

## 激光与光电子学进展

## 基于激光偏转效应的水下邻域声场重建方法

甄旖璠, 薛彬\*

天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072

**摘要** 水下邻域声场的高精度重建对研究分析邻域声场结构特点和提升水声传感性能有重要意义。在激光束宽度远小于声波波长的条件下, 激光束穿过声场的偏转效应既携带了声场声压信息, 也携带了梯度信息, 这为直接引入 Kirchhoff 积分定理进行声场重建计算提供了数据传感基础。在此基础上, 利用激光传感声场的稠密性, 引入虚拟扩展声场孔径的计算方法, 进一步接近了 Kirchhoff 积分定理对无穷大积分区间的理论要求。在水下邻域空间, 对提出的声场重建思路和方法进行了验证。实验结果表明, 与直接进行声全息的方法相比, 所提声场重建方法的峰值信噪比提高了约 5.5 dB, 为高精度邻域声场传感器的开发提供了可行新思路。

**关键词** 激光偏转; 光学声场重建; 声全息; 边界延拓

中图分类号 O426.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230859

## Underwater Neighborhood Sound Field Reconstruction Method Based on Laser Deflection Effect

Zhen Yifan, Xue Bin\*

School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** The high-precision reconstruction of an underwater neighborhood sound field is crucial for studying and analyzing the structural characteristics of neighborhood sound field and improving the underwater acoustic sensing performance. The deflection effect of the laser beam passing through the acoustic field carries the gradient and pressure information of the acoustic field when the laser beam width is much smaller than the acoustic wave wavelength. This study provides a data sensing basis for sound field reconstruction by employing the Kirchhoff integral theorem. The calculation method of a virtual extended acoustic field aperture is presented herein by using the density of the laser sensing acoustic field, which further approaches the theoretical requirement of the infinite integral interval in the Kirchhoff integral theorem. The results of the proposed sound field reconstruction ideas and methods are verified in an underwater neighborhood space. The results show that, compared with direct acoustic holography, the proposed acoustic field reconstruction method improves the peak signal-to-noise ratio by 5.5 dB, thereby providing a new feasible idea for developing high-precision neighborhood acoustic field sensors.

**Key words** laser deflection; optical sound field reconstruction; acoustic holography; linear predictive border-padding

## 1 引言

准确重建并获取水下邻域声场的结构与传播特征等信息对换能器测试、医学诊断、声学检测、新型水声传感器研发等具有重要意义。目前, 声场测量主要分为基于压电换能器的直接测量与基于某种媒介的间接测量。而激光是一种非侵入式的测量媒介, 同时有着测量带宽较宽、空间分辨率高、干扰小等优点, 在水下

声场测量<sup>[1-2]</sup>领域有重要研究价值, 并在超声检测<sup>[3]</sup>、空间信道扩容<sup>[4]</sup>、目标跟踪<sup>[5]</sup>等方面有广阔应用场景。

Lucas 等<sup>[6]</sup>在 1932 年首先发现并证实了激光在声场中会发生偏转效应。声波作为机械波, 在传播时会使介质密度随声压变化产生周期性变化, 光束通过介质时将在光束和波前的交叉处发生偏转。Faris 等<sup>[7]</sup>在 1987 年利用声光偏转效应实现了超声波的三维测量。Torrás-Rosell 等<sup>[8-9]</sup>使用激光多普勒测振仪 (LDV), 利

收稿日期: 2023-03-14; 修回日期: 2023-04-22; 录用日期: 2023-05-06; 网络首发日期: 2023-07-12

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC3104600)、国家自然科学基金 (62075162, 62001329)

通信作者: \*xuebin@tju.edu.cn

用声压对时间的导数实现了对空气中 2 kHz 声场的重建。早稻田大学的 Oikawa 团队<sup>[10-11]</sup>围绕声场的激光重建问题,提出了一系列创新方案,有代表性的如使用 LDV 实现的基于激光投影重建的声场测量方案。丹麦科技大学的 Rosell 团队<sup>[12-13]</sup>基于声光效应,利用层析成像技术实现了声场可视化,提出了近场声光全息法,并设计了一种声光波束成形技术,且通过实验验证了其对于远场声源定位的准确性<sup>[14]</sup>。本课题组<sup>[15]</sup>前期利用激光偏转效应实现了 Kirchhoff 定理的直接使用,为近场声场预测和左右弦模糊问题提供了有效的解决方案,并进行了验证。

本文提出一种基于光学偏转效应的邻域声场重建方法,通过测量激光束穿过声场的偏转情况实现对声场声压分布与声压梯度分布的解算,并应用 Kirchhoff 积分定理实现对声场的三维重建<sup>[16]</sup>。针对文献<sup>[15]</sup>中 Kirchhoff 平面衍射方程需要平面向无穷大的理论要求,本文提出了对声场数据进行边界延拓后进行声全息的方法,使实际可积分区间范围更接近理论要求,提高声场重建质量,并进行了三维声场的重建。

## 2 声场重建理论基础

利用声光偏转原理采集声场的梯度信息,完成声场与声压梯度场的重建,并应用 Kirchhoff 积分定理实现声全息,模型构建思路具体如图 1 所示。

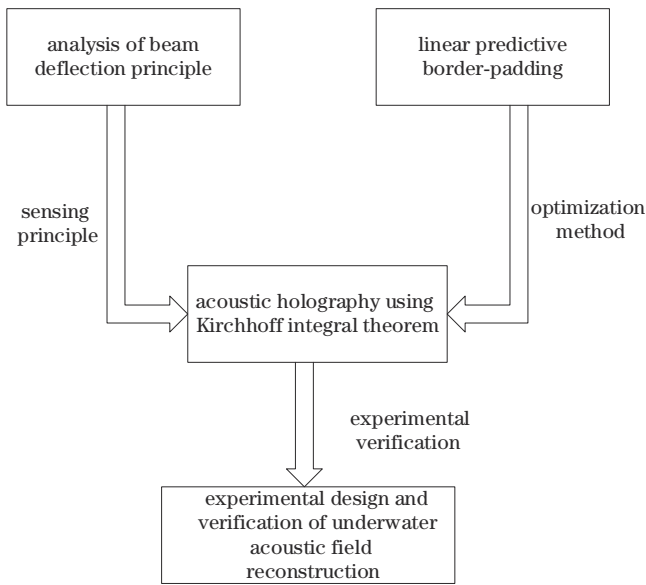


图 1 声场重建模型构建思路

Fig. 1 Construction idea of sound field reconstruction model

### 2.1 声光偏转原理

声波在介质中传播时,将会导致介质折射率发生改变<sup>[17]</sup>。介质折射率与声压之间成线性关系,可以表示为

$$n(\mathbf{r}, t) = n_0 + \left( \frac{\delta n}{\delta p} \right)_s p(x, y, z, t), \quad (1)$$

式中: $n$ 表示介质折射率; $\mathbf{r}$ 表示坐标向量; $n_0$ 表示介质初始折射率; $p(x, y, z, t)$ 表示坐标为 $(x, y, z)$ 、时刻为 $t$ 时的声压; $\left( \frac{\delta n}{\delta p} \right)_s$ 称为压光系数<sup>[18]</sup>,可以表征介质受到

应力时所发生的折射率变化。在 25 °C 水中使用氦氖激光进行照射时,压光系数等于  $1.444 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ <sup>[19]</sup>。

在折射率不断改变的介质中传播时,光束将会发生偏转<sup>[20]</sup>,偏转角度与介质折射率之间的关系可以表达为

$$\alpha = \frac{1}{2n_0} \left( \frac{\delta n}{\delta p} \right)_s \int \frac{\partial p(x, y, z, t)}{\partial z} dx, \quad (2)$$

式(2)说明,激光偏转角度与声压梯度有关。通过光束偏转角度可以得到激光传播路线上声压梯度的积分值,文献<sup>[15]</sup>已经成功利用该测量值重建声压场与声压梯度场。

### 2.2 Kirchhoff 积分定理

Kirchhoff 积分定理是一种曲面积分,该定理表明,对于一个封闭曲面 $S$ ,如果声场及其一阶、二阶微商在 $S$ 内以及 $S$ 上都是单值且连续的,则该曲面内任意一点的声压值可以根据 $S$ 上的声压值与声压梯度值得到<sup>[17]</sup>:

$$p(P) = \frac{1}{4\pi} \oint_S \left\{ \frac{\partial p}{\partial n} \frac{\exp(jkr)}{r} - p \frac{\partial}{\partial n} \left[ \frac{\exp(jkr)}{r} \right] \right\} dS, \quad (3)$$

式中: $p(P)$ 代表封闭曲面内点 $P$ 处的声压; $\frac{\partial}{\partial n}$ 表示对曲面 $S$ 外法向量的导数; $k$ 代表波数; $r$ 代表点 $P$ 到封闭曲面的距离。式(3)的积分区域如图 2 所示,图中 $S$ 表示封闭曲面, $P$ 表示待求声压点, $\mathbf{n}$ 表示曲面外法向量。

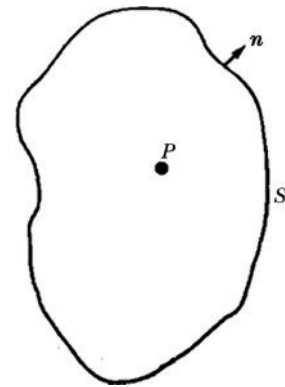


图 2 Kirchhoff 积分区域设置

Fig. 2 Kirchhoff integral region setting

以往的技术手段中,声场的声压值和声压梯度值不能同时获得,因此 Kirchhoff 积分定理很少有实际应用。本文基于激光偏转角度,可以同时获得声场声压值与声场法向梯度值,这为直接应用 Kirchhoff 积分定理提供了条件。在实际测量时,通常只能获得平面数据,很难直接获得整个封闭面上的声场信息。为了直接使用平面声场,应用 Kirchhoff 积分定理实现声全息,考虑图 3 所示的封闭曲面。

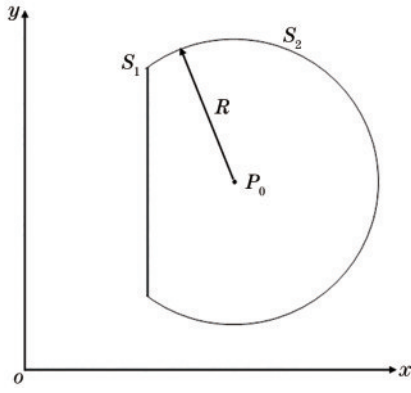


图 3 平面衍射 Kirchhoff 积分定理

Fig. 3 Kirchhoff integral theorem for plane diffraction

如图 3 所示,为计算点  $P_0$  处的声压,取测量平面  $S_1$  与以点  $P_0$  为圆心、半径为  $R$  的球面  $S_2$  组成的封闭曲面进行计算,公式为

$$p(P_0) = \frac{1}{4\pi} \iint_{S_1+S_2} \left\{ \frac{\partial p}{\partial n} \frac{\exp(jkR)}{R} - p \frac{\partial}{\partial n} \left[ \frac{\exp(jkR)}{R} \right] \right\} dS, \quad (4)$$

对于曲面  $S_2$  上的点,有

$$\frac{\partial}{\partial n} \left[ \frac{\exp(jkR)}{R} \right] = \left( jk - \frac{1}{R} \right) \frac{\exp(jkR)}{R}, \quad (5)$$

根据 Sommerfeld 辐射条件,对于曲面  $S_2$  上的点,当半径  $R$  趋近于无穷时,有

$$R \left( \frac{\partial p}{\partial n} - jkp \right) = 0, \quad (6)$$

因此当半径趋于无穷时,曲面  $S_2$  的 Kirchhoff 积分等于 0,则点  $P_0$  处的声压可以直接由测量面  $S_1$  得出:

$$p(P_0) = \frac{1}{4\pi} \iint_{S_1} \left\{ \frac{\partial p}{\partial n} \frac{\exp(jkR)}{R} - p \frac{\partial}{\partial n} \left[ \frac{\exp(jkR)}{R} \right] \right\} dS, \quad (7)$$

式(7)被称为 Kirchhoff 平面衍射方程。但是,式(7)要

求测量平面数据是在无穷大平面上的,在实际应用场景中显然不可能成立,只能使用实际测量的声场区域替代无穷大平面,即认为测量区域以外声场声压值为 0。通过这种近似使用 Kirchhoff 积分定理实现的声全息往往存在一定的误差,本文通过使用线性预测边界延拓(LPBP)方法对声场声压数据与声压梯度数据进行边界延拓,减小这种误差。

LPBP 方法通过测量数据外推测量边界外的数据分布情况,有效扩充数据信息量,提高声全息的精度<sup>[21]</sup>。给定测量声场数据中某一条线上的数据  $\tilde{p} = [\tilde{p}(x_1), \tilde{p}(x_2), \tilde{p}(x_3), \dots, \tilde{p}(x_N)]$ ,边界延拓的目标是通过已有数据预测出  $\tilde{p}$  右侧的若干个数据  $[\tilde{p}(x_{N+1}), \tilde{p}(x_{N+2}), \tilde{p}(x_{N+3}), \dots]$  或其左侧的若干个数据  $[\dots, \tilde{p}(x_{-2}), \tilde{p}(x_{-1}), \tilde{p}(x_0)]$ 。LPBP 方法基于前  $m$  个数据线性预测其后数据  $\tilde{p}(x_s)$ ,表达式为

$$\tilde{p}(x_s) = - \sum_{i=1}^m a_i \tilde{p}(x_{s-i}), \quad (8)$$

式中  $a_i$  表示对应  $\tilde{p}(x_{s-i})$  的拟合系数。

对于 LPBP 方法,已有许多学者提出了不同的方法来计算最符合原始信号的拟合系数  $\mathbf{a} = [1, a_1, a_2, \dots, a_m]$ ,其中 Burg<sup>[22]</sup>提出的实现方法将  $m$  个已知量的自回归系数作为预测后续未知量的基础,所需要的已知数据最少,精确度高,适用于本文提出的方法。

### 2.3 数值仿真

为了验证 LPBP 方法对声场声压数据进行边界延拓的准确性,比较了进行边界延拓后的仿真声场与理论上的声场,结果如图 4 所示。

图 4 表明,延拓得到的声场与相同范围内的仿真声场相似。为了评估声场边界延拓质量,使用峰值信噪比(PSNR)对重建声场质量进行量化评估。PSNR 用于衡量两张图像之间的差异,两张图像的 PSNR 值越大,则两张图像越相似。PSNR 大于 40 dB 则表示图

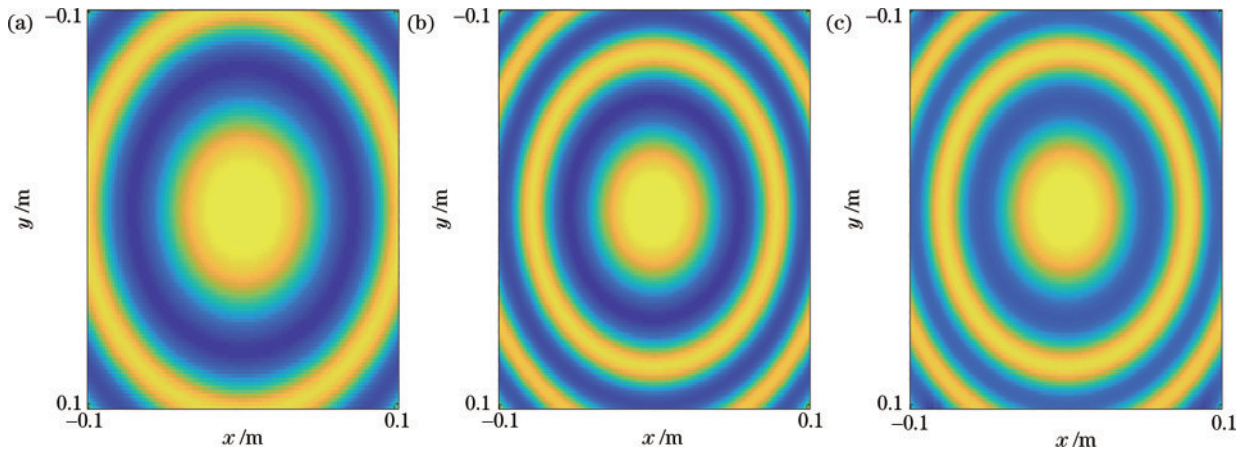


图 4 声场边界延拓方法验证。(a) 仿真  $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$  范围声场;(b) 仿真  $0.26 \text{ m} \times 0.26 \text{ m}$  声场;(c) 对声场图 4(a) 进行边界延拓得到的  $0.26 \text{ m} \times 0.26 \text{ m}$  声场

Fig. 4 Verification of sound field boundary extension method. (a) Simulation of  $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$  range sound field; (b) simulation of  $0.26 \text{ m} \times 0.26 \text{ m}$  range sound field; (c)  $0.26 \text{ m} \times 0.26 \text{ m}$  range sound field obtained by boundary extension for the sound field Fig. 4(a)

像重建效果极好, 小于 10 dB 表示重建图像不可接受, 重建失败。PSNR 的计算表达式为

$$R_{\text{PSNR}} = 20 \cdot \log_{10} \frac{I_{\text{MAX}}}{\sqrt{E_{\text{MS}}}}, \quad (9)$$

$$E_{\text{MS}} = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \frac{\|I(i, j) - K(i, j)\|^2}{mn}, \quad (10)$$

式中:  $I(i, j)$  表示原始图像中坐标为  $(i, j)$  的像素值;  $K(i, j)$  表示重建图像中坐标为  $(i, j)$  的像素值;  $m$  和  $n$  表

示图像的尺寸;  $I_{\text{MAX}}$  表示图像的最大像素值。计算可得, 经过边界延拓后声场与仿真声场的 PSNR 值为 31.79 dB, 因此可以使用延拓后声场替代原始声场。

为初步验证边界延拓对 Kirchhoff 积分定理进行声全息的作用, 进行了数值仿真实验, 仿真了范围为  $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ 、与点声源垂直距离为  $0.2 \sim 0.3 \text{ m}$  的三维声场, 并分别使用距点声源  $0.2 \text{ m}$  处  $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$  声场、 $0.26 \text{ m} \times 0.26 \text{ m}$  声场、边界延拓得到的  $0.26 \text{ m} \times 0.26 \text{ m}$  声场进行了声全息, 结果如图 5 所示。

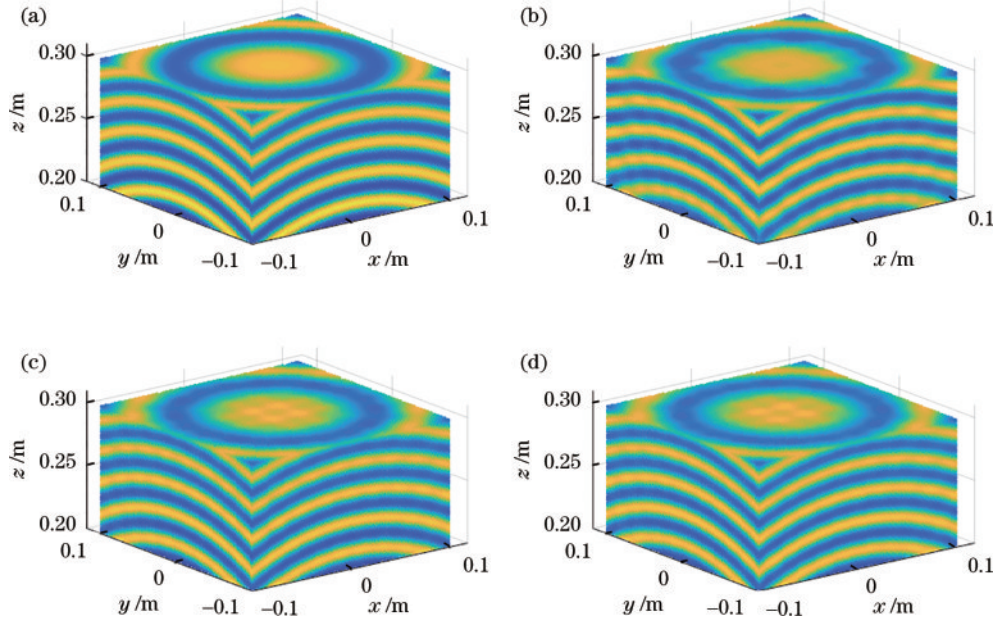


图 5 仿真声全息比较。(a) 仿真三维声场; (b) 利用  $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$  声场进行声全息; (c) 利用  $0.26 \text{ m} \times 0.26 \text{ m}$  声场进行声全息; (d) 边界延拓后进行声全息

Fig. 5 Simulated acoustic hologram comparison. (a) Simulated three-dimensional sound field; (b) acoustic holography by  $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$  sound field; (c) acoustic holography by  $0.26 \text{ m} \times 0.26 \text{ m}$  sound field; (d) acoustic holography after LPBP

通过比较图 5(b) 与图 5(d) 得出, 进行边界延拓后的声全息声场相比直接进行声全息的声场更加接近直接仿真得到的声场。为了量化图 5(b)~(d) 三个全息声场的质量, 在  $z$  轴上每隔  $1 \text{ mm}$  截取一个平面, 分别与仿真声场计算 PSNR 值, 得到的结果如图 6 所示。

图 6 表明, 边界延拓之后进行声全息的声场的重建质量高于直接声全息, 因此可以认为边界延拓方法

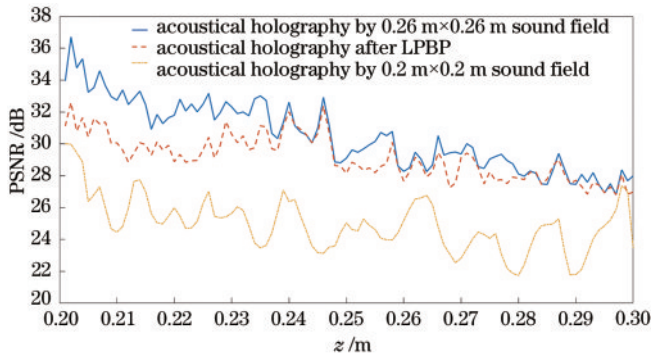


图 6 三种方法进行声全息的 PSNR

Fig. 6 PSNR of acoustic holography obtained by three methods

能够有效提高声全息质量。

### 3 实验验证与分析

#### 3.1 实验设计

实验装置主要由水声换能器激励源 (DYW-110)、激光光源 (He-NeHRS015B, Thorlabs)、水声换能器夹持装置 (实验室自制) 和光信号采集模块 4 部分组成。水声换能器激励源包括功率放大器 (ATA4051, 西安安泰电子) 和信号发生器 (AFG3022C, Tektronix)。信号发生器生成正弦信号, 功率放大器放大信号电压, 激励换能器发射超声。信号发生器同时为数据采集系统提供触发信号, 以便重建瞬时声场。测量平面位于换能器下方  $10 \text{ cm}$  处。激光器发射激光, 垂直射入水缸穿过声场。激光中心波长为  $632.992 \text{ nm}$ , 输出功率为  $1.8 \text{ mW}$ , 光束直径为  $(0.65 \pm 0.05) \text{ mm}$ , 光强稳定性为  $\pm 0.2\%$ 。光强会对位置敏感探测器 (PSD) 的输出信号造成影响。保持激光位置不变提高光功率时, PSD 的输出信号如图 7 所示。

图 7 说明, 光功率为  $1.5 \sim 3.5 \text{ mW}$  时, PSD 输出信

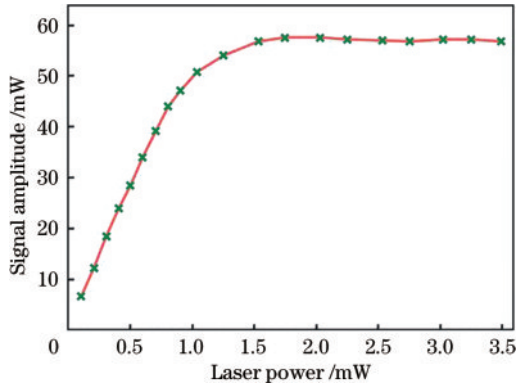


图7 光功率对PSD输出信号的影响

Fig. 7 Effect of light power on output signal of PSD

号平稳,此时光强漂移所造成的误差较小。此外,PSD测量的光斑位置误差会随着光束直径增加而增加。当光束直径为6.5 mm时,测量误差在10 μm以内,该误差可以通过校准得到进一步减小。

使用四象限位置探测器(PDQ80A, Thorlabs)接收激光,探测器控制箱(KPA101, Thorlabs)与示波器(MDO3104, Tektronix)相连。在激发声场前,需调整四象限探测器位置,将激光指向探测器中心位置,使激光处于PSD的线性探测区间内并进行校准。由于激光器本身固定于光学平台上,所以实验中所有测量都是使用四自由度位移台和旋转换能器来实现的。当超声换能器与激光束水平情况下,移动、旋转超声换能器和移动、旋转激光的效果相同。具体测量参数如表1所示。

表1 实验参数

Table 1 Experimental parameter

| Parameter                | Value     |
|--------------------------|-----------|
| Room temperature /°C     | 25        |
| Measuring area / (cm×cm) | 20×20     |
| Measure angle / (°)      | 5         |
| Beam spacing /mm         | 5         |
| Number of beams          | 40        |
| Beam width /mm           | 0.65±0.05 |

实验布置如图8所示。搭建光路时,需要确保激光束垂直于位移台旋转轴,同时换能器发射面与激光平行。实验过程水温控制在25℃,使用消声尖劈覆盖水缸底面,避免底面声波反射带来的影响。位移台可以实现三自由度以及旋转的功能,达到1 μm的定位精度和0.001°的旋转精度。实验具体流程如图9所示。

### 3.2 声场重建结果

应用上述实验装置进行声场重建,以1T表示一个周期,选取一个周期内的6个时刻,分别为0T、0.2T、0.4T、0.6T、0.8T和1.0T,使用光学偏转法分别得到声场声压值与声压法向梯度值。重建得到的声场图像如图10所示。

重建结果表明,所提方法可以同时得到声压场与声

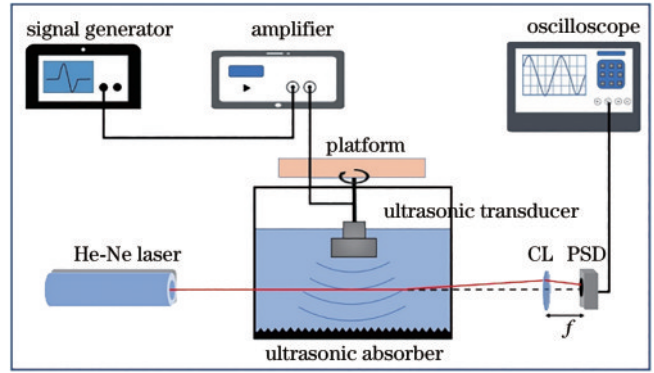


图8 实验装置示意图

Fig. 8 Schematic of experimental apparatus

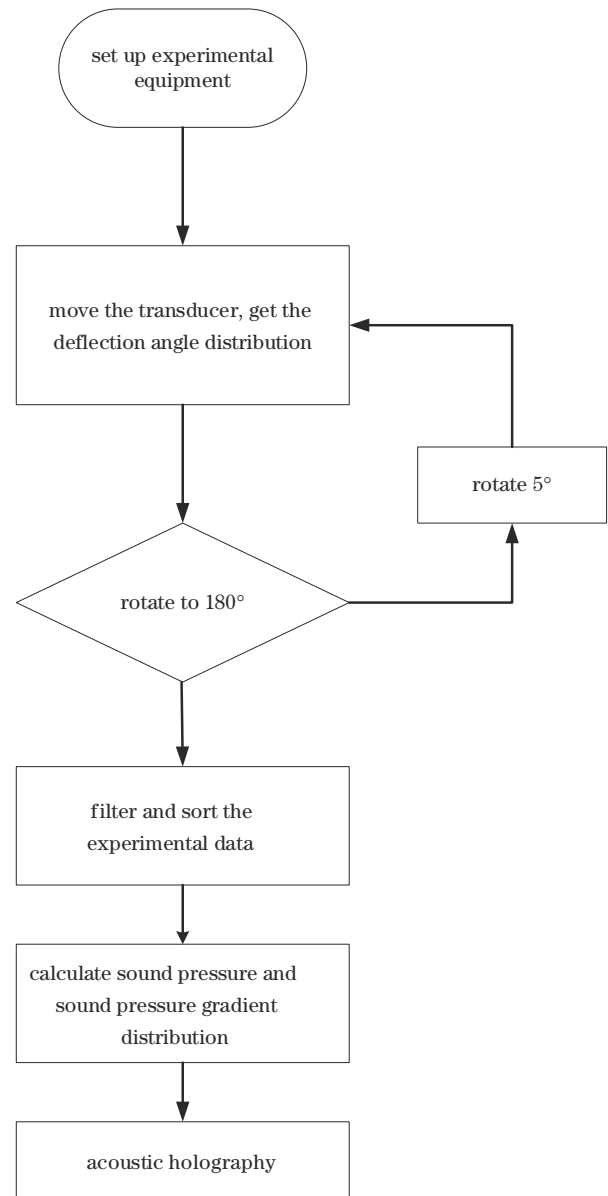


图9 实验流程图

Fig. 9 Experimental flow chart

压梯度场。观察图10可以看出,重建声场在边缘处趋近于0,这是由于换能器指向性强,在边缘处声压值较低。

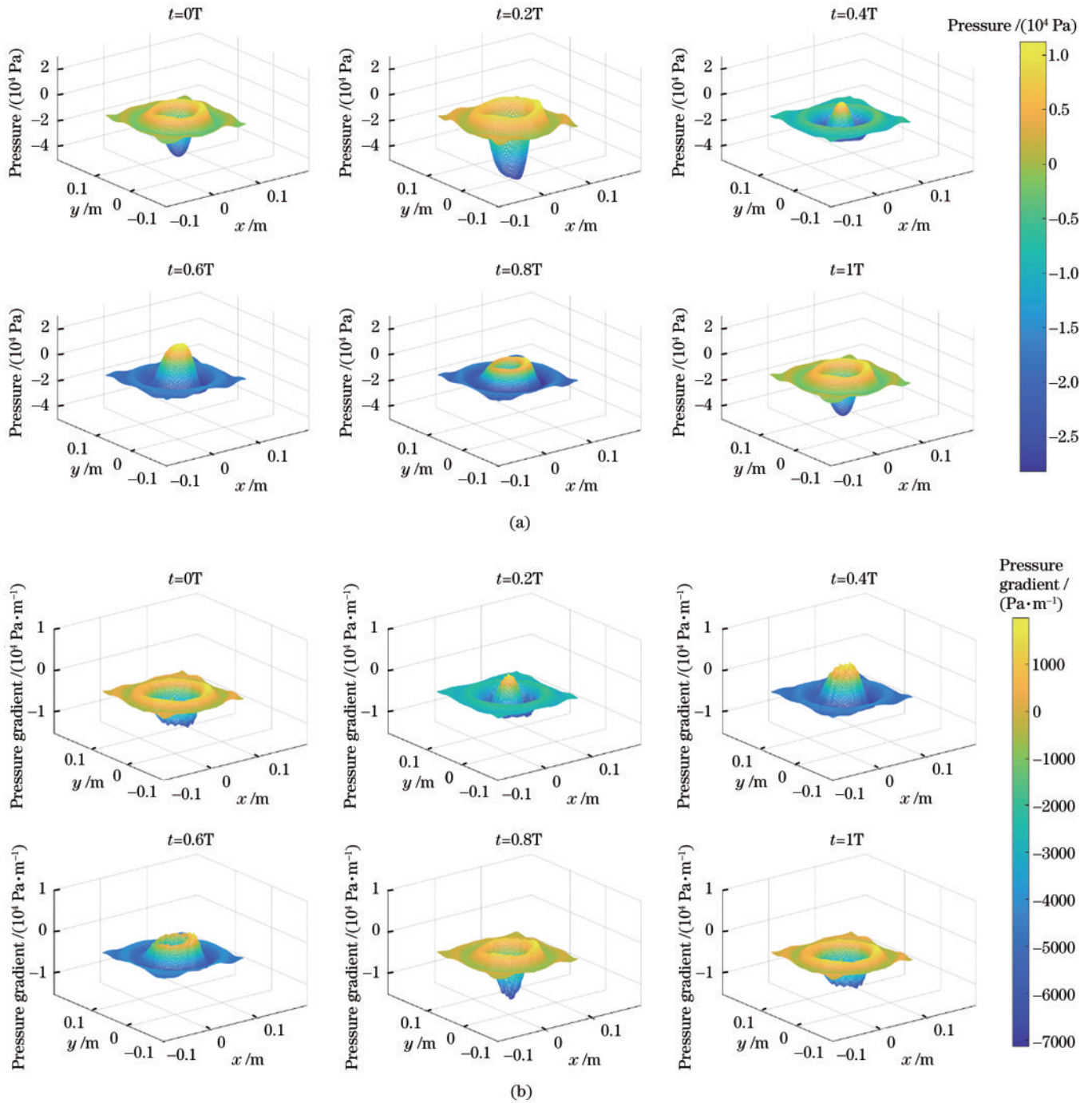


图 10 声场重建结果。(a) 声压重建结果;(b) 声压梯度场重建结果

Fig. 10 Result of sound field reconstruction. (a) Sound pressure reconstruction results; (b) sound pressure gradient field reconstruction results

通过分析声场重建图像可得,声波中心呈随时间向四周扩散的中心辐射状,且0T时刻与1T时刻的声压场、声压梯度场一致,证明所提方法可以清晰得到不同时刻的瞬时声压与声压梯度。实际上所提方法能够获得更高分辨率的传播过程,其上限取决于PSD的响应速度(一般为10 ns左右),能够实现高采样率的声场重建。

### 3.3 声场重建结果对比分析

为了分析重建声场质量,分别在空间与时间上对重建声场进行了对比分析。在空间上,对各时刻声场

横截面(位置如图11(a)虚线所示)声压值与仿真值进行对比;在时间上,计算6个特定空间点(位置如图11(a)黑点所示)在一个脉冲时间内的声压值并进行对比分析,结果分别如图11(b)和图11(c)所示。

从图11(b)可以看出,在6个时刻下,重建声场与仿真值在横截面0~10 cm处吻合良好,而在-10~0 cm处,重建声场的波峰波谷幅值均低于仿真值,这可能是探头声压分布不均匀导致的。图11(c)中,6个特定空间点的幅值随着远离中心点而逐渐降低,相位

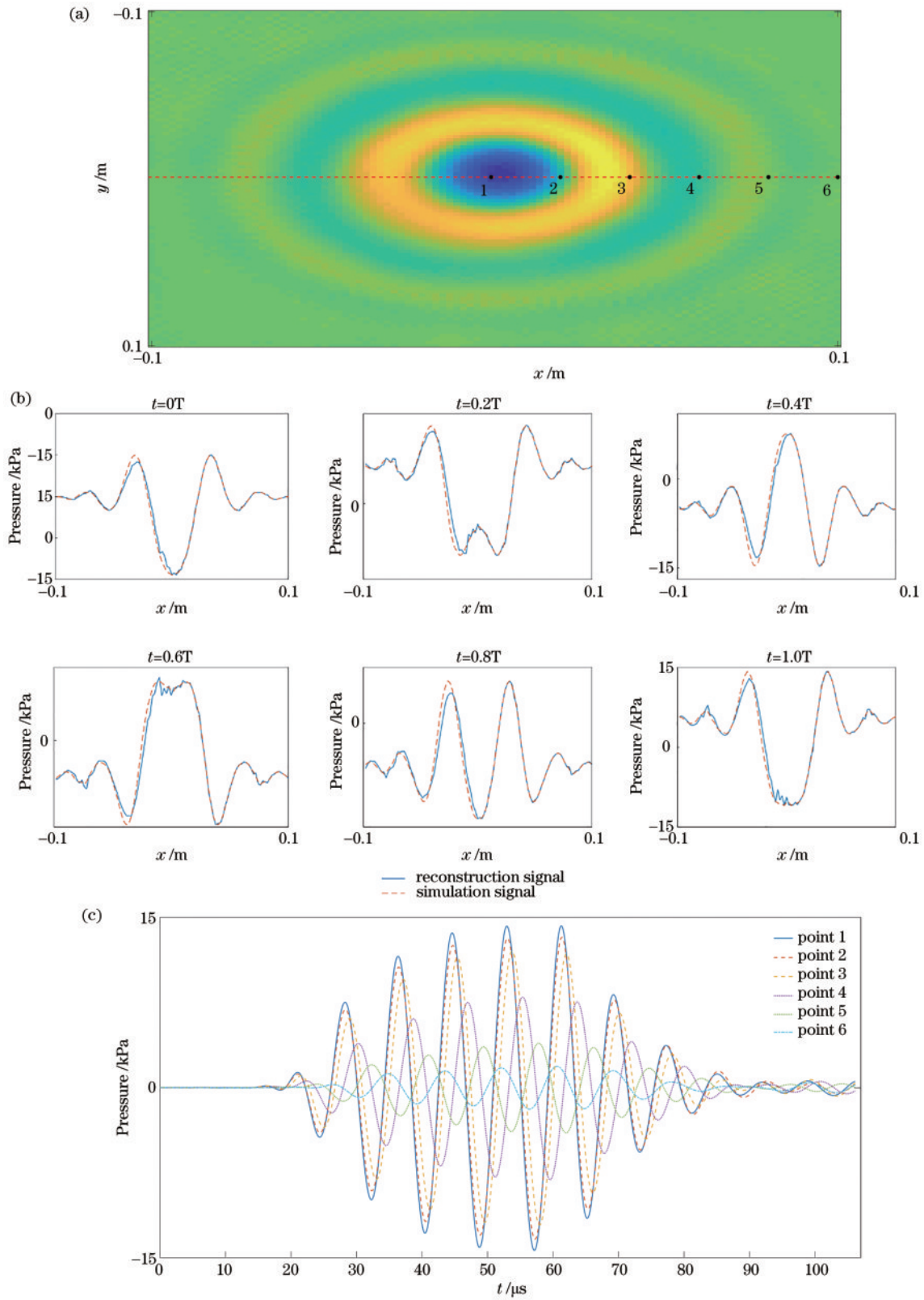


图 11 重建声场声压比较分析。(a) 声场分析截面与点位置示意图；(b) 各时刻声场空间横截面声压；(c) 声场中 6 个特定点声压随时间的变化

Fig. 11 Comparative analysis of sound pressure in reconstructed sound field. (a) Sound field analysis section and point location diagram; (b) spatial cross-section sound pressure of sound field at each time; (c) variation of sound pressure at six specific points in the sound field over time

差稳定,符合声波的传播规律,可以认为重建声场质量良好。

### 3.4 声场全息实验

为了验证 Kirchhoff 平面衍射方程与边界延拓方法的实际效果,在距离重建声场平面 1 cm 处进行了测量,并使用重建得到的声压场与声压梯度场对该平面声场进行预测,随后对声全息得到的声场与实际测量得到的声场进行比较。重建平面与测量平面如图 12 所示。

将测量平面声场恢复后,使用重建声场直接进行声全息与边界延拓后进行声全息的结果如图 13 所示,虚线标注处的声压对比如图 14 所示。

观察图 14 可以看出,边界延拓之后进行声全息得到的声压值与实际测量值更加接近。经过计算,直接进行声全息得到的声场与测量值之间的 PSNR 值为 21.27 dB,在边界延拓后进行声全息得到的声场与测量值之间的 PSNR 值为 26.81 dB,提高了约 5.5 dB。

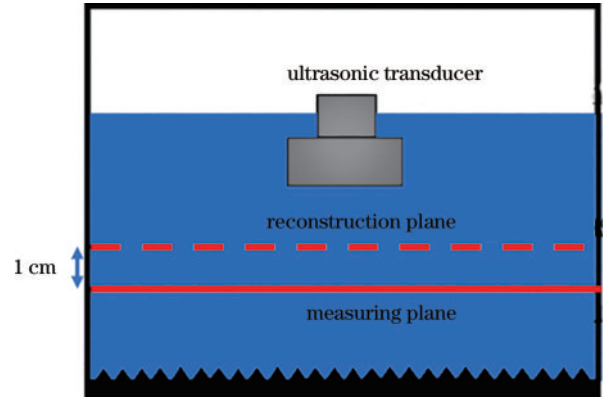


图 12 近场声全息场景

Fig. 12 Near field acoustic hologram scene

与所提方法类似的声场重建方法还有激光干涉法<sup>[23]</sup>与纹影法<sup>[24]</sup>,3种方法区别如表 2 所示。所提方法与其他方法相比,具有光路结构简单、获取信息更多及声全息准确度更高的优点。

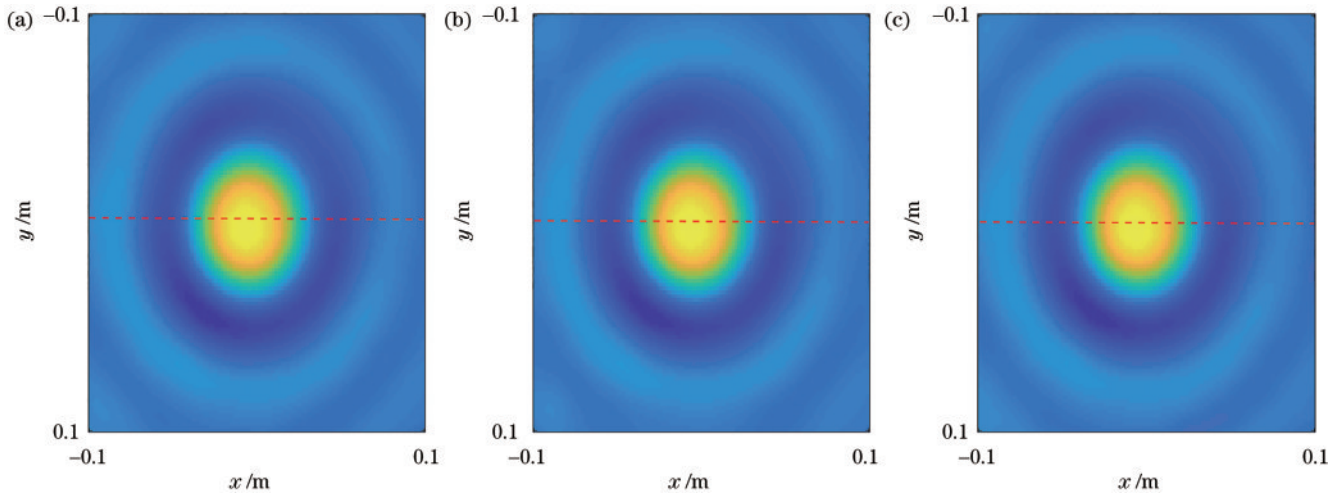


图 13 测量声场与全息声场比较。(a) 测量声场;(b) 直接进行声全息;(c) 边界延拓后进行声全息

Fig. 13 Comparison of measurement sound field and holographic sound field. (a) Measuring sound field; (b) direct acoustic holography; (c) acoustic holography after LPBP

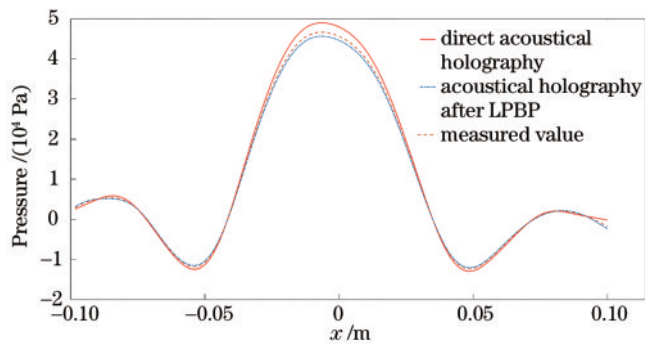


图 14 测量声压值与全息声压值对比

Fig. 14 Comparison of measured sound pressure value and holographic sound pressure value

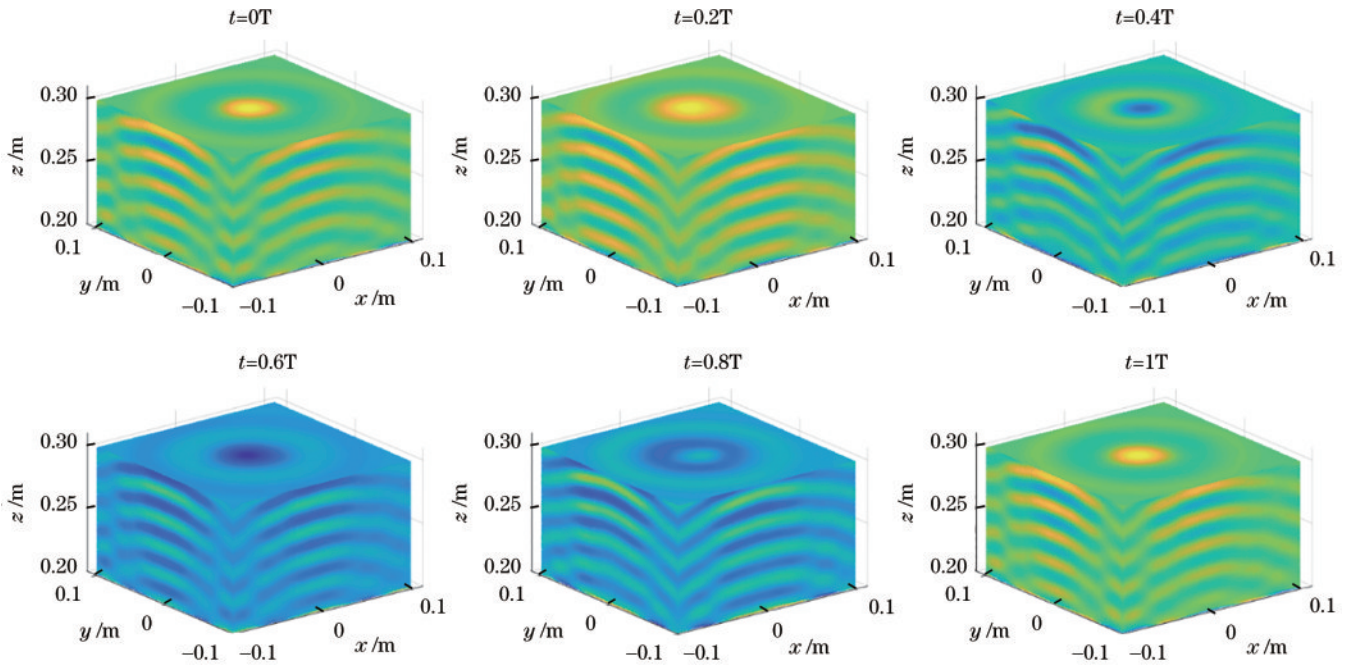
利用测量得到的声压与声压梯度场进行声全息,得到的结果如图 15 所示。图 15(a)和图 15(b)分别是边界延拓前后测量声场在 6 个时刻进行声全息的结果。通过对比图 15(a)与图 15(b)可以发现,直接进行声全息得到的三维声场侧面结构杂乱,没有规律,而进行边界延拓后的全息图侧面结构规律,与仿真的三维声场结构相似,准确度高。从时间角度看,图 15(a)展示了三维声场随时间周期性变化的特点,证明了 LPBP 方法与 Kirchhoff 平面衍射方程结合后可以准确实现不同时刻的声场全息;从空间角度看,图 15(a)与图 5(a)结构相似,可以认为成功实现了声场的三维重建。



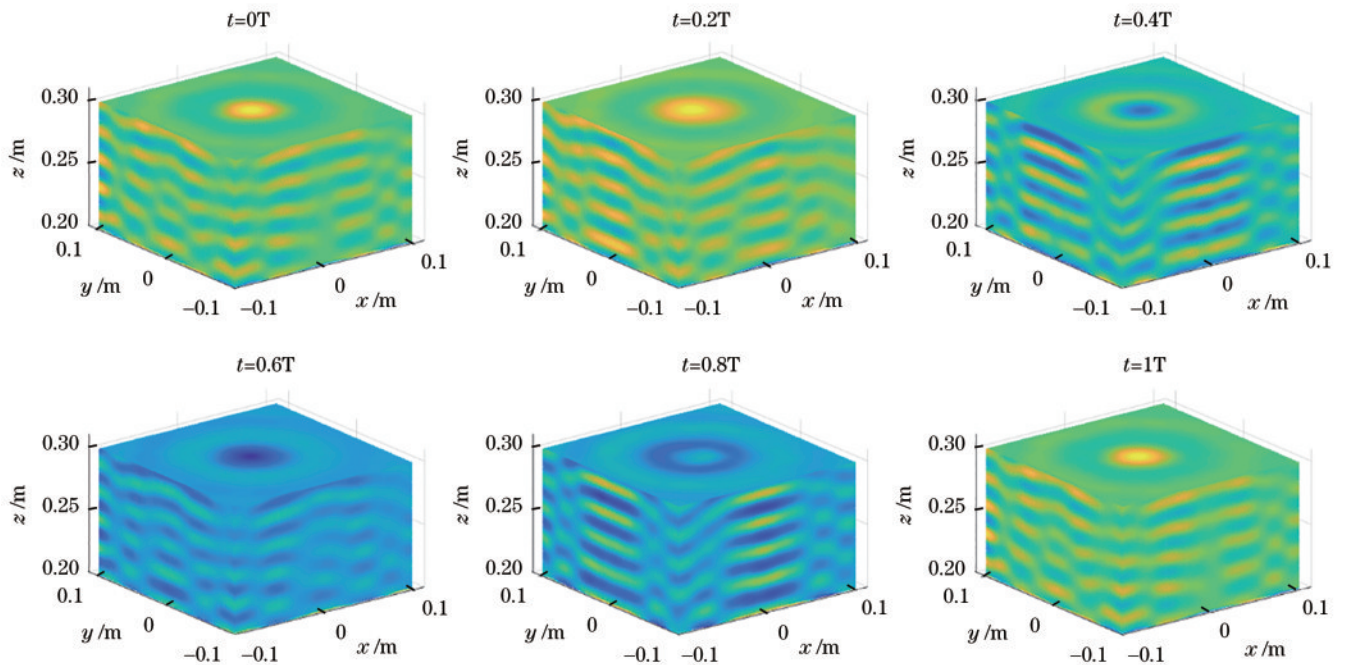
表 2 三种重建方法对比

Table 2 Comparison of three reconstruction methods

| Measurement method   | Optical path structure              | Measurement result                                   | Acoustic holographic PSNR / dB |
|----------------------|-------------------------------------|--|--------------------------------|
| Laser interferometry | Reference light & interference path | Sound pressure field                                 | 20.39                          |
| Schlieren method     | Single laser & beam expander        | Non-quantitative measurement of sound field          | /                              |
| Laser deflection     | Single laser                        | Sound pressure field & sound pressure gradient field | 26.81                          |



(a)



(b)

图 15 测量声场声全息结果。(a) 边界延拓后进行声全息;(b) 直接进行声全息

Fig. 15 Acoustic hologram result of measuring sound field. (a) Acoustic holography after LPBP; (b) direct acoustic holography

## 4 结 论

所提方法使用激光偏转数据准确重建了声场的声压信息与声压梯度信息,在使用边界延拓方法后可以有效提高 Kirchhoff 定理重建邻域声场的准确度。与以往利用光学方法重建声场的方法相比,所提方法利用激光偏转特性获得了声场的梯度信息,使直接应用 Kirchhoff 积分定理成为了可能,并使用边界延拓提高了声全息图的准确度,为 Kirchhoff 积分定理在工程中的应用贡献了理论基础。同时所提方法不需要干涉光路,结构简单,易于搭建。该研究结果可以为新型邻域声场传感器的设计提供借鉴,并增加声场可视化方法的技术储备。

### 参 考 文 献

- [1] Wang D L, Cai W, Zhen Y F, et al. Method of merging the divergence sparsity and simplified acousto-optic interferometry to sense an acoustic wave field[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(15): 15022-15032.
- [2] 孙琪真, 杨留洋, 徐栋宸, 等. 光纤超声换能器技术及应用进展[J]. *中国激光*, 2022, 49(12): 1210001.  
Sun Q Z, Yang L Y, Xu D C, et al. Technology and application progress of optical fiber ultrasonic transducer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(12): 1210001.
- [3] 谭辉, 陈友兴, 金永, 等. 丁羟衬层固化状态的激光超声实时监测方法研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(8): 0814004.  
Tan H, Chen Y X, Jin Y, et al. Study on real-time monitoring method of curing state of HTPB lining by laser ultrasound[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(8): 0814004.
- [4] 魏亚明, 薛彬, 蔡旺, 等. 空间扩容通信模型的稀疏阵列优化设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(23): 2307001.  
Wei Y M, Xue B, Cai W, et al. Sparse array optimization design of space expansion communication model[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(23): 2307001.
- [5] 蔡旺, 王栋梁, 冯伟, 等. 基于激光传感的水下声学目标高分辨跟踪方法[J]. *中国激光*, 2022, 49(18): 1810004.  
Cai W, Wang D L, Feng W, et al. High-resolution tracking method of underwater acoustic target based on laser sensing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(18): 1810004.
- [6] Lucas R, Biquard P. Propriétés optiques des milieux solides et liquides soumis Aux vibrations élastiques ultra sonores[J]. *Journal De Physique et Le Radium*, 1932, 3(10): 464-477.
- [7] Faris G W, Byer R L. Quantitative three-dimensional optical tomographic imaging of supersonic flows[J]. *Science*, 1987, 238(4834): 1700-1702.
- [8] Torras-Rosell A, Barrera-Figueroa S, Jacobsen F. Sound field reconstruction using acousto-optic tomography [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 131(5): 3786-3793.
- [9] Fernandez G E, Torras-Rosell A, Jacobsen F. Holographic reconstruction of sound fields based on the acousto-optic effect[J]. *Institute of Noise Control Engineering*, 2013, 247(5): 3181-3190.
- [10] Oikawa Y, Goto M, Ikeda Y, et al. Sound field measurements based on reconstruction from laser projections[C]//*IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, March 23, 2005, Philadelphia, PA. New York: IEEE Press, 2005: 661-664.
- [11] Yatabe K, Ishikawa K, Oikawa Y. Acousto-optic back-projection: physical-model-based sound field reconstruction from optical projections[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 394: 171-184.
- [12] Rosell A T. New measurements techniques: optical methods for characterizing sound fields[D]. Denmark: Technical University of Denmark, 2014.
- [13] Rosell A T, Lylloff O, Figueroa S B, et al. Reconstruction methods for sound visualization based on acousto-optic tomography[C]//*42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, September 15-18, 2013, Innsbruck, Austria. [S.l.: s.n.], 2013.
- [14] Torras-Rosell A, Barrera-Figueroa S, Jacobsen F. An acousto-optic beamformer[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 132(1): 144-149.
- [15] Xue B, Wang D L, Zhen Y F, et al. Reconstruction of the gradient field in the cross-section of an acoustic wave and its usefulness in processing acoustic wave fields[J]. *Optics Express*, 2022, 30(13): 24103-24117.
- [16] Kirchhoff G. Zur theorie der lichtstrahlen[J]. *Annalen Der Physik*, 1883, 254(4): 663-695.
- [17] Born M, Wolf E. Principles of optics[M]. 7th ed. New York: Cambridge University, 1999: 84-90.
- [18] Tanigawa R, Yatabe K, Oikawa Y. Experimental visualization of aerodynamic sound sources using parallel phase-shifting interferometry[J]. *Experiments in Fluids*, 2020, 61(9): 1-10.
- [19] Scruby C B, Drain L E. Laser ultrasonics: techniques and applications[M]. Bristol: A. Hilger, 1990.
- [20] Kopeika N S. A system engineering approach to imaging [M]. Bellingham: SPIE, 1998.
- [21] 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.
- [22] Burg J P. Maximum entropy spectral analysis[D]. Stanford: Stanford University, 1975.
- [23] Paltauf G, Nuster R, Haltmeier M, et al. Photoacoustic tomography using a Mach-Zehnder interferometer as an acoustic line detector[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3352-3358.
- [24] 陈皓, 徐峥, 姜学平, 等. 纹影法在超声场成像中的应用[J]. *声学技术*, 2016, 35(3): 235-238.  
Chen H, Xu Z, Jiang X P, et al. Application of Schlieren method to ultrasound field imaging[J]. *Technical Acoustics*, 2016, 35(3): 235-238.