

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513716

基于声光偏转的高分辨波矢方向估计研究*

于航宁¹, 李鑫¹, 薛彬²

(1. 天津大学海洋科学与技术学院 天津 300072; 2. 同济大学测绘与地理信息学院 上海 200092)

摘要:水声波矢方向估计是水声领域的一项关键任务,对于水下目标的识别、探测和跟踪等研究领域具有至关重要的意义。然而,在传统探测方法中,水听器阵列存在相位模糊和干扰声场等局限性;矢量水听器的角度分辨率和有效带宽受偶极子指向性和谐振频率的限制。针对传统探测方法存在于物理结构上的局限性,引入了激光传感声场信息的方法。激光在穿越受声场影响的介质时,不会对声场产生干扰,但激光的传播路径会发生偏转。即激光可以实现对声场的非侵入式传感,同时使得激光在代替传统探测设备中的敏感元件时不受谐振频率的限制。通过深入分析声光偏转原理,详细探讨了利用声光偏转感知声矢量方向的机制,基于此原理单层激光阵列在探测声场时可消除相位模糊的影响。在此基础上利用激光水声传感的非侵入性创新性地提出了双层激光阵列传感模型,该模型通过上下层激光的联合校正计算进一步消除了声速参数对波矢方向估计的影响,并且显著提高了测量分辨率。实验结果显示,两种模型均有较高的角度分辨率,同时与单层激光阵列传感模型相比,双层激光阵列传感模型波矢方向角估计的分辨率从 0.19° 提高到了 0.13° ,性能提升31.6%。

关键词:波矢方向估计;声光偏转;激光阵列

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.50

Research on high-resolution wavevector direction estimation based on acousto-optic deflection

Yu Hangning¹, Li Xin¹, Xue Bin²

(1. School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Underwater acoustic wave vector direction estimation is a crucial task in hydro acoustics, holding significant importance for underwater target identification, detection, and tracking. However, conventional detection methods exhibit inherent limitations. For hydrophone arrays, they are prone to phase ambiguity and acoustic interference. Vector hydrophones have constrained angular resolution and bandwidth due to directivity patterns and resonance frequency limitations. To overcome these physical constraints in traditional detectors, a laser-based acoustic sensing method is proposed. When traversing an acoustic-modulated medium, laser beams undergo measurable deflection without perturbing the original acoustic field. This enables non-invasive acoustic sensing through optical means, circumventing the resonance frequency limitations inherent in conventional transducers. Through rigorous analysis of acousto-optic deflection principles, the mechanism for acoustic vector direction perception is systematically investigated. Theoretical analysis demonstrates that a single-layer laser array configuration can eliminate phase ambiguity during acoustic detection. Building on the non-invasive nature of laser-based sensing, an innovative dual-layer laser array architecture is developed. This enhanced model employs joint correction algorithms to mitigate the influence of sound velocity parameters on wave vector estimation while achieving significant resolution improvement. Experimental results show that both configurations exhibit high angular resolution. Notably, compared with the single-layer array, the dual-layer configuration improves wave vector direction estimation resolution from 0.19° to 0.13° , representing a 31.6% performance enhancement.

Keywords: wavevector direction estimation; acousto-optic deflection; laser array

收稿日期: 2025-01-24 Received Date: 2025-01-24

* 基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2022YFC3104600)、国家自然科学基金面上项目(62471336)资助

0 引 言

在海洋探测领域,声波信号至今仍是最有效且应用最广泛的探测手段。作为声波信号的基本物理表征,水声波矢以矢量形式描述声波传播特征:模值对应声波波数,描述了声波的空间频率;方向则为声波的传播方向,可由波矢的方向角和方向余弦精确描述。而波矢的方向角则是指波矢与各坐标轴正方向之间的夹角。

水声波达方向(direction of arrival, DOA)是水声探测的一个重要参数,指水下环境中声源的方位角和俯仰角。需要说明的是,波矢方向角与波达方向角本质相同,仅在描述视角存在差异。为有效获取水声信号的波达方向信息,通常需构建水听器阵列并通过阵列信号处理技术进行 DOA 估计。自 20 世纪中后期起,随着水声探测技术的快速发展,一系列经典 DOA 估计算法相继涌现:多重信号分类算法^[1](multiple signal classification, MUSIC)、基于旋转不变技术的信号参数估计(estimation of signal parameters via rotational invariance techniques, ESPRIT)、加权子空间拟合算法等,这些算法及其改进至今仍是重要的研究内容^[2-4]。矢量水听器是水声波达方向的另一重要探测手段^[5]。单个矢量水听器提供的信息理论上就等效于一个小型四阵元固定阵列提供的信息,从而独立完成声源方位角和俯仰角的估计^[6]。随着声压振速联合处理技术的发展,声能流法、波束形成、各种子空间方法也相继出现并各有其特性,单矢量水听器在高信噪比的仿真条件下最高能达到 0.89° 的定向精度^[7]。

然而,水听器阵列与矢量水听器在 DOA 估计中均存在一些问题与限制。

针对水听器阵列:首先面临相位模糊带来的一系列问题。传统水听器在工作时被视为点探测器,在对声场进行空间采样时,均匀阵列的阵元间距通常不超过探测信号的半波长,否则会出现相位模糊,因此阵列的孔径和带宽也会受到限制;其次,传统的探测方式具有“侵入性”缺陷。从水听器的原理来说,水听器需通过振动的流体介质与水听器的敏感材料相互作用来传递能量与信息,进而探测介质中的声压。此过程会因能量耗散引发声场相位失真,导致相位信息受损,同时声场也会在探测过程中被干扰^[8]。而为了解决相位模糊的问题,学者们提出了各种方法:基于多种基线的组合解决相位模糊^[9];利用多频信号相位差特性解算模糊整数;利用互质阵列通过稀疏布局扩大阵列孔径避免相位模糊^[10];通过非均匀阵元间距的嵌套阵列设计消除模糊。传统水听器阵列对阵列结构或信号的改进可以较为有效地消除相位模糊的影响,然而复杂的阵列结构与算法增加了工程实现的难度。

就矢量水听器而言,其局限性主要体现在两方面:一方面,角度分辨率受限。由于矢量水听器的振速通道具有偶极子的指向性,其方向响应遵循偶极子模式。声信号入射角越接近 90°,方向性函数的导数越小甚至趋近于零,同时方位估计的克拉美-罗下界发散,导致角度估计误差急剧增大;另一方面,有效信号带宽窄。矢量水听器的振速传感器在低频时灵敏度下降,在高频时受共振频率限制,有效带宽集中在较窄的频段内,同时更多的信息量使矢量水听器对工作环境与安装布局提出了更高的要求。将矢量水听器组合成阵列可有效缓解单矢量水听器的问题,但同时会出现多传感器相位匹配困难的现象。矢量水听器角度分辨率低、有效带宽窄的根本原因在于其偶极子指向特性与机械结构的谐振频率。

已有的 DOA 估计算法多数是在现有的传统物理探测结构下,对获得信息的优化与约束,并没有突破物理结构的限制。为突破传统探测方式的物理局限,除优化现有机械结构与处理算法外,亟需发展基于新原理的声场感知技术。

声光偏转效应,指激光在声波作用下发生传播方向偏转的现象,为声场的非侵入式探测提供了新途径。与传统的换能器阵列相比,声光偏转信号中包含声场的空间信息,可以高效地消除相位模糊。基于声光偏转原理,激光在探测声波时,不仅有更高的分辨率,不会对声场造成干扰,还不存在振铃效应和谐振现象,因此相比矢量水听器激光水声传感系统的带宽不会受到谐振频率的限制。这为将来探索出一种相较换能器阵列、矢量水听器效率更高、对声场干扰更小的水声探测方法提供了新的思路。目前,基于声光相互作用的水声 DOA 估计方法尚在发展阶段,然而,激光传感的非接触、高精度使其在声场测量中具有很大的潜力:Bahr 等^[11]利用多普勒测振仪穿过声场时发生的相位变化,通过层析方法进行了空气中麦克风声场的重建测量;Maswadi 等^[12]利用声光偏转技术检测生物组织产生的声波,进行显微成像,并将其性能与压电换能器进行对比。基于声光偏转的新型激光阵列水声波矢方向的探测装置,在机理层面上就具有高分辨率、不干扰声场、不存在振铃效应(即因机械振动残余引起的信号干扰)和克服相位模糊等优势。基于对声光偏转感知声矢量方向原理的详细分析,创新性提出了双层激光传感阵列模型,提高了声波矢方向传感的分辨力。

1 声矢量方向的激光传感原理

声波在流体介质中传播时,介质压力的周期性变化引起单位体积内分子数的变化,介质密度会随之周期性变化,致使介质的折射率改变^[13]。除少数可以使介质空化的情况外,流体满足连续性方程,由声场扰动引起的折

射率变化和折射率两者之间的关系可以近似认为是线性的,解析表示^[14]为:

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

式中: δn 表示折射率的变化量; \mathbf{r} 表示坐标向量; $p(\mathbf{r}, t)$ 表示在位置 \mathbf{r} 处, 时刻为 t 时的声压; $(\delta n / \delta p) S$ 称为压光系数^[15], 是表征介质所受应力或应变而导致折射率变化的物理量, 由介质种类和温度决定。在各向同性介质中, 压光系数为:

$$\left(\frac{\delta n}{\delta p} \right)_s = \frac{n_0^2 - 1}{2\rho_0 n_0 c^2} \quad (2)$$

式中: n_0 为介质静止时的折射率; ρ_0 为介质不受干扰时的静态密度; c 为静止时介质中的声速。

声波传播的时候, 介质折射率周期性变化。当声波波长大于激光波长时, 激光光束在声场中的前进路径由近轴光线方程表示^[16]为:

$$\frac{d}{dl} \left(n \frac{d\mathbf{r}}{dl} \right) = \nabla n(\mathbf{r}, t) \quad (3)$$

式中: n 表示声波传播引起对介质折射率变化; \mathbf{r} 表示激光传播路径上某点的位置坐标; l 表示光束路径的无穷小长度。

以二维平面声波为例分析声光相互作用的过程。如图1所示, 假设由激光器发出的激光束沿 x 轴传播, 与沿 y 轴传播的声信号 $p(y, t)$ 在长度为 x_l 的区域相互作用, 并在经过相互作用区域后继续传播一段距离后在四象限位置探测器 (position sensitive detector, PSD) 上形成光斑。

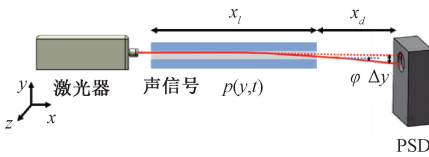


图1 声光偏转原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the acousto-optic deflection principle

记 PSD 与声光相互作用区域终点沿 x 轴方向距离为 x_d ; 经过声光相互作用区域后的光线与原光线 (未经过声光相互作用区域的光线) 之间的夹角, 即光线偏转角为 φ ; 偏转后的光斑与未发生偏转的光线形成的光斑 y 轴方向的距离, 即光斑的偏移量为 Δy 。

根据近轴方程, 可得:

$$\frac{d}{dx} \left(n \frac{d\mathbf{r}}{dx} \right) = \frac{dn}{dx} \frac{d\mathbf{r}}{dx} + n \frac{d^2\mathbf{r}}{dx^2} = \nabla n \quad (4)$$

结合式(2)~(4), 假设介质流体为水, 并假设未经偏转的光束的空间位置为 y_0 , 同时又因为声波沿着 y 轴方向传播^[17], 则有:

$$y(x) = \frac{(n_0^2 - 1)}{4n_0\rho_0 c^2} x^2 \frac{\partial}{\partial y} p(y_0, t) \quad (5)$$

代入声波表达式, 则可以得到:

$$y(x) = \frac{\pi(n_0^2 - 1)}{2n_0\rho_0\lambda c^2} x^2 \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{\lambda} y_0\right) \quad (6)$$

声光作用 (积分) 长度为 x_l , 声光相互作用终点与位置探测器 PSD 的距离为 x_d , 位置探测器上光斑的偏移量 Δy 可以表示为:

$$\Delta y = y(x_l) + x_d \tan \varphi \quad (7)$$

其中, 偏转角满足 $\tan \varphi = \frac{dy(x_l)}{dx_l}$ 。

由声光偏转原理可知, 当沿 x 轴传播的激光穿过沿 y 轴的声场作用区域时, 激光会在探测器的光屏上形成一系列沿着 y 轴方向分布的光斑。

此时, 在探测器的光屏上以未经过偏转的光线在光屏上形成的光斑为原点 O_{sc} , 建立 $Y_{sc} O_{sc} Z_{sc}$ 坐标系, 其中 Y_{sc} 轴与 y 轴方向相同, Z_{sc} 轴与 z 轴方向相同。可以得到, 当沿 x 轴的激光与沿 y 轴的声信号作用后, 激光束发生偏转, 光束偏转角以及光屏上的光斑的空间关系如图2所示。

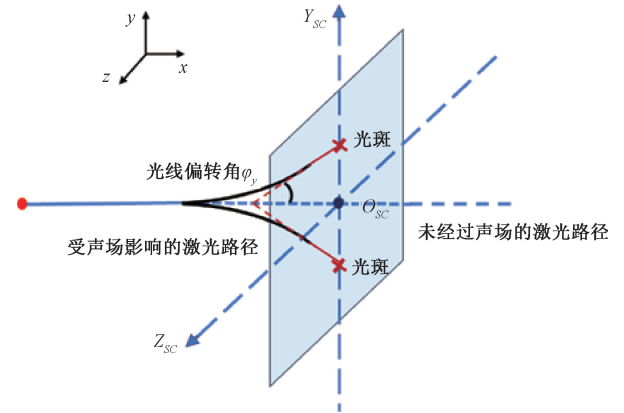


图2 光斑及光线偏转角的空间位置关系示意图

Fig. 2 Diagram of the spatial relationship between light spot and light deflection angle

进一步分析, 假设声信号波矢的方向垂直于 x 轴, 并与 y 轴的夹角为 θ , 同时, 与 z 轴的夹角为 $(\pi/2 - \theta)$ 。

此时, 声波的表达式变为:

$$p = A \cos\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{\lambda} y \cos \theta + \frac{2\pi}{\lambda} z \sin \theta\right) \quad (8)$$

结合近轴方程, 于是有:

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dx^2} = \frac{(n_0^2 - 1)}{2n_0\rho_0 c^2} \frac{\partial}{\partial y} p(y, z, t) + \frac{(n_0^2 - 1)}{2n_0\rho_0 c^2} \frac{\partial}{\partial z} p(y, z, t) \quad (9)$$

分别将光线在 y, z 轴的偏离距离记为 $y(x)$ 和 $z(x)$, 假设未经偏转的光束的空间位置为 (y_0, z_0) , 并将声波表达式代入, 则可以分别得到:

$$\begin{cases} y(x) = \frac{\pi(n_0^2 - 1)\cos\theta}{2n_0\rho_0\lambda c^2} x^2 \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{\lambda} y_0 \cos\theta + \frac{2\pi}{\lambda} z_0 \sin\theta\right) \\ z(x) = \frac{\pi(n_0^2 - 1)\sin\theta}{2n_0\rho_0\lambda c^2} x^2 \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{\lambda} y_0 \cos\theta + \frac{2\pi}{\lambda} z_0 \sin\theta\right) \end{cases} \quad (10)$$

同理,根据光线的偏转原理,可以得到光屏上的光斑的偏移量 Δy 、 Δz 以及总光线偏角 φ 分别在两个方向的投影 φ_y 、 φ_z 。

$$\begin{cases} \Delta y = y(x_t) + \varphi_y \cdot x_d \\ \Delta z = z(x_t) + \varphi_z \cdot x_d \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \tan\varphi_y = \frac{\pi(n_0^2 - 1)\cos\theta}{2n_0\rho_0\lambda c^2} x^2 \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{\lambda} y_0 \cos\theta + \frac{2\pi}{\lambda} z_0 \sin\theta\right) \\ \tan\varphi_z = \frac{\pi(n_0^2 - 1)\sin\theta}{2n_0\rho_0\lambda c^2} x^2 \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{\lambda} y_0 \cos\theta + \frac{2\pi}{\lambda} z_0 \sin\theta\right) \end{cases} \quad (12)$$

可以得出光斑在两个方向的偏移量 Δy 、 Δz 的关系如式(13)所示。

$$\frac{\Delta z}{\Delta y} = \tan\theta \quad (13)$$

声信号的波矢方向是垂直于 x 轴,并与 y 轴成 θ 角,而光斑的偏移轨迹与 y 轴也成 θ 角。于是在此条件下可以得出结论:若激光穿过平面波声场,且声波波矢与激光传播路径垂直时,激光会发生偏转,且偏转方向与声场梯度相同。

在光屏上建立坐标系后,声信号、偏转光线、光线偏转角、光斑以及光斑偏移角的空间关系如图3所示。

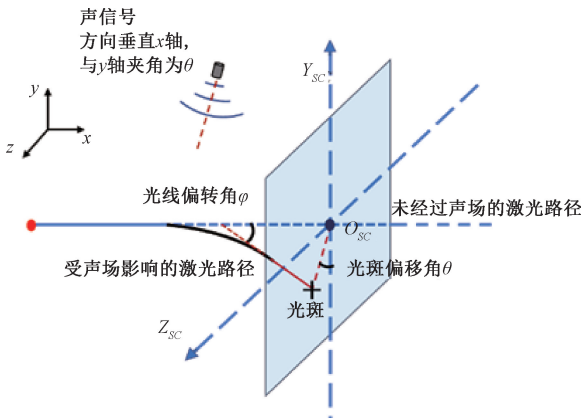
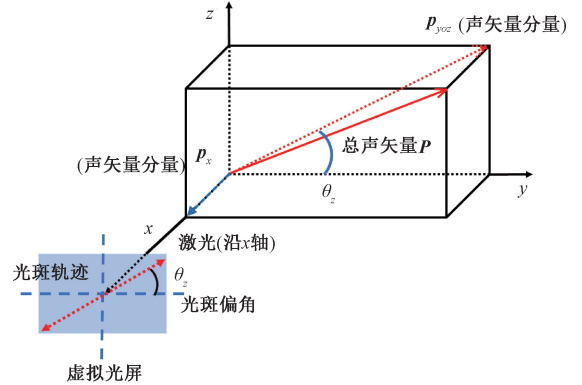


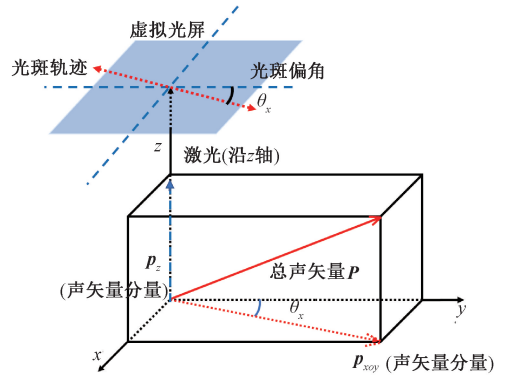
图3 光斑及光斑偏移角的空间位置关系示意图

Fig. 3 Diagram of spatial position relationship between light spot and light spot offset angle

实际上,当声矢量以任意角度与激光阵列相互作用时,由 PSD 光屏上光斑的偏移计算所得的角度并不是直接表示声矢量与 x 、 y 、 z 轴的夹角,而是表示声矢量在光屏所在平面上的投影与坐标轴的夹角。图4为表示任意与 y 轴正方向成锐角的声矢量分别与沿 x 轴的激光、沿 z 轴的激光相互作用后两组激光对应光屏上光斑的偏移角度示意图。



(a) 声矢量与沿 x 轴激光作用及对应光斑偏移角 θ_z 示意图
(a) Schematic diagram of the interaction between sound vector and laser along the x -axis and the corresponding spot offset angle θ_z



(b) 声矢量与沿 z 轴激光作用及对应光斑偏移角 θ_x 示意图
(b) Schematic diagram of the interaction between sound vector and laser along the z -axis and the corresponding spot offset angle θ_x

图4 声矢量分别与沿 x 轴激光、沿 z 轴激光作用及对应光斑偏移角示意图

Fig. 4 Diagram of the interaction between sound vectors and laser along the x -axis and z -axis, as well as the corresponding beam offset angles

记总声矢量 P 的方向余弦为 $(\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma)$; 分别记 θ_z 和 θ_x 为沿 x 轴激光和沿 z 轴激光对应光屏上光斑的偏移角度,即 θ_z 和 θ_x 分别作为 P 在平面 $yozy$ 和平面 xoy 上的投影与 y 轴的夹角。显然, θ_z 和 θ_x 并不与 α 、 β 、 γ 中任一角度相等。那么,为了利用 PSD 测得参数 θ_z 、 θ_x 对其与 α 、 β 、 γ 做一个参数变换。示意图如图5所示。

α 、 β 、 γ 与 θ_z 、 θ_x 的关系如式(14)、(15)所示。

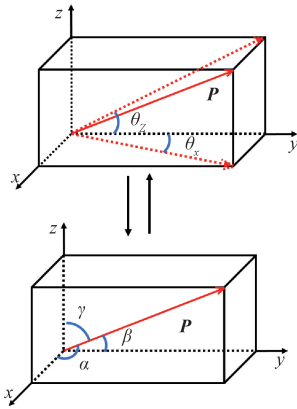


图 5 坐标系中参数变换示意图

Fig. 5 Diagram of parameter transformation in coordinate system

$$\begin{cases} \tan \theta_x = \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \\ \tan \theta_z = \frac{\cos \gamma}{\cos \beta} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \cos \alpha = \sqrt{\frac{\tan^2 \theta_x}{1 + \tan^2 \theta_x + \tan^2 \theta_z}} \\ \cos \beta = \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2 \theta_x + \tan^2 \theta_z}} \\ \cos \gamma = \sqrt{\frac{\tan^2 \theta_z}{1 + \tan^2 \theta_x + \tan^2 \theta_z}} \end{cases} \quad (15)$$

2 两种声光传感模型及误差分析

2.1 单层激光传感模型

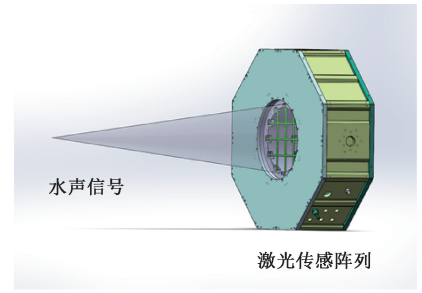
单层激光传感模型是基于传统的阵列结构的探测模型,但又因融合了激光阵列结构,利用激光阵列直接感知声矢量方向的特点,单层激光传感模型可以避免计算中相位模糊的影响。

单层激光传感模型与传统均匀平面阵列类似,激光在探测平面内横、纵两种正交的激光束等距排列,激光间距为 50 mm 且探测长度相等。单层激光模型阵列及其原理的示意图如图 6 所示。

类似传统水听器阵列^[18-19],单层激光阵列通过相位差的方法测量的波矢方向角满足:

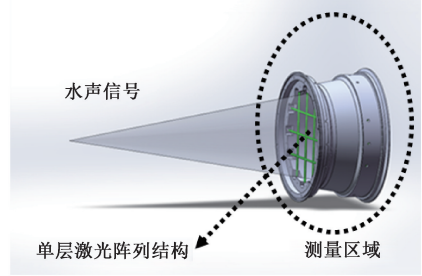
$$\frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} = n \cdot 2\pi + \varphi \quad (16)$$

式中: θ 为声矢量与阵列所在直线形成的锐角,以 θ 表示此情况下的波达角; d 表示相邻两束平行激光之间的距离; λ 为声波的波长; n 为正整数代表相位的整周模糊数。



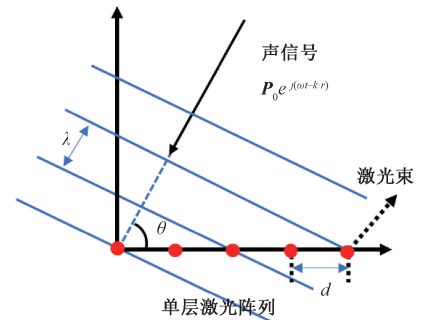
(a) 激光水声传感阵列示意图

(a) Diagram of laser underwater acoustic sensing array



(b) 激光阵列测量区域示意图 (单层激光模型)

(b) Diagram of laser array measurement area (single-layer laser model)



(c) 单层激光水声传感模型原理示意图

(c) Schematic diagram of single-layer laser underwater acoustic sensing model principle

图 6 单层激光阵列示意图

Fig. 6 Schematic diagram of single-layer laser array

将两束激光的光斑偏移角的平均值经过式(15)的变换所得的结果作为 x 方向声波波达角的粗略估计值代入式(16)左侧,确定 n 的值,消除相位模糊的影响。再对两束激光接收到的水声信号进行傅里叶变换得到相位谱,分别取对应频率点处的相位差,即可得到相位差的小数部分 φ 。即:通过粗略估计值确定相位的整周模糊数,结合相位差对波矢方向进行精确估计。

于是可以得到波达方向角为:

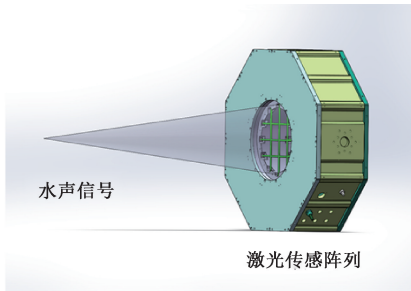
$$\theta_1 = F_1(n, \varphi, c, d, f) = \arcsin \left(\frac{\left(n + \frac{\varphi}{2\pi} \right) c}{d \cdot f} \right) \quad (17)$$

式中: θ_1 为单层激光模型得到的信号的波达角; d 为阵元间距; n 为相位的整周模糊数; φ 为相位差的小数部分;

λ 为声信号波长; f 为声信号频率; c 为介质中声速。

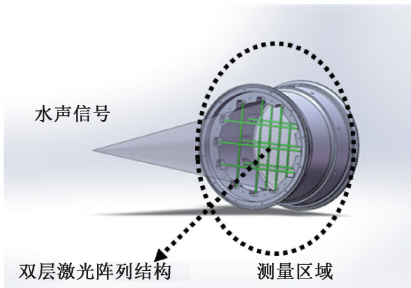
2.2 双层激光传感模型

水下环境复杂多变,海水也并非均匀的、性质固定的介质,这就导致声速 c 并不是一个常数,而单层激光传感模型并不能解决由实际声速与代入的理论声速值不同导致的误差。声速对波达角的测量结果影响也是不可忽视的,因此需要一种方法来减小甚至消除声速对波达角的影响。结合激光水声传感器具有非侵入性的特点,即测量区域内声场信息不会因为激光的测量而改变,以单层激光阵列水声传感器模型为基础,在第 1 层激光的后方(沿声传播方向)再布设一层激光,组成双层激光阵列水声传感器模型。示意图如图 7 所示,其中, h 表示两层激光所在平面的距离。



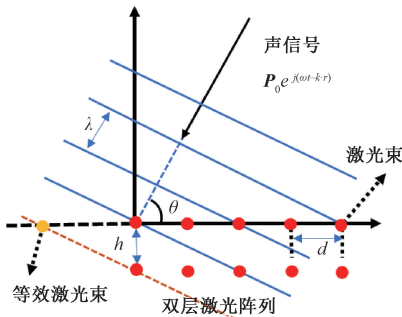
(a) 激光水声传感阵列示意图

(a) Diagram of laser acoustic sensing array



(b) 激光阵列测量区域示意图 (双层激光模型)

(b) Diagram of laser array measurement area (double-layer laser model)



(c) 双层激光水声传感模型原理示意图

(c) Diagram of double-layer laser underwater acoustic sensing model principle

图 7 双层激光传感模型示意图

Fig. 7 Diagram of double-layer laser array

第 2 层激光的布设既可以增加一系列激光探测点,又可以提高阵列的等效孔径,其中扩大的等效孔径为 $h/\tan \theta$,更重要的是可以辅助第 1 层激光消除声速对波达角测量的影响:

与单层激光传感模型相同,波达方向满足:

$$d \sin \theta = \left(n + \frac{\varphi}{2\pi} \right) \cdot \frac{c}{f} \quad (18)$$

同时,若第 2 层激光与第 1 层激光对齐且对应两束激光距离为 h ,则波达角与声速还满足:

$$h \cos \theta = c \cdot \tau \quad (19)$$

其中, τ 为第 1 层激光与第 2 层激光中对应两束激光对声信号响应的时差,可以在实地实验的数据采集设备中读取。

最终可以得到波达方向角为:

$$\theta_2 = G_1(n, \varphi, h, d, f, \tau) = \arctan \left(\frac{\left(n + \frac{\varphi}{2\pi} \right) h}{d f \tau} \right) \quad (20)$$

同时也可以得到声速数据,即:

$$c = \sqrt{1 - \frac{\left(n + \frac{\varphi}{2\pi} \right)^2 h^2 + d^2 f^2 \tau^2}{d^2 f^2 h^2}} \quad (21)$$

2.3 误差分析

下面对两个激光传感模型进行误差分析,首先是单层激光传感模型。

为方便误差分析,用 N 替换 $(n + \varphi/2\pi)$,即式(17)可简化为:

$$\theta_1 = F(N, c, d, f) = \arcsin \left(\frac{Nc}{d \cdot f} \right) \quad (22)$$

根据误差传播率可以得到波达角误差,即:

$$(\Delta \theta_1)^2 = \left(\frac{\partial F}{\partial N} \cdot \Delta N \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial c} \cdot \Delta c \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial d} \cdot \Delta d \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial f} \cdot \Delta f \right)^2 \quad (23)$$

其中:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial N} &= \frac{c}{d f \sqrt{1 - \left(\frac{Nc}{d f} \right)^2}} \\ \frac{\partial F}{\partial c} &= \frac{N}{d f \sqrt{1 - \left(\frac{Nc}{d f} \right)^2}} \\ \frac{\partial F}{\partial d} &= - \frac{Nc}{d^2 f \sqrt{1 - \left(\frac{Nc}{d f} \right)^2}} \\ \frac{\partial F}{\partial f} &= - \frac{Nc}{d f^2 \sqrt{1 - \left(\frac{Nc}{d f} \right)^2}} \end{aligned} \right. \quad (24)$$

式(20)中以 θ_2 表示双层激光模型得到的波达角。

同样,令 $N = (n + \varphi/2\pi)$, 式(20)可化简为:

$$\theta_2 = G(N, h, d, f, \tau) = \arctan\left(\frac{Nh}{df\tau}\right) \quad (25)$$

对此结果进行误差分析,即:

$$\begin{aligned} (\Delta\theta_2)^2 = & \left(\frac{\partial G}{\partial N} \cdot \Delta N\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial h} \cdot \Delta h\right)^2 + \\ & \left(\frac{\partial G}{\partial d} \cdot \Delta d\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial f} \cdot \Delta f\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial \tau} \cdot \Delta \tau\right)^2 \end{aligned} \quad (26)$$

其中,

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial N} = \frac{h}{df\tau \left(1 + \left(\frac{Nh}{df\tau}\right)^2\right)} \\ \frac{\partial G}{\partial h} = \frac{N}{df\tau \left(1 + \left(\frac{Nh}{df\tau}\right)^2\right)} \\ \frac{\partial G}{\partial d} = -\frac{Nh}{d^2 f\tau \left(1 + \left(\frac{Nh}{df\tau}\right)^2\right)} \\ \frac{\partial G}{\partial f} = -\frac{Nh}{df^2 \tau \left(1 + \left(\frac{Nh}{df\tau}\right)^2\right)} \\ \frac{\partial G}{\partial \tau} = -\frac{Nh}{df\tau^2 \left(1 + \left(\frac{Nh}{df\tau}\right)^2\right)} \end{cases} \quad (27)$$

下面对两种模型得到的方差进行对比分析,两种模型的方差如式(28)与(29)所示。

$$\begin{aligned} (\Delta\theta_1)^2 = & \frac{c^2}{d^2 f^2 \left(1 - \left(\frac{Nc}{df}\right)^2\right)} (\Delta N)^2 + \\ & \frac{N^2}{d^2 f^2 \left(1 - \left(\frac{Nc}{df}\right)^2\right)} (\Delta c)^2 + \frac{N^2 c^2}{d^4 f^2 \left(1 - \left(\frac{Nc}{df}\right)^2\right)} (\Delta d)^2 + \\ & \frac{N^2 c^2}{d^2 f^4 \left(1 - \left(\frac{Nc}{df}\right)^2\right)} (\Delta f)^2 \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} (\Delta\theta_2)^2 = & \frac{h^2}{d^2 f^2 \tau^2 \left(1 + \left(\frac{Nh}{df\tau}\right)^2\right)} (\Delta N)^2 + \\ & \frac{N^2}{d^2 f^2 \tau^2 \left(1 + \left(\frac{Nh}{df\tau}\right)^2\right)} (\Delta h)^2 + \frac{N^2 h^2}{d^4 f^2 \tau^2 \left(1 + \left(\frac{Nh}{df\tau}\right)^2\right)} (\Delta d)^2 + \\ & \frac{N^2 h^2}{d^2 f^4 \tau^2 \left(1 + \left(\frac{Nh}{df\tau}\right)^2\right)} (\Delta f)^2 + \frac{N^2 h^2}{d^2 f^2 \tau^4 \left(1 + \left(\frac{Nh}{df\tau}\right)^2\right)} (\Delta \tau)^2 \end{aligned} \quad (29)$$

式(28)可简化为:

$$\begin{aligned} (\Delta\theta_1)^2 = & \frac{c^2}{d^2 f^2 \cos^2 \theta_1} (\Delta N)^2 + \frac{N^2}{d^2 f^2 \cos^2 \theta_1} (\Delta c)^2 + \\ & \frac{N^2 c^2}{d^4 f^2 \cos^2 \theta_1} (\Delta d)^2 + \frac{N^2 c^2}{d^2 f^4 \cos^2 \theta_1} (\Delta f)^2 \end{aligned} \quad (30)$$

而式(28)中的声速 c 又可以看作实测声速与系统误差之和,即:

$$c = \frac{h \cos \theta_1}{\tau} + c_e \quad (31)$$

于是有:

$$\begin{aligned} (\Delta\theta_1)^2 > & \frac{h^2}{d^2 f^2 \tau^2} (\Delta N)^2 + \frac{N^2}{d^2 f^2 \cos^2 \theta_1} (\Delta c)^2 + \\ & \frac{N^2 h^2}{d^4 f^2 \tau^2} (\Delta d)^2 + \frac{N^2 h^2}{d^2 f^4 \tau^2} (\Delta f)^2 \end{aligned} \quad (32)$$

首先对比分析式(32)和(29)中的 $(\Delta N)^2$ 项、 $(\Delta d)^2$ 项、 $(\Delta f)^2$ 项,有:

$$\begin{cases} \frac{h^2}{d^2 f^2 \tau^2} (\Delta N)^2 > \frac{h^2}{d^2 f^2 \tau^2 \left(1 + \left(\frac{Nh}{df\tau}\right)^2\right)} (\Delta N)^2 \\ \frac{N^2 h^2}{d^4 f^2 \tau^2} (\Delta d)^2 > \frac{N^2 h^2}{d^4 f^2 \tau^2 \left(1 + \left(\frac{Nh}{df\tau}\right)^2\right)} (\Delta d)^2 \\ \frac{N^2 h^2}{d^2 f^4 \tau^2} (\Delta f)^2 > \frac{N^2 h^2}{d^2 f^4 \tau^2 \left(1 + \left(\frac{Nh}{df\tau}\right)^2\right)} (\Delta f)^2 \end{cases} \quad (33)$$

其次对比分析两式的剩余与声速相关的项。由于 $c = (h \cos \theta_1 / \tau + c_e)$, 则有:

$$(\Delta c)^2 = \frac{\cos^2 \theta_1}{\tau^2} (\Delta h)^2 + \frac{h^2 \cos^2 \theta_1}{\tau^4} (\Delta \tau)^2 + (\Delta c_e)^2 \quad (34)$$

$$(\Delta c)^2 > \frac{\cos^2 \theta_1}{\tau^2} (\Delta h)^2 + \frac{h^2 \cos^2 \theta_1}{\tau^4} (\Delta \tau)^2 \quad (35)$$

于是有:

$$\begin{aligned} \frac{N^2}{d^2 f^2 \cos^2 \theta_1} (\Delta c)^2 > & \frac{N^2}{d^2 f^2 \tau^2 \left(1 + \left(\frac{Nh}{df\tau}\right)^2\right)} (\Delta h)^2 + \\ & \frac{N^2 h^2}{d^2 f^2 \tau^4 \left(1 + \left(\frac{Nh}{df\tau}\right)^2\right)} (\Delta \tau)^2 \end{aligned} \quad (36)$$

比较两种模型的误差项,可以发现两种模型的角度误差项均存在周期数误差 $(\Delta N)^2$ 、同一层相邻激光间距误差 $(\Delta d)^2$ 和频率误差 $(\Delta f)^2$ 。而双层激光模型的这3项均小于单层激光模型。此外,单层激光模型中特有的声速误差项 $(\Delta c)^2$ 大于双层激光模型中的两层激光距离的误差 $(\Delta h)^2$ 与两层激光响应的时差误差 $(\Delta \tau)^2$ 之和。至此,可以得出结论,通过布设第2层激光可以利用两层激光之间的距离与对应激光对声信号的响应时间差消除声速对波达角测量的影响,并进一步提高测量的精度。

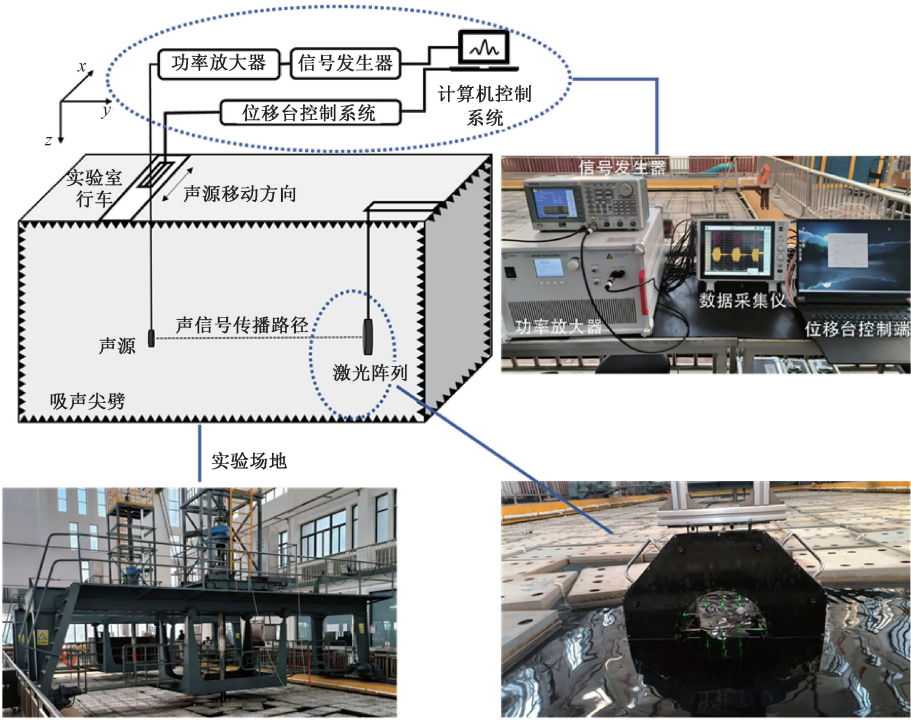
在海洋这类复杂的水域中,声速会随着时间以及空间位置的变化而改变。单层激光水声传感模型并不能规避掉声速对测量结果的影响,这使得其抗干扰能力很差:声速一旦发生较大的变化,其测量结果就会出现很大的偏差。而双层激光水声传感模型引入了一个新的维度,其测量结果不受声速的影响,也就是说双层激光水声传感模型的抗干扰能力更强。

3 实验与分析

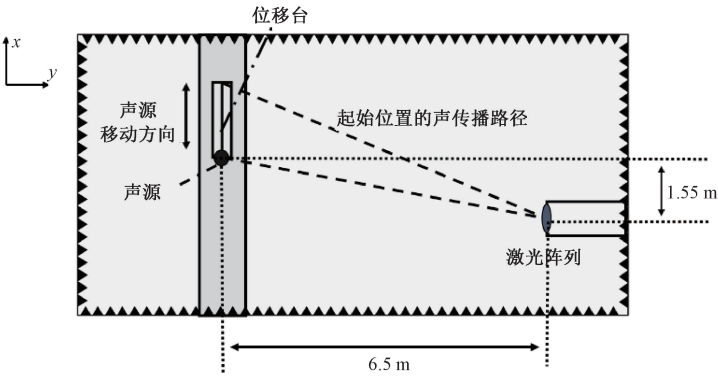
实验时,为了避免反射波的影响,营造开阔水域的自由场水下环境,水声波矢方向角度传感实验选择在消声

水池中进行。该水池长20 m,宽8 m,深7 m,池体各边界表面(侧壁、底面及水面)均铺设设有锥形的橡胶尖劈,对2 kHz以上频段声波的吸声系数>98%,单个锥形橡胶长度达500 mm。实验场地配置有2个大型移动行车系统,并利用建筑横梁在水池一侧架设设有可三维移动的吊车机构用于实验设备的定位和移动。

声源与位移台布设在水池一侧的行车上,激光传感阵列由吊车机构固定在水池另一侧。实验开始时,调整搭载水声发射单元的水面行车与搭载激光传感阵列的吊车,使声源与激光阵列位于同一水深。实验布局的示意图如图8所示。



(a) 实验布局的三维空间示意图
(a) Three-dimensional spatial schematic diagram of experimental layout

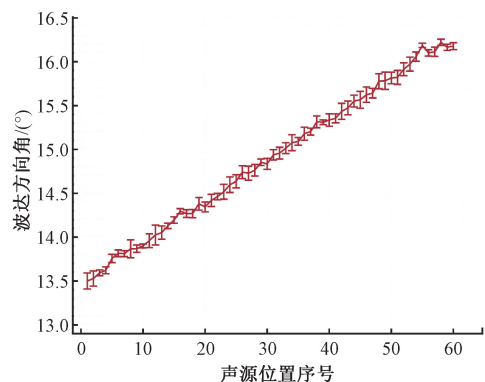


(b) 实验布局俯视示意图
(b) Top view schematic diagram of experimental layout

图8 实验布局示意图
Fig.8 Diagram of experimental layout

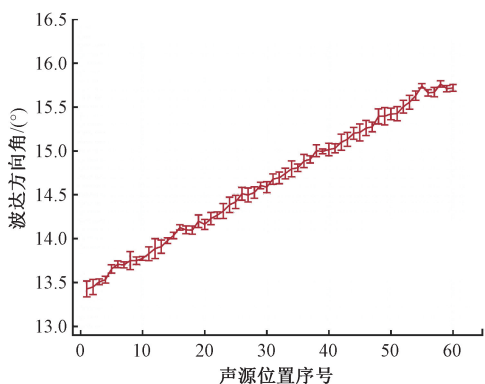
实验时,水声发射端选用中心频率 75 kHz 的水声换能器,激光探测装置中的激光阵列布局为双层激光布局,其中的每一层由一系列相互垂直的横向排布的激光与纵向排布的激光组成。水声发射端与激光探测装置间距 6.5 m。声源为中心频率 75 kHz,带宽 50 kHz 的全指向性换能器。将声源安装至位移台,使其沿 x 轴运动,步进距离 5 mm,共移动 60 次,总位移 300 mm。为保证声源的稳定,每次移动后静止 20 s,最后共测得 60 组数据。使用单层激光水声传感模型与双层激光水声传感模型分别测量并计算此条件下的波达角及其变化。

分别基于一维的单层声光传感模型与多维度的双层声光传感模型进行 5 次独立实验。对各个声源位置点的 5 次测算结果求平均值,并绘制误差棒图如图 9 所示,其中误差棒的长度代表各个声源位置处测算结果的最大偏差。



(a) 单层激光阵列测算数据与其误差棒图

(a) Calculation data and error bar chart of single-layer laser



(b) 双层激光阵列测算数据与误差棒图

(b) Calculation data and error bar chart of double-layer laser

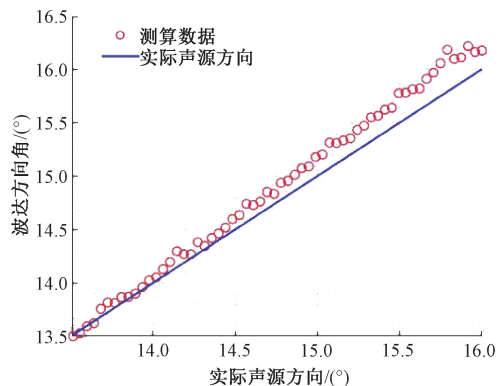
图 9 单层激光阵列与双层激光阵列的测算数据与误差棒图

Fig. 9 Calculation data and error bar charts for single-layer laser array and double-layer laser array

通过分析多次独立实验的结果以及偏差误差棒图,可以发现单层激光、双层激光两种模型得到的波达方向变化趋势几乎一致且数据波动均相对较小。同一位置处(即声波来向相同的条件下)数据的波动最大为 0.13° 与 0.11° ,这表明在此次实验中双层激光模型的精度相较单

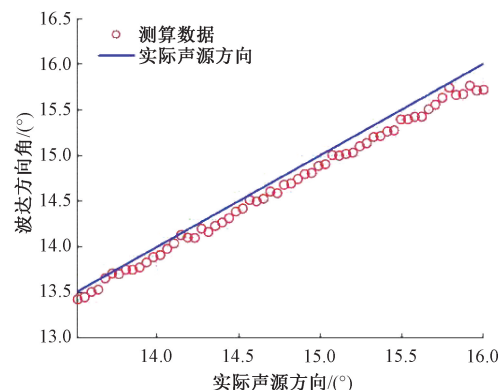
层激光模型略有提高。

分别使用单层激光传感模型和双层激光传感模型对采集所得数据进行理论计算,并将计算结果与实际真值进行对比分析,其中真值数据由实验场地中各实验装置布设的位置计算得出。结果如图 10 所示,其中,图 10(a)为单层激光阵列测算数据与实际声源方向对比结果图,图 10(b)为双层激光阵列测算数据与实际声源方向对比结果图。



(a) 单层激光模型的测算结果

(a) Calculation results of single-layer laser model



(b) 双层激光模型测量结果

(b) Calculation results of double-layer laser model

图 10 两种激光传感模型的波达方向角测算结果与理论值

Fig. 10 Calculation results and theoretical values of direction of arrival angle for two laser sensing models

其中,理论值为通过目标位置的变化计算得到的与激光探测装置的实际对应角度变化。由于实验场地消声水池中的实时声速与单层激光模型中代入的声速接近但不一致,因此图 10(a)中显示的测量结果与理论值有一个较小的差异。而使用双层激光传感模型的计算结果相较单层激光传感模型有了一个明显的提升。部分误差分析结果如表 1 所示。

表 1 中,均方根误差由式(37)计算得出,即:

$$\Delta\theta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2}{n-1}} \quad (37)$$

式中: $\overline{\theta_i}$ 为声源处于不同位置时与激光探测装置的实际角度; θ_i 为通过激光传感模型得到的波达方向角度计算值。

表 1 单层激光模型、双层激光模型误差分析对比表
Table 1 Comparison of error analysis between the single-layer laser model and the double-layer laser model

阵列模型	声信号	绝对误差	均方根
	频率/kHz	最大值/(°)	误差/(°)
单层激光传感模型	75	0.39	0.19
双层激光传感模型	75	0.25	0.13

4 结 论

激光水声传感器使用激光作为传感方式,其测量区域内声场信息不会因为激光的测量而改变,具有非侵入性的特点。结构相对简单的单层激光阵列的结构,测量结构会受到声速的影响,在较为复杂的水域中可能会出现较大误差。为解决这一劣势,在单层激光的基础上再布设一层激光,形成双层激光的多维声光传感模型,可以利用新引入的空间信息与时间信息消除声速对水声波矢方向测量结果的影响。在消声水池中的实验也表明双层激光阵列传感模型在具有更高探测精度,对复杂环境中的波达角的测量有重要意义。

第 2 层激光的布设不仅有效地提高了声波波矢方向的探测精度,还可以提高阵列的等效孔径(其中双层激光——对齐的模型下扩大的等效孔径为 $h/\tan\theta$),为之后多个目标声信号的探测与分辨的研究提供探讨思路。

参考文献

[1] SCHMIDT R. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34(3):276-280.

[2] KUNDU D. Modified MUSIC algorithm for estimating DOA of signals[J]. Signal Processing, 1996, 48(1):85-90.

[3] ZOLTOWSKI M D, KAUTZ G M, SILVERSTEIN S D. Beam-space root-MUSIC[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(1):344-364.

[4] LONG W X, CHEN R, MORETTI M, et al. AoA estimation for OAM communication systems with mode-frequency multi-time ESPRIT method[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(5):5094-5098.

[5] 李智,杨士莪. 水声矢量传感器研究进展与挑战[J]. 仪器仪表学报,2024,45(11):1-19.

LI ZH, YANG SH E. Advances and challenges in underwater acoustic vector sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(11):1-19.

[6] 王文龙,王超,马士全,等. 基于单矢量水听器的水声目标探测系统[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(10):6-11.

WANG W L, WANG CH, MA SH Q, et al. Underwater acoustic target detection system based on single vector hydrophone[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021,40(10):6-11.

[7] 曾雄飞,孙贵青,李宇,等. 单矢量水听器的几种 DOA 估计方法[J]. 仪器仪表学报,2012,33(3):499-507.

ZENG X F, SUN G Q, LI Y, et al. Several DOA estimation methods for single vector hydrophones[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012,33(3):499-507.

[8] DALMONT J P. Acoustic impedance measurement, part I: A review[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 243(3):427-439.

[9] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11):2375-2383.

[10] VAIDYANATHAN P P, PAL P. Sparse sensing with coprime samplers and arrays[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(2):573-586.

[11] BAHR L, LERCH R. Beam profile measurements using light refractive tomography[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2008, 55(2):405-414.

[12] MASWADI S M, IBEY B L, Roth C C, et al. All-optical optoacoustic microscopy based on probe beam deflection technique[J]. Photoacoustics, 2016, 4(3):91-101.

[13] 贾乐成,陈世利,曾周末. 超声声场光学检测的研究进展[J]. 仪器仪表学报,2019,40(9):1-15.

JIA L CH, CHEN SH L, ZENG ZH M. Research progress on ultrasonic acoustic field optical detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(9):1-15.

[14] 甄旖璠,薛彬. 基于激光偏转效应的水下邻域声场重建方法[J]. 激光与光电子学进展,2024,61(5):108-117.

ZHEN Y F, XUE B. Underwater neighborhood sound field reconstruction method based on laser deflection effect[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2024, 61(5):108-117.

[15] RILEY W A, KLEIN W R. Piezo-optic coefficients of

liquids[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1967, 39(6):1258-1261.

[16] WELFORD W T. Contemporary optics[J]. Optica Acta, 1979, 26(9):1133-1134.

[17] YU R ZH, LI X, ZHEN Y F, et al. Estimation of underwater acoustic direction-of-arrival using the probe beam deflection technique [J]. Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision, 2023, 40(5):987-995.

[18] LI B, PENG C Y, BISWAS S. Association of DOA estimation from two ULAs [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(6):1094-1101.

[19] LIU SH, ZHAO J. 2D DOA estimation algorithm with increased degrees of freedom for two parallel linear arrays[J]. China Communications, 2020, 17(6):101-108.

作者简介



于航宁,2021 年于天津大学获得学士学位,现为天津大学硕士研究生在读,主要研究方向为水下声光融合探测技术。
E-mail:yhn@tju.edu.cn

Yu Hangning received his B.Sc. degree from Tianjin University in 2021. He is currently a master student at Tianjin University. His main

research interest is underwater acousto-optic detection technology.



李鑫,2017 年于沈阳理工大学获得学士学位,2021 年于中国民航大学获得硕士学位,现为天津大学博士研究生在读,主要研究方向为声光水声信号传感。
E-mail:xinli003@tju.edu.cn

Li Xin received his B.Sc. degree from Shenyang Ligong University in 2017 and received his M.Sc. degree from Civil Aviation University of China in 2021. He is currently a Ph. D. candidate at Tianjin University. His main research interest includes acousto-optic hydroacoustic signal sensing.



薛彬(通信作者),2009 年于天津大学获得学士学位,2014 年于天津大学获得博士学位,现为同济大学教授,主要研究方向为声光矢量水听技术及应用。
E-mail:binxue@tongji.edu.cn

Xue Bin (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Tianjin University in 2009, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2014. He is currently a professor at Tongji University. His main research interests include acousto-optic vector hydrophone technology and applications.