

声场计算模型的环境宽容性分析

秦凯丽^{1,2}, 胡长青¹

(1. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 201815; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 浅海水声环境容易受到各种因素的影响, 导致其环境参数具有很强的不确定性, 依据环境宽容性选择快速、精确的声场计算模型是保证后续研究分析正确性的重要前提。以海水声速为例, 简述了基于传播损失和声场互相关系数的计算模型环境宽容性分析方法。为定量描述环境和声场计算模型的失配情况, 在研究浅海不确定环境对于声场空间相关性影响的基础上, 结合水声环境不确定性推理模型, 得到声场空间相关半径和传播损失概率分布可信区间, 提出利用声场空间相关半径相对值来度量声场计算模型的环境宽容性, 同时利用非嵌入式随机多项式展开 (NON-Polynomial Chaos Expansion, NPCE) 法, 结合差值评定方法对得到的环境宽容区间进行验证, 结果表明, 利用声场相关半径相对值可以定量分析不确定性环境下声场计算模型的宽容性。

关键词: 宽容性分析; 模型失配; 声场空间相关性; 不确定性海洋环境; 非嵌入式随机多项式展开法

中图分类号: O427

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-01-0015-09

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.01.003

Analysis of the environment robustness of acoustic field calculation model

QIN Kai-li^{1,2}, HU Chang-qing¹

(1. Shanghai Acoustics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201815, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The acoustic environment in shallow water is easily affected by various factors, resulting in a strong uncertainty of its environment parameters. Selecting a fast and accurate acoustic field calculation model based on environment robustness is an important prerequisite to ensure the correctness of subsequent research and analysis. Taking the sound speed of water as an example, the environment robustness analysis method based on propagation loss and acoustic field correlation coefficient is described briefly. In order to quantitatively describe the mismatch between environment and acoustic field calculation model, the influence of uncertain environment parameters on the spatial correlation of sound field in shallow sea is studied. Based on the inference model of underwater acoustic environment uncertainty, the confidence interval of spatial correlation radius and the propagation loss probability distribution of the acoustic field are obtained. The relative value of spatial correlation radius of the acoustic field is proposed to measure the environment tolerance of the acoustic field calculation model, and the NON-Polynomial Chaos Expansion (NPCE) method combined with the difference evaluation method is used to verify the environment-robust interval. The results show that the relative value of spatial correlation radius of the acoustic field can be used to quantitatively analyze the robustness of the acoustic field calculation model in uncertain environments.

Key words: robust analysis; model misfit; spatial correlation of acoustic field; uncertain acoustic environment; non-embedded polynomial chaos expansion

0 引言

在统计学领域, Hampel^[1]将宽容性理解为对模型失配不敏感的假设检验方法或技术。在水声领域, 水声环境的不确定性是环境与模型失配的主要原因, 模型包括环境域的声场计算模型和应用域的

检测、定位处理模型。环境域作为观测域和应用域的唯一连接环节, 域中声场计算模型的失配计算结果不仅仅会造成声场预报误差, 还会进一步将失配误差叠加到检测、定位处理模型结果之上^[2]。目前关于环境和模型失配问题的研究和改进主要集中在应用域, 以实现对不确定性水声环境中目标的稳健定位和稳健检测为主要工作^[3-5]。过武宏等^[6]将海洋数值模式同水声传播模型进行耦合, 尝试建立了海洋-声学耦合数值模式, 但主要目标是对动态水声环境不确定性的估计和分析。目前的工作甚少涉及到环境和声场计算模型失配或者说是声场计算模

收稿日期: 2018-03-04; 修回日期: 2018-05-14

作者简介: 秦凯丽(1993—), 女, 山东日照人, 硕士, 研究方向为水声技术。

通讯作者: 胡长青, E-mail: hchq@mail.ioa.ac.cn

型的环境宽容度分析。而且除了水声环境本身的动态扰动,观测数据测量误差也可以计入水声环境参数的不确定性中,考虑到声场计算模型计算结果有效性对于后续研究分析的重要性,有必要对声场计算模型的环境宽容性进行分析。

声场空间相关性是水声领域重要的研究内容,具有十分重要的理论与实践意义。本文利用射线高斯束模型 BELLHOP 对浅海 Pekeris 波导进行数值模拟,先以海水声速为例,简述了基于传播损失和声场互相关系数的计算模型环境宽容性分析方法;然后为定量描述环境和声场计算模型的失配情况,研究了海水声速、海深、海底声速不确定性对于声场空间相关性的影响,结合水声环境不确定性推理模型得到了声场空间相关半径和传播损失概率分布可信区间,提出利用声场空间相关半径相对值度量声场计算模型环境宽容性,同时利用非嵌入式随机多项式展开(NON-Polynomial Chaos Expansion, NPCE)法,结合差值评定方法对得到的环境宽容区间进行验证。

1 基本原理

1.1 基于传播损失的宽容性分析

在水声领域,声强度往往是主要观测对象,传播损失是对声波传播一定距离后声强度衰减变化的定量描述。水声环境不确定性会导致声强度的变化,故可以按照实际应用要求,设定观测点的传播损失阈值,得到声场计算模型的环境宽容区间,假设在实际应用中此阈值范围内声场计算模型对环境变化不敏感。

1.2 基于声场互相关系数的宽容性分析

基于传播损失的宽容性分析方法体现的是单纯的声场能量分布变化,并不能充分有效地体现不确定性水声环境参数对于声场的扰动影响,因此,用声场互相关系数综合分析不确定水声环境参数对于声场的影响,某一点 (r, z) 处声场互相关系数定义为^[7]

$$\rho(r, z, \Delta\xi) = \frac{\left| \sum_{i=1}^{N_0} P_0(r, z, \omega_{0i}) \tilde{P}_0(r, z, \omega_{0i}, \Delta\xi) \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_0} |P_0(r, z, \omega_{0i})|^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{N_0} |\tilde{P}_0(r, z, \omega_{0i}, \Delta\xi)|^2}} \quad (1)$$

其中, $\omega_{0i} = 2\pi f_{0i}$ 表示角频率, N_0 为中心频率的频点数, f_{0i} 为宽带信号的中心频率, $P_0(r, z, \omega_{0i})$ 为参考水声环境中声场声压值的均值, $\tilde{P}_0(r, z, \omega_{0i}, \Delta\xi)$ 为水

声环境参数变化为 $\Delta\xi$ 时声场声压值的均值,表达式为^[7]

$$P_0(r, z, \omega_{0i}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P(r, z, \omega_j) \quad (2)$$

$$\tilde{P}_0(r, z, \omega_{0i}, \Delta\xi) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P(r, z, \omega_j, \Delta\xi) \quad (3)$$

其中, N 为带宽内的频点数, $P(r, z, \omega_j)$ 为参考水声环境中声场声压值, $P(r, z, \omega_j, \Delta\xi)$ 为水声环境参数变化为 $\Delta\xi$ 时声场声压值。

1.3 基于声场空间相关性的宽容性分析

1.3.1 水声环境不确定性推理模型

参照文献[2], 利用贝叶斯理论建立水声环境的不确定性推理模型, 水声环境参数的后验概率密度为

$$p(m|d) = \frac{p(d|m)p(m)}{p(d)} \propto L(m)p(m) \quad (4)$$

其中, d 为水声环境的观测数据, m 为传播模型环境参数。水声环境参数 m 的先验概率分布为 $p(d|m)$, 按照统计数据设定, 表征水声环境参数估计值与参数实际观测值之间的相似程度, 也称为似然函数。本文考虑到单纯的声场能量分布变化并不能充分体现水声环境参数不确定性对于声场的扰动影响, 故采用复声压值获得最大似然函数 L 为^[2]

$$L(m) = \prod_{f=1}^N \frac{1}{(\pi v_f)^M} \exp \left(\frac{-B_f(m) \cdot \sum_{i=1}^M |P_{if}^{obs}(m)|^2}{v_f} \right) \quad (5)$$

其中, N 、 M 分别表示频点数和线阵的阵元数, V_f 为线阵的信噪比, $B_f(m)$ 为 Bartlett 处理器的关于声压的相关性函数^[7]:

$$B_f(m) = 1 - \frac{\left| \sum_{i=1}^M P_{if}^{obs}(m) P_{if}^{cal*}(m) \right|^2}{\sum_{i=1}^M |P_{if}^{obs}(m)|^2 \sum_{i=1}^M |P_{if}^{cal*}(m)|^2} \quad (6)$$

式中, $P_{if}^{obs}(m)$ 、 $P_{if}^{cal}(m)$ 分别表示在传播模型环境参数为 m 、频率为 f 时, 第 i 个水听器的实测声压值、水声传播模型计算声压值, “*” 表示共轭。

至此, 可以利用贝叶斯理论和马尔科夫链蒙特卡洛算法的 M-H 抽样方法^[2], 以 Bartlett 处理器关于复声压的相关性函数计算得到的似然函数作为声场扰动指标, 得到符合水声环境参数后验概率分布的大量样本。利用这些样本一方面可以修正水声环境参数的先验知识, 另一方面可以得到包含水声环境参数不确定性估计的应用域参数的概率分布和 80% 可信区间^[2], 本文的应用域参数选择声场空间相关半径和传播损失。

1.3.2 声场的空间相关性描述

声场相似程度可以通过空间上存在一定间距(垂直或者水平)的两个接收点之间的声场空间相关性来定量描述,包括垂直相关性和水平相关性。在水声实际应用中,声场的垂直和水平起伏变化分别反映了海洋声场在深度和水平方向上的稳定性。

声场的空间相关系数可以表示为^[8]

$$\rho_{12}(z, \Delta z) = \frac{\left| \sum_{i=1}^N P_1(r, z, \omega_i) P_2^*(r, z + \Delta z, \omega_i) \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |P_1(r, z, \omega_i)|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N |P_2(r, z + \Delta z, \omega_i)|^2}} \quad (7)$$

$$\rho_{12}(r, \Delta r) = \frac{\left| \sum_{i=1}^N P_1(r, z, \omega_i) P_2^*(r + \Delta r, z, \omega_i) \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |P_1(r, z, \omega_i)|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N |P_2(r + \Delta r, z, \omega_i)|^2}} \quad (8)$$

其中, $\rho_{12}(z, \Delta z)$ 和 $\rho_{12}(r, \Delta r)$ 分别表示垂直相关系数(两个接收点垂直间距为 Δz)和水平相关系数(两个接收点水平间距为 Δr), N 为频点数, z 、 r 分别表示参考接收点的深度和它与声源间的水平距离, $\omega_i = 2\pi f_i$ ($i=1, \dots, N$) 为角频率, P_1 和 P_2 分别表示两个接收点同时接收到的复声压信号谱。

声场空间相关半径是声场空间相关性的体现形式,水声环境参数不确定性会导致声场相关半径的起伏变化。为定量描述海洋环境参数不确定性对于相关性(垂直和水平)的影响,以声场空间相关半径的相对变化值 γ 来研究声场计算模型的环境宽容性, γ 表示为

$$\gamma = \frac{R_i}{R_0} \quad (i=1, \dots, I) \quad (9)$$

其中, R_i 表示相关半径,即相关系数为 0.707 时对应的阵元间距, i 对应于选定的海洋环境参数的变化范围, I 表示参数样本数,参考半径 R_0 为海洋环境参数设置为参考值时对应的相关半径。显然, γ 在一定区间 $[\chi_1, \chi_2]$ 范围内可以保证计算模型对于不确定性水声环境的适应性,宽容阈值 $\chi_{1,2}$ 可由声场空间相关半径的可信区间^[2]来确定。

1.3.3 非嵌入式随机多项式展开法

目前研究海洋环境参数不确定性对声传播的影响主要有两种方法:(1)蒙特卡洛(Monte Carlo, MC)法^[9]:该方法易理解和实现,但计算量大,效率低;(2)随机多项式展开(Polynomial Chaos Expansion, PCE)法^[10]:分嵌入式 PCE 法和非嵌入式 PCE(NPCE)法,其基本思想是将声场近似表示成未知系数和已知概率分布的环境参数的多项式,可以

大大减少计算量,但嵌入式 PCE 法需要根据实际需要修改声场计算模型的计算过程,而 NPCE 法可以直接利用现有的声场计算模型,避免了复杂的推导过程,应用性更广。本文将利用 NPCE 法结合传播损失差值评定方法,对提出的宽容性系数进行验证,其中传播损失阈值可按照传播损失 80%可信区间^[2]来确定。

NPCE 理论方法:浅海不确定环境参数可以表示成标准随机变量函数式,进而声场可以近似表示成未知系数和已知概率分布的环境参数的多项式^[10]:

$$\tilde{P}(\xi) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i H_i(\xi) \approx \sum_{i=0}^N A_i H_i(\xi) \quad (10)$$

其中, ξ 为浅海环境不确定环境参数,在本文中为 Pekeris 波导海水声速、海深、海底声速, A_i 为待求多项式系数, $H_i(\xi)$ 为关于不确定环境参数的随机变量函数式,与 ξ 的分布类型有关,如均匀分布时选择 Legendre 多项式;指数分布时选择 Laguerre 多项式;正态分布时选择 Hermite 多项式。本文假设 Pekeris 波导的三种不确定环境参数服从截断正态分布,多维 m 阶 Hermite 多项式表示为

$$H_m(\xi_1, \dots, \xi_m) = (-1)^m \exp\left(\frac{1}{2} \xi^T \xi\right) \frac{\partial^m}{\partial \xi_1 \dots \partial \xi_m} \exp\left(-\frac{1}{2} \xi^T \xi\right) \quad (11)$$

随机选取 K 个配点,利用声场计算模型计算声场 P_j ($j=1, \dots, K$),将 P_j 与多项式预估声场值 $\tilde{P}_j$ 求方差值 σ ,可以得到关于不确定环境参数和待求系数之间的等式:

$$\sigma = \sum_{j=1}^K (P_j - \tilde{P}_j)^2 = \sum_{j=1}^K \left[P_j(\xi_j) - \sum_{i=0}^N A_i H_i(\xi_j) \right]^2 \quad (12)$$

由最小方差原理知:式(12)两边对 A_i 求导, σ 在 A_i 处取得极值,有:

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^K H_0(\xi_j) H_0(\xi_j) & \dots & \sum_{j=1}^K H_0(\xi_j) H_N(\xi_j) \\ \vdots & & \vdots \\ \sum_{j=1}^K H_N(\xi_j) H_0(\xi_j) & \dots & \sum_{j=1}^K H_N(\xi_j) H_N(\xi_j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ \vdots \\ A_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^K P(\xi_j) H_0(\xi_j) \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^K P(\xi_j) H_N(\xi_j) \end{bmatrix} \quad (13)$$

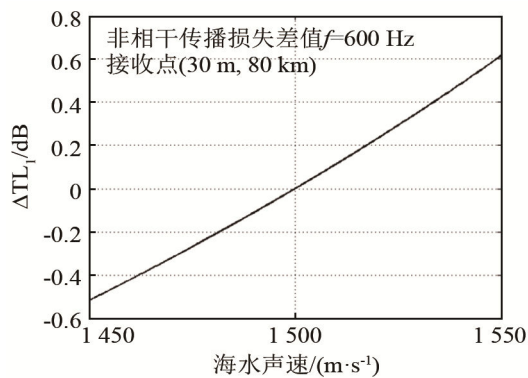
求解式(13)即可得到多项式系数,进而得到声场的多项式表达式,后续就可以利用多项式进行特性统计,例如:对多项式求导可以得到声场对于某个不确定环境参数的灵敏度等。

2 仿真实验与分析

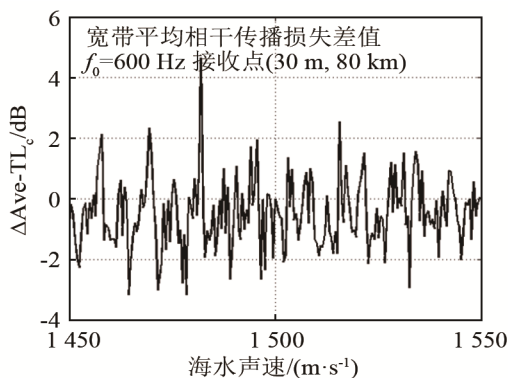
基本仿真环境设置如下：假设海水的密度为 $1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，海水的吸收系数为 $7.5\times 10^{-5}\text{ dB}\cdot\lambda^{-1}$ ；海底为无限均匀半空间，海底的密度为 $1\,575\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，衰减系数为 $0.165\text{ dB}\cdot\lambda^{-1}$ ；声源深度为 30 m ，假设海面是声压自由边界。声场计算模型为 BELLHOP，宽带频率范围为 $550\sim 650\text{ Hz}$ 。

2.1 基于传播损失和声场互相关系数的宽容性分析

本文选用带宽内相干传播损失平均值和 600 Hz 时非相干传播损失进行基于传播损失的宽容性分析。以海水声速存在不确定性为例，以海水声速为 $1\,500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、海深为 100 m 、海底声速为 $1\,800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的平坦水声环境为参考，得到固定点(30 m , 80 km)处传播损失差值和声场互相关系数随海水声速的变化曲线如图 1、2 所示，发现在海水声速变化区间内，(1) 非相干传播损失差值 ΔTL_1 与海水声速变化值大致呈线性关系；(2) 宽带内平均相干传播损失差值 $\Delta\text{Ave-TL}_C$ 和声场互相关系数随着海水声



(a) ΔTL_1 随海水声速的变化曲线



(b) $\Delta\text{Ave-TL}_C$ 随海水声速的变化曲线

图 1 传播损失差值随不确定性海水声速的变化曲线
Fig.1 The variation of the difference of propagation loss with uncertain sound speed of water

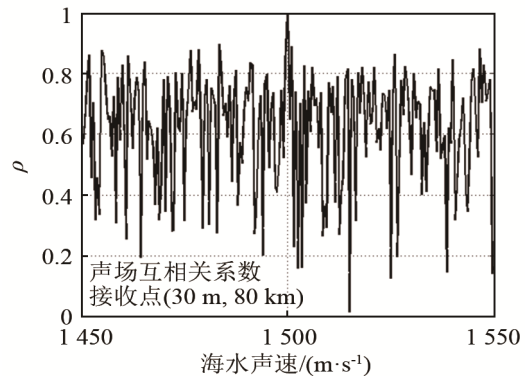


图 2 声场互相关系数随不确定性海水声速变化曲线
Fig.2 The variation of the cross-correlation coefficient of acoustic field (ρ) with uncertain sound speed of water

速变化呈现起伏波动状态。故在应用中，可按照实际应用要求设定观测点的传播损失阈值和声场互相关系数阈值，得到声场计算模型的环境宽容区间。

2.2 基于声场空间相关性的宽容性分析

计算垂直相关性时，接收垂直阵置于距声源水平位置 80 km 处，参考阵元深度为 30 m ；计算水平相关性时水平接收阵置于 30 m 深度处，参考阵元与声源的水平距离为 79.9 km 。海水声速、海深、海底声速三种不确定性海洋环境参数分布取值如表 1 所示。

表 1 不确定性海洋环境参数分布取值
Table 1 The distribution of uncertain marine environment parameters

参数	参考值/ 初值	初始 均方差	变化区间	分布类型
海水声速 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1 500	1	[1 498, 1 502]	截断正态分布
海深/m	100	5	[95, 105]	截断正态分布
海底声速 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1 800	20	[1 770, 1 830]	截断正态分布

2.2.1 海洋环境参数不确定时声场空间相关性

基于上述环境设置，得到声场空间相关性随三种海洋环境参数变化值(相对于参数均值)和阵元间距的变化分布如图 3 所示(图 3(a)、3(c)、3(e)为垂直相关性，图 3(b)、3(d)、3(f)为水平相关性，从上往下依次为海水声速、海深、海底声速)。从图 3 可以看出，声场空间相关性和海洋环境参数值密切相关，声场相关半径随着参数值的变化呈现起伏状态。但图 3 仅能显示声场空间相关性随参数值变化的大致趋势，需要进一步定量描述不确定性海洋环境参数对于两种相关性的影响。

2.2.2 水声环境参数的后验概率密度和可信区间

根据第 1.3.1 节建立的水声环境不确定性推理

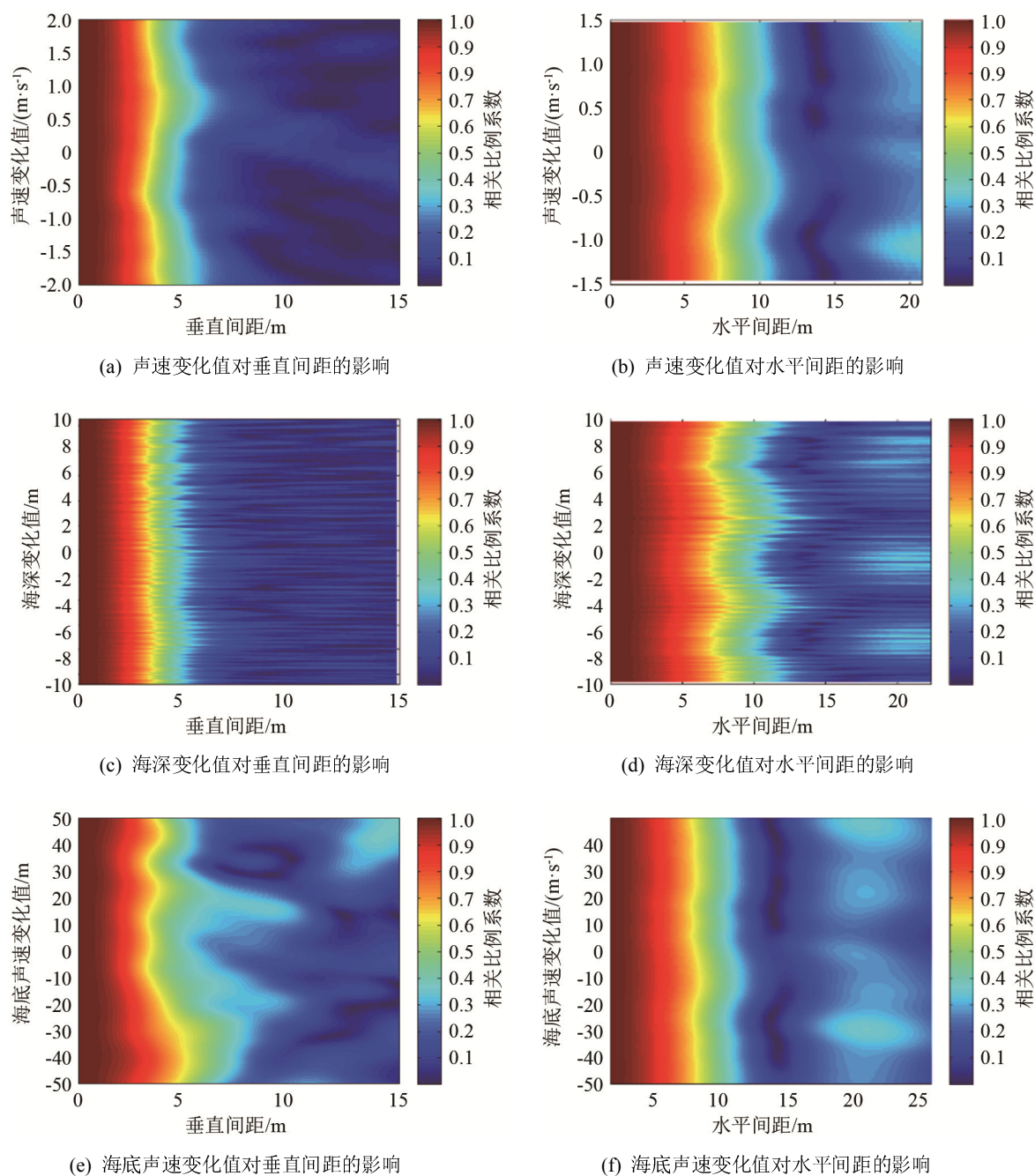


图 3 不确定性海洋环境参数对声场空间相关性的影响

Fig.3 The effects of uncertain marine environment parameters on acoustic spatial correlation

模型,选取垂直线阵和水平线阵两种水听器放置类型,分别计算相应的似然函数,可以得到三种水声环境参数的后验概率密度分布,如图 4 所示。图 4 的结果显示通过此模型获得的水声环境参数的后验概率密度可以对参数的先验分布进行修正,具体修正结果见表 2。

利用符合水声环境参数后验概率分布的大量样本,通过 BELLHOP 计算可以得到包含水声环境参数不确定性估计的固定接收位置处的传播损失

和声场空间相关半径的概率分布和 80%可信区间^[2],可信区间即为两者累计概率分布 10%~90%区间,如图 5、6 所示,其中传播损失是频段内的平均值。

由图 4、5 可知,水声环境不确定性推理模型依据两种水听器阵建立的似然函数得到的水声环境参数、传播损失估计基本一致。将传播损失 TL 和声场空间相关半径 R (其中用 R_h 表示水平相关半径, R_v 表示垂直相关半径)在接收点(30 m, 80 km)处的 80%可信区间总结如表 3 所示。

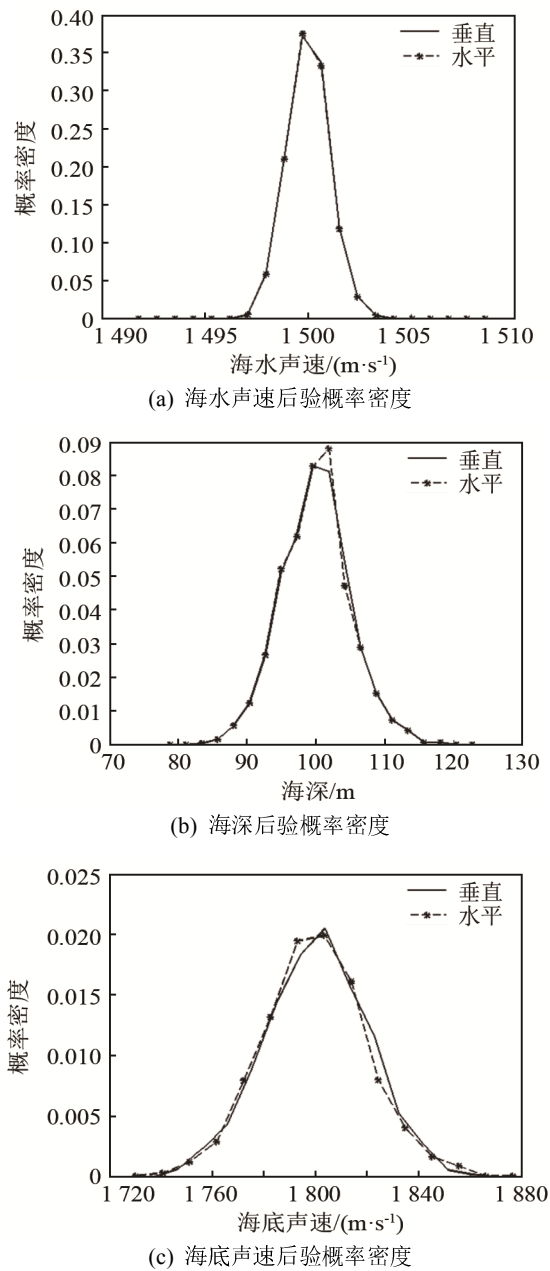


图 4 水声环境参数后验概率密度

Fig.4 The posterior probability densities of underwater acoustic environment parameters

表 2 水声环境参数后验概率密度均值与均方差

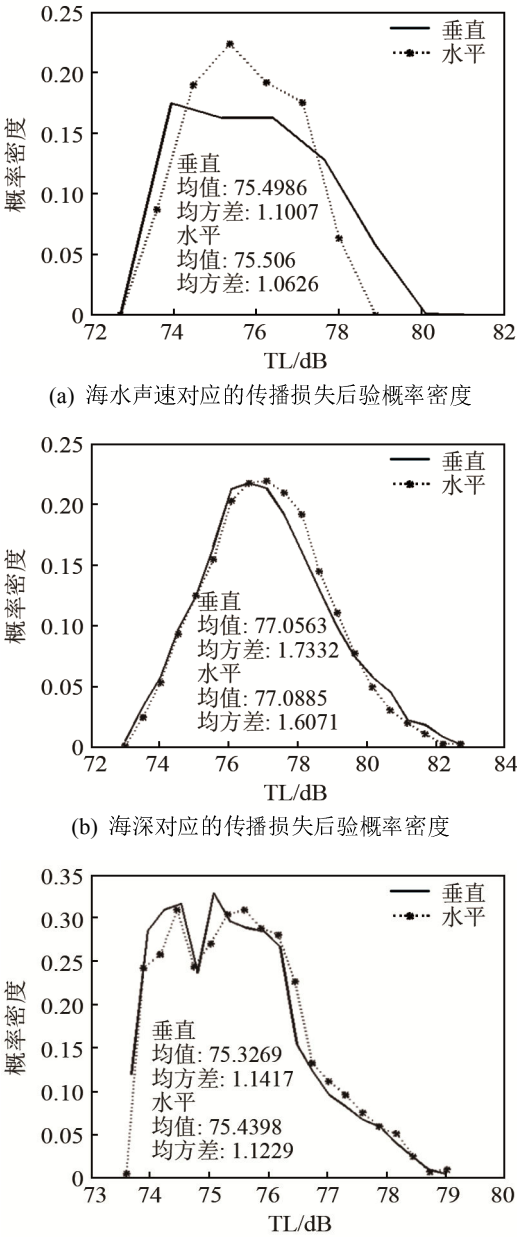
Table 2 Mean and mean variance of the posterior probability density of underwater acoustic environment parameter

参数	后验概率密度均值		后验概率密度均方差	
	垂直	水平	垂直	水平
海水声速/(m·s ⁻¹)	1 500.00	1 500.00	1.01	1.01
海深/m	99.95	99.95	5.02	5.02
海底声速/(m·s ⁻¹)	1 800.40	1 799.80	19.82	20.07

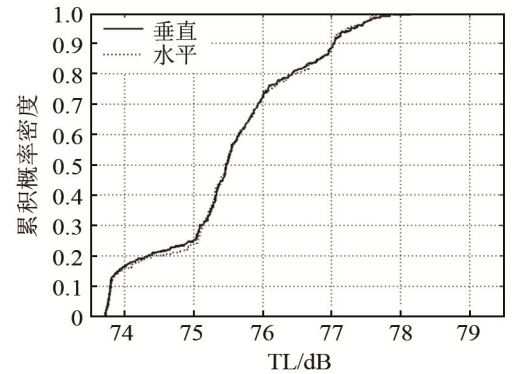
2.2.3 声场计算模型的环境宽容区间

将 2.2.2 节计算得到的声场空间相关半径 R 的可信区间定义为宽容阈值(见表 3), 结合宽容系数(垂

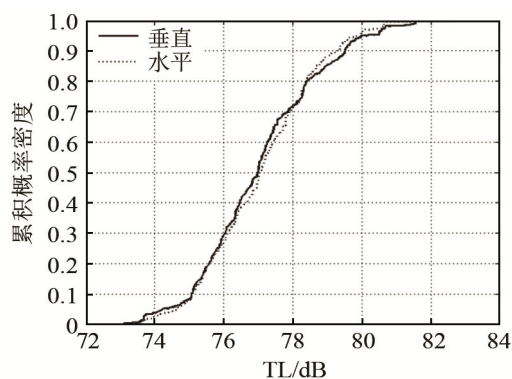
直和水平)随水声环境参数值的变化曲线(见图 7), 取垂直和水平宽容区间的交集可以得到 BELLHOP 模型对于三种水声环境参数的宽容性区间(见表 4)。



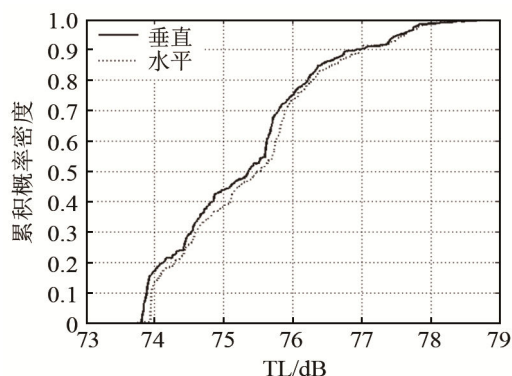
(c) 海底声速对应的传播损失后验概率密度



(d) 海水声速对应的传播损失 80%可信区间



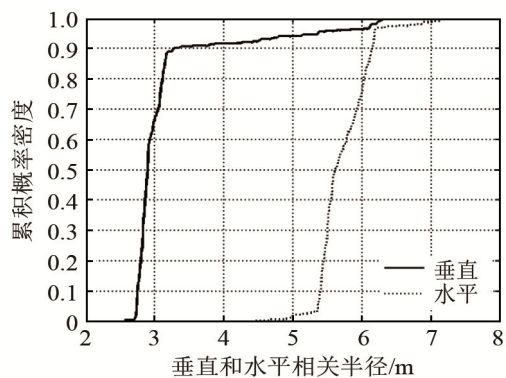
(e) 海深对应的传播损失 80%可信区间



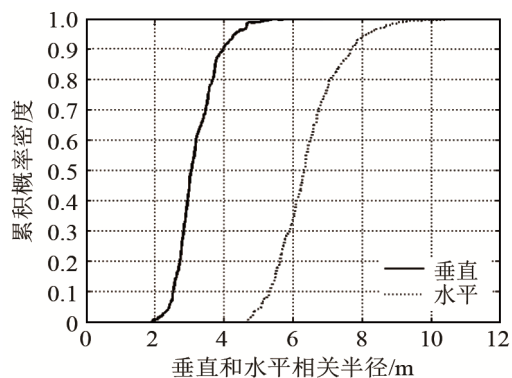
(f) 海底声速对应的传播损失 80%可信区间

图5 在 30 m 和 80 km 处的传播损失概率密度分布及 80%可信区间

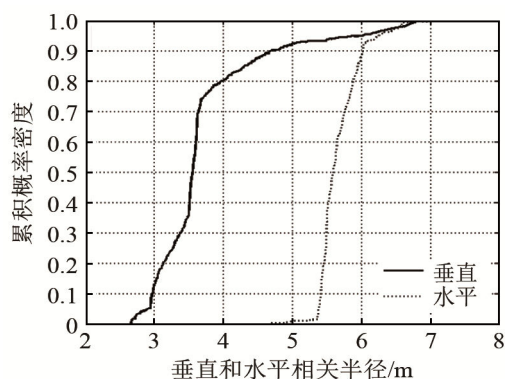
Fig.5 The probability density distribution of propagation loss and 80% confidence interval at 30 m and 80 km



(a) 海水声速对应的声场空间相关半径 80%可信区间



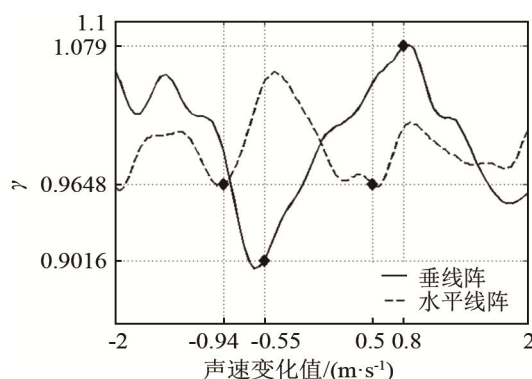
(b) 海深对应的声场空间相关半径 80%可信区间



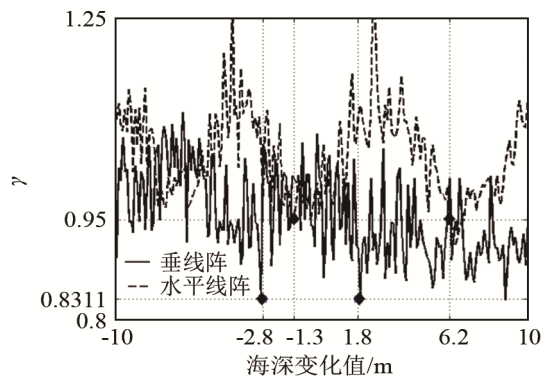
(c) 海底声速对应的声场空间相关半径 80%可信区间

图6 声场空间相关半径 80%可信区间

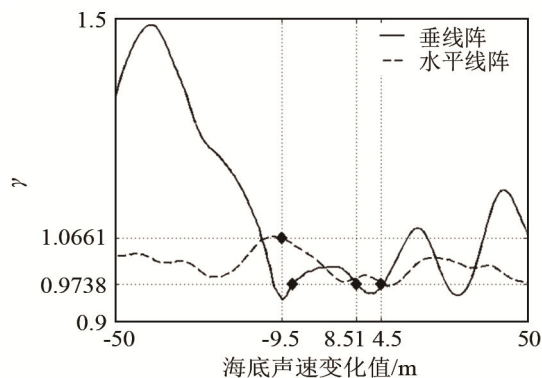
Fig.6 The spatial correlation radius of acoustic field and 80% confidence interval



(a) BELLHOP 模型对于海水声速的宽容区间



(b) BELLHOP 模型对于海深的宽容区间



(c) BELLHOP 模型对于海底声速的宽容区间

图7 BELLHOP 模型对于水声环境参数的宽容区间
Fig.7 The robustness intervals (γ) of BELLHOP model for underwater acoustic environment parameters

表 3 TL 和 R 在 30 m 和 80 km 处的 80%可信区间
Table 3 The 80% confidence intervals of TL and R at 30 m and 80 km

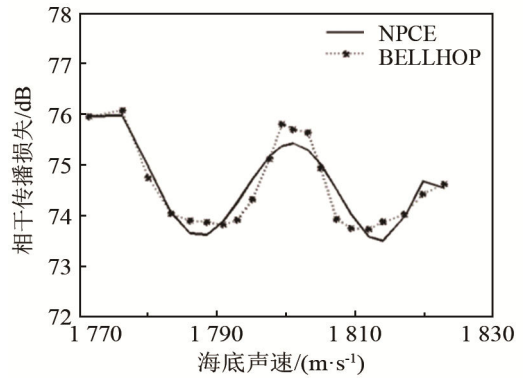
参数	80%可信度区间		
	海水声速	海深	海底声速
TL/dB	[73.81, 77.04]	[75.11, 79.32]	[73.96, 76.98]
R_r /m	[5.400, 6.150]	[5.320, 7.670]	[5.410, 6.030]
R_b /m	[2.749, 3.293]	[2.535, 3.995]	[2.970, 4.710]

表 4 宽容限度结果对比
Table 4 The comparison between robustness limits

参数	$\gamma=R_i/R_0$	差值评定方法阈值
海水声速/(m·s ⁻¹)	[-0.550, 0.500]	[-0.561 2, 0.527 1]
海深/m	[-1.300, 1.800]	[-1.091, 1.722]
海底声速/(m·s ⁻¹)	[-7.000, 8.500]	[-7.286, 8.905]

2.2.4 NPCE 法结合差值评定方法验证

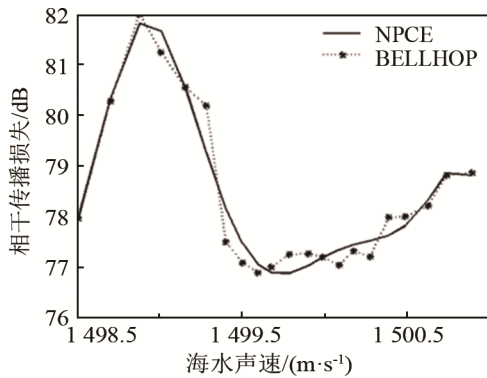
采用 NPCE 法结合差值评定方法验证得到的环境宽容区间: 仿真计算宽带声源(550~650 Hz)在固定接收点($z=30$ m, $r=80$ km)处的相干传播损失。NPCE 法与 BELLHOP 模型计算的相干传播损失结果对比的情况如图 8 所示, 其中海深变化时相干传播损失波动剧烈, 所以采用 15 阶多项式拟合, 其余参数采用 7 阶多项式拟合。由图 8 可知, NPCE 方法可以较高精度地拟合不确定性海洋环境条件下相干传播损失。



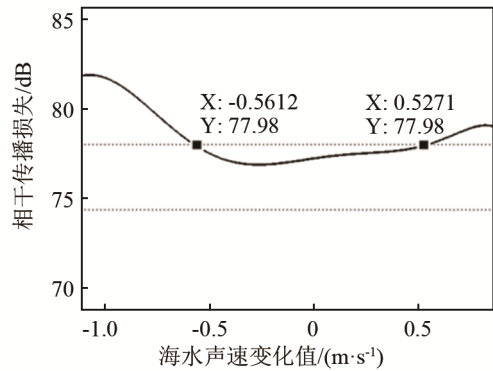
(c) 不同海底声速传播损失对比

图 8 用 NPCE 和 BELLHOP 计算的相干传播损失对比
Fig. 8 Comparison of coherence propagation losses calculated by NPCE and BELLHOP

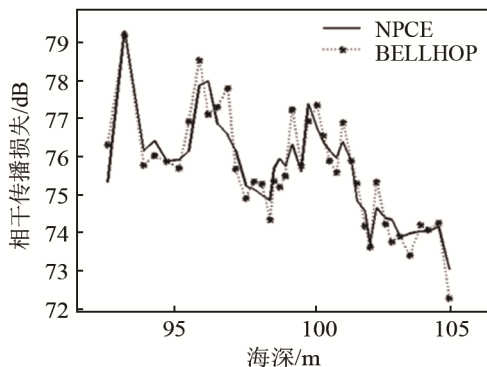
随机产生 10 000 个服从后验概率分布(均值和均方差取两种水听器阵型结果的均值, 见表 2)的海水声速、海深和海底声速值, 计算其对应的声场传播损失估计值, 选用表 3 中传播损失 80%可信区间作为差值评定方法的阈值, 如图 9 所示, 即可得到符合差值评定方法的模型对于不确定性水声环境参数的宽容区间, 与通过宽容系数得到的宽容限度做对比(如表 4 所示), 可以发现: (1) 结果大致相同(存在的较小差值是由计算步长的设置引起的); (2) 海深存在不确定性时, 因为相干声场波动较剧烈, 所以拟合效果略差, 导致得到的宽容区间差异较



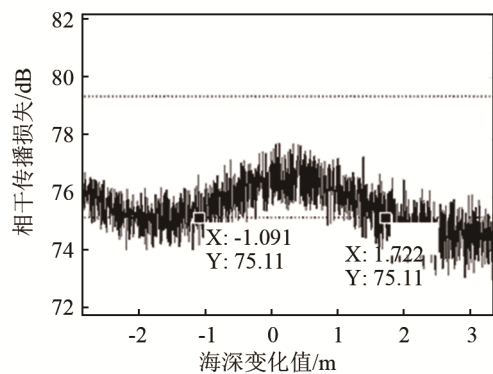
(a) 不同海水声速传播损失对比



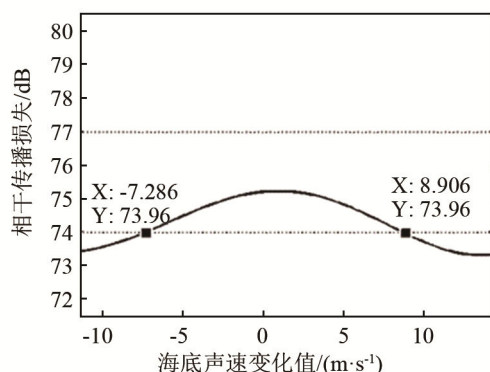
(a) 海水声速宽容区间



(b) 不同海深传播损失对比



(b) 海深宽容区间



(c) 海底声速宽容区间

图9 对于不同水声环境参数的差值评定方法

Fig. 9 Difference evaluation method for different underwater acoustic environment parameters

大。结果表明在相干声场随不确定性参数变化较为平缓时,可以利用声场空间相关半径相对值定量描述不确定性水声环境下声场计算模型的环境宽容性。

3 结论

为探究不确定性水声环境中声场计算模型的环境宽容性,本文先以海水声速为例,利用基于传播损失和声场互相关系数的声场计算模型环境宽容性分析方法,得到了 BELLHOP 模型的环境宽容性分析,结果表明,在实际应用中可以按照性能目标设置相应阈值,得到声场计算模型的具体环境宽容区间。为定量描述环境和声场计算模型的失配情况,本文利用建立的水声环境不确定性推理模型,将应用域中关心的性能参数作为声场扰动指标抽取样本(本文选择 Bartlett 处理器关于声压的相关性函数),进而得到包含水声环境参数不确定性估计的声场空间相关半径和传播损失的 80%可信区间。以这两种性能指标的可信区间分别作为阈值,利用声场空间相关半径的相对值得到声场计算模型的环境宽容性,并通过 NPCE-差值评定方法验证了此区间的正确性。

但是,本文利用声场互相关系数和声场空间相关半径的相对值得到声场计算模型环境宽容性,是对环境与声场计算模型失配分析的初步探索,下一步工作将结合实际的海洋实验对此分析方法进行

可行性验证,并进一步考虑多种水声环境参数不确定性同时存在的情况,提出普适性更强的水声传播模型宽容性分析指标。

参 考 文 献

- [1] HAMPEL F R. A general qualitative definition of robustness[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1971: 1887-1896.
- [2] 过武宏, 笪良龙, 赵建昕. 地声参数及传播损失不确定性估计与建模[J]. 应用声学, 2015, 34(1): 71-78.
GUO Wuhong, DA Lianglong, ZHAO Jianxin. Estimation and modeling of geoacoustic parameters and transmission loss uncertainty[J]. Journal of Applied Acoustics, 2015, 34(1): 71-78.
- [3] 王奇, 王英民, 苟艳妮. 不确定环境下后验概率约束的匹配场处理[J]. 兵工学报, 2014, 35(9): 1473-1480.
WANG Qi, WANG Yingmin, GOU Yanni. Posterior probability constraint matched field processing with environmental uncertainty[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(9): 1473-1480.
- [4] 刘宗伟, 孙超, 吕连港. 不确定海洋环境中基于蒙特卡罗优化的稳健检测方法[J]. 声学学报, 2015, 40(5): 665-674.
LIU Zongwei, SUN Chao, LYU Liangang. A robust signal detection method based on Monte Carlo optimization[J]. Acta Acustica, 2015, 40(5): 665-674.
- [5] 李倩倩, 阳凡林, 张凯. 不确定海洋环境中基于贝叶斯理论的多声源定位算法[J]. 海洋学报, 2018, 40(1): 39-46.
LI Qianqian, YANG Fanlin, ZHANG Kai. Multiple source localization using Bayesian theory in an uncertain environment[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 40(1): 39-46.
- [6] 过武宏, 笪良龙, 赵建昕. 动态水声环境不确定性的估计与分析[J]. 应用声学, 2013, 32(6): 464-472.
GUO Wuhong, DA Lianglong, ZHAO Jianxin. Uncertainty estimation and analysis for dynamic underwater acoustic environment[J]. Journal of Applied Acoustics, 2013, 32(6): 464-472.
- [7] 赵梅, 胡长青. 浅海倾斜海底声场空间相关性研究[J]. 声学技术, 2010, 29(4): 365-369.
ZHAO Mei, HU Changqing. Study of the sound spatial correlation in shallow water with inclined seafloor [J]. Technical Acoustics, 2010, 29(4): 365-369.
- [8] HUANG C F, GERSTOFT P, HODGKISS W S. Uncertainty analysis in matched-field geoacoustic inversions[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2006, 119(1): 197-207.
- [9] 王文博, 黄勇, 李淑秋. 水平不变浅海环境随机扰动对声传播的影响[J]. 应用声学, 2015, 34(1): 90-94.
WANG Wenbo, HUANG Yong, LI Shuqiu. Effects of random environmental disturbance on sound propagation in range-independent waveguide in shallow water[J]. Journal of Applied Acoustics, 2015, 34(1): 90-94.
- [10] 程广利, 张明敏. 浅海不确定声场的随机多项式展开法研究[J]. 声学学报, 2013, 38(3): 294-299.
CHENG Guangli, ZHANG Mingmin. On polynomial chaos expansion method for the uncertain acoustic[J]. Acta Acustica, 2013, 38(3): 294-299.