

基于稀疏贝叶斯学习的高分辨率 Patch 近场声全息

扈 宇¹, 胡定玉¹, 方 宇¹, 肖 悦²

(1. 上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620;

2. 南昌工程学院 江西省精密驱动与控制重点实验室, 南昌 330099)

摘 要: 针对基于空间二维 Fourier 变换的近场声全息技术的重建效果受到测量孔径与测点数影响的问题, 提出一种基于稀疏贝叶斯学习的高分辨率 Patch 近场声全息方法。利用高斯核函数和稀疏贝叶斯学习算法对全息面声压进行插值和外推, 利用插值和外推后的全息面声压进行近场声全息重建。仿真和实验结果表明, 所提方法可有效抑制小全息孔径测量对重建精度的影响, 同时可以在测点较少的情况下极大提升全息重建的空间分辨率。另外, 仿真结果还证明了插值过程具有较好的稳定性, 可以在一定程度上提高测量数据的信噪比。

关键词: Patch 近场声全息; 稀疏贝叶斯学习; 数据插值; 数据外推

中图分类号: TB532

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.16.016

Super resolution patch near-field acoustic holography via sparse Bayesian learning

HU Yu¹, HU Dingyu¹, FANG Yu¹, XIAO Yue²

(1. School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Jiangxi Province Key Laboratory of Precision Drive and Control, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: An approach for super resolution patch near-field acoustic holography was proposed based on sparse Bayesian learning. The interpolation and extrapolation models were first established by use of the Gaussian kernel functions and the sparse Bayesian learning, and then the measured pressure was simultaneously interpolated and extrapolated to obtain a larger and denser virtual measurement. Finally, the interpolated and extrapolated pressures were used to perform near-field acoustic holography. Results of the simulation and experiment show that the aperture effect was greatly suppressed and the super resolution reconstruction can be achieved when using the Fourier-based near-field acoustic holography. It also shows that the measurement noise was suppressed in the process of interpolation.

Key words: patch NAH; sparse Bayesian learning; data interpolation; data extrapolation

基于空间二维 Fourier 变换的近场声全息^[1-2] (Near-field Acoustic Holography, NAH) 技术能够充分利用包含高空间频率的倏逝波信息实现高分辨率的声场重建, 是一种重要的声场可视化与噪声源识别工具。但 NAH 的极限分辨率取决于全息面上的测点间隔, 因此要获得较高的分辨率, 就需要极高的测量成本, 这极大影响了该技术的实际应用价值。针对这种问题, Harris 等^[3]提出了利用声压梯度为指导的全息声压的三次 Hermite 插值法提高声场重建的分辨率, 但该方法需要测量质

点振速信息, 增大了测量工作量。Xu 等^[4]提出了利用带限信号恢复算法的 NAH 分辨率增强方法, 但该方法需要经过多次迭代计算, 增加了计算时间。随后, 徐亮等^[5]提出了一种基于正交球面波插值的方法, 但是对于形状较为复杂的声源插值效果并不理想。张小正等^[6]通过波叠加法原理构建虚源面对全息数据插值, 一定程度缓解了声源形状对重建结果的影响。最近, 毛荣富等^[7]利用支持向量回归算法实现了全息数据插值, 有效地减少了测量工作量。孙超等^[8]提出了一种基于极限学习机的全息数据插值方法, 通过神经网络训练数据提高全息分辨率并对全息数据外推。

基于空间二维 Fourier 变换的 NAH 技术在应用中遇到的另一个问题是测量孔径对 NAH 技术重建精度的影响^[9-10]。由于 NAH 的理论是建立在测量面为无穷大的基础上, 因此当测量孔径较小时, 窗函数的截断效应会导致波数谱泄露等一系列影响重建精度的问

基金项目: 国家自然科学基金(51605274; 51565037); 上海高校青年教师培养资助计划专项基金(ZZGCD15115); 上海工程技术大学研究生科研创新项目(16KY1001)

收稿日期: 2017-03-17 修改稿收到日期: 2017-06-02

第一作者 扈宇 男, 硕士生, 1990 年生

通信作者 胡定玉 男, 博士, 讲师, 1987 年生

题。Saijyou 等^[11]在研究大尺寸声源重建问题时通过全息面补零和波数域反复迭代滤波有效抑制了测量孔径的影响。Williams 等^[12]进一步提出了基于空间二维 Fourier 变换的 Patch NAH, 以解决小测量孔径下的全息重建问题。徐亮等^[13-14]在波数域进行全息数据外推并通过极小化加权范数优化了外推方法, Scholte 等^[15-16]对重建过程的低通滤波方法进行优化并利用线性边界预测法实现了空间域上的全息数据外推, 有效提高了小孔径全息数据的重建精度。在全息数据外推方法不断发展的同时, 基于波叠加法^[17]、分布源边界点法^[18]、统计最优法^[19]与边界元法^[20]的 Patch NAH 技术相继被提出, 扩大了 Patch NAH 的适用范围。

本文针对基于空间二维 Fourier 变换的 NAH 重建精度受到测量孔径影响较大的问题, 提出一种基于稀疏贝叶斯学习 (Sparse Bayesian Learning, SBL) 算法的高分辨率 Patch NAH 方法。该方法利用测点的空间坐标构建高斯核函数, 通过 SBL 算法构建全息面声压拟合模型实现全息面声压数据的插值和外推, 并进一步将插值和外推的数据用于 NAH 重建, 有效抑制了测量孔径与测点间隔对 NAH 的限制。本文首先给出基于 SBL 的全息面声压插值与外推理论模型, 然后通过数值仿真对该方法用于 Patch NAH 重建的有效性、抗噪性与分辨率提升等性能进行分析, 最后通过实验进一步验证该方法的有效性。

1 基于空间二维 Fourier 变换的 NAH

基于空间二维 Fourier 变换的 NAH 的基本原理是利用均匀分布在靠近声源表面的全息面上有限个测点的声场信息, 通过全息面和重建面声压在波数域的传递关系重建声源辐射区域任意平面的声压及其他声学物理量。如图 1 所示, 波数域声压从全息面到重建面的传递关系为

$$P(k_x, k_y, z_r) = P(k_x, k_y, z_h) e^{-ik_z(z_h - z_r)} \quad (1)$$

式中: k_x 、 k_y 和 k_z 分别是空间坐标 x 、 y 和 z 方向的波数分量, 且 $k_z = \pm \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$ (波数 $k = \omega/c$, c 为声速), z_h 、 z_r 和 z_s 分别为全息面、重建面和声源面位置, 波数域声压 $P(k_x, k_y, z)$ 可以由空间域声压 $p(x, y, z)$ 通过空间二维 Fourier 变换获得

$$P(k_x, k_y, z_h) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y, z_h) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (2)$$

由于在实际计算中采用了快速 Fourier 变换算法, 且测量孔径与测量点数有限, 因此重建分辨率受到测量点数的影响。另外将式 (2) 分解可得到

$$P(k_x, k_y, z_h) = \iint_{\Theta} p(x, y, z_h) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy + \iint_{\bar{\Theta}} p(x, y, z_h) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (3)$$

式中: $\Theta \cup \bar{\Theta}$ 为 z_h 处无限大平面, Θ 为测量区域。从式

(3) 中可以看出, 舍去 $\bar{\Theta}$ 区域仅通过测量区域 Θ 内的声压进行计算会在重建过程中产生重建误差, 若 Θ 较小时误差更为明显。

在重建过程中通常会利用窗函数抑制噪声的放大, 其中最常用的经典窗函数是 Maynard 等^[21]提出的指数窗, 其形式为

$$W(k_x, k_y) = \begin{cases} 1 - 1/2 \exp[(k_r/k_c - 1)/\eta], & k_r \leq k_c \\ 1/2 \exp[(1 - k_r/k_c)/\eta], & k_r > k_c \end{cases} \quad (4)$$

式中: η 为窗函数陡度系数, k_c 为截止波数, $k_r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ 。窗函数的实质是波数域低通滤波器, 若式 (3) 计算中产生的误差成分与倏逝波相近, 窗函数将无法有效抑制误差, 并且可能滤掉倏逝波信息。

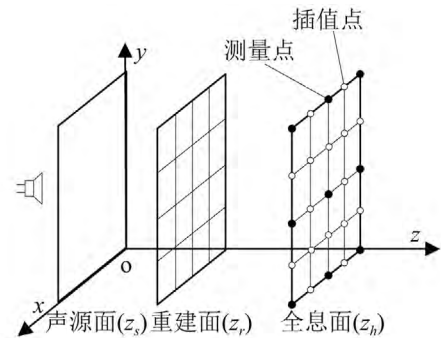


图 1 声源面、重建面与全息面分布图

Fig. 1 A diagram of NAH

2 基于 SBL 算法的全息面声压插值与外推

2.1 高斯核函数

高斯核函数是径向基函数的一种, 二维高斯核函数的数学表达式为

$$\varphi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_c) = \exp\left(-\frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_c|^2}{\sigma^2}\right) \quad (5)$$

式中: \mathbf{r} 为任意一点的位置变量 (x, y), \mathbf{r}_c 为高斯核函数中心峰值位置 (x_c, y_c), $|\mathbf{r} - \mathbf{r}_c|^2$ 为任意点 \mathbf{r} 到中心峰值位置 \mathbf{r}_c 的欧氏距离, σ^2 为高斯核函数宽度系数。高斯核函数由中心峰值处向各个方向平滑衰减为零, 这一特性使得在将其用于全息面声压外推时, 在测量孔径边缘声压幅值较低的测点处数据平滑衰减, 同时在幅值较高的测点处可以一定程度上保留测量孔径外部的声压信息。另外, 由于高斯核函数在任意维度空间皆为正定函数, 保证了高斯核函数插值具有唯一解^[22], 因此运用高斯核函数对全息面声压进行拟合即可实现对全息数据插值^[23]。

2.2 基于 SBL 算法的全息面声压插值

高斯核函数可以将低维数据映射到高维并对其进行线性求解, 在升维过程中保证了以高斯核函数为基的解的稀疏性, 理论上可以通过较少测点拟合声压在全息面上的分布, 从而实现超高分辨率^[24]。由于在全息重建中使用的是复声压, 且复声压实部与虚部的误差虽都服

从零均值高斯分布,但方差可能会有不同,因此可以分别对复声压实部与虚部插值并将两者合并获取复声压。下面仅以实部插值为例介绍全息面声压插值过程。

通过高斯核函数映射后,全息面上任意一点 r_i 处的声压实部理论值可由高斯核函数表示为

$$p_h^{\text{re}}(r_i) = \sum_{j=1}^N w_j \varphi(r_i, r_j) \quad (6)$$

式中: $p_h^{\text{re}}(r_i)$ 为全息面 r_i 处声压实部理论值, $\varphi(r_i, r_j)$ 表示以第 j 个测点坐标 r_j 为中心的高斯核函数, w_j 为其权重系数, N 为测点数。对于全息面上所有测点的声压,可以用矩阵表示为

$$\mathbf{p}_{\text{re}} = \Phi \mathbf{w} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{p}_{\text{re}} = [p_h^{\text{re}}(r_1), p_h^{\text{re}}(r_2), \dots, p_h^{\text{re}}(r_N)]^T$ 为全息面声压实部列向量, $\Phi(i, j) = \varphi(r_i, r_j)$, $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为服从零均值高斯分布的测量噪声。全息面声压实部 \mathbf{p}_{re} 的似然函数为

$$\text{Prob}(\mathbf{p}_{\text{re}} | \mathbf{w}, \beta^2) = (2\pi\beta^2)^{-N/2} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{p}_{\text{re}} - \Phi \mathbf{w}\|^2}{2\beta^2}\right) \quad (8)$$

式中: β^2 为 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的方差。与极大似然估计法不同, SBL 并非单纯地对式(8)进行极大求解,而是通过调节 \mathbf{w} 的先验以避免过拟合。设权重系数 w_j 服从均值为 0, 方差为 α_j^{-1} 的高斯分布,即

$$\text{Prob}(\mathbf{w} | \boldsymbol{\alpha}) = \prod_{j=1}^N \mathcal{N}(w_j | 0, \alpha_j^{-1}) \quad (9)$$

式中: $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N]^T$, α_j 为权重系数 w_j 的超参数。

在 $\boldsymbol{\alpha}$ 与 β^2 皆为未知的情况下,通过测量的声压求解权重系数 \mathbf{w} 的问题即可转化为最大化联合后验概率 $\text{Prob}(\mathbf{w}, \boldsymbol{\alpha}, \beta^2 | \mathbf{p}_{\text{re}})$ 的问题, $\text{Prob}(\mathbf{w}, \boldsymbol{\alpha}, \beta^2 | \mathbf{p}_{\text{re}})$ 最大值对应的 \mathbf{w} 即为最优的权重系数。但由于 $\text{Prob}(\mathbf{w}, \boldsymbol{\alpha}, \beta^2 | \mathbf{p}_{\text{re}})$ 很难通过积分直接获取,因此将 $\text{Prob}(\mathbf{w}, \boldsymbol{\alpha}, \beta^2 | \mathbf{p}_{\text{re}})$ 分解为

$$\text{Prob}(\mathbf{w}, \boldsymbol{\alpha}, \beta^2 | \mathbf{p}_{\text{re}}) = \text{Prob}(\mathbf{w} | \mathbf{p}_{\text{re}}, \boldsymbol{\alpha}, \beta^2) \text{Prob}(\boldsymbol{\alpha}, \beta^2 | \mathbf{p}_{\text{re}}) \quad (10)$$

式中: \mathbf{w} 的后验概率分布 $\text{Prob}(\mathbf{w} | \mathbf{p}_{\text{re}}, \boldsymbol{\alpha}, \beta^2)$ 可以根据贝叶斯定理表示为

$$\text{Prob}(\mathbf{w} | \mathbf{p}_{\text{re}}, \boldsymbol{\alpha}, \beta^2) = \frac{\text{Prob}(\mathbf{p}_{\text{re}} | \mathbf{w}, \beta^2) \text{Prob}(\mathbf{w} | \boldsymbol{\alpha})}{\text{Prob}(\mathbf{p}_{\text{re}} | \boldsymbol{\alpha}, \beta^2)} \quad (11)$$

式中: 分母 $\text{Prob}(\mathbf{p}_{\text{re}} | \boldsymbol{\alpha}, \beta^2)$ 可由似然函数式(8)对权重系数 \mathbf{w} 进行边缘积分得到,即

$$\text{Prob}(\mathbf{p}_{\text{re}} | \boldsymbol{\alpha}, \beta^2) = \int \text{Prob}(\mathbf{p}_{\text{re}} | \mathbf{w}, \beta^2) \text{Prob}(\mathbf{w} | \boldsymbol{\alpha}) d\mathbf{w} = \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{C}) \quad (12)$$

式中: $\mathbf{A} = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_N)$, $\mathbf{C} = \beta^2 \mathbf{I} + \Phi \mathbf{A}^{-1} \Phi^T$ 。

将式(8)、式(9)和式(12)代入式(11)可得

$$\text{Prob}(\mathbf{w} | \mathbf{p}_{\text{re}}, \boldsymbol{\alpha}, \beta^2) = \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) \quad (13)$$

式中: $\boldsymbol{\Sigma} = (\beta^{-2} \Phi^T \Phi + \mathbf{A})^{-1}$, $\boldsymbol{\mu} = \beta^{-2} \boldsymbol{\Sigma} \Phi^T \mathbf{p}_{\text{re}}$, $\text{Prob}(\mathbf{w} | \mathbf{p}_{\text{re}}, \boldsymbol{\alpha}, \beta^2)$ 满足均值为 $\boldsymbol{\mu}$ 、方差为 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的 N 维高斯分布。

得到 \mathbf{w} 的后验分布 $\text{Prob}(\mathbf{w} | \mathbf{p}_{\text{re}}, \boldsymbol{\alpha}, \beta^2)$ 后,稀疏贝叶斯学习过程即被转化为超参数后验分布 $\text{Prob}(\boldsymbol{\alpha}, \beta^2 | \mathbf{p}_{\text{re}}) \propto \text{Prob}(\mathbf{p}_{\text{re}} | \boldsymbol{\alpha}, \beta^2) \text{Prob}(\boldsymbol{\alpha}) \text{Prob}(\beta^2)$ 关于 $\boldsymbol{\alpha}$ 与 β^2 的最大值问题。在贝叶斯模式中, $\text{Prob}(\mathbf{p}_{\text{re}} | \boldsymbol{\alpha}, \beta^2)$ 被称为边缘似然函数。对边缘似然函数进行第 II 类型最大似然参数估计可求出 $\boldsymbol{\alpha}$ 与 β^2 的估计值,即利用式(12)分别对 $\boldsymbol{\alpha}$ 与 β^2 求偏导并使导数等于零,可求出 $\boldsymbol{\alpha}$ 与 β^2 的更新公式

$$\alpha_j^{\text{new}} = \frac{\gamma_j}{\mu_j^2} \quad (14)$$

$$(\beta^2)^{\text{new}} = \frac{\|\mathbf{p}_{\text{re}} - \Phi \boldsymbol{\mu}\|^2}{N - \sum_j \gamma_j} \quad (15)$$

式中: $\gamma_j = 1 - \alpha_j \boldsymbol{\Sigma}_j$, $\boldsymbol{\Sigma}_j$ 是 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的第 j 个对角元素。超参数的初始值为 $(\beta^2)^{\text{initial}} = \text{var}(\mathbf{p}_{\text{re}}) \times 0.1$ 与 $\alpha_j^{\text{initial}} = \frac{\|\Phi_j\|^2}{\|\Phi_j^T \mathbf{p}_{\text{re}}\|^2 / \|\Phi_j\|^2 - (\beta^2)^{\text{initial}}}$, Φ_j 为与 w_j 对应的第 j 组基。将超参数的初始值代入式(14)与式(15)对 $\boldsymbol{\alpha}$ 与 β^2 进行更新,并将更新后的 $\boldsymbol{\alpha}$ 与 β^2 重新代入式(14)与式(15)对其进行再估计。重复以上计算直到 $\boldsymbol{\alpha}$ 与 β^2 满足一定的收敛条件,即可完成对 $\boldsymbol{\alpha}$ 与 β^2 地估计。

得到满足条件的 $\boldsymbol{\alpha}$ 与 β^2 后,可以根据式(13)求出此时 \mathbf{w} 的后验概率 $\text{Prob}(\mathbf{w} | \mathbf{p}_{\text{re}}, \boldsymbol{\alpha}, \beta^2)$ 。由于 \mathbf{w} 的后验概率 $\text{Prob}(\mathbf{w} | \mathbf{p}_{\text{re}}, \boldsymbol{\alpha}, \beta^2)$ 服从均值为 $\boldsymbol{\mu}$ 、方差为 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的 N 维高斯分布,因此通过均值 $\boldsymbol{\mu}$ 即可完成对 \mathbf{w} 的求解,即 $\mathbf{w} = \boldsymbol{\mu}$ 。在 α_j 与 β^2 不断地迭代计算中,大多数 α_j 的值不断增大至无穷, α_j^{-1} 无限接近于 0。此时根据式(9)与 0 均值高斯分布的性质可以得出大多数 w_j 接近于 0,即 \mathbf{w} 为稀疏解。最后将 \mathbf{w} 代入式(6)建立全息面复声压实部插值模型 $p_h^{\text{re}}(\mathbf{r})$ 。通过该插值模型可以得到全息面任意一点 \mathbf{r} 的声压实部。SBL 算法求得 \mathbf{w} 的稀疏解代入式(6)的过程属于信号稀疏求解与表达^[24-25],因此可以利用较少的测点实现全息面声压的精确插值,且插值过程还具有较强的抗噪声能力^[26],可以有效地抑制测量噪声。

2.3 基于 SBL 算法的全息面声压外推

全息面声压外推过程和插值过程类似,都是利用高斯核函数实现,区别在于外推点的位置和插值点位置的不同。由于外推点均位于测量孔径外部,而全息面声压是采用以测点位置为中心峰值位置的高斯核函数进行拟合,因此根据高斯核函数的衰减特性,测量孔径外的外推点声压平滑衰减,最终可得到边缘为零或无限近似于零的全息面声压数据,因此利用外推后的数据进行重建,可以极大避免窗函数截断效应的影响。需要说明的是,在应用过程中可以同时全息面声压的插值和外推,可以在几乎不增加计算时间的同时提高重建结果的分辨率。

3 数值仿真

在声源面 $z_s = 0$ 处布置一个边长为 0.5 m 的正方形简支钢板, 钢板厚度为 0.003 m, 杨氏模量为 2.1×10^{11} Pa, 泊松比为 0.28, 密度为 7.85×10^3 kg/m³。对该简支钢板的中心位置施加不同频率的激励信号产生声场。在 $z_h = 0.05$ m 处布置全息面, 全息面与简支钢板大小相同, 全息面内测点间隔 $\Delta d = 0.05$ m, 共测量 11×11 个测点的声压, 声压的信噪比为 30 dB。重建面位于 $z_r = 0.02$ m 处, 各面布置示意图见图 1。在仿真计算中对全息面声压进行插值与外推计算时, 设定当 $\alpha_j \geq 10^{12}$ 时判定该组基与测量的声压值不相关, 即 $\alpha_j^{-1} = 0$, $w_j = 0$; 当更新过程中 α_j 满足 $\lg(\alpha_j^{\text{new}}) - \lg(\alpha_j^{\text{old}}) < 10^{-3}$ 且 β^2 满足 $\lg((\beta^2)^{\text{new}}) - \lg((\beta^2)^{\text{old}}) <$

10^{-6} 时认定超参数满足收敛条件。为定量地描述插值或重建误差, 定义均方误差公式为

$$\text{Error} = \frac{\|P^{\text{cal}} - P^{\text{th}}\|_2}{\|P^{\text{th}}\|_2} \quad (16)$$

式中: P^{cal} 为插值或重建的声压, P^{th} 为对应的理论值。

3.1 全息面声压插值

为便于描述, 定义插值倍数为插值前后分辨率的比值。对全息面声压进行 5 倍插值, 即插值后全息面声压的分辨率为 1 cm。图 2 显示的是频率为 900 Hz 时全息面上的测量声压(图 2(a))、插值后的声压(图 2(b))及其理论值(图 2(c))。从图中可以看出, 插值结果与理论值几乎完全一致, 利用式(16)计算出插值后全息数据的插值误差仅为 1.88%, 证明了本文插值模型的有效性。

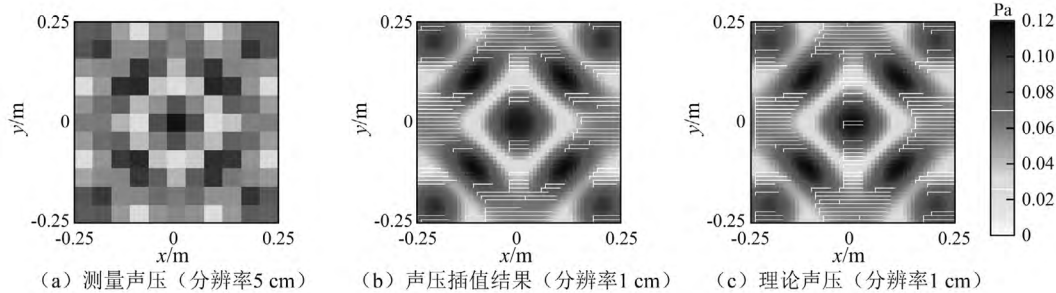


图 2 900 Hz 时全息面声压插值效果对比图

Fig. 2 The pressure on the hologram at 900 Hz

为研究插值倍数与插值精度之间的关系, 对全息面声压进行不同倍数的插值。频率为 900 Hz 时插值误差与插值倍数的关系如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 虽然插值点间距缩小使得全息数据点数成倍增长, 但插值误差的变化很小, 说明插值点数对于插值结果的影响很小。图 3 同时也显示了全息面声压的测量数据与理论值之间的相对误差。比较测量误差和插值误差可以看出, 基于 SBL 算法的全息数据插值方法对测量数据中的噪声有一定的抑制能力。图 4 给出了频率为 500 Hz 和 900 Hz 时, 在不同的信噪比(SNR)的情况下插值误差与测量误差的对比。从图中可以看出, 在测量条件较差的情况下, 使用插值模型可以较好地抑制噪声, 证明了插值模型具有较高的工程实用性。

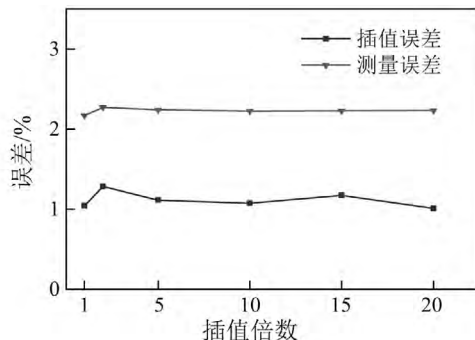


图 3 插值误差与插值倍数的关系

Fig. 3 The relative errors of the measurement and the interpolation versus the ratios of the spatial resolutions before and after interpolation

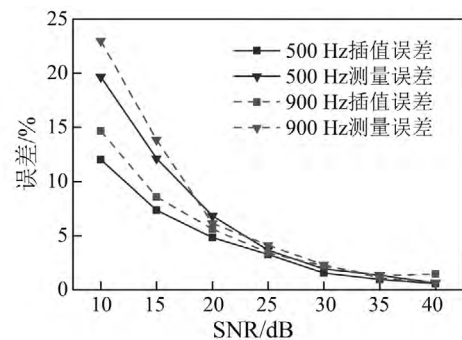


图 4 插值误差与测量误差随信噪比变化曲线

Fig. 4 The relative errors of the measurement and the interpolation versus the SNR

3.2 高分辨率声场重建

对全息面声压进行 5 倍插值并同时外推, 并利用插值和外推后的全息面声压重建距板表面 0.02 m 处的声压。图 5 显示的是频率为 900 Hz 时重建结果与理论值的比较。从图中可以看出, 重建的声压与理论值吻合地很好, 通过式(16)计算两者之间的误差仅为 3.32%, 由此可见, 对全息面声压进行插值和外推处理可以有效地避免有效孔径效应对重建精度的影响, 同时可以获取高分辨率的重建结果。

图 6 显示的是在 100 ~ 2 000 Hz 的频率范围内声压的重建误差随频率的变化。从图中可以看出, 声压的重建误差均在 10% 以下, 证明了本文方法的有效性。

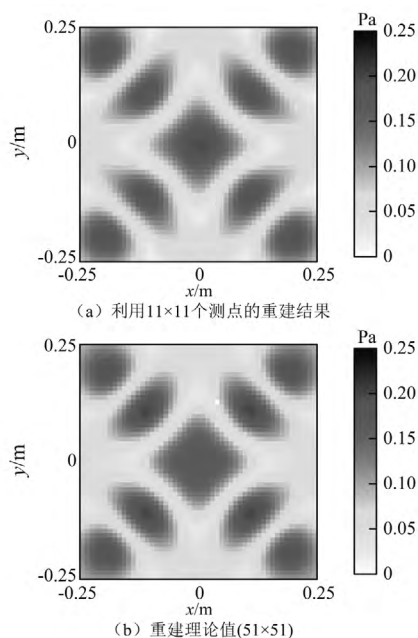


图5 900 Hz 时重建结果与重建面处实际声压幅值分布对比图

Fig.5 The pressure on the reconstruction plane at 900 Hz

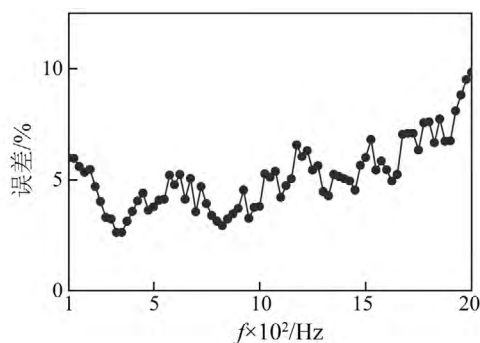


图6 激励频率与重建误差关系图

Fig.6 The reconstruction errors versus frequencies

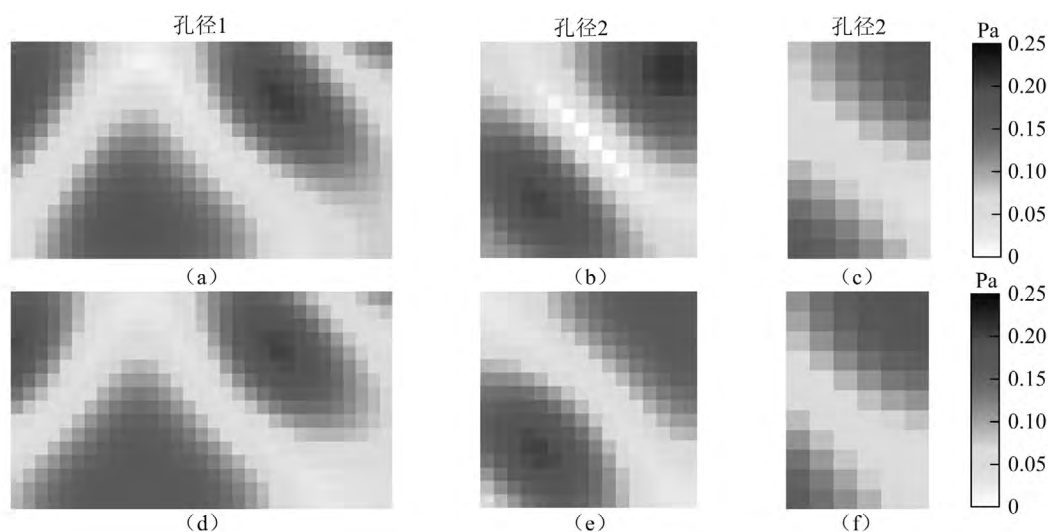


图8 900 Hz 时各孔径重建结果对比图

Fig.8 The pressure on the three reconstruction plane at 900 Hz

4 实验验证

实验在半消声室中进行,半消声室本底噪声小于 16 dB。实验装置实物照片如图 9 所示。声源为 $80 \times$

为进一步验证高分辨率 Patch HAH 对小测量孔径的适应性,在全息面上取三个不同大小的测量孔径,其位置如图 7 所示。分别对三个孔径的全息数据进行插值和外推,并进一步利用 NAH 重建距板表面 2 cm 处的声压。图 8 显示的是频率为 900 Hz 时利用三个测量孔径内声压重建的结果与其理论值的比较。从图中可以看出,三个测量孔径的边缘附近均存在较大峰值,测量孔径产生的截断效应会对基于二维空间 Fourier 变换的 NAH 的重建精度产生很大影响。而利用本文方法对全息面声压进行插值和外推后,利用三个测量孔径的全息数据都获得了较好的重建结果。其中,三个孔径的重建误差分别为孔径 1: 10.95%,孔径 2: 15.53% 和孔径 3: 16.35%。证明了本文插值外推方法对较小的测量孔径仍具有较好的稳定性。

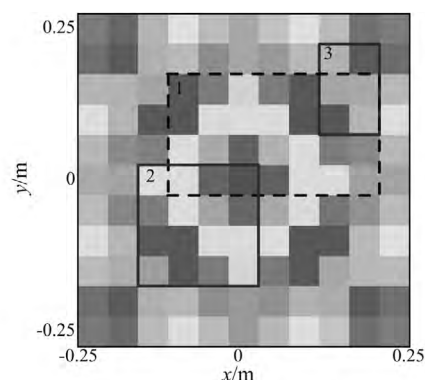


图7 全息面测量孔径分布位置图

Fig.7 Positions of the measurement apertures

66 cm^2 的固支钢板,钢板厚度为 2 mm。对钢板施加简谐信号产生声场。全息面位于钢板上方 5 cm 处,测点间隔为 5 cm,共 15×11 个测点。重建面位于钢板上方 2 cm 处。为检验重建结果,同时以 2.5 cm 的测量间隔

测量重建面上的声压作为其真实值,共 31×21 个测点。在 15×11 个测点得到全息面中,选取 2 个大小不同、测点数不同的测量孔径并利用孔径内的数据进行重建。孔径在全息面上的位置分布如图 10 所示。算法迭代过程中判断收敛条件与仿真相同。



图 9 实验装置实物图
Fig. 9 A photo of the experimental setup

图 11 显示的是频率为 700 Hz、900 Hz 与 1 100 Hz 时,对两个测量孔径的全息数据进行外推并插值后重建结果与真实值的比较。从图中可以看出,利用本文方法对不同尺寸测量孔径进行重建皆获得了较好的重建效果。不同激励下各测量孔径重建误差见表 1。重

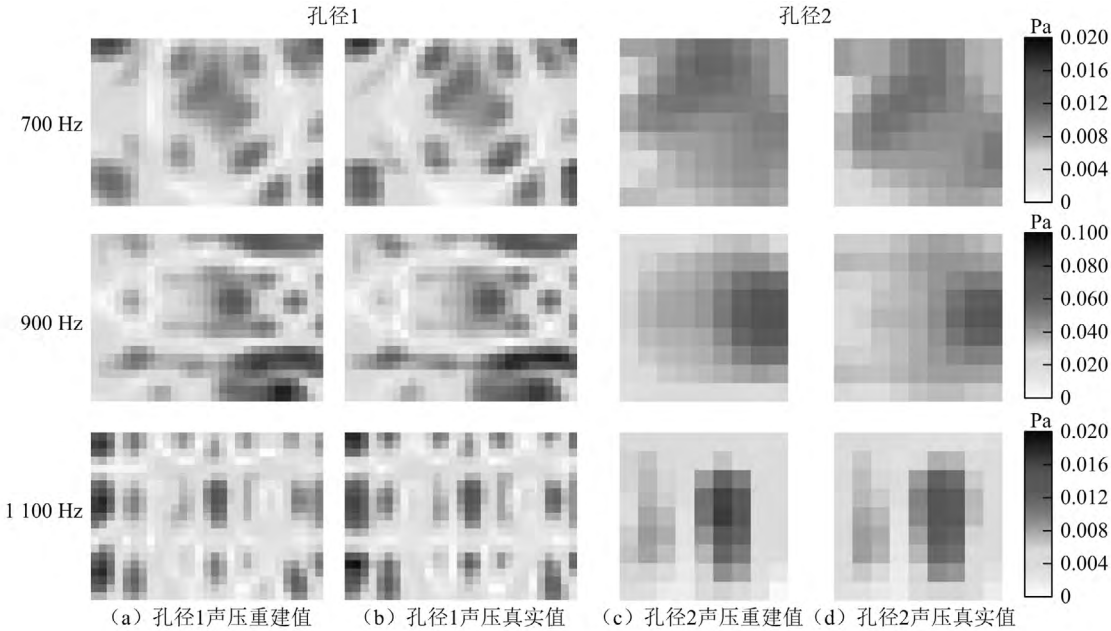


图 11 不同激励频率下各孔径重建结果对比图
Fig. 11 Comparison of reconstruction results with the corresponding true values

5 结 论

本文建立了一种基于 SBL 的高分辨率 Patch NAH 方法,解决了测量孔径与测点数对基于空间二维 Fourier 变换的 NAH 重建效果影响较大的问题。研究结果表明:利用高斯核函数和 SBL 算法对全息面数据进行插值和外推,可以有效地避免测量孔径对 NAH 重建结果的影响,同时获取高分辨率的重建结果。另外,利用插

建结果表明,本文方法可以准确地重建出声场分布,并且有效地提升了重建结果分辨率,证明了利用 SBL 算法对全息数据插值与外推后可以实现高分辨 Patch NAH。

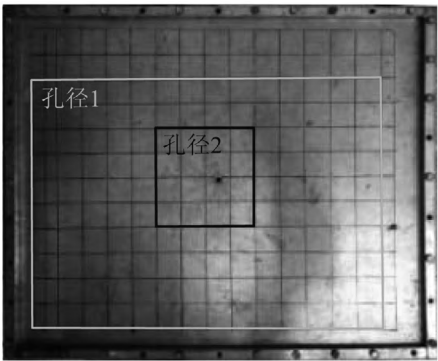


图 10 全息面测量孔径位置
Fig. 10 Positions of the measuring apertures

表 1 不同频率下各测量孔径重建误差
Tab. 1 The reconstruction error under each measurement aperture

激励频率/Hz	700	900	1 100
孔径 1 重建误差/%	13.88	10.32	18.69
孔径 2 重建误差/%	7.74	14.15	11.94

值模型还可以在在一定程度上减少测量噪声,具有较高的工程应用价值。

参 考 文 献

[1] WILLIAMS E G, MAYNARD J, SKUDRZYK E. Sound source reconstructions using a microphone array [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68(1): 340-344.
[2] WILLIAMS E G, MAYNARD J. Holographic imaging without the wavelength resolution limit [J]. Physical Review Letters,

- 1980, 45(7): 554.
- [3] HARRIS M C, BLOTTER J D, SOMMERFELDT S D. Obtaining the complex pressure field at the hologram surface for use in near-field acoustical holography when pressure and in-plane velocities are measured [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 119(2): 808–816.
- [4] XU L, BI C, CHEN X, et al. Resolution enhancement of nearfield acoustic holography by interpolation using band-limited signal restoration method [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(20): 3142–3150.
- [5] 徐亮, 陈心昭, 毕传兴, 等. 近场声全息分辨率增强的正交球面波插值方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(10): 1808–1811.
XU Liang, CHEN Xinzha, BI Chuanxing, et al. Nearfield acoustic holography resolution enhancing method based on interpolation using orthogonal spherical wave source [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2009, 43(10): 1808–1811.
- [6] 张小正, 毕传兴, 徐亮, 等. 基于波叠加法的近场声全息空间分辨率增强方法[J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5564–5571.
ZHANG Xiaozheng, BI Chuanxing, XU Liang, et al. Resolution enhancement of nearfield acoustic holography by the wave superposition approach [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(8): 5564–5571.
- [7] 毛荣富, 朱海潮, 柳志忠, 等. 利用支持向量回归插值减少全息面测量点数方法的试验研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(3): 128–131.
MAO Rongfu, ZHU Haichao, LIU Zhizhong, et al. Experimental study on reduction of measuring points number on hologram using support vector regression [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(3): 128–131.
- [8] 孙超, 何元安, 商德江, 等. 全息数据外推与插值技术的极限学习机方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(5): 544–551.
SUN Chao, HE Yuanan, SHANG Dejiang, et al. Hologram data extrapolation and interpolation method based on the extreme learning machine [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(5): 544–551.
- [9] WILLIAMS E G. 傅里叶声学: 声辐射与近场声全息[M]. 卢奂采译. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [10] WU S F. Methods for reconstructing acoustic quantities based on acoustic pressure measurements [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 124(5): 2680–2697.
- [11] SAIJYOU K, YOSHIKAWA S. Reduction methods of the reconstruction error for large-scale implementation of near-field acoustical holography [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2001, 110(4): 2007–2023.
- [12] WILLIAMS E G, HOUSTON B H, HERDIC P C. Fast Fourier transform and singular value decomposition formulations for patch nearfield acoustical holography [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 114(3): 1322–1333.
- [13] 徐亮, 毕传兴, 陈剑, 等. 基于波数域外推方法的近场声全息[J]. 机械工程学报, 2007, 43(9): 84–90.
XU Liang, BI Chuanxing, CHEN Jian, et al. Nearfield acoustic holography based on K-space data extrapolation method [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(9): 84–90.
- [14] 徐亮, 毕传兴, 王慧, 等. 全息声压场的加权范数外推方法[J]. 物理学报, 2011, 60(11): 398–408.
XU Liang, BI Chuanxing, WANG Hui, et al. Hologram pressure field weighted norm extrapolation method [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(11): 398–408.
- [15] SCHOLTE R, LOPEZ I, BERT ROOZEN N, et al. Truncated aperture extrapolation for Fourier-based near-field acoustic holography by means of border-padding [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 125(6): 3844–3854.
- [16] ARTEAGA I L, SCHOLTE R, NIJMEIJER H. Improved source reconstruction in fourier-based near-field acoustic holography applied to small apertures [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 32: 359–373.
- [17] 徐亮, 毕传兴, 陈剑, 等. 基于波叠加法的 patch 近场声全息及其实验研究[J]. 物理学报, 2007, 56(5): 2776–2783.
XU Liang, BI Chuanxing, CHEN Jian, et al. Algorithm and experimental investigation of patch nearfield acoustic holography based on wave superposition approach [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(5): 2776–2783.
- [18] 毕传兴, 袁艳, 贺春东, 等. 基于分布源边界点法的局部近场声全息技术[J]. 物理学报, 2010, 59(12): 8646–8654.
BI Chuanxing, YUAN Yan, HE Chundong, et al. Patch nearfield acoustic holography based on the distributed source boundary point method [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(12): 8646–8654.
- [19] PASCAL J C, PAILLASSEUR S, THOMAS J H, et al. Patch near-field acoustic holography: regularized extension and statistically optimized methods [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 126(3): 1264–1268.
- [20] VALDIVIA N P, WILLIAMS E G, HERDIC P C. Approximations of inverse boundary element methods with partial measurements of the pressure field [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 123(1): 109–120.
- [21] MAYNARD J D, WILLIAMS E G, LEE Y. Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1985, 78(4): 1395–1413.
- [22] SCHABACK R. Limit problems for interpolation by analytic radial basis functions [J]. Journal of Computational & Applied Mathematics, 2008, 212(2): 127–149.
- [23] FASSHAUER G E, MCCOURT M J. Stable evaluation of gaussian radial basis function interpolants [J]. Siam Journal on Scientific Computing, 2012, 34(2): 737–762.

(下转第153页)

幅波理论,在独立于船型情况下有效地解释了船舶在波浪中产生高阶振动的激励力来源。对比计算了某双体船在不同波频参与激励下,船体振动响应的差异。可见,在大多数海情下(特别是高海情),即使船舶总振动固有频率与波浪频率相差较大,有限幅波中高阶成分亦可对船舶产生高频激励,因此,利用有限幅波理论分析船舶高频振动更具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] 中国船级社: GD 01—2015. 波激振动和砰击颤振对船体结构疲劳强度影响计算指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [2] 汪雪良, 顾学康, 胡嘉骏. 船舶波激振动研究进展[J]. 船舶力学, 2013, 17(7): 830–844.
WANG Xueliang, GU Xuekang, HU Jiajun. A state-of-the-art review on ship's springing investigation [J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17(7): 830–844.
- [3] JUNCHEER JENSEN J. Stochastic procedures for extreme wave load predictions—wave bending moment in ships [J]. Marine Structures, 2009, 22: 194–208.
- [4] 钱小斌, 尹勇, 张秀凤, 等. 海上不规则波浪扰动对船舶运动的影响[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(3): 116–124.
QIAN Xiaobin, YIN Yong, ZHANG Xiufeng, et al. Influence of irregular disturbance of sea wave on ship motion [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(3): 116–124.
- [5] TAYLOR R E, HUANG S M. Second order diffraction forces on a vertical cylinder in regular waves [J]. Applied Ocean Research, 1987(9): 19–30.
- [6] 贺五洲, 陈炜. Stokes 波在铅垂圆柱上绕射的二阶分析[J]. 工程力学, 2004, 21(6): 177–182.
HE Wuzhou, CHEN Wei. Second order analysis of diffraction of Stokes waves by a vertical cylinder [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(6): 177–182.
- [7] TROESCH A W. Effects of nonlinearities on hull springing [J]. Marine Technology, 1984, 21(4): 356–363.
- [8] GU X K, SHEN J W, MOAN T. Experimental and theoretical investigation of higher order harmonic components of nonlinear bending moments of ships [J]. Journal of Ship Technology Research, Schiffstechnik, 2000(4): 143–154.
- [9] HE H P, TROESCH A W, SHIN Y S, et al. Springing analysis of elastic vessels in head and oblique seas including non-linear effects due to second order diffraction pressures [C]. The 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2004: 253–259.
- [10] 顾学康, 胡嘉骏. 超大型油船模型波浪载荷试验报告[R]. 无锡: 中国船舶科学研究中心科技报告, 2004.
- [11] 马广宗. 船舶振动与实用计算[M]. 北京: 人民交通出版社, 1981: 451–459.
- [12] 文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 95–101.
- [13] 叶永林, 席亦农, 尤国红, 等. 小水线面双体船总振动计算与试验研究[J]. 中国造船, 2011, 52(4): 56–65.
YE Yonglin, XI Yinong, YOU Guohong, et al. Overall vibration calculation and test for SWATH ship [J]. Shipbuilding of China, 2011, 52(4): 56–65.
- [14] 唐宇航, 陈志坚, 张佳栋. 基于数值试验的波浪载荷激励船舶振动响应研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(22): 114–122.
TANG Yuhang, CHEN Zhijian, ZHANG Jiadong. Vibration response of ships under wave load based on numerical experiment [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(22): 114–122.
- [15] 夏齐强, 陈志坚. 波浪载荷与砰击载荷联合作用下 SWATH 船结构动态响应[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(3): 352–357.
XIA Qiqiang, CHEN Zhijian. Study on dynamic response of SWATH structure subjected to wave loads and slamming loads [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(3): 352–357.
- [16] 陈志坚. 船艇振动学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 229–230.
- [24] 石光明, 刘丹华, 高大化, 等. 压缩感知理论及其研究进展[J]. 电子学报, 2009, 37(5): 1070–1081.
SHI Guangming, LIU Danhua, GAO Dahua, et al. Advances in theory and application of compressed sensing [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(5): 1070–1081.
- [25] TIPPING M E. Sparse bayesian learning and the relevance vector machine [J]. Journal of Machine Learning Research, 2001(1): 211–244.
- [26] 蔡泽民, 赖剑煌. 一种基于超完备字典学习的图像去噪方法[J]. 电子学报, 2009, 37(2): 347–350.
CAI Zemin, LAI Jianhuang. An over-complete learned dictionary-based image de-noising method [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(2): 347–350.

(上接第 110 页)