

基于飞秒激光的水下声速溯源性高精度测量

刘超, 薛彬*, 徐昕阳, 钱治文, 魏亚明

天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072

摘要 传统的海水声速测量方法是基于压电效应发展起来的, 该方法在测量飞行时间和飞行距离时, 因时间起始点不确定而存在误差, 无法实现高精度的声速测量。为了解决此问题, 本文提出了一种基于光频梳和超声脉冲之间声光效应的水下声速测量方法, 同时引入声光效应理论, 在声场和激光之间建立清晰的相互作用标识点。通过搭建双迈克耳孙干涉仪系统, 测量超声脉冲穿过两个测量臂时产生的光脉冲标记, 并分别使用互相关技术测量了超声波传播的时间和距离。该方案溯源清晰, 精度提升空间大。实验结果表明, 该实验系统可以实现水下声速的高精度测量, 测量不确定度为 0.023 m/s, 有望成为一种用于测量水下声速的新型校准设备。

关键词 测量; 声光效应; 光学频率梳; 脉冲互相关; 溯源性

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1112006

Traceable Accuracy Measurement of Underwater Sound Velocity Based on Femtosecond Laser

Liu Chao, Xue Bin*, Xu Xinyang, Qian Zhiwen, Wei Yaming

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

Abstract The traditional method for measuring sound velocity in seawater is developed on the basis of the piezoelectric effect. This traditional method is prone to errors because of its uncertain starting points when measuring the propagation time and distance. To address these problems, this study proposes an approach for measuring underwater sound velocity based on the acousto-optic effect between optical frequency comb and ultrasonic pulse. We introduce the acousto-optic effect with a clear interaction point between sound and laser. A dual Michelson interferometer system is built to measure the optical pulse markers generated when the ultrasonic pulse passes through two measuring arms. We measure the ultrasonic propagation time and distance using the cross-correlation technique. The traceability of the method is clear, however, the accuracy of the method has room for improvement. The experimental results show that the experimental system can achieve high precision measurement of underwater speed, and the measurement uncertainty is 0.023 m/s. It can be used as a new calibration device for measuring underwater sound velocity.

Key words measurement; acousto-optic effect; optical frequency comb; pulse cross-correlation; traceability

OCIS codes 120.3940; 230.1040; 010.7340

收稿日期: 2020-10-19; 修回日期: 2020-12-01; 录用日期: 2020-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(62075162, 62001329)、天津市自然科学基金(18JCYBJC17100)、天津市自然科学基金(19JCQNJC01700)

*E-mail: xuebin@tju.edu.cn

1 引言

当今,声学测量方法已被广泛应用于海洋定位、测距和导航等方面,成为海洋探测的主流手段。声速是声学测量方法中描述海水属性的主要参数,高精度声速测量是其他声学技术在海洋环境中应用的基础,它对声学探测系统的测量精度、数据质量和成像效果都有着重要影响。对于常用的多波束测深系统^[1-2],由于声线弯曲现象的存在,声速测量值直接影响着多波束系统各个波束在海底的触底位置及水深值。因此,针对海水声速高精度测量的研究是长期需求。

水下声速测量方法^[3]主要有间接法^[4]和直接法^[5]。间接法是对温度、盐度和压力三个参数进行实时监测,并通过建立流体状态方程来实现对水下声速测量的方法。此前,已有学者为建立水下声速的经验公式进行了大量工作,并提出了包括 Wilson 算法^[6]、del Grosso 算法^[7]和 Chen-Millero 算法^[8]在内的多种算法。人们对海水声速经验公式的研究一直在不断地完善和深入,但由于适应范围及准确性不同,间接测量法难以做到国际统一。直接法直接获取与声速有关的物理量,根据路程和时间或者频率和波长对水下声速进行测量。目前市场上所推广的声速仪^[9]便是以此为原理而研发的。为了突破传统方法对水下声速测量的局限性,有学者将光学测量系统^[10-11]引入到声速测量中,尝试利用光学手段高精度、高灵敏度的特性,获取较为准确的测量结果。

综上,在水下声速的各种测量方法中,直接方法具有更强的溯源性。然而,该方法的局限性(即压电效应)带来了难以消除的误差源^[12]。鉴于此,本文提出了一种新型的水下声速直接测量方法,该方法基于飞秒光频梳^[13-15]与超声脉冲之间的声光效应^[16-17]建立声速标定基准。声波在水中传播时,水因发生了弹性应变而使其折射率也随时间发生周期性改变,可以将这种周期性变化的折射率看作一个移动的平面光栅^[18]。薛彬等^[19]利用声光效应理论进行了水下声速测量的首次尝试,他们仅通过计算两个负脉冲的跨度来获得飞行时间。与其方法相比,本文将光梳的重复频率锁定在外部频率基准上,从而使光梳和时间基准共享相同级别的频率稳定性。此外,本文方法通过光学频率梳干涉法读取两束光的相位信息,进而利用脉冲互相关法^[20]获取声波的准确飞行时间;同时,利用连续光干涉法获

取声波的飞行距离。通过长期实验得出,本方法在不同环境水中的声速测量结果与声速传感器的最大差值为 0.016 m/s。

2 实验原理

本文实验原理图如图 1 所示,光学频率梳发出的光脉冲进入双迈克耳孙干涉仪。把水槽放置在干涉仪两测量臂的路径上,两测量臂分别与声波发生作用。 s 是两测量臂之间的几何距离,即声波的飞行距离。光电探测器接收携带距离和时间信息的合束光束。假设声波的飞行时间为 t ,则声速的计算公式为

$$v = \frac{s}{t} \quad (1)$$

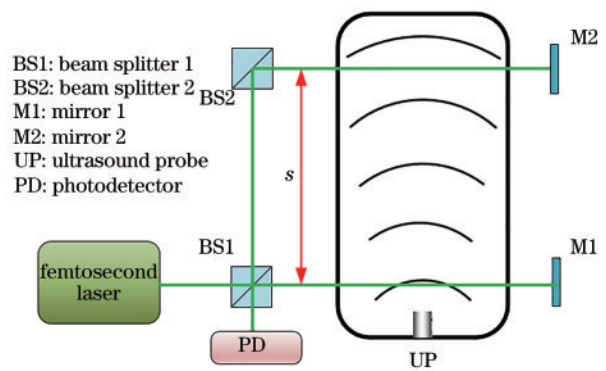


图 1 实验原理图

Fig. 1 Experimental schematic

2.1 距离测量原理

根据激光干涉仪的基本原理,利用光电探测器监测两光束之间的干涉情况。随着光程的改变,光电探测器能在测量臂每一次光程改变时找到相长性和相消性的变化信号。声波的飞行距离可以表示为

$$s = \frac{(M + \Delta m)\lambda_a}{2n} \quad (2)$$

式中: M 是一个正整数; Δm 是小数部分; λ_a 是连续波激光器的波长; n 是空气折射率。将(2)式代入(1)式,则(1)式可以表示为

$$v = \frac{(M + \Delta m)\lambda_a}{2nt} \quad (3)$$

2.2 时间测量原理

在实验过程中,超声换能器会发出一定周期的机械波,从而对局部介质的密度产生周期性调制。在声波传播期间,当声波通过光梳时,光梳的相位将被周期性地调制,并且相位的调制会反映在光程上。对于在测量臂上发生的周期性波动,对其进行外差干涉就可以获得与声脉冲波动参数一致的干涉信

号,从而完成对声波传播时间的测量。这样,声脉冲的传播时间在原理上可以追溯到光频梳。

在时域上,光学频率梳的电场强度 $E_{\text{train}}(t)$ 可以表示为

$$E_{\text{train}}(t) = E(t) \exp[i\omega_c t + i(\varphi_0 + \Delta\varphi_{\text{ce}} t)] \cdot \sum_{-\infty}^{+\infty} \delta(t - mT_R), \quad (4)$$

式中: $E(t)$ 是光学频率梳发出的脉冲的电场强度; ω_c 是光脉冲的中心角频率; φ_0 是光脉冲的任意初始相位; $\Delta\varphi_{\text{ce}}$ 是由光脉冲群速度和相速度差异引起的相位差异; δ 是狄拉克函数; m 是梳齿的个数; T_R 是光脉冲周期。由(4)式可得参考臂上脉冲的电场强度为

$$E_{\text{ref}}(t) = E(t) \exp[-i\omega_c t + i\varphi_0 + iN\Delta\varphi_{\text{ce}}], \quad (5)$$

式中: $N = \text{floor}(2L/l_{\text{pp}})$, floor 表示距离 $2L/l_{\text{pp}}$ 最近的

整数, l_{pp} 是脉冲间距, L 是水下距离。相应的测量臂上脉冲的电场强度表达式为

$$E_{\text{meas}}(t) = E(t) \left(t - \frac{2nL}{c} \right) \sqrt{\exp(-2CL)} \cdot \exp \left[-i\omega_c \left(t - \frac{2nL}{c} \right) + i\varphi_0 \right], \quad (6)$$

式中: n 是水的折射率; L 是水下距离; C 是相应的衰减系数; c 为光速。当参考光和测量光在空间中叠加后,电场强度为

$$E_{\text{total}} = E_{\text{ref}}(t) + E_{\text{meas}}(t). \quad (7)$$

假设光电探测器的积分时间是 T_d , 叠加后的光被光电探测器接收,探测器测到的光强为

$$I = \sum_j \langle |E_{\text{total}}|^2 \rangle = \sum_j \langle E_{\text{total}} E_{\text{total}}^* \rangle. \quad (8)$$

(8)式展开后为

$$I = \frac{1}{T_d} \sum |E_{\text{total}}|^2 dt = \frac{1}{T_d} \sum [E_{\text{ref}}(t) + E_{\text{meas}}(t)]^2 dt = \frac{1}{T_d} \int [E_{\text{ref}}^2(t) + E_{\text{meas}}^2(t)] dt + \frac{2}{T_d} \int \text{Re}[E_{\text{ref}}(t) \cdot E_{\text{meas}}^*(t)] dt. \quad (9)$$

使用时间相关函数 $R(\tau)$, 将与 M1 对应的测量臂采样波的信号 f_1 与 M2 对应的测量臂采样波的信号 f_2 进行相关计算, 即

$$R_{f_1-f_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(t) \cdot f_2(t + \tau) dt, \quad (10)$$

式中: $R_{f_1-f_2}(\tau)$ 被定义为 f_1 和 f_2 的互相关函数; τ 属于 $[-\infty, +\infty]$ 延迟时域中的一个点。基于傅里叶变换的算法与性质, 在(11)式两端应用傅里叶算子

$$\mathcal{F}[R_{f_1-f_2}] = \mathcal{F}[f_1]^* \mathcal{F}[f_2], \quad (11)$$

通过两个傅里叶变换和最终傅里叶逆变换可以得到互相关函数。图 2 所示信号 CH1 代表 f_1 , CH2 代表 f_2 。图 3 所示两光信号波形间的时间延迟是函数

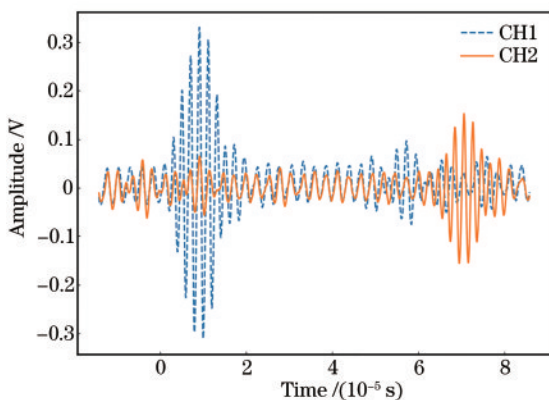


图 2 对应 M1 和 M2 的干涉信号

Fig. 2 Corresponding to the interference signals of M1 and M2 measuring arms

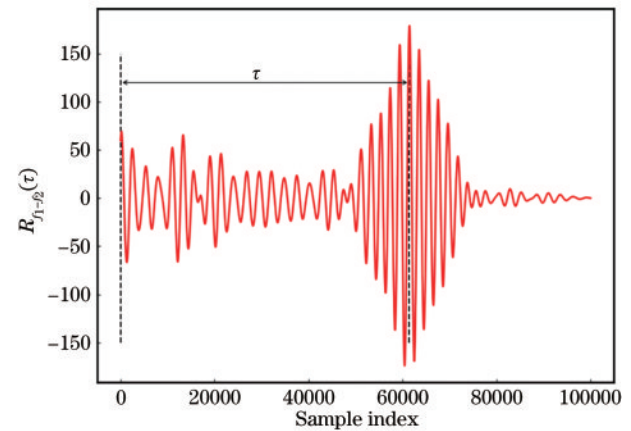


图 3 互相关信号

Fig. 3 Cross-correlation signal

$R_{f_1-f_2}(\tau)$ 自变量 τ 的最大值 τ_{max} 。利用该函数实现两光信号波形间的最大程度互相关后, 就可以获取声波的飞行时间。

3 实验

3.1 实验装置

图 4 为实验装置图。飞秒光频梳的输出功率在 0~500 mW 内可调, 中心波长为 518 nm, 谱宽为 5 nm, 重复频率为 100 MHz。光频梳发出的一串连续的脉冲光进入双迈克耳孙干涉仪, 两个测量光路被声波连续调制。同时, 调整反射镜 6(M6) 在位移台 1(PDP1) 上的位置, 使参考光路和测量光路具有

相同的光程差。同理,调整反射镜7(M7)在位移台2(PDP2)上的位置,由光电探测器接收干涉信号,即间接获取了声波的飞行时间。调整位移台3(PDP3)上反射镜3(M3)的位置,使参考光路和测量光路具有相同的光程差,同时,反射镜4(M4)随位移台3一起移动,使连续光一直发生干涉。对连续光进行干涉条纹计数,便能获取声波的飞行距离。

本实验在水箱中放置了温度传感器、盐度传感

器和声速传感器,以实时监测温度和盐度。实验中使用的声信号频率为 500 kHz。本实验在水箱的内外壁上均安装了吸音棉(吸收声波),并在水箱两侧的吸音棉上挖了能够使光波正常通过的小孔,这种消声处理能够有效地避免回波对信号的影响。本实验所用的恒温系统在较短时间内的恒温精度为 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在测量周期内,温度在 $22.01\sim 22.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内波动。

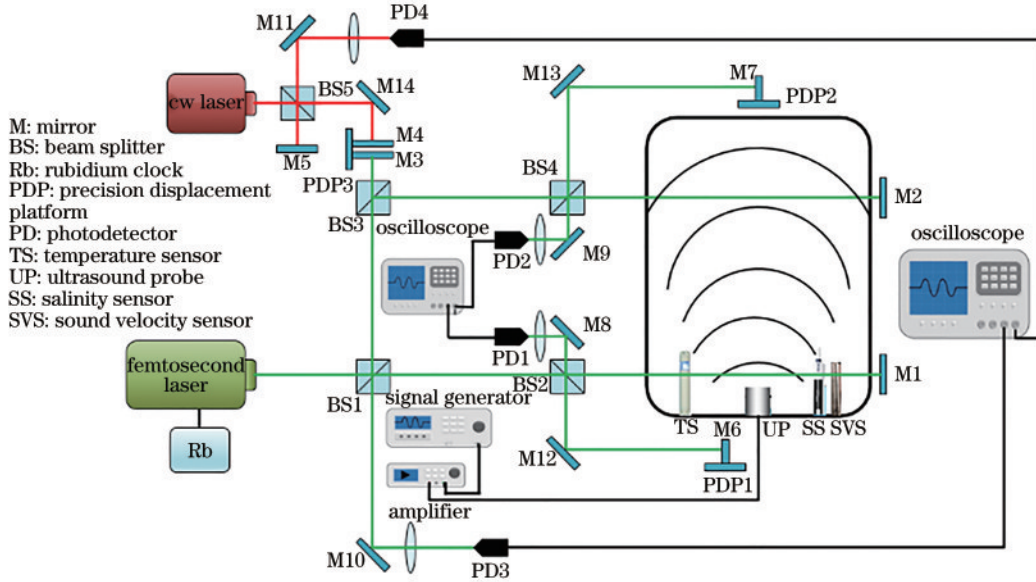


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Experimental setup diagram

3.2 距离测量结果

如图 5 所示,当 M4 持续移动时,连续光干涉仪中的测量臂与参考臂持续发生干涉,产生了呈正弦波形的干涉信号。同时, M3 持续移动使双迈克尔孙干涉仪的参考臂与对应 M1、M2 的两测量臂发生

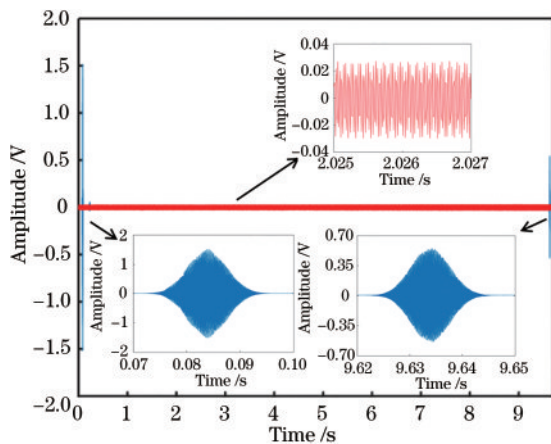


图 5 脉冲光干涉包络和连续光干涉条纹

Fig. 5 Pulsed light interference envelope and continuous light interference fringes

干涉,产生了呈正弦规律变化的纺锤体状包络。通过计算两脉冲光间的连续光干涉条纹数量,就可以获得飞行距离。测量结果如图 6 所示。

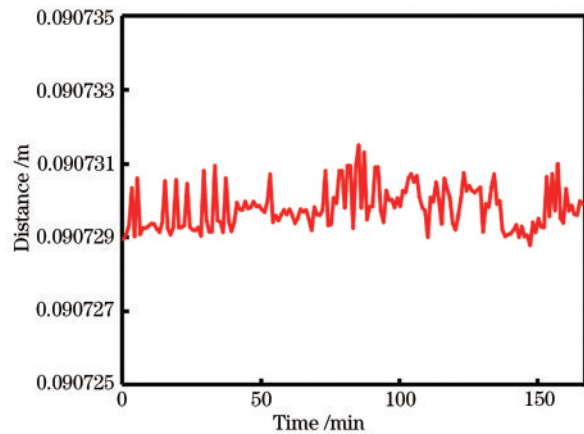


图 6 飞行距离的测量结果

Fig. 6 Measured propagation distance

3.3 声速测量结果

图 7 表示在环境压力和预选温度下的声速测量

结果(在测量之前,系统应稳定至少 1 h)。将通过该方法获得的测量结果与声速传感器(SVS)的测量结果进行比较,结果显示,两者之间的最大偏差为 0.0052 m/s。从整个测量时间范围来看,所得测量结果与声速传感器测量结果的趋势是一致的。

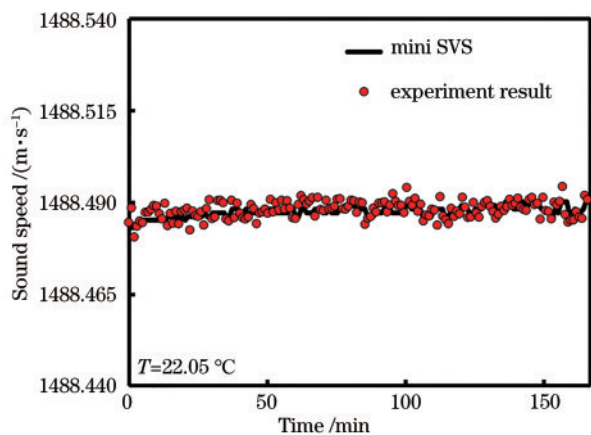


图 7 22.05 °C 下的声速测量结果

Fig. 7 Measured sound velocity at 22.05 °C

本团队在 20.05~31.29 °C 温度下测量了声速。注意,当每次恒温温度发生变化时,系统应在测量前稳定 2~3 h。测量结果的标准偏差如图 8 所示。在每个温度下快速测量声速 20 次,测量结果显示,标准偏差在 0.01 m/s 之内。

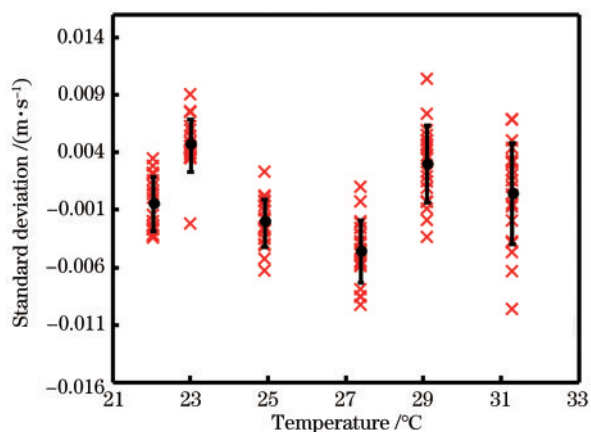


图 8 不同温度下声速测量结果与声速传感器结果算数平均值间的标准偏差

Fig. 8 Standard deviation of arithmetic mean of sound speed between measurement values and sound velocity sensor' data at different temperatures

除了在纯水中进行测量外,本团队还对不同盐度的类海水溶液中的声速进行了测量,以进一步评估该方法的性能。盐度 S 为 27.25‰ 时的声速测量结果如图 9 所示,与 22.05 °C 纯水中的测量结果相

比,图 9 中的数据更稳定。

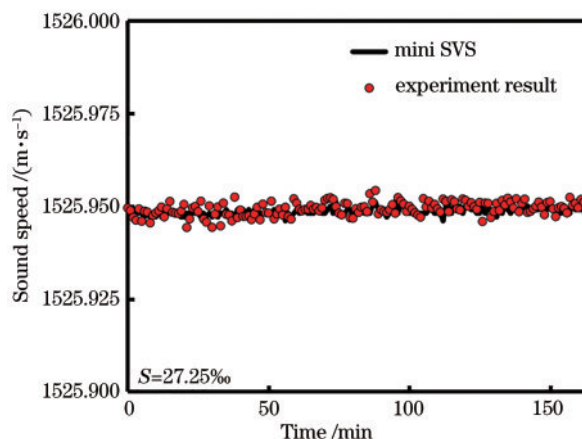


图 9 盐度为 27.25‰ 下的声速测量结果

Fig. 9 Measured sound velocity at the salinity value of 27.25‰

本团队在温度为 25.5 °C、盐度为 0~38‰ 范围的类海水溶液中进行了声速的测量,测量结果如图 10 所示。每当水的盐度变化时,系统在测量前均稳定约 1 h。可以发现,与图 8 中的数据相比,测量结果平均值与声速传感器测量结果平均值之间的差值,没有发生较大改变。

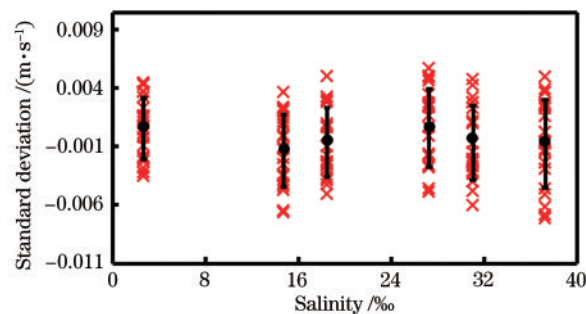


图 10 不同盐度下声速测量结果与声速传感器结果算数平均值间的标准偏差

Fig. 10 Standard deviation of arithmetic mean of sound speed between measurement values and sound velocity sensor' data at different salinity values

4 不确定度分析

从计量学的角度来看,用于声速测量的脉冲互相关技术是一种具有溯源性的直接测量方法;因此,声速测量的不确定性方程可从(3)式中推导出,即

$$u_v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial \lambda_n} \cdot u_{\lambda_n}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial f} \cdot u_f\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial t} \cdot u_t\right)^2}, \quad (12)$$

式中: t 和 λ_n 是独立的机械测定值; f 是受温度、湿度、

压强等物理量影响的状态变量。

声波飞行距离的不确定度受固体激光器波长与空气折射率的影响。由于水下距离的测量被空气中距离的测量代替,因此不必考虑水中压力与热膨胀系数对飞行距离的影响。飞秒激光器的重复频率锁定在铷原子钟上,具有相当的稳定度。固体激光器的波长已由厂商校准到标准状态。示波器两通道的时间延迟残差不确定度小于 2 ps,可以忽略它对测量结果的影响。表 1 是测量声速的相关不确定度。

表 1 声速测量的不确定度

Table 1 Uncertainty for measurements of sound velocity

Error source	Uncertainty
Wavelength of continuous wave laser	1.8×10^{-8}
Refractive index of air	5.1×10^{-8}
Ciddor formula	3×10^{-8}
Propagation time	6.6×10^{-10}
Propagation distance	9.8×10^{-7}
Rubidium atomic clock	1×10^{-12}

空气折射率可利用 Ciddor 公式计算得到,考虑到折射率对测距系统本身的影响,本团队认为它是一个不可忽略的参数。由于实验在环境压力下进行,因此环境不确定度仅由大气压和环境传感器贡献。其中,本实验所用的环境传感器已在实验环境中校准,其单次测量时间为 40 s。本实验在测量周期内的温控精度为 ± 0.01 °C,结合 del Grosso 经验公式可知测量结果的最大偏差为 ± 0.005 m/s。由温度引入的对测量不确定度具有影响的因素分为恒温系统和外部环境。由恒温系统和外部环境引入的测量不确定度分别为 1×10^{-8} 和 0.3×10^{-8} 。在环境温度、压力、盐度和湿度等因素的影响下,由所制备的盐溶液在实验过程中的浓度误差引入的不确定度必须单独考虑。表 2 是环境影响的声速测量不确定度。最终的合成不确定度为 0.023 m/s。

表 2 环境影响的声速测量不确定度

Table 2 Uncertainty for measurements of sound velocity due to experimental variability of the environment

Error source	Uncertainty
Temperature	1.3×10^{-8}
Pressure	3.5×10^{-8}
Humidity	1.6×10^{-8}
Salinity	1×10^{-12}

5 结 论

本团队使用飞秒光频梳状激光器对水下声速进行了测量,并将不同环境下的测量结果与 SVS 的测量结果进行了比较,证明了本文方法实现声速测量的可行性。本文根据声速的定义进行了扁平化测量,这种测量方法压缩了中间传递和溯源环节,从而大幅减少了误差的引入,使基准直接与被测量建立关联,并真正实现了测量溯源性。

从结果来看,实验系统的稳定性一般,但本方法有很大的提升空间。本文方法的测量结果与声速传感器的测量结果相比,最大差值为 0.016 m/s。在不同的温度和盐度条件下,标准偏差均在 0.01 m/s 以内,最终的合成不确定度为 0.023 m/s。

由于干涉信号会受实验仪器和环境噪声的影响而产生波动,因此,以后将在实现测量溯源的基础上,控制实验环境的稳定性,以进一步提高本文方法的准确性。目前本实验方案仅限于实验室条件,未来拟将其应用于室外环境,并利用卫星将激光器锁定在外部频率标准参考上,以实现可追溯性测量。此外,为了实现高精度声速测量,绝对稳定的实验系统是本文方法所需的环境条件,因此要将介质的温度稳定控制在 ± 0.001 °C 以内,以减小外部环境对本系统测量精度的干扰。

从理论上讲,本实验系统能成为一种新的测量水下声速的检定基准装置,并且有望脱离声速仪的限制,成为一种更好的声速测量基准装置。由于实验室设备的限制,在有限条件下进行的实验尚有较大的提升空间,有望使不确定度达到毫米级,这将为水下声速计量工作提供新的测量方案。

参 考 文 献

- [1] Dong J, Xu Z Q, Sun Y X, et al. Fast measurement of primary reflector dynamic deformation of radio telescope based on multibeam and phase retrieval[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0612005.
董健, 许志强, 孙云霞, 等. 基于多波束相位恢复的射电望远镜主反射面动态形变的快速测量[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0612005.
- [2] Wang W J, Thomas P J, Wang T Q, et al. A frequency-response-based method of sound velocity measurement in an impedance tube[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(4): 045007.
- [3] Sahu O P, Gupta A K. Measurement of distance and medium velocity using frequency-modulated sound/

- ultrasound[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(4): 838-842.
- [4] Li Z, Zhu J, Li T, et al. An absolute instrument for determination of the speed of sound in water[J]. The Review of Scientific Instruments, 2016, 87(5): 055107.
- [5] Loomis A L, Hubbard J C. A sonic interferometer for measuring compressional velocities in liquids: a precision method[J]. JOSA, 1928, 17(4): 295-307.
- [6] Wilson W D. Speed of sound in distilled water as a function of temperature and pressure[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1959, 31(8): 1067-1072.
- [7] del Grosso V A, Mader C W. Speed of sound in seawater samples[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1972, 52(3B): 961-974.
- [8] Millero F J, Kubinski T. Speed of sound in seawater as a function of temperature and salinity at one atmosphere[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1975, 57(2): 312-319.
- [9] Holbrook G W, Srinivasan N. High-sensitivity underwater acoustic velocimeter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1972, 21(2): 124-127.
- [10] Bogdanov S V, Sapozhnikov V K. An acoustooptic method for sound velocity measurements in strongly sound-absorbing materials[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2008, 51(4): 625-629.
- [11] Arenas J P, Darmendrail L. Measuring sound absorption properties of porous materials using a calibrated volume velocity source[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(10): 105005.
- [12] von Rohden C, Fehres F, Rudtsch S, et al. Capability of pure water calibrated time-of-flight sensors for the determination of speed of sound in seawater[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 138(2): 651-662.
- [13] Hall J L. Nobel lecture: defining and measuring optical frequencies[J]. Reviews of Modern Physics, 2006, 78(4): 1279-1295.
- [14] Hänsch T W. Nobel lecture: passion for precision[J]. Reviews of Modern Physics, 2006, 78(4): 1297-1309.
- [15] Yang M Z, Meng F, Lin Y Y, et al. Research on transfer oscillator technology based on fiber optical frequency comb[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 070602.
杨明哲, 孟飞, 林弋戈, 等. 基于光纤光梳的传递振荡器技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 070602.
- [16] Humphrey V F, Cooling M P, Theobald P D, et al. The influence of the acousto-optic effect on LDV measurements of underwater transducer vibration and resultant field predictions[EB/OL]. [2020-10-15]. <https://core.ac.uk/display/1495228>.
- [17] Kang S. Review on the principle and applications of acousto-optic effect[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 602/603/604/605: 2905-2908.
- [18] Tadesse S A, Li M. Sub-optical wavelength acoustic wave modulation of integrated photonic resonators at microwave frequencies[J]. Nature Communications, 2014, 5: 5402.
- [19] Xue B, Wang Z Y, Zhang K, et al. Seawater sound velocity measurement based on acousto-optic effect[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0404008.
薛彬, 王志洋, 张凯, 等. 基于声光效应的海水声速测量[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0404008.
- [20] Tang Z T, Ding Z, Zeng R M, et al. Quantum image stitching algorithm based on improved Harris and quadratic normalized cross correlation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(10): 101005.
唐泽恬, 丁召, 曾瑞敏, 等. 基于改进的Harris和二次归一化互相关的量子图像拼接算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(10): 101005.