

动态水声环境不确定性的估计与分析*

过武宏[†] 笪良龙 赵建昕

(海军潜艇学院 青岛 266071)

摘要 水声环境具有强烈的时空易变性,为了解其变化中的规律和产生的不确定性,将 Princeton ocean model (POM) 海洋数值模式和 Parabolic equation (PE) 水声传播模型进行耦合,建立海洋—声学耦合数值模式。对海区的温盐等环境参数和 underwater 声场进行估计,给出了典型断面的温度垂直结构、实验海区声速剖面 and 传播损失。同时,采用集合卡尔曼滤波方法结合海洋—声学耦合数值模式分析了水声环境的不确定性,对不同深度与频率下,传播损失的均值与满足 90% 的可能区间进行了计算,同时给出了不同声速、传播损失的不确定性直方图。和实验数据的对比结果表明该方法具有较高的有效性,能对水声环境的不确定性进行合理的估计。

关键词 水声环境, 不确定性, 海洋模式

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2013)06-0464-09

Uncertainty estimation and analysis for dynamic underwater acoustic environment

GUO Wuhong DA Lianglong ZHAO Jianxin

(Navy Submarine Academy, Qingdao 266071, China)

Abstract Underwater acoustic environment is variable in space and time domain. In order to find out the uncertain characteristics, this paper couples the Princeton ocean model (POM) and parabolic equation (PE) acoustic propagation model, and the ocean-acoustic coupled numerical model is established. Temperature, salt and other parameters of physical ocean and acoustic environment are estimated, the representative vertical temperature section, sound speed profile and transmission loss in experimental sea area are given. Meanwhile, this paper uses ensemble kalman filter and ocean-acoustic coupled model to analyze the uncertainty of acoustic environment. The mean and 90% likelihood interval of transmission loss in different depth and frequency, the uncertain histogram of sound speed, and transmission loss are given. Compared with the experimental data, the results show that the model and approach are valid, they can be used to estimate the uncertainty of underwater acoustic environment.

Key words Underwater acoustic environment, Uncertainty, Ocean model

2012-12-05 收稿; 2013-03-21 定稿

*中国博士后科学基金项目(20110491884)、总装预研基金项目(9140A03060213JB15039)

作者简介: 过武宏(1980-), 男, 浙江杭州人, 博士后, 研究方向: 海洋、水声环境预报与不确定性。

笪良龙(1967-), 男, 教授, 博士。

赵建昕(1969-), 男, 副教授, 博士。

[†]通讯作者: 过武宏, E-mail: g1w2h31980@163.com

1 引言

声波作为水下信息的主要载体, 是潜艇获取信息的重要手段之一。然而, 海洋时域、地域差异悬殊, 并有着极其复杂的周期性和非周期性动态变化, 表现出极强的不确定性。因此, 快速准确地预报水声环境信息是正确估计声纳设备性能, 并进行有效决策的重要依据。目前水声环境信息保障大多是基于历史数据与经验总结出来的确定性描述, 不能给出诸如天气预报之类的动态水声环境预报, 更无法准确推算和估计水下声场不确定性的特点和规律。有必要对动态水声环境不确定性进行估计和分析, 以期更好地掌握水声环境信息。

2 水声环境动态预报

水声学的相关研究是在海水介质中展开的, 因此水声环境与海洋物理环境有着密切的联系, 要实现水声环境的动态预报需要与动态海洋环境相结合, 通过海洋物理环境要素与水声环境参数的耦合关系对水声环境进行动态预报。

海洋—声学耦合数值模式包括海洋动力模型、声学传播模型和地声参数反演模型^[1]。该模型通过海洋动力模型的状态变量和声学计算参数之间的相互传递与影响, 进行声场预报与修正。由于本文的研究采用了实验海区现有的地声参数反演结果, 未考虑地声参数反演模型, 因此文中将不对地声参数反演模型进行论述。那么海洋—声学耦合数值模式一般性的数学模型可表述如下:

2.1 海洋动力模型^[2-7]

水平动量:

$$\frac{Du_h}{Dt} + fe_3 \wedge u_h = -\frac{1}{\rho_0} \nabla_h p_w + \nabla_h \cdot (A_h \nabla_h u_h) + \frac{\partial A_v \partial u_h / \partial z}{\partial z}, \quad (1)$$

垂直动量:

$$\rho g + \frac{\partial p_w}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

热量公式:

$$\frac{DT}{Dt} = \nabla_h \cdot (K_h \nabla_h T) + \frac{\partial K_v \partial T / \partial z}{\partial z}, \quad (3)$$

盐度守恒:

$$\frac{DS}{Dt} = \nabla_h \cdot (K_h \nabla_h S) + \frac{\partial K_v \partial S / \partial z}{\partial z}, \quad (4)$$

质量守恒:

$$\nabla \cdot u = 0, \quad (5)$$

状态方程:

$$\rho(x, y, z, t) = \rho(T, S, p_w), \quad (6)$$

声速方程:

$$c(x, y, z, t) = C(T, S, p_w). \quad (7)$$

以上有关海洋的状态变量主要指温度 T , 盐度 S , 水平流速 u_h , 垂直流速 w , 压力 p_w , 这些量可通过海洋的原始方程式(1)~(6)求得。式中 ρ_0 为参考密度, g 为重力加速度, f 为垂直科氏率, A_v 为垂直涡动粘度, K_v 为垂直扩散率, A_h 为水平涡动粘度, K_h 为水平扩散率。由公式(6)、(7)求得密度 ρ 与声速 c , 传递给水声模型, 实现两者的耦合。 (x, y, z, t) 表示变量的空间位置与时间。

本文采用的海洋数值模式为 POM, 该模式原有的湍流混合较弱, 因此上层混合强度不足造成模拟的夏季海洋表层温度偏高、温跃层强度偏低的情况, 本文在原有的湍流混合的基础上加入波浪混合, 较好的模拟了夏季黄海海域的温度垂直结构。

乔方利等提出了一种将海浪混合作用表达为海浪波数谱的方案^[8]:

$$B_v = \alpha \left(\iint_k E(k) \exp(2kz) dk \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\iint_k \omega^2 E(k) \exp(2kz) dk \right)^{\frac{1}{2}} \right), \quad (8)$$

$E(k)$, ω , k , z 分别为波浪的方向谱、角频率、波数和从海面起算的深度。取常系数 $\alpha = 1$, 这样, 通过波浪数值模式积分可以得到波浪方向谱, 由(8)式可以计算出随时间和空间变化的 B_v 。得出 B_v 后, 将其迭加到动量控制方程中的垂直涡动系数 K_m 和垂直扩散系数 K_h , 得到总的垂向混合系数 K'_m 和 K'_h 。

$$K'_m = K_m + B_v \quad (9)$$

$$K'_h = K_h + B_v \quad (10)$$

这样有效弥补了 POM 海洋数值模式模拟夏季温度上混合层偏浅的缺陷。

2.2 声学模型

考虑到海洋中的水平非均匀性甚至三维的结构特性,海洋——声学耦合模式引入了抛物近似算法模型来进行有关的声场数值计算,抛物近似作为一种纯数值计算方法,尤其适合复杂海洋环境中的声场计算。

抛物方程算法中选取柱坐标系为参考坐标系,则简谐点源在水平变化声道中的声场由三维 Helmholtz 方程^[9]

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + k_0^2 n^2(r, \theta, z) P = 0, \quad (11)$$

及相应的边界条件确定。式中 P 为声压, k_0 为参考波数,对应的 $c_0 = \omega / k_0$ 为参考声速, $n = c_0 / c$ 为介质折射率,这里 c 由海洋动力模型计算提供。

Helmholtz 方程(11)属于椭圆形式的偏微分方程,对距离、辐角和深度的偏导数都存在二阶形式,直接求解比较困难。引入 Tappert 采用的变换

$$P(r, \theta, z) = u(r, \theta, z)v(r), \quad (12)$$

其中, $v(r)$ 为 P 中随 r 显著变化部分, $u(r, \theta, z)$ 则是 P 中随 r 缓变部分。

将式(12)代入式(11)得到:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + k_0^2 v = 0, \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{2}{v} \frac{\partial v}{\partial r} \right) \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + k_0^2 [n^2(r, z) - 1] u = 0. \quad (14)$$

方程(13)的解为零阶第一类 Hankel 函数:

$$v(r) = H_0^{(1)}(k_0 r), \quad (15)$$

在远场近似的条件下,即 $k_0 r \gg 1$,

$$v(r) = H_0^{(1)}(k_0 r) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi k_0 r}} e^{i(k_0 r - \pi/4)}, \quad (16)$$

将(16)式代入到(14)式中得:

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + 2ik_0 \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + k_0^2 [n^2(r, z) - 1] \right\} u = 0, \quad (17)$$

$$\text{令 } X = n^2(r, \theta, z) - 1 + \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad Y = \frac{1}{k_0^2 r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2},$$

代入(17)进行算子分离,并忽略反向散射得:

$$\left(\frac{\partial}{\partial r} + ik_0 - ik_0 \sqrt{1 + X + Y} \right) u = 0, \quad (18)$$

这就是广义的三维抛物方程。

3 不确定性建模

水声环境的不确定性研究一直是水声研究的难点,并日益受到海洋大国的关注,而它的研究需要与海洋预报技术用一种系统性的方法,综合理论、数据和数值计算进行。海洋观测与预报系统中对于物理场和参数的估计由三个主要的要素组成:一是观测网络,包括一整套对特定任务的平台和传感器以及数据管理和分析方案;二是学科间的动态模型;三是数据同化方案和科学的分析。

对于非线性的海洋——声学耦合模式,由于各种近似,存在一定的模型误差。若将海洋运动与声场变化视为一个连续的随机过程,该模式可简单的描述为以下随机微分方程:

$$d\psi = f(\psi)dt + g(\psi)dq, \quad (19)$$

式中, ψ 对应于 t 时刻模式的状态向量; f 是 n 维的非线性向量函数; $g(\psi)dq$ 表示模式的误差项, dq 为协方差为 Q 的随机变量。

对于海洋和声学观测系统,可表示为

$$y = H(\psi) + \varepsilon, \quad (20)$$

式中, H 为观测算子矩阵,它使状态向量 ψ 与观测向量 y 相联系; ε 为测量误差,表示观测过程中的不确定性。

若模型误差是高斯的,可以通过 Fokker-Planck 方程^[10](也称为 Kolmogorov 方程)描述模型状态概率密度函数 P 随时间的演变。

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot (f(\psi) \cdot P) = \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{\partial^2}{\partial \psi_i \partial \psi_j} [P(gQg^T)]_{i,j}, \quad (21)$$

式中， gQg^T 为模式误差的协方差矩阵。在海洋系统中，涉及多重变量，因此 P 是多重变量的联合概率密度函数。如果公式(21)可以解得状态变量的概率密度函数，则相应的均值、误差协方差都可以求得，用于动力模型的预报与同化系统的分析方案。

同时，根据 Bayes 法则，在测量时间 t_k ，可作如下更新：

$$P(\psi, t_k | y_{t_0}, \dots, y_{t_k}) = \frac{P(y_{t_k} | \psi)P(\psi, t_k | y_{t_0}, \dots, y_{t_{k-1}})}{\int P(y_{t_k} | \chi)P(\chi, t_k | y_{t_0}, \dots, y_{t_{k-1}})d\chi}, \quad (22)$$

式中， y_{t_i} 为 t_i 时刻的观测值， $P(\psi, t | y)$ 表示 $\psi(t)$ 的条件概率密度函数。而 $P(y_{t_k} | \psi)$ 表示观测资料信息； $P(\psi, t_k | y_{t_0}, \dots, y_{t_{k-1}})$ 表示先验信息； $\int P(y_{t_k} | \chi)P(\chi, t_k | y_{t_0}, \dots, y_{t_{k-1}})d\chi$ 为归一化因子。这是大部分滤波同化方法的基础，描述了新的观测资料信息会如何改变模式状态的概率密度分布，并对其进行调整。

本文采用的集合卡尔曼滤波 (Ensemble Kalman Filter, EnKF) 数据同化方法可应用马尔可夫链蒙特卡罗 (Markov Chain Monte Carlo, MCMC) 方法求解式(21)。概率密度可用一个模式状态集合来表示，通过向前积分如随机微分方程式(19)所描述的动力学模式，使用 MCMC 方法作集合预报可以近似求解式(21)。

EnKF 方法采用模式状态向量的平均值来代替真实状态求解预报误差协方差 C^f 和分析误差协方差 C^a 。

$$C^f \approx C_e^f = \overline{(\psi^f - \bar{\psi}^f)(\psi^f - \bar{\psi}^f)^T}, \quad (23)$$

$$C^a \approx C_e^a = \overline{(\psi^a - \bar{\psi}^a)(\psi^a - \bar{\psi}^a)^T}, \quad (24)$$

其中的分析步骤由每一集成员的数据更新方案

组成：

$$\psi_j^a = \psi_j^f + C_e^f H^T (HC_e^f H^T + C_e)^{-1} (y_j - H\psi_j^f), \quad (25)$$

式中，观测误差的集合协方差矩阵为

$$C_e = \overline{\varepsilon\varepsilon^T}. \quad (26)$$

4 数值仿真与结果分析

4.1 数值模式设置与初始条件

本文将 POM 海洋数值模式与 PE 水声传播模型进行耦合，将 POM 模式预报的海洋温盐密等参数转化为 PE 所需的输入数据进行声场的预报。本文计算区域为渤、黄、东海 ($24^\circ \sim 41.167^\circ\text{N}$, $116.833^\circ \sim 131^\circ\text{E}$)，水平分辨率为 $1^\circ/6 \times 1^\circ/6$ ，垂向分为 12 层，共 86 (经向) \times 104 (纬向) \times 12 (垂向) 的三维网格。为了进一步提高计算效率和保留 POM 模式和 PE 的运算特点，在并行计算中海洋部分采用水平区域二维数据分解的并行方法，将网格划分为大小相同的几块区域进行计算；PE 算法程序中采用“N \times 2D 声场计算”模式，即将声场划分为若干扇面，由不同的进程同时计算不同的扇面，最后聚合输出。开边界取台湾海峡、台湾—西表岛、大隅—吐噶喇海峡、对马海峡四条，在西表岛—奄美大岛的岛链间作闭边界处理，未考虑长江入流的影响。海底为均匀半无限介质，其密度、声速、吸收系数采用表 1 中的反演结果^[11]。

仿真初始温盐场采用国家海洋信息中心的中国近海及邻近海域海洋再分析资料 (CORA)，开边界流量取自 MOM2 大洋环流模式的计算结果^[12]，考虑保持计算海洋的水量平衡，总流量分别为 $0.05 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $22.88 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $21.88 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.95 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。海面风场数据来自 NCEP (National Centers for Environment Prediction) 的经过质量受控处理的月平均风应力。

表 1 海底系数反演结果

中心频率 (Hz)	ρ (g/cm ³)	c (m/s)	α (dB/λ)
200			0.0831
500	1.7359	1602.0	0.2619
1000			0.3708

4.2 实验概况

本文以 2012 年 6 月 30 日在黄海某岛以东 50 海里左右海域进行的声传播实验数据来验证海洋—声学耦合模式。实验过程及水听器布放如图 1 所示，接收船静止布放 16 元垂直阵，水听器之间距离两米，发射船以 10 节速度远离接收船，每隔 1 分钟投放一枚手榴弹作为爆炸声源，该声源通过标准水听器接收到的信号如图 2 所示，而图 3 是标准水听器接收信号处理得到的手榴弹声源级。

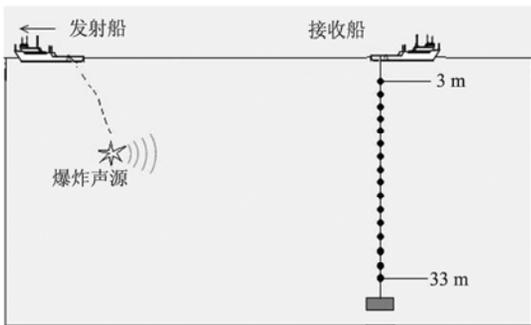


图 1 实验过程及水听器布放示意图

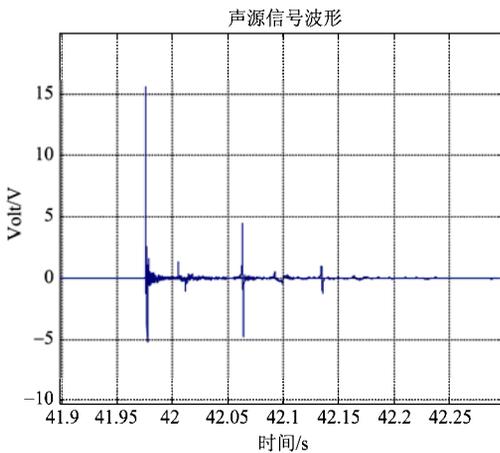


图 2 标准水听器接收到的手榴弹信号

数据处理时首先对场点 (r, z) 处的爆炸声传播接收信号进行适当的截取，得到时间序列 $p(t)$ ，它应该包括从声源发出到达接收点的所有多途信号。对于给定的分析频率 F_i ，进行 1/3 倍频程的窄带滤波得到 $\hat{p}(t, F_i)$ ，频带宽度 ΔF_i ， M_v 是标准水听器的灵敏度（利用有效电压数值换算），单位为 $\text{dB re } 1\text{V}/\mu\text{Pa}$ ， m 是水听器的放大倍数，这样对应的有

$$10\lg \hat{E}_r = 10\lg E_r(F_i) - 10\lg \Delta F_i - M_v - m, \quad (27)$$

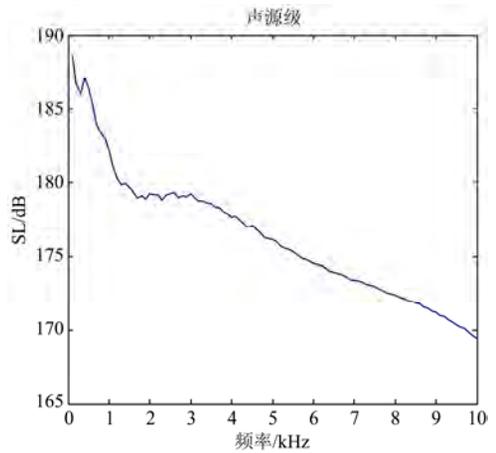


图 3 爆炸声源的声源级

其中：

$$E_r(f) = \int_0^{\tau_r} |\hat{p}_r(t, f)|^2 dt. \quad (28)$$

声传播损失计算公式为

$$TL(r, z) = SL(F_i) - (10\lg E_r(F_i) - 10\lg \Delta F_i - M_v - m), \quad (29)$$

注意到在式(27)~(29)的声传播计算公式中， $TL(r, z)$ 原则上具有频带内平均的谱级形式，与声源和接收信号的宽带和窄带无直接联系，只是要求在源级测量信号和传播信号的分析中，采用的是同样信号处理带宽和能量形式即可。

4.3 结果分析

由于计算海域包含整个黄海，而夏季的温跃层是黄海显著的水文现象，声学上表现为声速的负跃层，造成这一现象的主要原因是黄海中部底层在 5~10 月出现冷水团，共约占黄海海水的 30%。夏季，底层水温可低至 6~8℃，而上层则可达 26~28℃，中间为一强温跃层，而跃层的预报在海洋和水声学中都是较为困难的一项工作。如图 4 是文献[13]中根据各观测站多年资料的平均值绘制的北纬 35°断面的温度情况，图 5 是本文模拟的情况。从两图的对比来看，在模型中加入波浪混合，上混合层深度达到 10 m 左右，海区底部出现冷水团，中间为温跃层，与实际基本相符。而图 6 给出了北纬 35°断面温度的均方根误差，图中显示在等温线较密集的深度上，均方根误差较大。

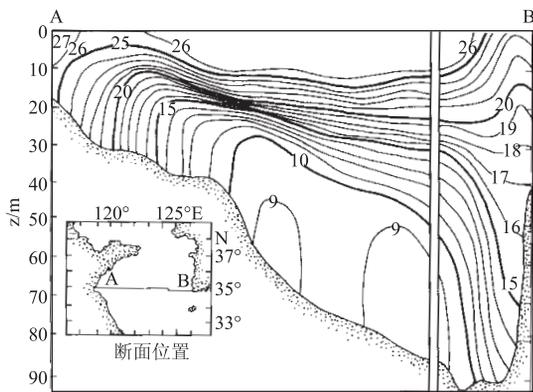


图 4 北纬 35°断面温度历史实测资料

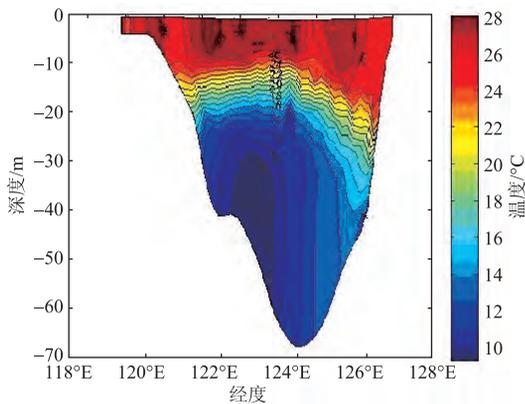


图 5 北纬 35°断面温度预报结果

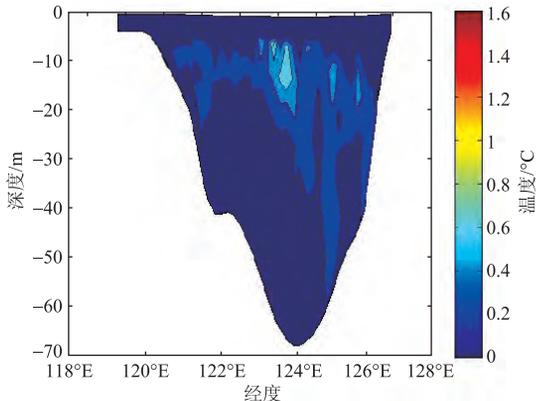


图 6 北纬 35°断面温度的均方根误差

图 7 是本文采用海洋—声学耦合模式，在稳定运行的基础上，以 6 月份多年平均温盐值为初始条件，海面边界条件采用 NOAA 卫星 AVHRR 获得的 SST 与模式预报结果进行同化后的分析值作为强迫场，预报到 6 月 30 日时实验海区的平均声速剖面，

从图中可以看出与实测值比较接近，预报出了声速负跃层结构。而该声速剖面在不同深度上呈现出不同的概率密度分布，图 8 分别给出了 2 m、8 m、16 m、24 m、32 m 处声速的概率密度直方图，并给出了均值和标准差，从图中可以看出 16 m 处的标准差最大，而该深度正好位于跃层中，基本符合实际情况。而假设声源深度为 7 m，声源频率 1000 Hz，接收深度为 31 m 时，其不同距离上的传播损失概率密度直方图如图 9 所示。同时还采用该模式对实验海区的传播损失进行了预报，并与实验数据进行了对比，如图 10 所示。图中“*”为实验数据，实线为模式预报传播损失的均值，虚线所包围的区域为传播损失 90% 的可能区间，具有一定的不确定性。从显示的结果来看，预报结果与实验数据总体趋势基本一致，但 10 km 以内的预报结果好于 10 km 以外的，低频优于高频。

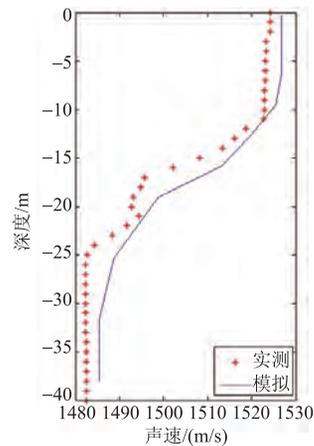


图 7 实验海区声速剖面

5 结论

本文首先通过建立海洋—声学耦合数值模式，实现对未来时刻海洋环境和水下声场的动态预报，给出了典型断面的温度垂直结构，并进一步通过与实验数据的对比，充分验证了该方法的有效性。在此基础上采用 EnKF 方法进行预报变量的不确定性建模，对预报的声速、传播损失等参数进行不确定性估计与分析，得出其不确定性直方图，体现了海洋—声学之间的不确定性传递，同时给出了 20 km 范围以内的传播损失的均值与

90%的可能区间, 经与实验数据对比, 验证了预报结果具有一定的可信性。与已有的水声环境不确定性研究相比, 本文的主要改进之处在于耦合了海洋动力学模型, 从环境源头去揭示水声环境的不确定性, 并且实现了水声环境的动态预报。

在模型构建过程中, 由于海洋动力尺度与水声传播尺度不匹配, 文章作了简单的插值处理, 因此采用高分辨率的海洋动力模型与水声模型进行耦合以及进一步挖掘两者之间的相互耦合关系值得深入研究。

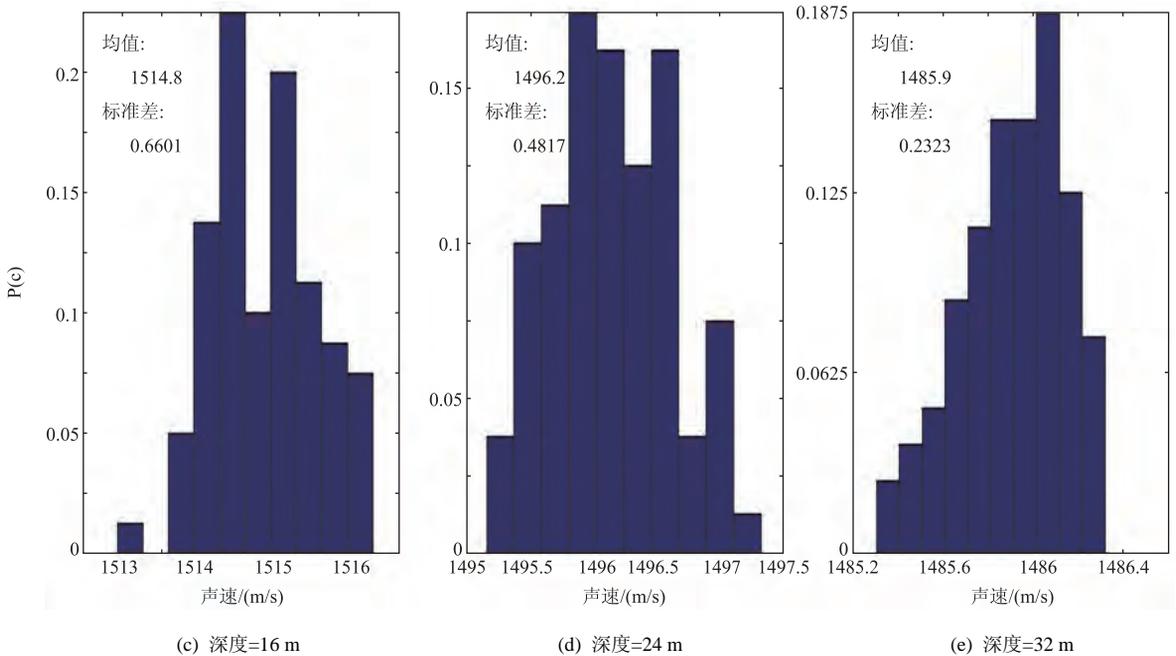
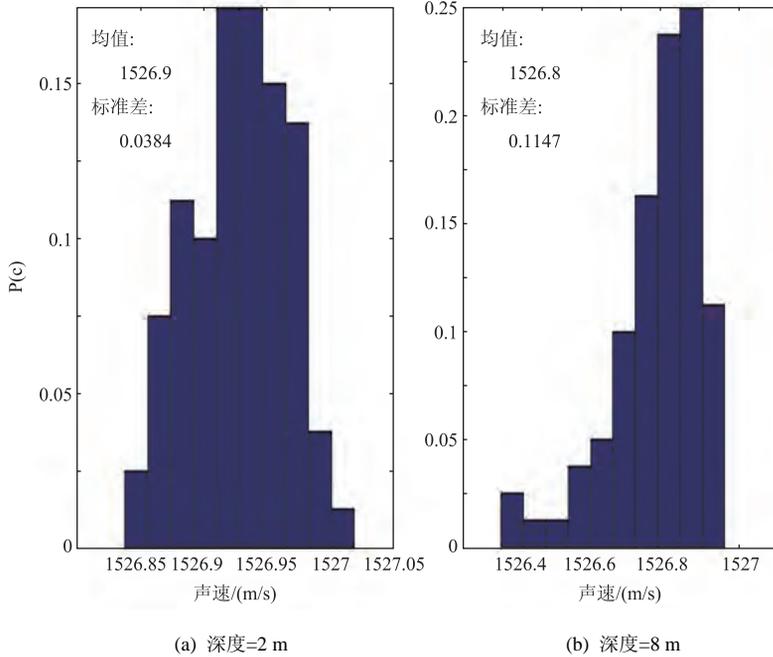


图8 不同深度上声速的概率密度直方图

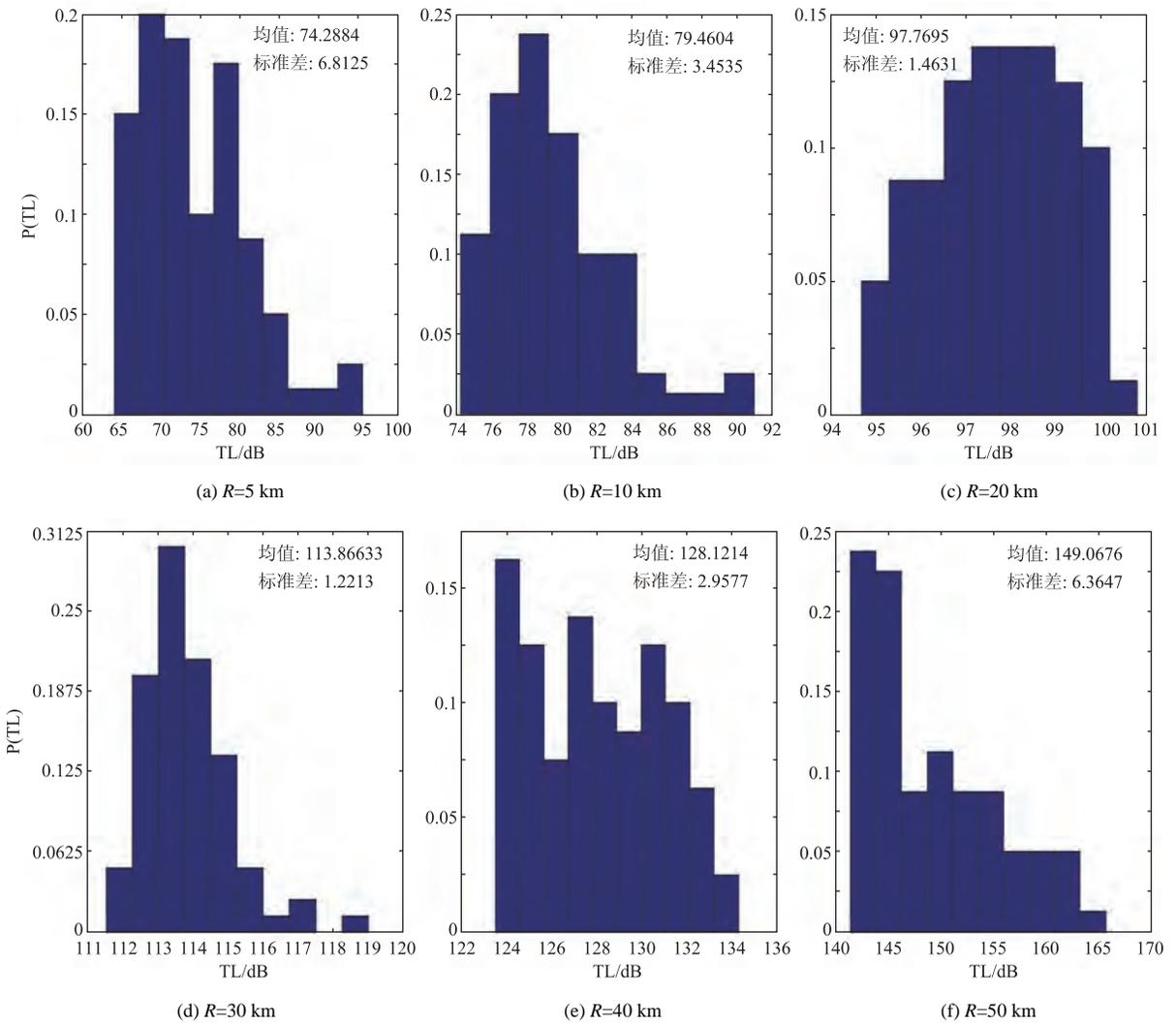


图 9 声源深度 7 m, 频率 1000 Hz, 接收深度 31 m 时不同距离上传播损失的概率密度直方图

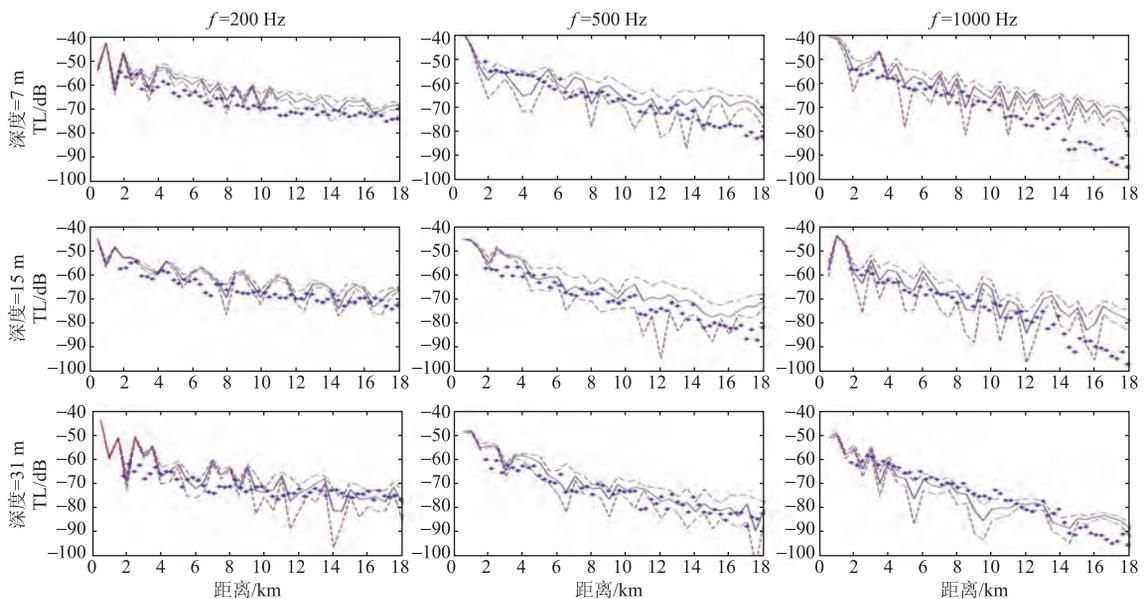


图 10 不同频率与接收深度下预报传播损失与实测值比较

参 考 文 献

- [1] ROBERT M. Capturing Uncertainty in the Common Tactical Environmental Picture[C]. Uncertainty DRI—Program Review, 2003: 6-9.
- [2] LERMUSIAUX P F J, CHIU C S. Four-dimensional data assimilation for coupled physical-acoustical fields[C]. Proceedings of the “Acoustic Variability, 2002” conference in Lerici, Italy, 2002: 417-424.
- [3] ROBINSON A R, ABBOT P, LERMUSIAUX P F J, et al. Transfer of uncertainties through physical-acoustical-sonar end-to-end systems: A conceptual basis[C]. In: Pace N G and Jensen F B, Editors, Acoustic Variability, SAACLANTCEN, 2002: 603-610.
- [4] LERMUSIAUX P F J. Uncertainty estimation and prediction for interdisciplinary ocean dynamics[J]. Journal of Computational Physics, 2006; 217: 176-199.
- [5] LERMUSIAUX P F J, CHIU C S, ROBINSON A R. Modeling Uncertainties in the Prediction of the Acoustic Wavefield in a Shelfbreak Environment[M]. Theoretical and Computational Acoustics, World Scientific Publishing Co., 2002: 191-200.
- [6] LERMUSIAUX P F J, ROBINSON A R. Data assimilation via error subspace statistical estimation, Part I: theory and schemes[J]. Monthly Weather Rev. 1999; 127 (7): 1385-1407.
- [7] LERMUSIAUX P F J. Data assimilation via error subspace statistical estimation, Part II: Middle Atlantic Bight shelfbreak front simulations and ESSE validation[J]. Monthly Weather Rev. 1999; 127 (7): 1408-1432.
- [8] 乔方利, 马建, 夏长水, 等. 波浪和潮流混合对黄海、东海夏季温度垂直结构的影响研究[J]. 自然科学进展, 2004, 14(12): 1434-1441.
- [9] 张林. 三维射线—简正波—抛物方程理论及并行算法研究[D]. 青岛: 海军潜艇学院, 2010: 15-19.
- [10] EVENSEN G. The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation[J]. Ocean Dynamics. 2003, 53: 343-367
- [11] 苏冰. 浅海声传播模型验证及地声参数多步反演方法研究[D]. 青岛: 海军潜艇学院, 2012: 14-25.
- [12] 方国洪, 魏泽勋, 王凯, 等. 中国近海域际水热盐输运: 全球变网格模式结果[J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(12): 969-977.
- [13] 海洋图集编委会编. 渤海、黄海、东海海洋图集(水文)[M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 247.

基于音色感知特征的声音变形技术

声音变形是近年来音乐信号处理方向的一个研究热点, 通过将源声音和目标声音之间的差异逐渐模糊转换, 实现二者间的平滑过渡。声音变形最终需要人耳进行听辨和主观评价, 因此研究最终目标是实现听感知上的线性变形。该技术的难点在于建立代表变形的两个声音特征的模型及选取合适的插值函数。经典的变形技术对声音模型的参数进行直接插值, 没有考虑感知效果的影响。这种情况下, 感知效果的评估方法十分繁琐, 且评估结果有时候并不能很好反映主观感知效果。

对于音乐声来说, 这种变形必须基于音色属性来变换, 才能让人在听觉上感觉是由两种乐器混合而成的一种新乐器所发出的声音, 而不是二者分别发出声音的混合效果。最近, 来自法国声学及音乐研究中心(Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique)的学者提出了一种由音色感知特征驱动的自动声音变形技术, 采用和音色感知特征呈

线性相关的声音表示模型参数, 进行线性插值后能够得到在感知上更接近线性变化的声音。该模型参数的插值分别在时域和频域进行, 其中时域的插值基于用倒谱系数表示的时域包络, 因为倒谱系数与音色感知时域特征线性相关; 频域的插值基于用线谱频率表示的频谱包络, 因为在众多频谱包络的表示方法中, 线谱频率与频谱分布特征线性相关。此外, 该研究指出, 实际测量的音色感知特征值和理论值的误差可以作为评价变形技术效果的客观标准, 这种客观评价标准与主观感知密切相关, 但更易操作, 结果也更精确。

(旷玮 编译自 CAETANO M, RODET X. Musical instrument sound morphing guided by perceptually motivated features[J]. IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process., 2013, 21(8):1666-1675.)