

浅海海底单参数模型分析与研究

赵 梅^{1,2}, 胡长青¹, 屈 科^{1,2}

(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: 介绍了单参数模型, 提出以小掠射角下反射损失随掠射角的变化率 F_{dB} 作为描述海底性质的单参数, 并分析研究了该海底单参数模型的适用性, 分析得到, 当频率不低于数十赫兹且海底沉积物类型属于高声速海底时, 单参数模型可以用来描述海底性质。还研究了海水声速对于海底单参数模型描述水下声场的适用性的影响, 结果表明, 当海水声速剖面可以近似等效为均匀水层时, 可用海底单参数模型对水下声场进行预报应用。

关键词: 单参数模型; 适用性; 声速剖面

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-06-0494-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.06.003

Analysis of single parameter seabed model in shallow water

ZHAO Mei^{1,2}, HU Chang-qing¹, QU Ke^{1,2}

(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: A single parameter seabed model is introduced in this paper, the slope of bottom loss versus grazing angle F_{dB} (dB/radian) is proposed as the single parameter to describe the characteristics of sea bottom. The suitability of the single parameter seabed model is discussed. The single parameter model could be applied to describe the properties of high speed seabed when the frequency is more than tens of Hertz. The model's applicability for underwater acoustic field prediction is also analyzed. The results show that when the sound speed profile could be equivalent to the homogeneous profile, the single parameter seabed model can be applied to predicting the underwater acoustic field.

Key words: single parameter seabed model; suitability; sound speed profile

0 引言

浅海环境中, 海底声学特性对声传播有着重要影响。对浅海海底声学特性进行研究, 一直是海洋声学、海洋地质调查、海洋矿产资源等领域的热点问题之一, 对军事应用也有着十分重要的意义。近年来我们致力于浅海单参数海底模型的研究, 提出用小掠射角下海底反射损失对掠射角 φ 的斜率 F_{dB} (dB/rad) 作为海底单参数来描述海底性质。该单参数模型是在均匀液态高声速海底反射损失机制基础上进行研究的^[1], 将多个海底声学参数拟合为单个参数, 过程中进行了合理的近似, 因此需要对模型的适用性进行进一步分析和研究。

本文首先对浅海单参数模型进行介绍, 并对该模型的适用性进行了分析, 包括其适用的频率范围和海底沉积物类型。同时介绍了用单参数模型表示水下声场的理论, 该理论是在浅海属于均匀水层的

基础上建立的, 然而在实际运用中, 大部分声场环境为非均匀浅海, 若将其等效成均匀水层, 该模型是否能很好地描述声场, 也是本文分析的一项内容。

1 单参数模型适用性研究

1.1 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} (dB/rad) 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:

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

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, 通过合理的数学近似, F_{dB} 可以表示为^[2]:

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

其中 c 和 ρ 是海底附近的海水声速和密度。

收稿日期: 2014-06-24; 修回日期: 2014-09-19

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, 研究方向为水声物理。

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

1.2 单参数模型频率适用范围研究

单参数模型是基于液态高声速海底模型^[1]，如图 1 所示。公式(2)的推导服从 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，若要该物理机制在很大程度上接近实际情况，需要把频率范围考虑得恰当，限制其低频下限。

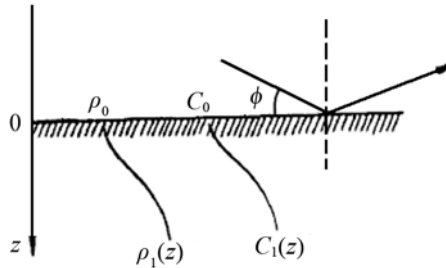


图 1 海底反射模型
Fig.1 Bottom reflection model

考虑该反射损失机制，对于分层结构海底，海底反射损失可以表示为：

$$V(\varphi) = \frac{m \sin \varphi - \frac{1}{ik_0} \left[\frac{Z_1'(0) + \rho_1'(0)}{Z_1(0) + \rho_1(0)} \right]}{m \sin \varphi + \frac{1}{ik_0} \left[\frac{Z_1'(0) + \rho_1'(0)}{Z_1(0) + \rho_1(0)} \right]} \quad (3)$$

其中： φ 为掠射角； k_0 为靠近海底处海水中的波数； $m = \rho_1(0)/\rho_0$ ； $Z_1(z) = dZ_1(z)/dz$ ； $\rho_1'(z) = d\rho_1(z)/dz$ 。 $\rho_1(z)$ 和 ρ_0 分别为海底和海水密度； $Z_1(z)$ 为海底介质中满足辐射条件的 Bergmann 波函数。

对于小掠射角 φ ，当满足条件式(4)时：

$$\left\{ \begin{aligned} & \left| \frac{1}{[k_1^2(0) - k_0^2 \cos^2 \varphi]} \frac{d}{dz} [k_1^2(0) - k_0^2 \cos^2 \varphi]^{1/2} \right| \ll 1 \\ & \left| \sqrt{1 - n_0^2} \right| \gg \left| \frac{1}{\rho_1 k_0} \frac{d\rho_1(0)}{dz} \right| \end{aligned} \right. \quad (4)$$

海底的深部分层结构的影响将不明显，此时反射损失可以由表层参数所描写的瑞利反射表示：

$$V(\varphi) = \frac{m \sin \varphi - \sqrt{n^2(0) - \cos^2 \varphi}}{m \sin \varphi + \sqrt{n^2(0) - \cos^2 \varphi}} \quad (5)$$

频率范围的下限由条件式(4)决定，式(4)中的 $k_1(z)$ 为海底中的波数， n 为界面折射率。

海底沉积层一般 $\frac{\rho_1'(0)}{\rho_1(0)}$ 的数量级约为 10^{-3}m^{-1} ，

因此，对于小掠射角，当频率高于数十赫兹时密度变化可忽略，此时，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，在很大程度上接近实际情况，可采用单参数模型描述海底性质。

1.3 沉积物类型适用范围研究

Hamilton 把沉积层海底分为九类^[3]，第九类为低速海底，反射机制与高速海底不同，故单参数模

型不适用。其余八类海底属“高声速”海底，在小掠射角时，具有良好的反射性能，计算的瑞利反射损失结果如图 2 所示，在小掠射角下瑞利反射损失随掠射角线性增大。

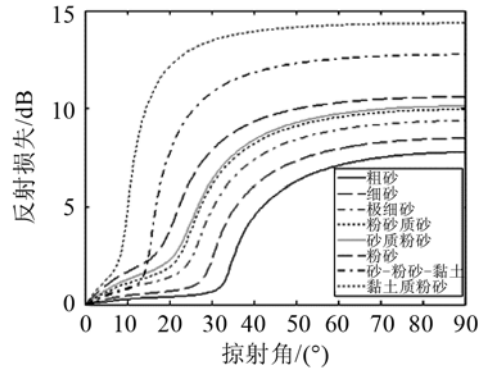


图 2 八种高声速海底反射损失随掠射角变化
Fig.2 Seafloor bottom losses of the eight types of high speed sediments

表 1 给出了 1 kHz 下八种沉积物相应的 F_{dB} 值，由公式(2)计算得出。

表 1 八种沉积物参数
Table 1 Eight sediment parameters

| 沉积类型 | $c_1 /$ (m/s) | $\rho_1 /$ (kg/m ³) | 孔隙率 $n / \%$ | $\alpha /$ (dB/ λ) | $F_{dB} /$ (dB/rad) |
|---------|------------------|------------------------------------|-----------------|--------------------------------|------------------------|
| 粗砂 | 1836 | 2.034 | 38.6 | 0.8708 | 2.1245 |
| 细砂 | 1759 | 1.962 | 44.5 | 0.8879 | 3.1466 |
| 极细砂 | 1709 | 1.878 | 48.5 | 1.0411 | 4.9847 |
| 粉砂质砂 | 1658 | 1.783 | 54.2 | 1.1155 | 8.0519 |
| 砂质粉砂 | 1644 | 1.769 | 54.7 | 1.0659 | 8.9346 |
| 粉砂 | 1615 | 1.740 | 56.2 | 0.9286 | 11.330 |
| 砂-粉砂-黏土 | 1582 | 1.575 | 66.3 | 0.1854 | 3.8333 |
| 黏土质粉砂 | 1546 | 1.489 | 71.6 | 0.1475 | 10.219 |

基于以上 8 种类型沉积物参数，利用单参数模型计算的传播损失与全参数模型(海底密度、声速和声衰减)预报的传播损失进行比较，比较吻合。说明以上 8 种类型均适用。图 3 为细砂质海底类型单参数与全参数预报传播损失比较图。

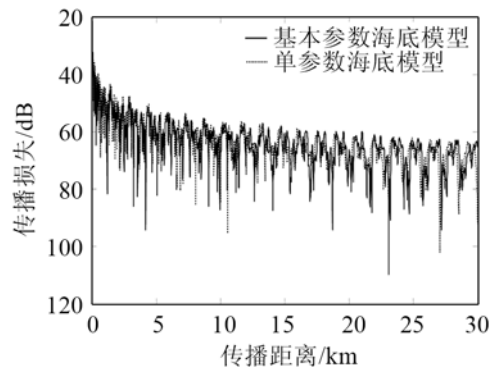


图 3 细砂质均匀半无限液态海底模型中单参数与全参数预报传播损失比较
Fig.3 TL for fine sand seabed: full description and description based on single parameter

2 单参数模型表示水下声场的适用性分析

2.1 理论描述

基于平滑平均声场理论进行推导，得到用单参数模型表示水下声场的公式。声源声强 I_0 在距离 r 处的声强 I 的单参数表达式为^[4]

$$I = \frac{\lambda I_0}{H^2 r} \sum_{l=1}^{N=2H/\lambda} \exp\left(-\frac{l^2 \lambda^2 r F}{8H^3}\right) \quad (6)$$

其中： $F = F_{db} / (10 \log_{10} e)$ ； l 为简正波号数；有效简正波数 $N = 2H/\lambda$ ，其中 H 为海深， λ 为波长。

如式(6)所示，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，即将海水视为等声速剖面。在实际运用中，大部分声场环境并非均匀浅海，此时该理论是否适用，需先对其进行分析。

2.2 海水声速对于单参数模型表示水下声场的影响

利用 2001 年中美联合考察实验数据进行模拟仿真，海底参数为：沉积密度 1.88 g/cm^3 、沉积声速 1692 m/s 、 200 Hz 的 $1/3$ 倍频程内平均声衰减系数 $0.13 \text{ dB}/\lambda$ 。海水深度 105 m ，海水密度 1.025 g/cm^3 、平均声速 1519 m/s 。计算单参数 F_{db} 为 0.7157 dB/rad 。图 4 为计算机仿真利用 Krakenc 计算(瑞利液态海底)模型和单参数模型计算传播损失的比较图，由于 Krakenc 计算时包含了相位关系，表现出声场相干结构，但是其能量总是在单参数模型计算的平滑平均曲线附近均匀分布，两者符合很好，说明当海水声速剖面取等声速时用单参数描述声场是可行、准确的。

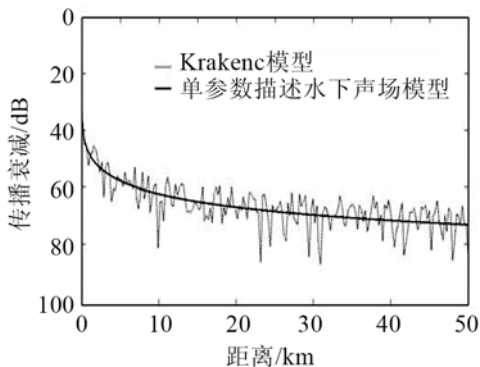
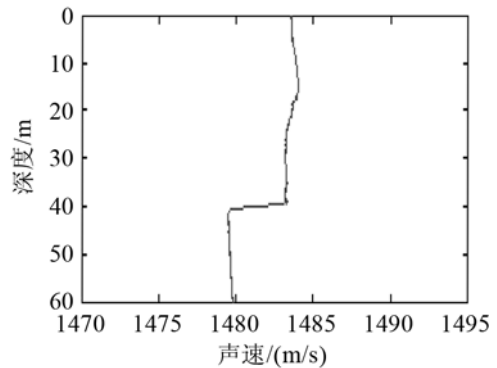


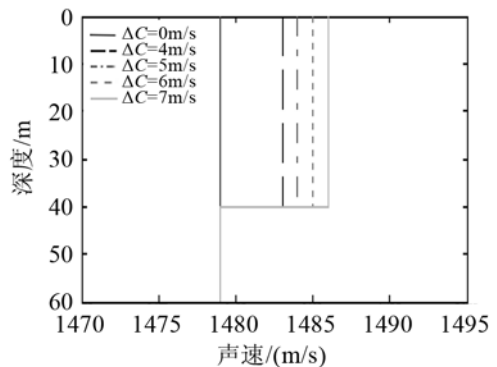
图 4 不同模型计算机仿真比较
Fig.4 Simulations for two computation models (single parameter model, three parameters using Krakenc model)

实际运用中，大部分声场环境为非均匀浅海，尤其在负跃层条件下，声源接收位置不同，声传播损失相差会很大，因此运用单参数模型描述声场时，需先分析声场环境是否可等效成均匀水层。根

据实验海域水声环境，将海水声速剖面简化为上下两个均匀层组成的理想跃层，如图 5(a)和 5(b)所示，图 5 为 2008 年中国北黄海实验中的声速剖面环境及其简化情况，通过数值仿真，计算不同声速剖面下的声传播衰减，研究上下两个均匀层声速之差 ΔC 可以视为“弱跃层”的极限范围。在这种“弱跃层”条件下，预报的声传播衰减结果与等声速剖面条件下的计算结果比较接近。



(a) 北黄海实验声速剖面



(b) 简化的声速剖面

图 5 (a)北黄海实验声速剖面 (b)简化的声速剖面

Fig.5 (a) Sound speed profile in the 2008 Yellow China Sea Experiment (b) the simplified sound speed profile

声源深度取实验中实际爆炸时的声源深度(sd) 25 m ，图 6 和图 7 分别为在图 5 的仿真环境条件下，接收深度(rd)为 20 m 和 50 m 时，不同 ΔC 条件下计算出的海底声传播损失。从图 6 和图 7 可以看出，接收位置位于跃层上方时， ΔC 不超过 6 m/s ，预报的声传播衰减结果与等声速剖面条件下的计算结果比较接近，接收位置位于跃层下方时， ΔC 不超过 3 m/s ，预报的声传播衰减结果与等声速剖面下的计算结果比较接近。在这种 ΔC 不超过 6 m/s 和 3 m/s 的“弱跃层”条件下，单参数模型可以很好地描述水下声场。

当实验海域声速剖面为“弱跃层”，即可近似为等声速剖面时，还需选取适当的等效声速作为计算参数。

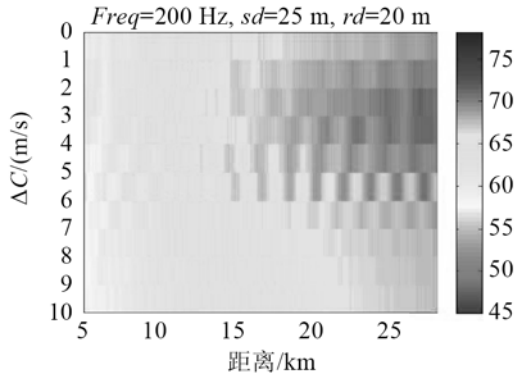


图 6 上发上收, 不同声速剖面下的声传播衰减曲线

Fig.6 Transmission loss diagram calculated for different sound speed profiles, source and receiver in the upper layer

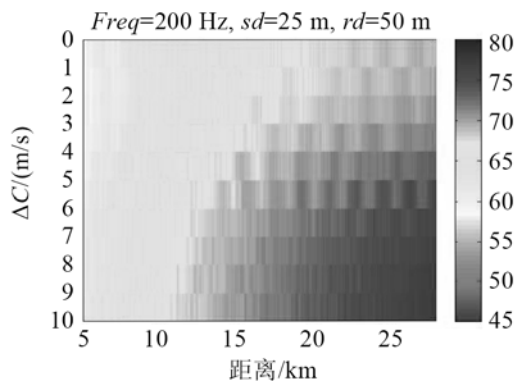


图 7 上发下收, 不同声速剖面下的声传播衰减曲线

Fig.7 Transmission loss calculated by different sound speed profile, source in the upper layer, and receiver in the lower layer

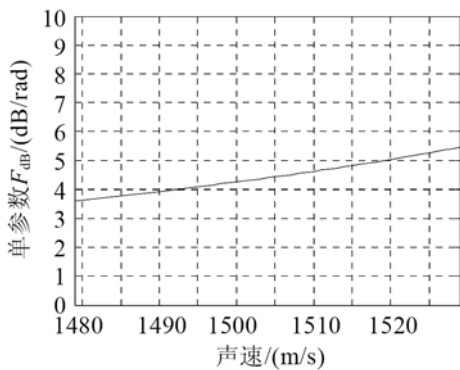


图 8 单参数对海水声速的敏感度

Fig.8 Sensitivity of single parameter to sea water sound speed

图 8 为根据公式(2)计算的单参数对于海底附近海水声速的敏感度, 该图亦反映了均匀浅海条件下频率为 1 kHz 时单参数对海水声速的敏感度。从该图可以看出, 均匀浅海条件下, 海底单参数对海水声速的敏感度不大。

分别取北黄海实验海域海面附近(等声速剖面 1)和海底附近(等声速剖面 2)的声速作为等声速剖面的等效声速值, 与实际跃层声速剖面计算的声传播损失进行比较。图 9 和图 10 分别为北黄海实验中, 中心频率为 200 Hz, 接收深度分别为 20 m 和 50 m 时三种不同声速剖面数值计算的声传播衰减

对比图。图 9 可以看出, 三种不同声速剖面下计算出的传播衰减曲线比较接近, 等效声速选择最大声速(海面附近)和最小声速(海底附近)时对于声场预报的影响很小。此时, 北黄海的海水声速剖面可近似看作等声速, 且等效声速的选取不影响声场预报结果, 可选取声速剖面上任意一值作为等效声速。图 10 中实际跃层声速剖面计算的声传播损失与等声速层的计算结果最大可相差 5 dB, 原因是接收位置位于跃层下方时, 实际声速剖面上下跃层声速差超过了 3 m/s 的极限, 近似“弱跃层”的效果稍差。

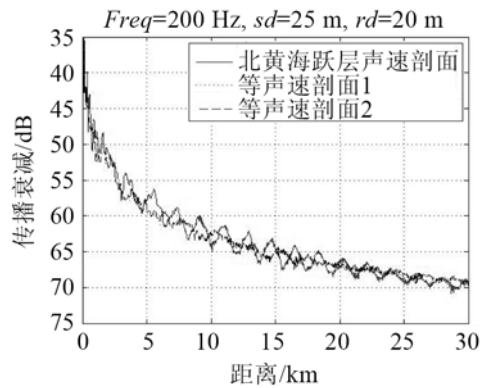


图 9 上发上收, 不同声速剖面下的声传播衰减曲线

Fig.9 Transmission loss curves calculated for different sound speed profiles, source in the upper layer, and receiver in the lower layer

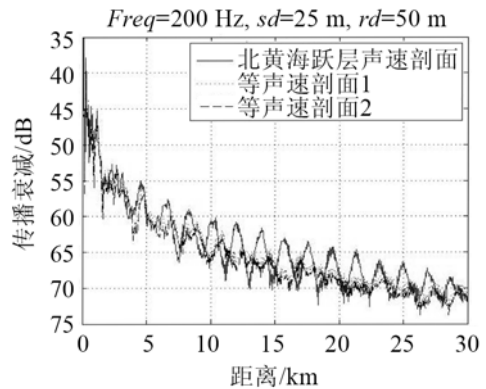


图 10 上发下收, 不同声速剖面下的声传播衰减曲线

Fig.10 Transmission loss curves calculated for different sound speed profiles, source in the upper layer, and receiver in the lower layer

3 结论

(1) 当频率高于数十赫兹时密度变化可以忽略, 此时, Hamilton 吸收-频率关系的 ρ 、 c 、 a 液态海底的瑞利反射损失物理机制, 在很大程度上接近实际情况, 可采用单参数模型描述海底性质;

(2) Hamilton 划分的九类沉积层海底, 第九类为低速海底, 其余八类海底属“高声速”海底, 在小掠射角时, 具有良好的反射性能, 可运用单参数

模型进行描述。

(3) 当海水声速剖面取等声速时, 用单参数模型可以准确地描述水下声场。实际运用中, 大部分声场环境为非均匀浅海, 当其可以等效成均匀水层, 即该声速剖面属于“弱跃层”时, 可用单参数描述水下声场的公式进行声场数值预报。此时进行数值计算, 等效声速的选取对预报结果的影响不大。

参 考 文 献

- [1] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 175-261.
WANG Dezha, SHANG Erchang. Underwater acoustics[M].

Beijing: Science Press, 1981: 175-261.

- [2] 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.
- [3] Hamilton E L. Geoacoustic modeling of the seafloor[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1980, 68(5): 1313-1340.
- [4] 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.