

基于激光传感的水下声学目标高分辨跟踪方法

蔡旺¹, 王栋梁¹, 冯伟², 董繁鹏¹, 魏亚明¹, 贾乐成³, 田文杰¹, 薛彬^{1*}¹天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072;²四川永星电子有限公司, 四川 成都 610000;³深圳市联影高端医疗装备创新研究院, 广东 深圳 518045

摘要 高分辨感知声波相位是实现水下声学目标跟踪与定位的核心问题之一。传统方法基于压电效应完成目标信号的相位感知,在传感机理上存在相位分辨率相对较低、障板干扰、声波振动起讫点不明等问题。本团队提出了基于声光效应的新型激光阵列水声相位高分辨传感方法,并设计了由 5 束平行激光组成的阵列传感装置(装置孔径为 340 mm),并于消声水池条件下验证了该装置的有效性。实验结果显示,本方法的水声相位感知分辨率优于 1°,水下目标跟踪的角度分辨率优于 0.05°。该方法为新型水下目标高分辨跟踪定位技术的发展提供了研究储备。

关键词 传感器; 声光效应; 光学传感; Raman-Nath 衍射; 广义互相关; 声学跟踪

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1810004

1 引言

水下小型游弋式目标的高分辨定位跟踪对于提升海防能力具有重要意义。这些小型游弋式目标包括蛙人、小型潜器等,具有目标小、游弋动作细节多等特点^[1-3]。从主流的定位跟踪原理来看,这些细节性运动特征主要反映在目标信号的相位上,因而高分辨感知目标声波信号的相位信息是实现小型游弋式目标高分辨定位跟踪的关键。

在不改变当前主流目标定位跟踪模型的前提下,应重点探讨目标声波信号的传感机理,以提升目标声波信号的细节(相位)感知能力^[4-7]。传统的声波感知方法主要依靠压电效应,相关技术比较成熟,但一直存在若干固有问題:1)传统压电换能器(水听器)的声波相位分辨率存在相对较高的阈值,其根源在于机械式振动固有的声波信号振动起讫点不明,这将导致一些隐藏在相位中的目标运动细节信息在水下目标探测过程中丢失;2)压电感知原理要求压电换能器与声波进行“接触碰撞”,从而在感知声波的同时,也破坏了一些声波信息,这将导致一部分相位信息损失;3)压电换能器与声波的“碰撞”伴随着声波的反射、衍射、散射等物理现象,这些现象会与目标声波叠加,这是障板效应的一类表现,也是相位损失的重要原因之一;4)传统压电换能器的成阵难度大,而且其自身的体积与结构也会影响声波的传感质量,同时,大型阵列系统的安装使用不便,定期维护成本相对较高,检测与校准难度大^[8]。

针对以上传统压电换能器的固有问題,本团队构建了基于声光效应的激光阵列,该阵列可以实现声波信号的高质量感知,使以上所列问題得到有效解决^[9-11]。这是因为:1)声光效应依靠声波振动引起介质密度或折射率变化进而导致光程变化来实现对声波信号的感知。即,若介质的密度或折射率发生变化,光程对应的变化将以光速量级相应改变,从原理上讲,振动起讫所需要的耦合时间足可以被忽略,也就是说,可以认为是即时响应或有足够宽的响应带宽^[12],因而声光效应感知机理不存在机械振动的起讫点模糊问題。2)激光在感知声波时,不会与声波发生“碰撞”,因此不会产生声波相位信息的损失;同时,压电感知机理下的障板效应带来的一些问題将被大幅弱化。3)与压电换能器相比,激光成阵相对容易,激光束占用的空间比较小,且不存在随声波频率变化而出现的换能器尺寸变化的问題,这源于激光对声波的高响应带宽优势^[13]。换言之,激光阵列可在一个相对小的孔径内构建,再结合激光对声波相位的高分辨捕获能力,一个小孔径激光阵列就可替代传统大孔径压电换能器阵列实现水下目标细节运动的跟踪。

针对水下目标的跟踪问題,国内外鲜有将激光阵列与声学目标探测模型相结合,进而对水下小目标细节运动进行跟踪捕捉的研究。原理上比较接近的研究工作主要是基于光纤水听器阵列的目标捕获跟踪,相关研究成果可参见文献[14-19]。光纤水听器采用光纤干涉仪原理,以光为信息载体,以光纤为媒质,探测

收稿日期: 2021-11-25; 修回日期: 2021-12-11; 录用日期: 2022-01-25

基金项目: 国家自然科学基金(62075162, 62001329)、国防科技创新特区项目、天津市自然科学基金(19JCQNJC01700)

通信作者: *xuebin@tju.edu.cn

水中的声压信息。光纤水听器内部含有数米至数十米的传感光纤,外界声信号会引起光纤形变,进而改变光信号经传感光纤传输的光相移,最终声信号经干涉仪调制为光强度突变信号^[20]。光纤水听器接收声信号与水声换能器接收声信号的过程相似,均需要“碰撞接触”。本团队提出的小孔径激光阵列装置不是基于光纤结构特性设计的,而是基于激光束阵列直接与声信号作用后的自相干特性设计的。空间激光阵列结构免去了光纤光相干法的繁复设计,且无光纤水听器光纤形变或水声换能器压电转化过程,其声波感知模式也摆脱了声波“碰撞”限制,是一种具有巨大应用潜力的目标高分辨跟踪捕获技术方案。

本文具体安排如下:第 2 部分介绍全文工作所依赖的基本原理,分别是声光效应基本原理、0 级和 1 级衍射光的自相干原理、目标追踪原理;第 3 部分主要阐述声光衍射实验装置的设计,对声光效应的基本原理和自相干原理进行验证分析,证明本文所提声光传感机理可以高质量获取声波相位信息;第 4 部分主要围绕目标定位追踪工作,将上述基本原理与目标定位追踪原理相结合,在水池条件下进行目标追踪实验,证实所提目标追踪方案的有效性;最后,在第 5 部分,进行了全文总结,并对后续研究进行了展望。

2 原 理

2.1 声光效应的原理

声波在透明介质中传播时,介质折射率发生空间周期性变化,导致通过该介质的光线发生改变的现象叫作声光效应。声光效应根据声波频率、声光相互作用长度和光入射角度的不同,可分为 Raman-Nath 衍射和 Bragg 衍射。Klein-Cook 提出了发生声光效应的判据 Q ^[21],其表达式为

$$Q = \frac{2\pi\lambda_L L}{n_0\lambda_s^2}, \quad (1)$$

式中: λ_L 为激光的波长; L 为声光作用长度; n_0 为无声扰动时介质的折射率; λ_s 为声波的波长。 $Q < 0.3$ 为 Raman-Nath 衍射,Raman-Nath 衍射原理如图 1 所示; $Q > 4\pi$ 时为 Bragg 衍射。

入射激光束通过声场后发生衍射,衍射角 θ 为

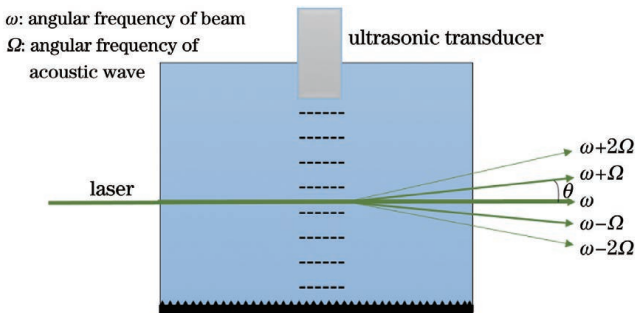


图 1 Raman-Nath 衍射原理

Fig. 1 Raman-Nath diffraction principle

$$\sin \theta = m \frac{\lambda_L}{\lambda_s}, \quad (2)$$

式中: m 为衍射光的级数。水是各向同性介质,在 Raman-Nath 区域受到声波影响时,其密度的变化与声压有关^[22-23]。声压改变会引起介质折射率的变化,折射率可以表示为

$$n(r, t) = n_0 + \left(\frac{\partial n}{\partial p}\right) p(r, t), \quad (3)$$

式中: $p(r, t)$ 是 t 时刻 r 处的瞬时声压; $\left(\frac{\partial n}{\partial p}\right)$ 为介质的压光系数。由此可知,折射率的调制与声压直接相关。

2.2 自相干原理

当平面光波与传播过程中的声波相互作用时,会产生移动的折射率光栅。令 Ω 和 \mathbf{K} 分别表示声波的角频率和声波波矢(假设声波沿 \mathbf{r} 方向传播),则移动的呈周期性变化的折射率为

$$n(r, t) = n_0 + \Delta n \sin(\Omega t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r}), \quad (4)$$

式中: $|\mathbf{K}| = \frac{2\pi}{\lambda_s}$; Δn 为声波引起的介质折射率周期性变化的峰值。经 Raman-Nath 衍射后,各级衍射光的振幅可表示为^[24-25]

$$E_m = C \cdot J_m[\varphi(t)] \cdot \exp\{i[(\omega + m\Omega)t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r} - \varphi_0]\}, \quad (5)$$

式中: ω 表示光束的角频率; C 为常数; J_m 是 m 阶贝塞尔函数; φ_0 为光的初相位; $\varphi(t)$ 表示光程差与光波矢量大小的乘积,即光相移量。在理想流体条件下,声压扰动引起的 $\varphi(t)$ 的变化相对较小^[9]。根据第一类贝塞尔函数,当 $\varphi(t)$ 较小时,可以忽略 2 级及以上极弱的衍射光,只需要考虑 0 级、1 级衍射光,则出射光束的振幅可以表示为

$$E(t) = E_0 + E_1 = C \cdot \{J_0 \exp[i(\omega t - \varphi_0)] + J_1 \exp\{i[(\omega + \Omega)t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r} - \varphi_0]\}\}. \quad (6)$$

实际上,0 级光与 1 级光并不共线,但二者之间的衍射角极小,且激光光束本身具有发散性,因此,0 级衍射光和 1 级衍射光可近似地视为共线。光程差恒定的 0 级和 1 级衍射光会发生互相干涉,即自相干效应。光电探测器接收到的光束合束后的光强为

$$I(t) = C^2 \cdot \{J_0^2 + J_1^2 + J_0 J_1 \exp[i(\Omega t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r})] + J_0 J_1 \exp[i(-\Omega t + \mathbf{K} \cdot \mathbf{r})]\}, \quad (7)$$

将其化简整合后,可得最终光束合束后的光强为

$$I(t) = C^2 \cdot [J_0^2 + J_1^2 + 2J_0 J_1 \cos(\Omega t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r})]. \quad (8)$$

衍射光强 $I(t)$ 记录了声光作用区域内声波的相位 $\Omega t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r}$ 和角频率 Ω ,体现了激光对声场的相位感知能力。

自相干原理的前提是 0 级和 1 级衍射光同时作用,其合束后的光强被光电探测器记录。以实验采用的蓝绿激光器为例,其波长为 532 nm,携带目标信息

的声波频率在 1 MHz 以下,声波的波长大于 1.5 mm。当接收到水下追踪目标的声波频率为 1 MHz 时,0 级和 1 级衍射光之间的角度最大,经式(2)计算得衍射角为 0.0203°。下文使用的激光器型号为 Spectra-Physics-excelor-one-532-Multi-Mode,其输出光束直径为(0.7±0.07) mm,光束发散角为 0.0688°(大于 0.0203°),保证了 0 级和 1 级衍射光的共线性和自相干性。由式(2)可得,只有水下目标频率大于 3.37 MHz 时,0 级与 1 级衍射光才会出现分离现象。极限频率下光电探测器光敏元件与衍射光的几何关系如图 2 所示。

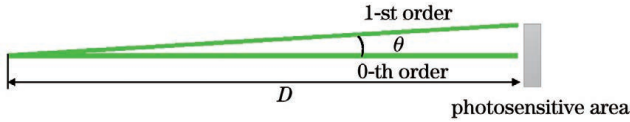


图 2 极限频率下光电探测光敏元件与衍射光的几何关系
Fig. 2 Geometric relationship between photoelectric detection sensitive unit and diffracted light at limit frequency

2.3 追踪原理

设追踪目标的初始位置为 (x_0, y_0) 。追踪过程中,目标在二维平面内移动,将目标在 k 时刻的位置坐标记为 (x_k, y_k) , $k+1$ 时刻的位置坐标记为 (x_{k+1}, y_{k+1}) ,如图 3 所示。将前后位置的声光信号作广义互相关,利用频域加权函数对信号进行滤波来突出响应信号部分的频谱成分,抑制噪声部分的频谱,从而得到精确的相位偏移量^[26]。广义互相关函数的计算公式为

$$R(n) = \frac{1}{N} \sum_{p=0}^{N-1} \varphi(p) X_1[p] X_2^*[p] \exp\left(\frac{i2\pi pn}{N}\right), \quad (9)$$

其中,

$$\varphi(p) = \frac{1}{|G_{x_1, x_2}(p)|}, \quad (10)$$

式中: $X_1[p]$ 表示 k 时刻探测到的声光信号的傅里叶变换; $X_2^*[p]$ 表示 $k+1$ 时刻探测到的声光信号的傅里叶变换的共轭; N 表示序列长度; $\varphi(p)$ 表示广义互相关加权函数,具体计算方式参见文献[27]。

求得声光信号的互相关函数后,通过寻找互相关函数的最大值得到信号匹配最佳的时刻,即可得到目

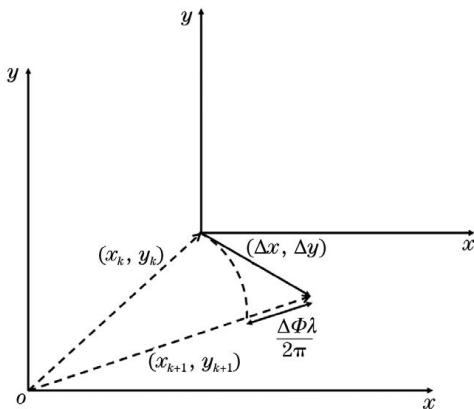


图 3 追踪原理示意图
Fig. 3 Schematic of tracing principle

标移动导致的超声信号的相位改变量 $\Delta\Phi_k$ ^[28]。 $\Delta\Phi_k$ 的计算公式为

$$\Delta\Phi_k = \underset{n}{\operatorname{argmax}}[R(n)], \quad (11)$$

式中: $\operatorname{arg}[\cdot]$ 表示当 $R(n)$ 取最大值时 n 的取值,即相位差。在二维平面内, k 时刻的坐标 (x_k, y_k) 与下一位置 $k+1$ 时刻的坐标 (x_{k+1}, y_{k+1}) 之间的关系为

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x_k, \quad (12)$$

$$y_{k+1} = y_k + \Delta y_k, \quad (13)$$

式中: Δx_k 为平面内 x 方向上的增量; Δy_k 为平面内 y 方向上的增量。

将追踪目标在 k 时刻的坐标 (x_k, y_k) 与第 i 束激光中点坐标 (x_{Li}, y_{Li}) 之间的距离记为 d_{ki} ,并将追踪目标在 $k+1$ 时刻的坐标 (x_{k+1}, y_{k+1}) 与第 i 束激光中点坐标 (x_{Li}, y_{Li}) 之间的距离记为 $d_{(k+1)i}$ ^[29],即

$$d_{ki} = \sqrt{(x_k - x_{Li})^2 + (y_k - y_{Li})^2}, \quad (14)$$

$$d_{(k+1)i} = \sqrt{(x_{k+1} - x_{Li})^2 + (y_{k+1} - y_{Li})^2}. \quad (15)$$

移动的距离差与接收到的声场相移量有关,式(15)、(14)相减可得到

$$d_{(k+1)i} - d_{ki} = \frac{\Delta\Phi_{ki}\lambda}{2\pi}. \quad (16)$$

激光束中点位置 (x_{Li}, y_{Li}) 已知,式(16)中有 2 个未知数,因此至少需要 2 束激光才能求解。应用激光传感方法接收水下声学目标信号时,激光束所占空间较小,且在一个相对小的孔径上(本实验中验证装置的直径为 340 mm),容易形成多束激光布阵,可以实现水下目标细节运动的跟踪。

3 声光信号特征及分析

3.1 声光衍射装置及搭建

水下声光衍射装置如图 4 所示,整个装置由水声换能器激励源、激光光源(Spectra Physics, excelor one 532 Multi-Mode)、水声换能器夹持装置(实验室自制)和光信号采集四部分组成。水声换能器激励源由功率放大器(西安安泰电子科技有限公司,ATA 4051)和信号发生器(Tektronix, AFG3022C)组成。信号发生器能够产生正弦脉冲信号,通过功率放大器完成信号

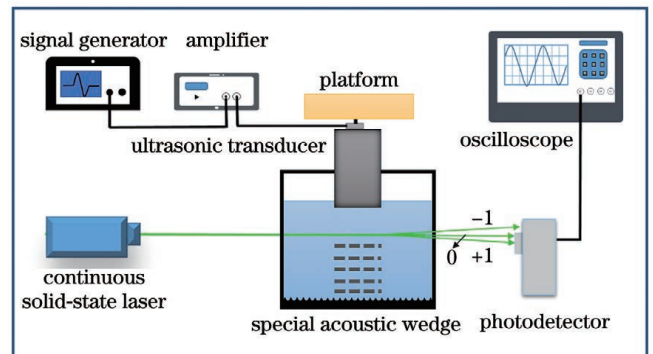


图 4 声光效应原理
Fig. 4 Principle of acousto-optic effect

的放大,激励水声换能器工作。搭建光路过程中,在无声场作用下调整激光束,使激光束与光电探测器(Thorlab, APD430A/M)光敏面的边界相切;当激光束穿过由水声换能器(中国船舶集团第七一五研究所, HPCTB-510-75-2)产生的声场时,发生 Raman-Nath 衍射,光电探测器在此情况下接收 0 级光及其一侧的衍射光。光电探测器与示波器(Tektronix, MDO3104)相连。水缸底部布满了消声尖劈(中国船舶集团第七一五研究所, SAJ35),以消除反射声波的影响。衍射光振幅与入射角度有关,当入射光和声场垂直时,衍射光强最大。利用换能器夹持装置调整换能器的俯仰角度,使声场与光束相互垂直,提高衍射效率。功率放大器的最大放大倍数为 100 倍,水声换能器的最大声源级为 185 dB。

3.2 声光信号与压电信号的特征对比

比较声光效应与压电效应的信号特征,主要对比激光传感法和水声换能器法接收到的信号,包括时域和频域。激光传感法与水声换能器法的对比实验设置如图 5 所示。在激光传感法实验中,发射端水声换能器(中国船舶集团第七一五研究所, HPCTB-510-75-2)表面与激光束的距离为 0.5 m,且换能器的表面与激光束平行。在对照的水声换能器法实验中,发射端水声换能器与接收端水声换能器(中国船舶集团第七一五研究所, HPCTB-510-75-2)的表面平行,且相距 0.5 m,底部换能器接收发射端的信号。

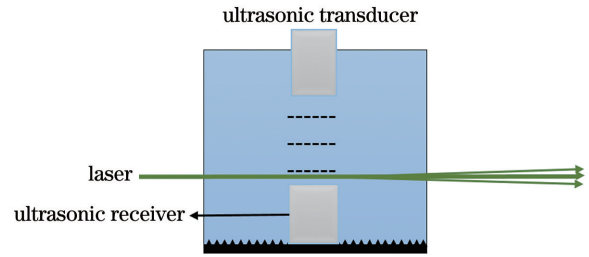


图 5 激光传感法与水声换能器法对比实验
Fig. 5 Contrast experiment between laser sensing and ultrasonic transducer methods

时域特征分析过程如下:实验参数设置为水声换能器发射 5 个脉冲激励信号,工作频率设置为 500 kHz,信号发生器激励的峰峰值为 1 V。时域特征对比结果如图 6 所示。基于声光效应的激光传感法和基于压电效应的水声换能器法得到的水声时域波形在上升沿一致,但激励消失后的阻尼振荡过程存在差异。在激光传感法中,阻尼振荡过程短,而在水声换能器法中,阻尼振荡过程较长。水声换能器法得到的时域波形受到了部分电学噪声的干扰,时域波形产生变形和失真;而在激光传感法中,光学噪声低于电学噪声,因此信号质量优于水声换能器法的信号质量,波形起讫点清晰。

频域特征分析过程如下:实验时水声换能器的工作频率设置分别为 500 kHz 和 550 kHz,信号发生器激励的峰峰值为 1 V。频域特征对比结果如图 7 所

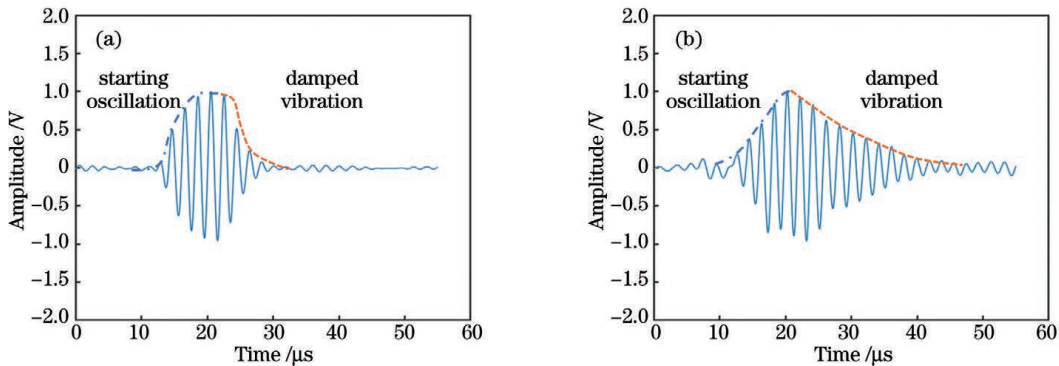


图 6 激光传感法与水声换能器法的时域特征对比。(a)激光传感法;(b)水声换能器法

Fig. 6 Time domain feature comparison between laser sensing and ultrasonic transducer methods. (a) Laser sensor method; (b) ultrasonic transducer method

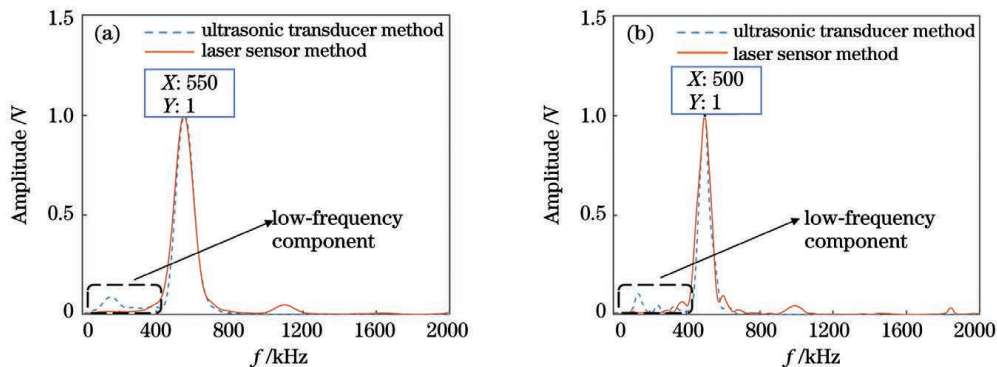


图 7 激光传感法与水声换能器法的频域特征对比。(a)发射端中心频率为 550 kHz;(b)发射端中心频率为 500 kHz

Fig. 7 Frequency domain feature comparison between laser sensing and ultrasonic transducer methods. (a) Transmitting center frequency is 550 kHz; (b) transmitting center frequency is 500 kHz

示。激光传感法和水声换能器法的频率与激励信号基本一致,主要以 500 kHz 和 550 kHz 为中心频率成分,但水声换能器法接收到的低频分量较多。这一结果表明激光传感法较水声换能器法具有更高的频域信号质量。由时域和频域信号特征对比可以看出,激光传感法接收到的水声信号与水声换能器接收到的水声信号类似,可使用水声相关方法进行信号处理。

3.3 声光信号特征分析

为进一步分析声光信号的特征,分别对激励特征

以及相位特征进行实验验证。激励特征分析过程如下:水声换能器的工作频率设置为 500 kHz,信号发生器激励的峰峰值为 1 V。激励信号为正弦脉冲,个数设置分别为 1、3、6、9,接收到的声光衍射信号如图 8 所示。当正弦脉冲激励信号少于 3 时,声光信号幅值不断增加;当正弦脉冲激励次数大于 3 时,光电检测峰值不变且保持稳定。当外界激励消失时,声光信号幅值迅速减小,声光衍射信号处于阻尼振动模式,在持续几个周期衰减振动后,声光信号恢复其本底信号。

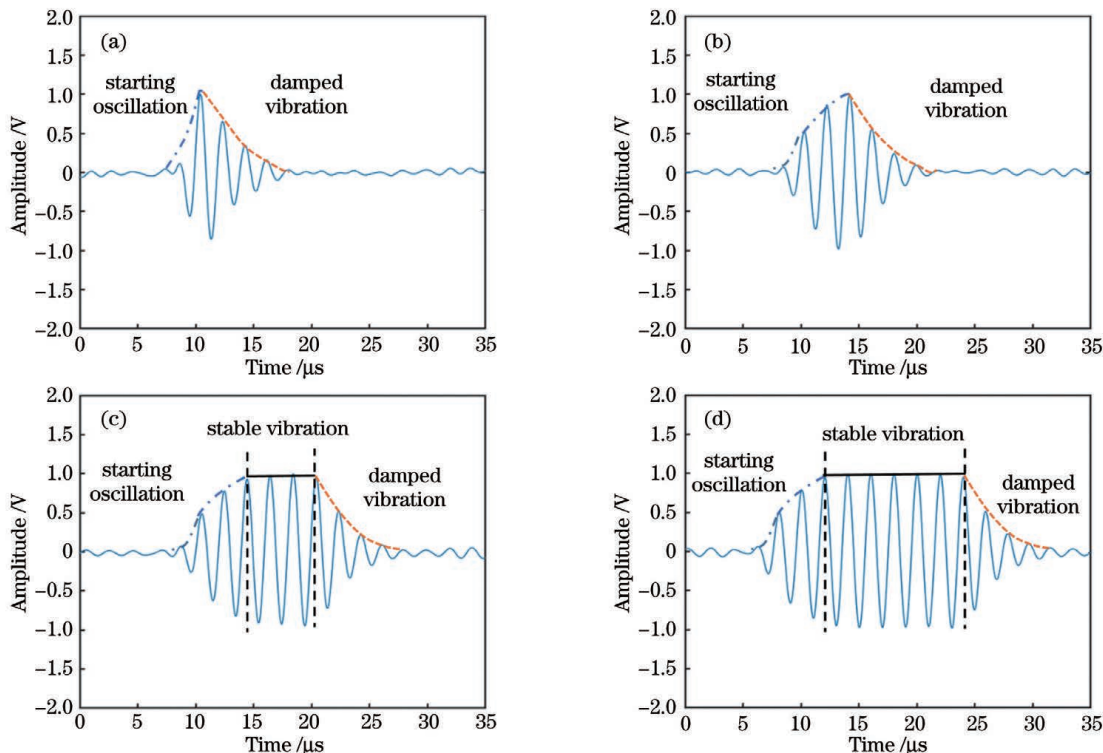


图 8 不同脉冲激励个数下的声光衍射信号图。(a)脉冲激励个数为 1;(b)脉冲激励个数为 3;(c)脉冲激励个数为 6;(d)脉冲激励个数为 9

Fig. 8 Acousto-optic diffraction signal diagrams under different numbers of pulse excitation. (a) The number of pulse excitation is 1; (b) the number of pulse excitation is 3; (c) the number of pulse excitation is 6; (d) the number of pulse excitation is 9

相位特征分析过程如下:使用水声换能器进行实验,保持水声换能器和激光束的位置不变,初相位为 0° 时,以功率放大器的 Monitor 信号作为起点,此时接收到的声光信号为参考信号。随后,通过信号发生器改变水声换能器的初相位,当初相位为 45° 、 90° 、 135° 、 180° 时,分别超前初相位为 0° 的参考信号 $1/8$ 、 $1/4$ 、 $3/8$ 、 $1/2$ 个周期,如图 9 所示。

从 0° 开始,以 1° 为步长不断改变水声换能器激励信号的初相位,采用激光传感法接收,直至激励信号的初相位为 180° 结束。以激励信号的初相位为横坐标,以探测到的实际声光信号的相位为纵坐标,得到如图 10 所示的激励信号初相位与激光传感初相位之间的关系图。综上所述,激光传感法可以实现水声信号相位的精确感知。根据实验设置和图 10 所示实验结果,激光传感法对水声信号的相位分辨率至少为 1° 。

4 激光传感追踪定位系统及结果分析

4.1 激光传感装置及实验系统设计

激光传感装置的基本结构如图 11 所示,左侧为激光阵列分束部分,中间为声场探测区域,右侧为光电探测接收区域。实验环境为水下 $3\sim 5$ m 处,设备需要完成水下密封以及抗压测试。激光器波长为 532 nm,激光器发射的激光束依次通过 5 个分束镜形成平行激光阵列,光束间距为 6.5 cm。激光经过声场区域发生声光效应,声光衍射信号被光电探测器接收。整个装置具有旋转功能,可以实现精度为 0.1° 的步进旋转。

为减小环境中的噪声以及混响的影响,在消声水池实验室中完成测试。激光传感装置[如图 12(a)、(b)所示]与声源发射装置[如图 12(c)、(d)所示]布置于消声水池两侧。实验过程中,通过上位机控制声源发射装置,接收端使用激光传感装置接收声信号。声

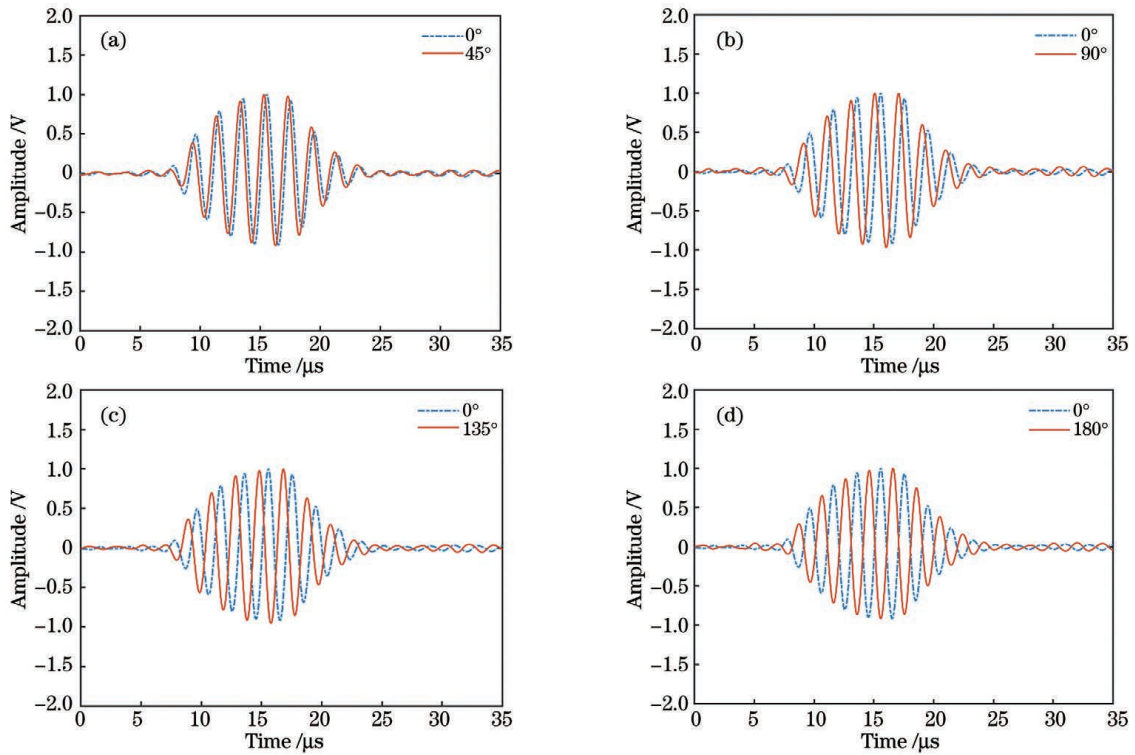


图 9 激励信号初相位不同时,激光传感信号的对比(以 0° 初相位信号作为参考信号)。(a)初相位为 45° ; (b)初相位为 90° ; (c)初相位为 135° ; (d)初相位为 180°

Fig. 9 Comparison of laser sensing signals when initial phase of excitation signals is different (0° initial phase signal is taken as reference signal). (a) Initial phase is 45° ; (b) initial phase is 90° ; (c) initial phase is 135° ; (d) initial phase is 180°

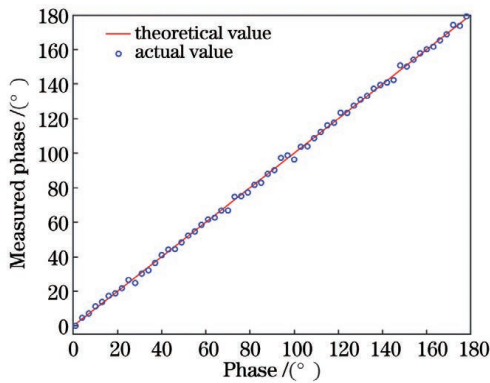


图 10 激励初相位与激光传感初相位之间的关系图

Fig. 10 Relationship between excitation initial phase and laser sensing initial phase

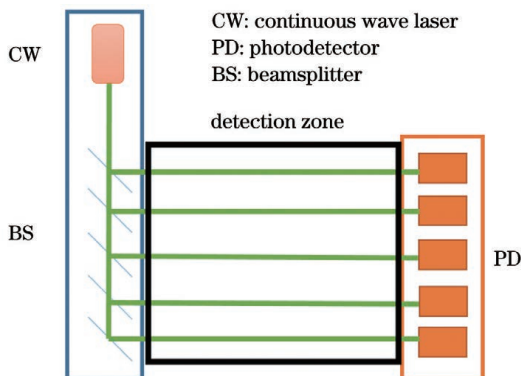


图 11 实验装置原理图

Fig. 11 Schematic of experimental device

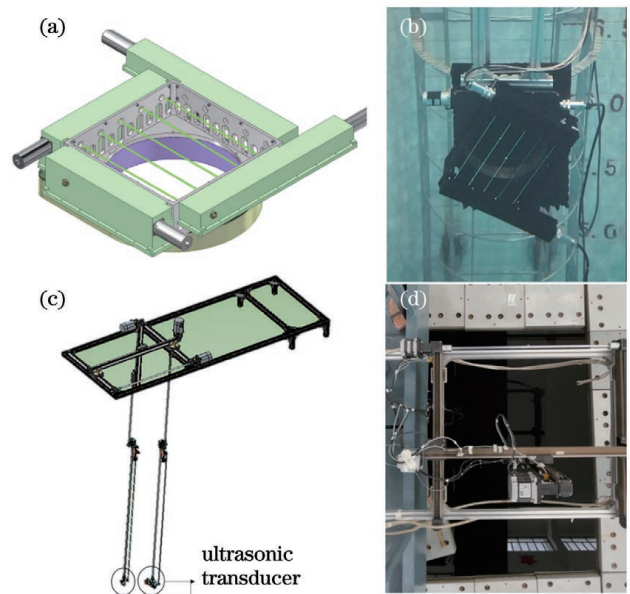


图 12 激光传感装置和声源发射装置图。(a)接收端的三维建模图;(b)接收端的水下测试图;(c)发射端的三维建模图;(d)发射端的实验图

Fig. 12 Laser sensor and sound source devices. (a) Three-dimensional modeling diagram of receiving terminal; (b) actual underwater experiment test diagram of receiving terminal; (c) three-dimensional modeling diagram of transmitting terminal; (d) actual experiment diagram of transmitting terminal

源发射装置可以实现水声换能器移动和姿态的调节。水声换能器通过声源发射装置沿 x 轴和 y 轴平移,最小移动间隔为 0.1 mm, x 轴、 y 轴上的移动量程为 100 cm。使用中心频率为 500 kHz 的水声换能器 (DYW-500kHz-AS) 和中心频率为 33 kHz 的水声换能器 (DYW-33kHz) 进行实验,其判据 Q 值分别为 3.42×10^{-2} 和 4.14×10^{-4} ,均符合 Raman-Nath 衍射条件。换能器的激励信号峰峰值为 2 V,功率放大器的放大倍数为 100 倍,脉冲信号激励个数为 5。

设定声源的移动轨迹,同时使用激光传感装置进行声光信号的采集,将采集到的数据上传到上位机进行处理。声光信号的采样频率为 50 MHz,单次采样点数为 2×10^6 个。首先通过过滤低频噪声对信号进行预处理,然后利用式(11)对前后时刻的声光衍射信

号波形进行互相关计算,得到相位差,随后利用式(16)构建激光传感机理下相位差与距离间的差分方程,最终求解得到坐标。本次实验每间隔 1 s 采集一组数据,将前一组数据的解作为后一组数据的初始坐标,即可得到移动轨迹。

4.2 实验验证及分析

某一时刻激光传感装置接收到的信号如图 13 所示,每路激光束的光强极值用“×”标出,信号的信噪比为 25.6 dB,效果满足预期。受各路激光束所使用的衰减片的衰减比例、分束镜的分光比例、水中杂质的散射和吸收等因素的影响,光强略有不同,因此接收的声信号的峰值有所差别。本文采用的互相关方法主要基于声光信号的相位特征,而光强对声光信号相位精度的影响很小,在小的接收孔径内可以忽略不计。

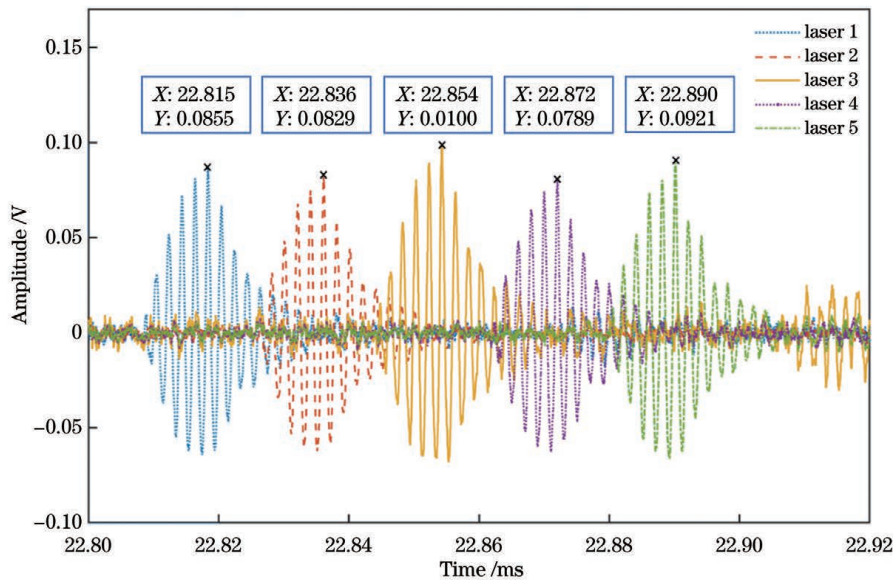


图 13 实际声光测量信号

Fig. 13 Actual acousto-optic measurement signal

应用上述实验系统进行水下跟踪实验,设置 500 kHz 和 33 kHz 的水声换能器的移动轨迹为“中”字,移动步数为 20 次,移动步长分别为 25 mm 和 5 mm。水声换能器的移动轨迹如图 14 中的实线所

示,激光传感装置的追踪结果分别如虚线和点线所示。由图 14 可知,对于厘米级和毫米级的位置变化,激光传感能够得到较为准确的追踪结果,追踪轨迹与实际运动轨迹基本一致。

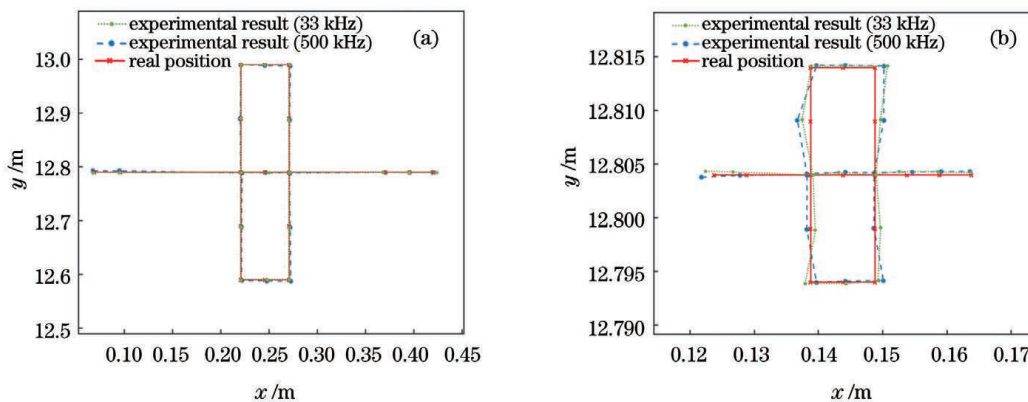


图 14 追踪轨迹图。(a)移动步长为 25 mm;(b)移动步长为 5 mm

Fig. 14 Picture of line tracing. (a) Step length is 25 mm; (b) step length is 5 mm

设置中心频率为 500 kHz 的水声换能器的移动轨迹为曲线,移动步数为 31 次,移动步长为 1~200 mm。实际移动轨迹和激光传感装置追踪结果如图 15 所示,其中实际移动轨迹为实线,激光传感装置的追踪结果为虚线。结果显示,激光传感装置的追踪轨迹与实际移动轨迹基本一致。

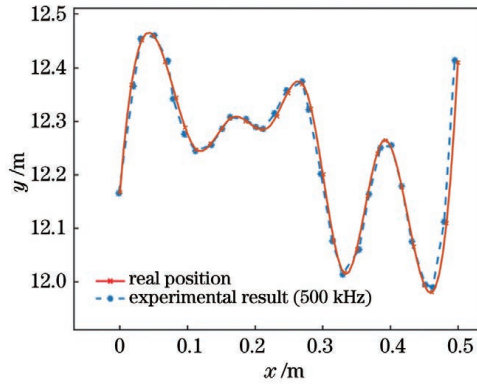


图 15 随机步长实验结果图

Fig. 15 Experimental results of arbitrary step length

对上述不同移动方式下得到的位置坐标进行

表 1 水下目标追踪实验测试结果

Table 1 Test results of underwater target tracking experiment

Step length /mm	Frequency /kHz	σ_x /mm	σ_y /mm	σ /mm	$\Delta\alpha$ /($^\circ$)
25	500	9.62	1.74	9.78	0.043
	33	10.24	1.80	10.40	0.046
5	500	9.71	1.84	9.88	0.043
	33	10.42	1.88	10.58	0.047
Random 1-200	500	9.65	1.70	9.80	0.043

由表 1 数据可知三种步长移动方式的追踪结果相近。由于 500 kHz 水声换能器的波长较短,广义互相关结果较为精确,因此 500 kHz 水声换能器较 33 kHz 的追踪定位结果更优,符合预期。用 33 kHz(5 mm 步长)和 500 kHz(5 mm 步长)水声换能器的追踪定位结果完成定位精度的评估。定位精度 Δd 以及斜距 D 的计算公式分别为

表 2 不同水下目标定位追踪方式的对比

Table 2 Comparison of different underwater target positioning and tracking methods

Method	Equipment	Positioning accuracy /%	$\Delta\alpha$ /($^\circ$)
Laser sensor	Laser sensing device	500 kHz	0.078
		33 kHz	0.082
Fiber optic hydrophone	Distributed optical fiber acoustic sensing (DAS) system (Chinese Academy of Sciences) ^[30]		0.08
		μ PAP200 (Kongsberg, Norwegian) ^[31]	0.45
Ultra-short baseline (USBL)	iTrackUB3000 (Zhonghaida, China) ^[32]	0.45	0.06

由表 2 数据可知激光传感法在定位精度与角度分辨率指标上均优于传统的 USBL 法,且与光纤水听器

处理,分别求得 x 方向标准差 σ_x 、 y 方向标准差 σ_y 、定位标准差 σ 以及角度分辨率 $\Delta\alpha$ 。计算公式分别为

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n-1}}, \quad (17)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{n-1}}, \quad (18)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}, \quad (19)$$

$$\Delta\alpha = \frac{180^\circ}{\pi} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x}_i)^2}{(X_{Ri}^2 + Y_{Ri}^2)}}{(n-1)}}, \quad (20)$$

式中: (x_i, y_i) 为所求水下声学目标与实际坐标的偏差; $x_i = X_i - X_{Ri}$, $y_i = Y_i - Y_{Ri}$, 其中 (X_i, Y_i) 为激光传感法所求的声学目标坐标, (X_{Ri}, Y_{Ri}) 为水下定位目标的实际位置; (\bar{x}_i, \bar{y}_i) 为偏差的平均值。最终的测试结果如表 1 所示。

$$\Delta d = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma}{n}, \quad (21)$$

$$D = \sqrt{X_{Ri}^2 + Y_{Ri}^2}. \quad (22)$$

同时,将本文提出的激光传感法与光纤水听器法、超短基线(USBL)法的追踪结果进行对比,不同追踪方式的定位精度与角度分辨率如表 2 所示。

法接近。激光传感装置具有结构简单、带宽较宽、无干扰探测等优势,能够在一个小孔径上实现高响应带

宽的水声信号探测,且激光传感机理下的水声相位感知能力得到了有效提升,可作为 USBL 法或光纤水听器法的替代方案。

5 结 论

本文提出了一种基于激光传感的新型水下高分辨追踪定位方法。推导了基于声光效应 Raman-Nath 衍射的自相干原理和水下目标追踪原理。搭建了基于 532 nm 蓝绿激光的声光衍射实验系统,采用激光传感方法接收水下声信号,并将其与基于压电效应的接收信号进行对比,同时分析了接收信号的时域、频域、激励及相位特征。设计了一个阵元数为 5 的可旋转平行激光阵列传感装置,搭建了“声学发射—激光接收”的水下定位追踪实验系统,并于消声水池中完成了中心频率为 500 kHz 和 33 kHz 的水下声学目标追踪实验。结果显示:激光传感机理下水声目标的信号质量优于传统的压电效应的信号质量,波形起迄点清晰;激光传感机理的相位感知测量能力优于 1° ,且能够实现真正意义上的无干扰探测;激光传感装置在实现水下声学目标跟踪时的角度分辨率优于 0.05° 。激光传感装置为新型水下目标高分辨跟踪定位技术的发展提供了研究储备,可作为 USBL 法或光纤水听器法的替代方案。

需要指出的是,本团队设计的激光传感装置具有以下局限性:1)当前装置的灵敏度仍低于光纤水听器,且由于激光裸露于水中,受环境噪声(如流场、温度场扰动)等的影响较大;2)激光传感装置基座及其周围环境造成的干扰(如散射光等)会在一定程度上影响信号的稳定性;3)激光传感装置能够全带宽地感知声信号,同样也能够全带宽地感知声学噪声信号,因此需要对声光信号进行特定的滤波处理,以获得水下目标追踪信号。未来拟计划对激光传感方法进行改进,可采取的措施包括采用宽带信号(如编码信号或宽带调频信号),在增加作用距离的同时,提高时间测量精度,从而减小距离测量误差带来的追踪定位误差,并实现水下目标的三维定位追踪。

参 考 文 献

- [1] 蒋立军, 杨娟, 许枫. 蛙人探测声呐技术研究进展[J]. 科学通报, 2009, 54(3): 269-272.
Jiang L J, Yang J, Xu F. Technological progress of diver detection sonar[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(3): 269-272.
- [2] Lo K W, Ferguson B G. Automatic detection and tracking of a small surface watercraft in shallow water using a high-frequency active sonar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(4): 1377-1388.
- [3] 胡明军. 蛙人探测声呐的现状与发展趋势[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(1): 36-37.
Hu M J. Current status and development trend of frog man detection sonar[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2010, 31(1): 36-37.
- [4] 贾宝贤, 边文凤, 赵万生, 等. 压电超声换能器的应用与发展[J]. 压电与声光, 2005, 27(2): 131-135.
Jia B X, Bian W F, Zhao W S, et al. Application and development of piezoelectric ultrasonic transducers[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2005, 27(2): 131-135.
- [5] 南德, 李朝晖. 移动平台超短基线阵实现水下目标高精度定位[J]. 声学学报, 2019, 44(4): 534-544.
Nan D, Li Z H. High-precision acoustic localization of underwater target for mobile platform using ultra-short baseline array[J]. Acta Acustica, 2019, 44(4): 534-544.
- [6] Tan H P, Diamant R, Seah W K G, et al. A survey of techniques and challenges in underwater localization[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(14/15): 1663-1676.
- [7] 毛卫宁. 水下被动定位方法回顾与展望[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(6): 129-132.
Mao W N. An overview of passive localization for underwater acoustics[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2001, 31(6): 129-132.
- [8] 吴永亭, 周兴华, 杨龙. 水下声学定位系统及其应用[J]. 海洋测绘, 2003, 23(4): 18-21.
Wu Y T, Zhou X H, Yang L. Underwater acoustic positioning system and its application[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2003, 23(4): 18-21.
- [9] Jia L C, Xue B, Chen S L, et al. Characterization of pulsed ultrasound using optical detection in Raman-Nath regime[J]. The Review of Scientific Instruments, 2018, 89(8): 084906.
- [10] Wissmeyer G, Pleitez M A, Rosenthal A, et al. Looking at sound: optoacoustics with all-optical ultrasound detection[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 53.
- [11] Nath N S N. The diffraction of light by high frequency sound waves: generalised theory [J]. Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Section A, 1936, 4(2): 222-242.
- [12] 王涛, 王晓东, 王立鼎. 压电陶瓷快速响应特性与应用研究[J]. 传感技术学报, 2009, 22(6): 785-789.
Wang T, Wang X D, Wang L D. Study on fast response characteristic and application of piezoceramics [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(6): 785-789.
- [13] Zhang K, Li Y, Zhao J H, et al. Underwater navigation based on real-time simultaneous sound speed profile correction [J]. Marine Geodesy, 2016, 39(1): 98-111.
- [14] Cranch G A, Nash P J, Kirkendall C K. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications [J]. IEEE Sensors Journal, 2003, 3(1): 19-30.
- [15] 汪云云, 黄俊斌, 丁朋, 等. 实时修正零差对称算法解调 DFB 光纤激光水听器[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1306001.
Wang Y Y, Huang J B, Ding P, et al. Real-time correction homodyne symmetry algorithm to demodulate DFB fiber laser hydrophone[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1306001.
- [16] 丁朋, 黄俊斌, 姚高飞, 等. 二次涂覆增敏型弱反射光纤布拉格光栅水听器[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0906003.
Ding P, Huang J B, Yao G F, et al. Weak reflection fiber Bragg grating hydrophone with secondary coating sensitization [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0906003.
- [17] Bock W J, Urbanczyk W. Fiber-optic sensor systems for absolute measurements[C]//IMTC/98 Conference Proceedings. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Where Instrumentation is Going (Cat. No. 98CH36222), May 18-21, 1998, St. Paul, MN, USA. New York: IEEE Press, 1998: 942-947.
- [18] 唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 应用于拖曳线列阵的分布反馈式光纤激光水听器[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0505005.
Tang B, Huang J B, Gu H C, et al. Distributed feedback fiber laser hydrophone used in towed line arrays[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0505005.
- [19] Bao X Y, Zhou D P, Baker C, et al. Recent development in the distributed fiber optic acoustic and ultrasonic detection [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3256-3267.

- [20] 孟洲, 陈伟, 王建飞, 等. 光纤水听器技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306009.
Meng Z, Chen W, Wang J F, et al. Research progress of fiber optic hydrophone technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306009.
- [21] Moharam M G, Young L. Criterion for Bragg and Raman-Nath diffraction regimes[J]. Applied Optics, 1978, 17(11): 1757-1759.
- [22] Antonov S N, Sotnikov V N, Leroy O, et al. Direct optical characterization of ultrasonic waves using Raman-Nath diffraction of convergent light [J]. Ultrasonics, 1991, 29(5): 366-369.
- [23] 田晶, 白光富, 江阳. 一种基于偏振特征的激光尾流探测方法[J]. 兵工学报, 2018, 39(5): 969-975.
Tian J, Bai G F, Jiang Y. A detection method for ship wake based on polarization characteristic [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(5): 969-975.
- [24] 田晶, 白光富, 江阳. 舰船气泡尾流散射光斯托克斯特征研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 0206003.
Tian J, Bai G F, Jiang Y. Research of scattering Stokes parameters for ship wake bubbles [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(2): 0206003.
- [25] Weng C C, Zhang X M. Model of Raman-Nath acousto-optic diffraction [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(10): 101701-101705.
- [26] 田坦. 水下定位与导航技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
Tian T. Underwater positioning and navigation technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [27] Kumar M, Mondal S. Recent developments on target tracking problems: a review [J]. Ocean Engineering, 2021, 236: 109558.
- [28] 张伟, 董阳泽, 张刚强, 等. 一种基于广义互相关的水声直扩信号检测方法[J]. 声学技术, 2021, 40(1): 44-48.
Zhang W, Dong Y Z, Zhang G Q, et al. A detection method of underwater acoustic DSSS signal based on generalized cross-correlation [J]. Technical Acoustics, 2021, 40(1): 44-48.
- [29] 田坦, 刘国枝, 孙大军. 声呐技术[M]. 2版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010: 30-36.
Tian T, Liu G Z, Sun D J. Sonar technology [M]. 2nd ed. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010: 30-36.
- [30] 杨洋. 分布式光纤水听器系统关键技术的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018: 55-60.
Yang Y. Research on key technologies of distributed optical fiber hydrophone system [D]. Changsha: Hunan University, 2018: 55-60.
- [31] 肖昌荣, 蒋青吉, 李鹏. HiPAP100 水下定位系统及应用[J]. 电子世界, 2014(12): 210-211.
Xiao C R, Jiang Q J, Li P. HiPAP100 underwater positioning system and its application [J]. Electronics World, 2014(12): 210-211.
- [32] 江苏中海达海洋信息技术有限公司. Itrack-USBL 系列超短基线定位系统 [EB/OL]. (2019-05-22) [2021-11-25]. <http://www.zhdgps.com/Product/>.
Jiangsu Zhonghaida Marine Information Technology Company, LTD. An Itrack-USBL series ultra-short baseline positioning system [EB/OL]. (2019-05-22) [2021-11-25]. <http://www.zhdgps.com/Product/>.

High-Resolution Acoustic Tracking Method for Underwater Target Using Laser-Based Sensor

Cai Wang¹, Wang Dongliang¹, Feng Wei², Dong Fanpeng¹, Wei Yaming¹, Jia Lecheng³,
Tian Wenjie¹, Xue Bin^{1*}

¹ School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

² Sichuan Yongxing Electronics Company, Chengdu 610000, Sichuan, China;

³ Shenzhen United Imaging Research Institute of Innovative Medical Equipment, Shenzhen 518045, Guangdong, China

Abstract

Objective The traditional acoustic wave sensing method mainly relies on the piezoelectric effect. Although this technology is relatively mature, there have been several inherent problems. First, the acoustic phase resolution of the piezoelectric transducer has a high phase resolution threshold mainly due to the unclear start and end points of the acoustic signal of the mechanical vibration. In underwater target detection applications, this problem leads to the loss of some details of target motion information hidden in the phase. Second, the piezoelectric effect sensing of acoustic waves requires a piezoelectric transducer to “contact and collide” with the acoustic wave. Consequently, some acoustic information is destroyed while sensing the acoustic wave, resulting in a loss of some phase information. Third, the “collision” between the piezoelectric transducer and the acoustic wave is accompanied by the reflection, diffraction, scattering, and other physical phenomena of the acoustic wave. Combining these physical phenomena and the target acoustic wave leads to phase loss, which is also a manifestation of the baffle effect. Fourth, the traditional piezoelectric transducer composed of an array is more difficult to use in engineering due to its volume and mechanical structure. This affects the quality of acoustic sensing since large array systems are inconvenient to install and use. Furthermore, the regular maintenance cost of the equipment is high, and the detection and calibration are difficult. Therefore, in this paper, we proposed an acousto-optic effect laser array method for high-quality sensing of acoustic signals.

Methods We proposed a Raman-Nath detection acoustic signal using laser sensing for the hydro-acoustic signal detection method. Here we focused on the colinear problem of levels zero and one diffracted light, respectively. A performance

analysis of relevant influencing elements was conducted. Furthermore, we derived the underwater target tracking method using the principle of mutual correlation to solve the acoustic field localization. Subsequently, we analyzed the quality and characterization of the acousto-optical signal. An experimental setup was built for principle verification (Fig. 4). We compared the time- and frequency-domain characteristics of the acousto-optical effect with those of the piezoelectric effect (Fig. 5), focusing on the phase information of the acousto-optical signal. Finally, we built an underwater target tracking system, designed and fabricated a laser sensing device (Fig. 11), and constructed and completed the experimental system in an anechoic pool laboratory.

Results and Discussions By comparing both the time- and frequency-domain signal characteristics of the laser sensing method and the ultrasonic transducer method (Figs. 6 and 7), we prove that the signal received using the laser sensing method is of good quality with clear starting and finishing points. The phase characteristics show that the laser sensing method achieves an accurate perception of the ultrasonic phase (Figs. 9 and 10). For the tracking experiments of underwater targets, we set the number of moving steps of the ultrasonic transducer target to 20, and the minimum moving steps are 25 mm and 5 mm respectively, in which the shape of the ultrasonic transducer moving trajectory is the Chinese character “Zhong”, and the results are shown in Figure 14. The moving path of the ultrasonic transducer is set as a curve with 31 moving steps with a random moving step length. The detection tracking of the laser sensing device is consistent with the actual motion track. The actual positioning tracking results are shown in Fig. 15, and the positioning results of the three moving methods are shown in Table 1. The results show that the standard deviation of the x - and y -direction measurements are better than 10.42 mm and 1.88 mm, respectively. Moreover, the positioning standard deviation is better than 10.58 mm, and the angular resolution is better than 0.047° . Our laser sensing method outperforms the ultra-short baseline (USBL) device in terms of positioning accuracy and angular resolution index. The performance of our equipment is close to that of fiber optic hydrophones, as shown in Table 2.

Conclusions In this paper, we propose a novel underwater high-resolution tracking method using laser sensing. Here, we deduce the principle of acousto-optical effect using Raman-Nath diffraction and the target tracking model. Based on these principles, we validate the phase-sensing capability of the acousto-optical effect for underwater acoustic waves and design a new small-aperture laser sensing device. Furthermore, we establish an experimental system for underwater tracking and experimentally verified the target tracking. The experimental results show that the measurement capability of hydro-acoustic phase sensing under the laser sensing mechanism is effectively improved. Laser sensing methods enable truly interference-free detection. Additionally, the angular resolution of underwater target tracking using our method is better than 0.05° . The laser sensing device provides a research reserve for developing new underwater target tracking and positioning technology with high resolution.

Key words sensors; acousto-optic effect; optical sensing; Raman-Nath diffraction; generalized cross-correlation; acoustic tracking