

基于 PSM 算法的激光致声 SAFT 水下小目标探测方法

赵扬^{1,2*}, 李鹏³, 张鹏辉³, 周志权¹, 白雪³, 马健³

¹哈尔滨工业大学(威海)信息科学与工程学院, 山东 威海 264209;

²威海市智能光声检测与传感技术重点实验室, 山东 威海 264209;

³齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省科学院激光研究所, 山东 济南 250103;

摘要 水下目标的有效探测是认知海洋的前提与关键。本文介绍了一种可用于空-水跨介质探测成像的激光致声合成孔径聚焦技术。分别建立激光源阵列中心聚焦及偏转聚焦的有限元仿真模型, 进而模拟激光致声合成孔径聚焦探测过程, 采用相位迁移算法对模拟的激光致声信号进行探测图像的重构。采用均方误差与峰值信噪比对图像质量进行评价。搭建了空气-水下激光致声探测实验系统, 通过分析水中钢球经衍射后的声波能量变化, 计算出了其平均能量损失率。利用合成孔径延时叠加波束形成方法实现了声波能量在目标处的汇聚及增强, 为水下目标探测提供了一种新的实现途径。

关键词 遥感; 信息处理; 激光致声; 合成孔径聚焦技术; 相位迁移算法; 有限元仿真

中图分类号 TB566

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.0909001

1 引言

海洋作为重要的国防屏障, 在国家发展格局中的作用十分重要。对海观测是认识海洋、开发海洋、保护海洋和发展海洋的基础。采用合适的空中-水下探测技术是实现对海观测的关键与前提^[1]。利用激光致声实现水下目标探测具有以下优势: 1) 激光与声波信号分别可在空气与水中进行远距离传输; 2) 可通过提高脉冲能量产生高声源级声波; 3) 声脉冲具有脉宽窄、频谱宽、时空分辨率高等特性。上述优点使得激光致声在跨介质探测与通信领域受到越来越多的关注^[2-5]。本文提出了一种基于相位迁移算法的激光致声合成孔径聚焦技术(LIA-SAFT 技术), 用于水下目标的探测与成像。

合成孔径聚焦技术(SAFT 技术)作为一种声学信号后处理方法, 可解决成像效果差、分辨率低的问

题^[6-7]。SAFT 最初起源于机载雷达的映射系统, 主要用于获得高分辨率的雷达图像数据^[8-9]。后来, SAFT 的应用范围得以拓展, Flaherty 等^[10]与 Burckhardt 等^[11]将该技术应用到了超声检测领域, 提升了聚焦域的横向分辨率, 并实现了动态聚焦。随后, Berkhout 等^[12]基于 SAFT 超声检测, 提出了多种数据采集及处理方法, 使得该技术在声学领域得到了快速发展。

近年来, 许多研究人员致力于 SAFT 采集方法的改进, 例如: Karaman 等^[13]利用多个单元阵列合成孔径方法并结合全数据集合法, 提高了检测图像的信噪比和分辨率; Spies 等^[14]利用 SAFT 确定强衰减材料中缺陷的尺寸, 提高了对缺陷的检测能力; Boehm 等^[15]采用 SAFT 对形如腐蚀裂纹的复杂反射面形状进行研究, 在分析裂纹边缘各种反射信号特征的基础上对信号进行处理, 提高了信噪比; Stepinski 等^[16]基于 MMSE 算法对超声

收稿日期: 2021-07-28; 修回日期: 2021-08-28; 录用日期: 2021-10-08

基金项目: 哈尔滨工业大学科研创新基金(202006)、哈尔滨工业大学青年教师发展基金(202002)、山东省重大科技创新工程项目(2020CXGC010705)

通信作者: *zhao.yang@hit.edu.cn

数据进行 SAFT 处理,提高了空间分辨率; Skjelvareid 等^[17]提出了 MULOK 聚焦算法,该算法可以有效地进行 SAFT 成像;刚铁等^[18]提出了 L-SAFT 方法,并采用该方法重建了经超声衍射时差法 (TOFD) 检测形成的 B 扫图像,图像分辨率得到了较大提升;李秋锋等^[19]将 SAFT 原理与波包原子分解算法巧妙结合,证明了采用 SAFT 对混凝土探测成像不仅可以实现高效聚焦还提高了分辨率;李俊燕等^[20]利用 SAFT 检测了厚钢板的内部缺陷并对其进行了定位与成像。

本文基于相位迁移 (PSM) 算法对激光致声的 SAFT 成像进行了研究。采用有限元数值仿真方法模拟了 8 个激光源对水下目标的 SAFT 探测成像,同时模拟并分析了水平面无扰动、微扰动以及大幅度扰动对激光致声信号的影响。利用数据分析软件对仿真信号进行处理,模拟聚焦成像过程并进行分析,然后采用 PSM 算法对图像进行降噪处理,并通过计算均方误差 (MSE) 与峰值信噪比 (PSNR) 对图像质量进行评价。搭建激光致声实验平台,分析衍射前后声波信号能量的变化情况,以及水面扰动对激光致声信号的影响,从而为实际应用提供一定的理论支撑。

2 相位迁移算法

对信号进行傅里叶变换后,可以推断出采样的脉冲回波波场在空间和时间上的分布。这种方法的主要优点是波场在具有不同波速的介质中形成的波形界限清晰,可以实现多层成像。本研究采用的相位迁移算法的原理是:对记录的波场进行小步骤迁移,并在每个深度下创建聚焦的图像线/面(使用“爆炸反射模型”)。从计算量的角度来看,这种方法非最优,因为完整的波场频谱矩阵在每一步都必须与一个相位因子矩阵相乘。然而,由于矩阵乘法在软件中的运行速度很快,因此在实际应用中可实现快速分析及处理。算法流程如下:

2.1 二维傅里叶变换

在几何体中,标量波动方程解的形式为平面波,可以表示为

$$P(t, x, z) = k' \cdot \exp [i(k_x x + k_z z - \omega t)], \quad (1)$$

式中: k' 为正相关系数; k_x 和 k_z 分别表示 x 和 z 方向的波数分量; ω 为角频率; t 为时间。

若 k_z 为 k_x 、 k_z 、 ω 中仅有的独立变量,则波动

方程的通解可表示为

$$P(t, x, z) = \iint_{-\infty}^{\infty} A(\omega, k_x) \exp [i(k_x x + k_z z - \omega t)] dk_x d\omega, \quad (2)$$

式中: $A(\omega, k_x)$ 为 ω 和 k_x 组成的复数幅值。

已知 $A(\omega, k_x)$ 和 $\exp(ik_z z)$, 则利用二维傅里叶逆变换可对 $P(\omega, k_x, z)$ 进行求解,得到

$$P(\omega, k_x, z) = A(\omega, k_x) \cdot \exp(ik_z z), \quad (3)$$

$$P(t, x, z) = \iint_{-\infty}^{\infty} P(\omega, k_x, z) \exp(ik_x x) \exp(-i\omega t) dk_x d\omega, \quad (4)$$

式中: $P(\omega, k_x, z)$ 为频域下的声场。

2.2 波场推导

若将全部探头置于半空间 ($z > Z$) 内, $z = Z$ 扫查平面的各个探头按顺序逐次记录目标反射回波信号,由式(4)可以求得频域内声场 $P(\omega, k_x, Z)$ 的通解,将其代入式(3)可得 $A(\omega, k_x)$ 的通解为

$$P(\omega, k_x, z) = P(\omega, k_x, Z) \cdot \exp [ik_z (z - Z)], \quad (5)$$

式中: $P(\omega, k_x, z)$ 表示探头在 $z = Z$ 扫查平面接收到的声压信号。

2.3 相位迁移

将式(5)代入式(3),得到时域内波场的表达式为

$$P(t, x, z) = \iint_{-\infty}^{\infty} P(\omega, k_x, Z) \cdot \exp [-ik_z (z - Z)] \cdot \exp(ik_x x) \exp(-i\omega t) dk_x d\omega. \quad (6)$$

为求得聚焦图像 $i_p(x, z)$ 的解,将 $t = 0$ 代入式(6),此时方程右侧为 k_x 相关的傅里叶逆变换,将 $\exp(-i\omega_0) = 1$ 代入式(6)后,其转换为 ω 相关的傅里叶逆变换,即

$$i_p(x, z) = \iint_{-\infty}^{\infty} P_{\text{map}}(k_x, k_z) \cdot \exp [ik_z (z - Z)] \cdot \exp(ik_x x) dk_x d\omega, \quad (7)$$

式中: $P_{\text{map}}(k_x, k_z)$ 表示波束分量在 x 和 z 方向扫查成像区域的声场。

PSM 算法流程如下:首先利用傅里叶变换将扫查平面(深度方向首行)采集到的数据进行时频转换,然后在深度方向进行相移,在 $t = 0$ 的条件下通过傅里叶逆变换得到该行聚焦后的图像。在深度方向上逐行相移可以得到整个区域内的聚焦成像。图 1 给出了 PSM 算法的框图。

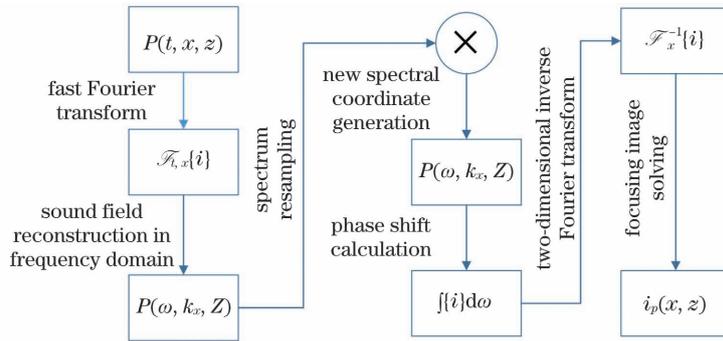


图 1 PSM 算法框图

Fig. 1 Block diagram of PSM algorithm

3 SAFT 技术

SAFT 是声学领域提高检测图像分辨率和质量的有效手段,其基本原理是将由多个小孔换能器组成的若干个线性排布阵列,组成一个相当于大孔径的换能器,可以将其看作是多组小孔换能器的替代,以达到提高识别目标横向方位分辨率的目的。

在检测过程中,换能器阵列沿着设计好的直线轨迹运动,并在其运动轨迹的若干空间位置处向目标域内发射相位调制超声脉冲。SAFT 把换能器阵列分为多组等距的单元,这些单元进行脉冲的发射与回波接收。每个发射单元作为点源发射超声信号,发射出的超声波束到达目标位置后,接收单元接

收成像区域内目标点的散射信号并将其存储起来。对接收到的回波信号进行延时处理,就可以得到目标处的逐点聚焦成像图。

SAFT 收发模式如图 2 所示,单次信号发射和对应的接收过程仅对单一阵元有效。对于场点 (r, θ) ,其合成波束表示为

$$S_{SAFT}(r, \theta) = \sum_{n=0}^{N-1} s\left(t - \frac{2r}{c} - 2\tau_n\right), \quad (8)$$

式中: r/c 表示声波的渡越时间; N 为阵元总数; τ_n 为延迟时间; r 为声波传播距离; θ 为波束角度。

式(8)为信号发射与接收的双重表示,因为在合成孔径收发模式下,发射和接收过程共用同一个传感器阵元,因此收发双向流程的延时是无差别的,均用 τ_n 表示。

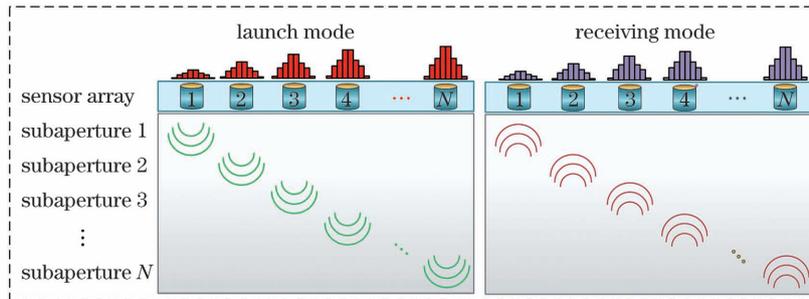


图 2 SAFT 收发模式

Fig. 2 SAFT transceiver mode

当阵元发射单一频率信号 $\exp(j\omega_0 t)$ 时,在不考虑时间 t 的情况下,由式(8)可得

$$S_{SAFT}(r, \theta) = \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\omega_0) \left(-\frac{2r}{c} - 2\tau_n\right). \quad (9)$$

图 3 所示为 SAFT 波束收发原理的几何关系图,延迟时间 τ_n 为

$$\tau_n = \frac{r - r_n}{c}. \quad (10)$$

由几何余弦定理可知

$$r_n = \sqrt{x_n^2 + r^2 - 2rx_n \sin \theta}, \quad (11)$$

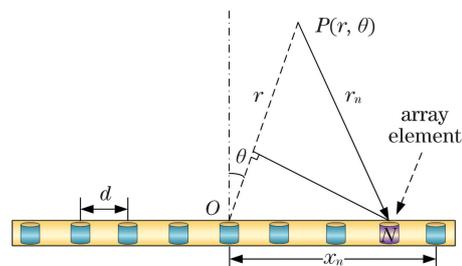


图 3 SAFT 波束收发原理的几何关系图

Fig. 3 Geometric diagram of SAFT beam transceiver principle

将其代入式(10)可得

$$\tau_n = \frac{1}{c} (r - \sqrt{x_n^2 + r^2 - 2rx_n \sin \theta}) = \tau_n^s + \tau_n^f \quad (12)$$

式(12)中的延时 τ_n 由聚焦延时 τ_n^f 与偏转延时 τ_n^s 组成。偏转延时 τ_n^s 可以表示为波束聚焦声场的指向性,其数值定义为

$$\tau_n^s = (x_n \sin \theta) / c \quad (13)$$

聚焦延时 τ_n^f 表示在保持聚焦方向的前提下,对每个发射单元施加不同的延时,使多组超声波束聚焦到某一个场点,可定义为

$$\tau_n^f = \frac{1}{c} (r - x_n \sin \theta - \sqrt{x_n^2 + r^2 - 2rx_n \sin \theta}) \quad (14)$$

由图 4 可以看出两种延时对波束的影响:当仅施加聚焦延时 τ_n^f 于阵列传感器时,波束中心位置在阵列的几何中心线处,在中心线的目标区域实现聚焦,如图 4(a)所示;当两种延时同时施加于阵列传感器时,波束中心会根据一定的偏转角进行偏转,且在目标区域内聚焦,如图 4(b)所示。

对于远场区, τ_n 可用 τ_n^s 来近似。将式(13)代入式(9)可得

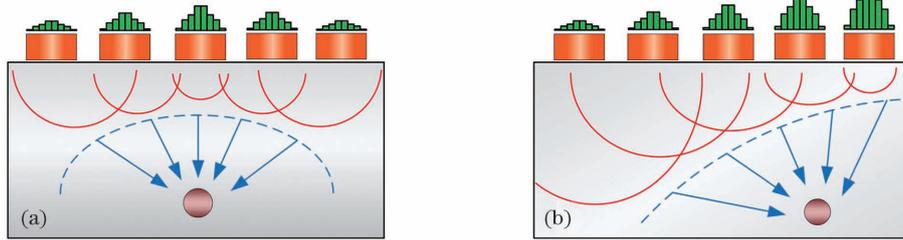


图 4 波束聚焦。(a)中心聚焦;(b)偏转聚焦

Fig. 4 Beam focusing. (a) Center focusing; (b) deflection focusing

$$S_{\text{SAFT}}(\theta) = \exp\left(-j\omega_0 \frac{2r}{c}\right) \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp[-2j\omega_0 \tau_n] = \exp\left(-j\omega_0 \frac{2r}{c}\right) \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-2jk_0 x_n \sin \theta) \quad (15)$$

r 为固定值时,对波束形成过程无重要影响,可不考虑,则合成波束可以表示为

$$P_{\text{SAFT}}(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-2jk_0 x_n \sin \theta) \quad (16)$$

应用等比数列求和公式对式(16)求和,可得

$$P_{\text{SAFT}}(\theta) = \frac{\sin(k_0 N d \sin \theta)}{\sin(k_0 d \sin \theta)} \quad (17)$$

图 5 为 SAFT 形成的波束模拟仿真图像,基本参数设置如下:阵元总数 $N = 32$,中心频率 $f_0 =$

3.5 MHz,水中声速 $c = 1480$ m/s,阵元间距 d 分别为 $\lambda/2$ 和 $\lambda/4$,波束角度 θ 的取值范围在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间。图 5(a)表示阵元间距为 $\lambda/2$ 时的波束形成,图 5(b)表示阵元间距为 $\lambda/4$ 时的波束形成。

从图 5(a)中可以看出,当阵元间距为 $\lambda/2$ 时,波束在 $\theta = \pm 90^\circ$ 时的副瓣较大。这是由于阵元间距已超过了奈奎斯特采样定理阈值。当阵元间距减小为 $\lambda/4$ 时,副瓣消失,如图 5(b)所示。

SAFT 每次收发利用的是同一个传感器,降

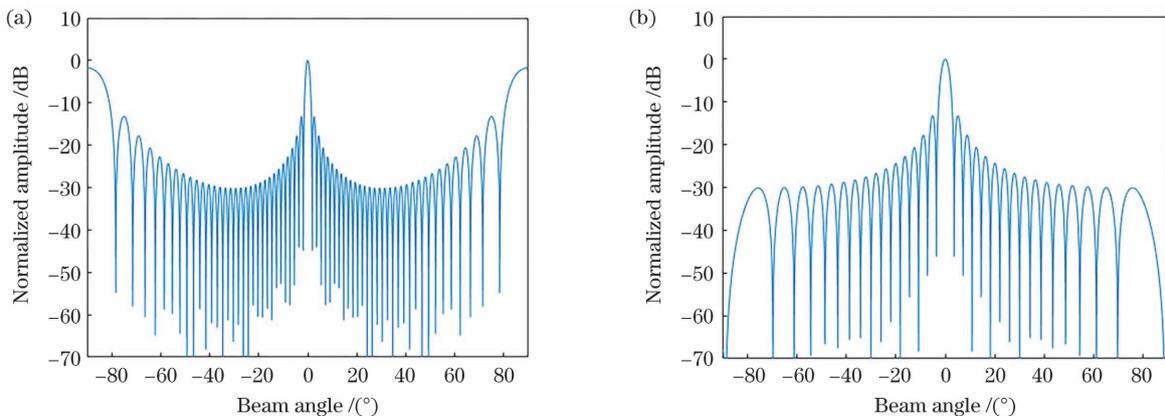


图 5 波束仿真。(a) $d = \lambda/2$;(b) $d = \lambda/4$

Fig. 5 Simulation of beam forming. (a) $d = \lambda/2$; (b) $d = \lambda/4$

低了硬件成本,并实现了信号发射及接收的双向聚焦;但其存在直接输出信号的信噪比较低、计算量庞大等不足,对于精度要求较高的目标检测还存在一定局限性。可以利用多阵元 SAFT 等方法加以改进。

4 有限元仿真

为研究液体介质中 SAFT 成像的效果,提升目标处的检测精度,采用有限元仿真软件从二维角度建立液体中 SAFT 仿真成像的几何模型,模拟 8 个激光源延时激发从而形成 SAFT 聚焦,介质选择液体(水)。通过计算可以得到 8 个激光源激发超声波传播并形成聚焦的声压分布。选择添加的物理场模块是热黏性声学(瞬态)模块和固体力学模块,多物理场选择热黏性声-结构边界。

4.1 控制方程

为了描述流体运动,这里引入了 Navier-Stokes 方程,如式(18)所示;连续性方程如式(19)所示。

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ \mu [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right\} + \mathbf{F}, \quad (18)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (19)$$

式中: \mathbf{u} 为流体的速度; p 为流体的压力; ρ 为流体的密度; μ 为流体的动力黏度; \mathbf{I} 为单位张量; \mathbf{F} 表示可能的体积力源项。Navier-Stokes 方程和连续性方程分别表示动量守恒和质量守恒。

在频域内,热黏性声学接口中的控制方程是连续性方程

$$i\omega \rho = -\rho_0 (\nabla \cdot \mathbf{u}_0), \quad (20)$$

式中: ω 为角频率; ρ_0 表示背景密度; \mathbf{u}_0 表示速度场。动量方程为

$$i\omega \rho_0 \mathbf{u}_0 = \nabla \cdot \left\{ -p \mathbf{I} + \mu_0 [\nabla \mathbf{u}_0 + (\nabla \mathbf{u}_0)^T] + \left(\mu_B - \frac{2}{3} \mu_0 \right) (\nabla \cdot \mathbf{u}_0) \mathbf{I} \right\}, \quad (21)$$

式中: μ_0 表示动力黏度; μ_B 表示容积黏度。能量守恒方程为

$$i\omega (\rho_0 C_p T - T_0 \alpha_0 |p|) = -\nabla \cdot (-k \nabla T) + Q, \quad (22)$$

式中: C_p 表示恒压热容; k 表示热导率; α_0 表示热膨胀系数; Q 为热源项; p 为压力; T 表示温度。最后可以得到与压力、温度和密度变化相关的线性化状态方程,即

$$\rho = \rho_0 (\beta_T |p| - \alpha_0 T), \quad (23)$$

式中: β_T 表示等温压缩率。

4.2 仿真模型设置

仿真模型为 40 cm×20 cm 的矩形区域,介质中心设置半径为 1 cm 的钢球,用以观察声波的变化情况。在仿真模型上表面中间处添加相邻的 16 个点作为 8 个激光源激发声波的边界。模型设置如图 6 所示。

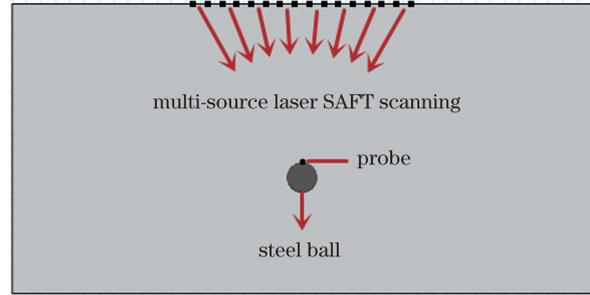


图 6 多源激光 SAFT 扫描

Fig. 6 Multi-source laser SAFT scanning

为激励的激光源施加时间延时,从而在液体介质中形成中心聚焦及偏转聚焦,波束的延时时长 t_n 为

$$t_n = \frac{F_d}{c} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{x_i}{F_d} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} + t_0, \quad (24)$$

式中: F_d 表示聚焦的深度; c 为声速; x_i 为第 i 个阵元与中心点的距离; t_0 为时间常数,主要是避免延时时长为负值。

4.3 仿真过程

1) 参数设定

对全局参数进行定义,包括激光能量密度、脉冲宽度、波长、声速等,其中定义超声波在水中的传播速度为 $c = 1480$ m/s,具体参数设定如表 1 所示。

表 1 相关参数定义

Table 1 Relevant parameter definitions

Parameter	Variable symbol and its unit	Value
Center frequency of ultrasonic signal	f_0 /MHz	1
Period of signal	t_0 /s	10^{-6}
Laser spot radius	R /m	10^{-4}
Laser pulse rise time	t_1 /s	10^{-8}
Peak position of Gaussian pulse	x_0 /m	10^{-2}
Laser energy density	F_e /(W·m ⁻²)	1.59×10^{12}
Velocity in water	c /(m·s ⁻¹)	1480
Time step	T_s /s	3×10^{-8}

2) 时间、空间函数以及热通量的定义

热通量为方向性矢量,表示单位时间内通过界面的热能,其函数表达式与时间、空间函数相关。时

间、空间函数的定义如式(25)及式(26)所示,其中: R 为激光光斑的半径, x_0 为高斯脉冲的峰值位置。热通量 q_n 为时间函数与空间函数的乘积,其函数图像如图7所示。

$$T_1(t) = t/t_0 \times \exp(-t/t_0) \quad (t \leq t_0), \quad (25)$$

$$T_2(x) = \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{R^2}\right], \quad (26)$$

式中: $T_1(t)$ 表示时间函数; t_0 表示激光脉冲持续时间; $T_2(x)$ 表示空间函数。

3)在有限元软件中添加介质水,并导入其内置

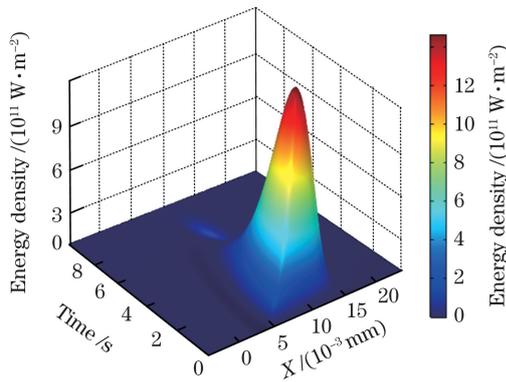


图7 热通量定义

Fig. 7 Definition of heat flux

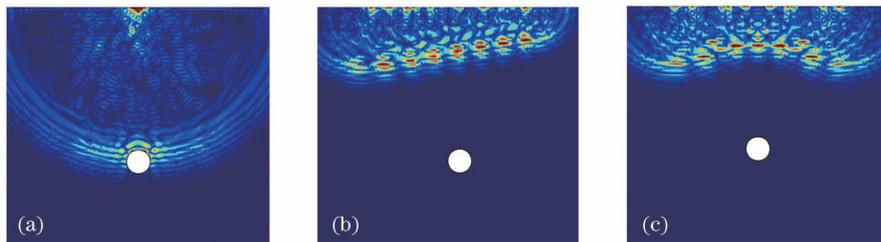


图8 液体中激光致声的仿真。(a)单激光源;(b)偏转聚焦;(c)中心聚焦

Fig. 8 Laser-induced acoustic simulation in liquid. (a) Single laser source; (b) deflection focus; (c) center focus

从声压的幅值可以明显看出,在外界环境和激光光源等都相同的情况下,与单个激光源激励相比,SAFT扫描合成后声波能量的汇聚效果增强。在探测目标处以较大能量汇聚进行扫描,结果如图9所示。可见,中心聚焦的能量汇聚效果最好,约为单光源下激光声信号能量的3.46倍。

在有限元软件中模拟海洋平面、15°斜面以及波浪面的水面情况,进行SAFT延时聚焦,并提取目标边界处的声压信号,比较、分析三种情况对激光声信号的影响(图10)。

为更加直观地分析三种情况对激光致声信号的影响,提取目标边界上方的声压信号并进行成像对比,结果如图11所示。

通过对比三种情况下的声压值分布可以发现,

的相关参数(如表2所示)。

表2 水的属性明细

Table 2 Water property details

Parameter	Variable symbol and its unit	Value
Dynamic viscosity	$\eta / (\text{Pa}\cdot\text{s})$	1.01×10^{-3}
Kinematic viscosity	$\nu / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	1.01×10^{-6}
Heat of evaporation	$Q / (\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	2.26×10^6
Specific heat capacity	$C_p / (\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	4.2×10^3
Density	$\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^3)$	1.0×10^3
Heat conductivity	$K / (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.598
Thermal expansivity	α / K^{-1}	2.08×10^{-4}
Prandtl number	P_r	7.02

4.4 仿真结果

图8所示为激光在液体中激励的声波信号经SAFT聚焦后的声压分布图,可以看出:声波在缺陷处汇聚,能量得到增强。为验证目标处的检测效果,提取钢球附近的声压信号进行时域内分析。在有限元模型中,钢球上方设置了如图6所示的域点探针,以提取钢球附近声压值的变化,从而对单源激光扫描和多源激光SAFT扫描后钢球处的能量分布进行对比分析和验证。

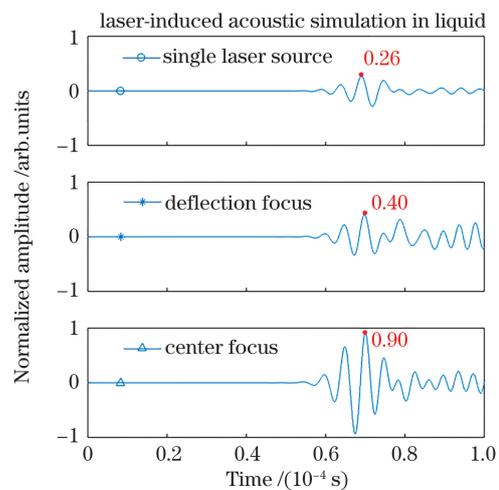


图9 声压信号的时域波形对比

Fig. 9 Time domain waveform comparison of acoustic pressure signals

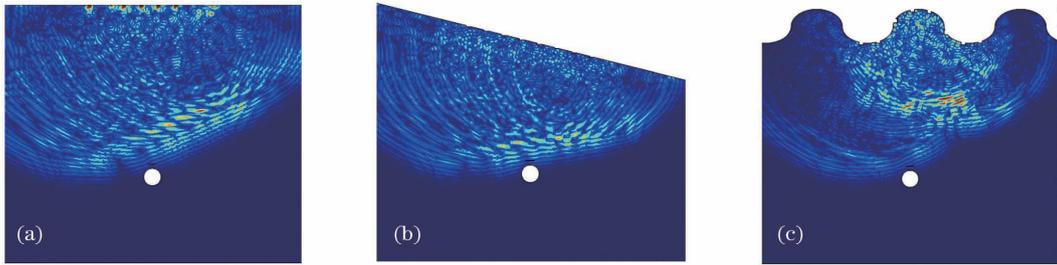


图 10 三种情况下的声压分布图。(a)平面;(b) 15°斜面;(c)波浪面

Fig. 10 Acoustic pressure distributions under three conditions. (a) Flat; (b) 15° incline; (c) wave

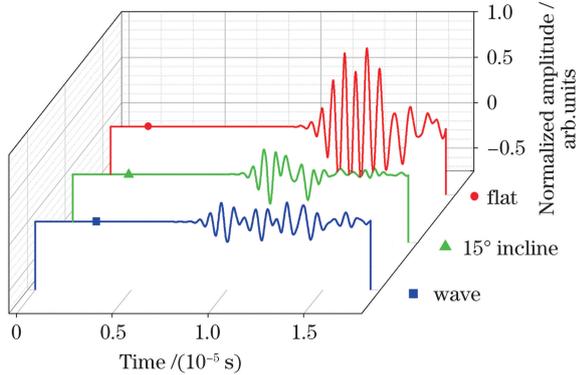


图 11 声压信号对比

Fig. 11 Sound pressure signal contrast

仿真中波浪面和斜面等因素对激光致声信号的影响较为严重,信噪比降低,会对探测质量造成一定影响。因此,在利用激光致声信号进行实际探测时,应当首先考虑海面波浪等因素对信号造成的影响。

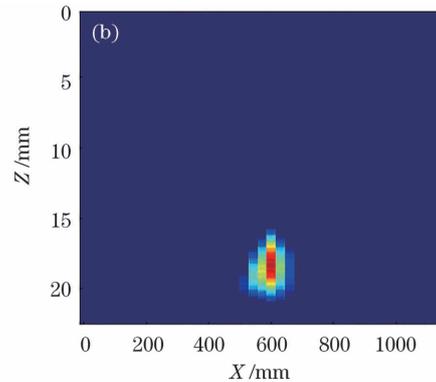
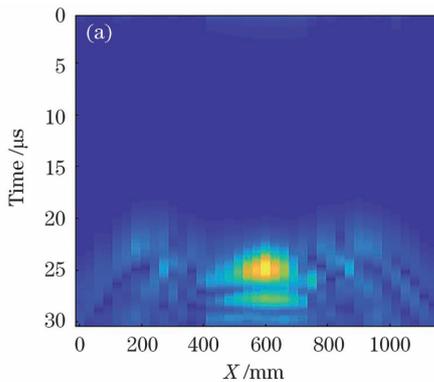


图 12 PSM 算法成像。(a)原始数据成像;(b)聚焦成像

Fig. 12 PSM algorithm imaging. (a) Raw data imaging; (b) focus imaging

图像在传输和显示过程中可能会失真,从而导致成像质量下降,无法满足实际探测要求。声波传播过程中由探针接收反射回波数据,这些数据经 PSM 算法处理后,可基于激光致声 SAFT 原理在目标处聚焦成像。为准确衡量聚焦图像质量的优劣,用均方误差(MSE)和峰值信噪比(PSNR)来衡量图像的质量。

MSE 反映的是估计量和被估计量之间的差异;

5 PSM 算法成像

首先载入仿真过程中由探针接收到的反射回波数据,确定采样时间间隔,从而计算出采样频率;然后设置空间步长及脉冲传输和测量之间的时间延迟,定义声波传播的速度;接着设置截止频率的上下限,并确定好 Z 轴成像的起止范围及分辨率大小;然后确定时间、空间坐标向量及谱坐标向量,使用原始数据进行图像的绘制,得到如图 12(a)所示的图像。去除对应于传感器频率的频谱部分,仅保留换能器频段的二维频谱部分,重新采样得到更高的分辨率并制作二维光谱坐标网格,然后返回到 $t=0$ 时刻计算时移并计算新的光谱坐标,对频谱进行重采样,再进行傅里叶逆变换即可得到图 12(b)所示的聚焦后的图像。

PSNR 表示最大可能功率与噪声功率的比值,可作为图像精度的参量。MSE 与 PSNR 的计算公式分别为

$$f_{\text{MSE}} = \frac{1}{M \times N \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f'(i,j) - f(i,j)]^2}, \quad (27)$$

$$r_{\text{PSNR}} = 10 \lg \frac{Q^2 \times M \times N}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f'(i,j) - f(i,j)]}, \quad (28)$$

式中: $f'(i, j)$ 和 $f(i, j)$ 分别表示待评价图像与原始图像; M, N 分别表示图像的长和宽; Q 表示图像量化的灰度级数。

采用数据分析软件对图像进行 MSE 值与 PSNR 值的计算, 得到 MSE 为 306.49, PSNR 约为 23.27 dB。对 PSNR 数值进行分析可以得到: 经 SAFT 聚焦后, 图像有少许失真, 但并未影响聚焦效果, 图像质量在可接受的范围内。

基于 PSM 算法的激光致声 SAFT 成像方法具有较好的声束合成能力, 提高了成像分辨率, 具有较好的成像质量, 为液体介质中实现目标的非接触式检测提供了新方法。

6 实验验证

6.1 实验装置及仪器

实验系统主要包括水槽、移动滑轨、压电陶瓷 (PZT) 水听器、Nd:YAG 固体激光器、振镜控制系统、聚焦透镜、数字示波器(带存储功能)以及 U 盘。其中: Nd:YAG 固体激光器发射脉冲激光的重复频率为 1~10 Hz, 脉宽为 10 ns, 单脉冲能量最大为 100 mJ; 实验中接收声信号的是 PZT 水听器, 其带宽为 1 MHz。通过示波器进行信号的识别与采集。

图 13 为实验装置图, 其中 1 为水冷系统, 2 为 Nd:YAG 固体激光器, 3 为光触发电路, 4 为四通道数字示波器, 5 为水槽, 6 为钢球, 7 为 PZT 探头。

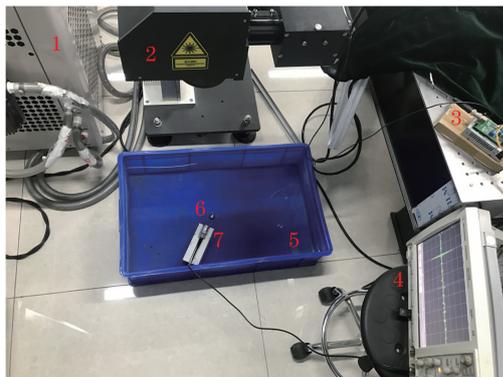


图 13 实验装置图

Fig. 13 Picture of experimental equipment

6.2 实验方案

首先选择水槽中 32 cm × 34 cm 的矩形区域作为信号接收的有效区域, 将水槽的短边与长边分别作为 X 轴与 Y 轴, 方便在实验过程中固定 PZT 探头并选取脉冲激光激发的位置。在工控机上设置激光脉冲能量的强度与频率, 固定激光器并调整光路, 使激光射入水槽。打开示波器调整相应的参数, 将触发电路连接至示波器通道 3 并保证工作状态稳

定, 将 PZT 探头连接至示波器通道 2 (以便于对转换后的声信号的波形进行显示)。实验原理框架如图 14 所示。

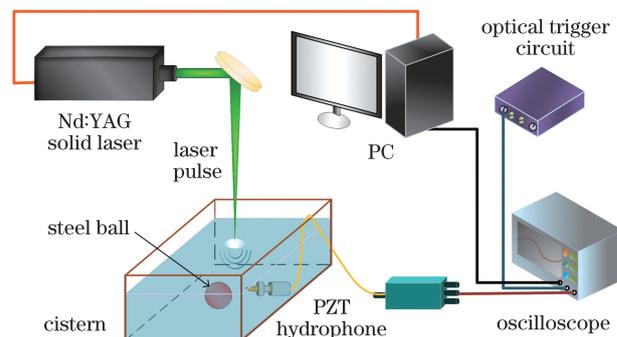


图 14 实验系统示意图

Fig. 14 Schematic of experimental system

实验过程中保持钢球位置不动, 通过等距移动激光器从而改变激光脉冲激励位置的方式进行实验, 每移动一次激光器位置都保存一次水听器采集到的声波信号。根据衍射原理计算激光激励的声波在水中传播到钢球处发生衍射后声波信号最强的位置, 在此处设置 PZT 探头接收衍射后的声波信号并保存数据。改变 PZT 探头的位置并接收未经衍射的声波信号, PZT 探头设置于与衍射声波传播距离相同的位置处。

6.3 数据分析及处理

利用分析软件对保存的数据进行成像处理, 将未经衍射的声波信号与经钢球衍射后的声波信号进行对比, 计算衍射后损失的声波能量。若经反射后的声波信号(能量)较强, 并可明显区别于杂波、噪声, 则证明水下激光致声探测技术可行。

图 15(a)、(b) 分别为衍射前后的声波信号对比。激光从不同位置逐次激发声波信号, 从信号的漂移情况可以看出衍射前后随着激励与接收位置不断变短, 声程差也在逐渐变小。这与理论预期相吻合。另外, 从衍射后的声波信号中能明显看出能量损失, 且能量损失比较大, 但仍能接收到有效的声波信号, 说明信息传递在一定程度上是可行的。

为了更加直观地评价多个激光源经一定延时后在目标处的能量汇聚情况, 采用后处理聚焦的方式对实验中获得的单个激光声信号进行延时叠加合成处理, 即: 模拟等间距排列的激光脉冲辐照到介质表面, 经时间调制后, 超声脉冲信号同时到达检测点处并发生干涉叠加, 因此检测点处声波信号的幅值将明显增大, 从而提高信噪比。图 16 所示为延时叠加合成前后声波信号的对比。

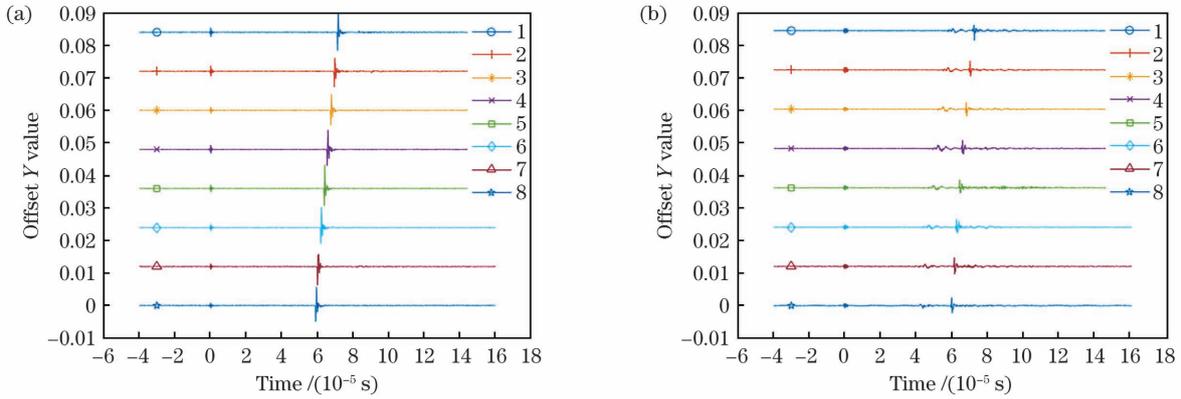


图 15 衍射前后的声波信号对比。(a) 衍射前的声波信号;(b) 衍射后的声波信号

Fig. 15 Comparison of acoustic signals before and after diffraction. (a) Acoustic signal before diffraction; (b) acoustic signal after diffraction

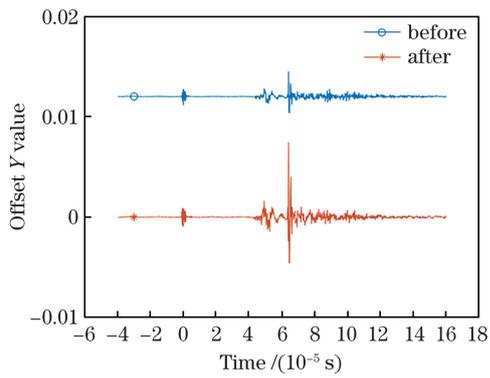


图 16 延时叠加前后的声波能量对比

Fig. 16 Comparison of acoustic energy before and after delay stacking

由图 16 可以发现衍射后的声波前有微小的低频信号,这是因为实验过程中为使钢球与 PZT 水听器保持在同一水平线,从而测得信噪比较好的信号波形,在水槽中设置了塑料支架。此处的低频微弱信号是经塑料支架衍射后的信号,塑料支架的声阻抗与水较为接近,因此衍射信号强度较弱。

通过对比钢球衍射前后声波能量的变化可以发现衍射后信号的信噪比较差,且能量有部分衰减损失,声波的频率也有一定程度的降低。利用数据分析软件对每组数据的信号峰值进行计算,得到平均能量损失率为 56.43%。由此可以证明激光致声信号受到水中障碍物的影响较大。利用合成孔径延时叠加合成的方法可以使能量在目标处汇聚增强,从而为水下目标探测成像精度及效果的提升提供了新的实现途径。

考虑到海洋实际应用中波浪面和斜面等因素会对激光致声信号产生影响,实验中人为对水面进行扰动,以观察信号时域波形的变化。从图 17 中可以看出,随着扰动幅度变大(从 a 到 e,扰动依次增

大),激光致声信号一次波峰变小。可见,水面扰动对信号有较大干扰,在实际应用中应考虑水面扰动带来的影响。

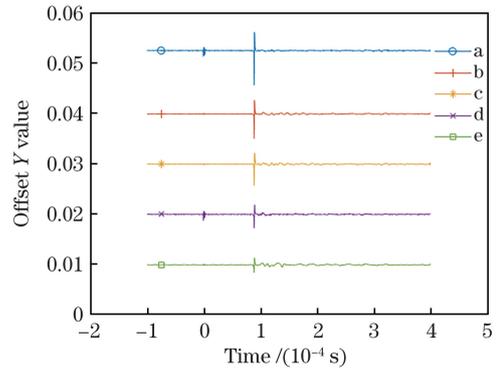


图 17 水面扰动对激光致声信号的影响

Fig. 17 Influence of water surface disturbance on laser-induced acoustic signals

7 结 论

针对液体中目标的探测问题,本课题组利用 SAFT 方法对液体中的目标进行聚焦定位及成像,并将探针接收到的回波数据导入数据分析软件进行聚焦成像分析,利用 MSE 和 PSNR 衡量图像质量。结果表明:目标处的声波聚焦成像效果有一定程度的提升。PSM 算法的聚焦成像分析验证了有限元仿真结果的正确性。

通过对有限元软件模拟得到的液体中声波的传播与聚焦进行分析可以发现:延时聚焦能够有效地减小不同激励源处产生的回波时差,相位的延迟相抵有效减小了聚焦波束的旁瓣幅值。激光激励源的增加使得波束指向性范围变窄,从而增大了聚焦处的能量幅值,提高了成像的分辨率和质量。八激光源阵列的检测效果约为单激光源阵列的 3.46 倍,说

明 SAFT 成像适合用于水下目标探测效果的提升。

通过后处理聚焦的方式可使多个弱衍射激光声信号延时叠加,能量汇聚增强,在目标处实现更高精度的探测。

基于 PSM 算法的激光致声 SAFT 成像方法具有较好的声束合成能力,提高了成像的分辨率,具有较好的成像质量,为空-水跨介质目标探测及 SAFT 成像提供了新思路,具有一定的应用前景。

SAFT 检测方法在固体的无损检测方面有诸多研究成果,而我国近些年大力发展和支持海底地形及目标探测,水下领域探测相比固体内部缺陷检测有着更多的影响因素,研究的困难程度也相对更大。探究新型、可靠、识别能力强的水下目标探测和成像方法是各国持续开展的重要课题。技术手段的迁移为水下探测领域研究提供了新思路,进一步解决及优化复杂水体环境中的目标探测和成像算法是今后的重要研究方向。

参 考 文 献

- [1] Carver C J, Tian Z, Zhang H Y, et al. Amphilight: direct air-water communication with laser light [J]. *GetMobile: Mobile Computing and Communications*, 2021, 24(3): 26-29.
- [2] Ko S H, Ryu S G, Misra N, et al. Laser induced plane acoustic wave generation, propagation, and interaction with rigid structures in water [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(7): 073104.
- [3] Lei L H, Zhou J, Zhang L, et al. Research on laser induced acoustic source based underwater communication system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10157: 1015720.
- [4] 李鹏, 赵扬, 周志权, 等. 一种跨介质的空中-水下激光致声探测技术研究 [J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(5): 20200310.
Li P, Zhao Y, Zhou Z Q, et al. Research on laser induced acoustic detection of trans-media aerial-underwater [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20200310.
- [5] Saeed N, Celik A, Al-Naffouri T Y, et al. Underwater optical wireless communications, networking, and localization: a survey [J]. *Ad Hoc Networks*, 2019, 94: 101935.
- [6] 吕亚昆, 吴彦鸿. 合成孔径激光雷达成像发展及关键技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 100004.
Lü Y K, Wu Y H. Development and key technologies of synthetic aperture lidar imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 100004.
- [7] 尹红飞, 郭亮, 杨利超, 等. 机载合成孔径激光雷达全孔径成像算法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0928002.
Yin H F, Guo L, Yang L C, et al. Full aperture imaging algorithm of airborne synthetic aperture lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0928002.
- [8] 胡焯, 李道京. 10 m 衍射口径天基合成孔径激光雷达系统 [J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1210002.
Hu X, Li D J. Space-based synthetic aperture LiDAR system with 10 m diffractive aperture [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1210002.
- [9] 李道京, 胡焯, 周凯, 等. 基于共形衍射光学系统的合成孔径激光雷达成像探测 [J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0428001.
Li D J, Hu X, Zhou K, et al. Synthetic aperture lidar imaging detection based on conformal diffractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0428001.
- [10] Flaherty J J, Erikson K R, van Lund M. Synthetic aperture ultrasonic imaging systems: US3548642 [P]. 1970-12-22.
- [11] Burckhardt C E, Grandchamp P A, Hoffmann H. An experimental 2 MHz synthetic aperture sonar system intended for medical use [J]. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1974, 21(1): 1-6.
- [12] Berkhout A J, Ridder J, Wal L F. Acoustic imaging by wave field extrapolation: theoretical considerations [M]//Alais P, Metherell A F. *Acoustical imaging*. Boston: Springer, 1982, 10: 513-540.
- [13] Karaman M, Li P C, O'Donnell M. Synthetic aperture imaging for small scale systems [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1995, 42(3): 429-442.
- [14] Spies M, Rieder H. Synthetic aperture focusing of ultrasonic inspection data to enhance the probability of detection of defects in strongly attenuating materials [J]. *NDT & E International*, 2010, 43(5): 425-431.
- [15] Boehm R, Brackrock D, Kitze J, et al. Advanced crack shape analysis using SAFT [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2010, 1211(1): 814-821.
- [16] Stepinski T, Lingvall F. Synthetic aperture focusing techniques for ultrasonic imaging of solid objects [C]//8th European Conference on Synthetic Aperture Radar, June 7-10, 2010, Aachen, Germany. New York: VDE, 2010: 1-4.
- [17] Skjelvareid M H, Olofsson T, Birkelund Y, et al. Synthetic aperture focusing of ultrasonic data from multilayered media using an omega-K algorithm [J].

- IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(5): 1037-1048.
- [18] 刚铁, 迟大钊, 袁媛. 基于合成孔径聚焦的超声 TOFD 检测技术及图像增强[J]. 焊接学报, 2006, 27(10): 7-10, 113.
- Gang T, Chi D Z, Yuan Y. Ultrasonic TOFD technique and image enhancement based on synthetic aperture focusing technique[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(10): 7-10, 113.
- [19] 李秋锋, 石立华, 金信鸿, 等. 一种改进的合成孔径聚焦算法研究[J]. 压电与声光, 2009, 31(3): 440-443.
- Li Q F, Shi L H, Jin X H, et al. Study on an improved SAFT algorithm [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(3): 440-443.
- [20] 李俊燕, 沈中华, 倪晓武, 等. 基于合成孔径聚焦技术的激光超声无损检测方法研究[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0904003.
- Li J Y, Shen Z H, Ni X W, et al. Laser-ultrasonic non-destructive detection based on synthetic aperture focusing technique [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0904003.

Underwater Small Target Detection Method of Laser-Induced Acoustic SAFT Based on PSM Algorithm

Zhao Yang^{1,2*}, Li Peng³, Zhang Penghui³, Zhou Zhiquan¹, Bai Xue³, Ma Jian³

¹ School of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, Shandong, China;

² Weihai City Key Lab of Photoacoustic Testing and Sensing Technology, Weihai 264209, Shandong, China;

³ Laser Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250103, Shandong, China

Abstract

Objective Effective detection of the underwater target is essential for the premise and key to understanding the ocean. Meanwhile, the ocean plays a significant role in national defense. The detection technology of a crossing air-water medium provides a new way to detect and communicate between air-based and underwater-based platforms, which is a hot research issue globally. Aiming at the limitation of the high loss for detecting signals caused by the physical interface between air and water, this study combines the synthetic aperture focusing technique (SAFT) and laser-induced acoustic (LIA) for the imaging detection of crossing air-water medium. The simulation calculation, numerical simulation, and experimental research on air-water cross medium detection of photoacoustic signal conversion between a nanosecond pulse laser and a hydrophone were conducted. The LIA-SAFT based on the phase shift migration (PSM) algorithm has the following advantages to realize photoacoustic underwater target detection: 1) Laser and acoustic signals can be transmitted remotely in air and water, respectively. 2) High source-level sound waves can be generated by increasing the pulse energy. 3) Sound signal has characteristics of pulse narrow, wide spectrum, high temporal and spatial resolution. 4) As a post-processing method of acoustic signals, SAFT can solve the problems of poor imaging effect and low resolution. 5) PSM algorithm can be effectively used to improve the image resolution and quality.

Methods This paper investigates LIA-SAFT imaging based on the PSM algorithm. Finite element simulation models of SAFT for center and deflection focusing were established (Fig. 8). Then, the simulation of LIA-SAFT was conducted. The influence of water-surface disturbance on amplitude of LIA signal was analyzed for the cases of no disturbance, micro disturbance, and large disturbance of water-surface, respectively. The PSM algorithm was used to reconstruct the detection image of LIA-SAFT (Fig. 12). The main procedures of LIA-PSM detection are as follows. First, data analysis software was used to process the simulation signal, the process of focusing imaging was simulated and analyzed, and PSM algorithm was used to de-noise the image. Then, the mean square error (MSE) and peak signal-to-noise ratio (PSNR) were calculated to evaluate the imaging quality. LIA testing system was set up for the experiment of crossing air-water medium (Fig. 13). The average loss rate of energy caused by acoustic diffraction was determined by comparing the energy before and after the sound diffraction at steel ball (Fig. 15). The delay superposition beamforming method with synthetic aperture achieved convergence and enhancement of LIA signals from the target (Fig. 16).

Results and Discussions The LIA-PSM method under the nonlinear mechanism is proposed to detect targets across air-underwater. The combination of experiment and numerical simulation verifies the feasibility and effectiveness of the LIA detection in a long distance. The air-water medium of the LIA-SAFT detection imaging model is established (Fig. 8). When the external environment and laser source are the same for boundary conditions and parameters, it can be seen from the amplitude of sound pressure that the acoustic energy convergence effect of laser SAFT scanning is enhanced compared with that under the excitation of a single laser source (Fig. 9). The energy convergence effect for the central focus way is the best, which is about 3.46 times of the energy of laser acoustic signal under the single light source. The PSM imaging algorithm is proposed to improve the quality of SAFT time-lapse focusing imaging. Then, the basis for quantitative evaluation of imaging quality and accuracy is given. The MSE and PSNR values of the image are calculated using the data analysis software. They are MSE of 306.49 and PSNR of 23.27 dB. After SAFT processing, the image has little distortion, but the focusing effect is not affected. The LIA signal obtained in the experiment is processed and analyzed using post-processing and focusing methods (Fig. 16). These methods can enhance the convergence of energy at the target to provide a new way of improving the imaging accuracy and effect of underwater target detection.

Conclusions The propagation and focusing of sound waves in liquid are simulated using finite element software. We find that delayed focusing can effectively reduce the echo time difference generated by different excitation sources. Additionally, the phase delay offset can effectively reduce the side-lobe amplitude of the focused beam. The increase in the laser excitation sources makes the beam directivity range narrowed to increase the energy amplitude at the focus; thereby, improving the imaging resolution and quality. Compared with a single laser source, the signal amplitude of eight laser source arrays can be improved by 3.46 times. Using post-processing focusing, multiple weak diffraction LIA signals are delayed and superimposed. The energy convergence is enhanced to realize higher precision detection at the target. The combination of the LIA-SAFT imaging method and PSM algorithm has good ability for acoustic beam synthesis, imaging resolution, and imaging quality. This study provides a new idea for LIA-SAFT imaging and shows a potential way of detecting underwater targets.

Key words remote sensing; laser-induced sound; synthetic aperture focusing technique; phase shift migration algorithm; finite element simulation