- [8] 赵梅, 胡长青, 屈科. 浅海海底单参数模型分析与研究[J]. 声学技术, 2014, 33(6): 494-498.
ZHAO Mei, HU Changqing, QU Ke. Analysis of single parameter seabed model in shallow water[J]. Technical Acoustics, 2014, 33(6): 494-498.