

水下相位式激光测距定标方法

宋 宏¹, 张云菲¹, 吴超鹏¹, 申屠溢醇¹, 吴超钜¹,
郭乙陆¹, 黄 慧¹, 司玉林^{1*}, 杨 萍², 全向前³

(1. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 杭州电子科技大学 数字媒体与艺术设计学院,
浙江 杭州 310018; 3. 中国科学院深海科学与工程研究所, 海南 三亚 572000)

摘要: 基于相位式激光测距的工作原理, 提出了将相位式激光测距仪用于水下测距的思路, 从原理上分析了水下相位式激光测距的可行性。通过水下距离测量实验, 对水下相位式激光测距可行性进行了验证, 完成了水下相位式激光测距仪的测距定标算法, 并探究了水体浊度对相位式激光测距动态范围和测距精度的影响。实验结果表明, 经过定标校正后的水下相位式激光测距仪在水下 3.5 m 范围内测距误差平均值不超过 3 mm, 测距范围与水体浊度间存在指数衰减关系。该水下相位式激光测距仪为水下距离的探测提供了一种新方法, 可实现水下目标近距离的精确测距。

关键词: 激光相位测距; 测距校正; 水体浊度; 测距动态范围

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0406008

Calibration method of underwater phase laser ranging

Song Hong¹, Zhang Yunfei¹, Wu Chaopeng¹, Shentu Yichun¹, Wu Chaofan¹,
Guo Yilu¹, Huang Hui¹, Si Yulin^{1*}, Yang Ping², Quan Xiangqian³

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China;
2. School of Media & Design, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;
3. Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China)

Abstract: Based on the principle of phase laser ranging, the idea of using phase laser range finder for underwater ranging was proposed, and the feasibility of underwater phase laser ranging was analyzed in principle. Through the underwater distance measurement experiments, the feasibility of underwater phase laser ranging was verified, the range calibration algorithm for underwater phase laser range finder was completed, and the effects of water turbidity on the dynamic range and distance measurement accuracy of laser ranging were explored. The experimental results show that the average ranging error of underwater laser range finder after calibration is not more than 3 mm in the range of 3.5 m, and there is an exponential decay relationship between range and water turbidity. The underwater phase laser range finder provides a new method for the detection of underwater distance, which can achieve accurate ranging at short range of underwater target.

Key words: phase laser ranging; ranging calibration; water turbidity; dynamic range of measurement

收稿日期: 2018-12-11; 修订日期: 2018-12-30

基金项目: 中国大洋矿产资源研究开发协会资源环境类课题(DY135-C1-1-08); 国家自然科学基金(61605038, 51705453);
中央高校基本科研业务费专项资金(2017FZA4028); 杭州海关重点科研项目(2017ZKZ04)

作者简介: 宋宏(1981-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事水下光学成像方面的研究。Email: hongsong@zju.edu.cn

0 引言

随着陆地资源的逐渐消耗和科技的飞速发展,测量学科已成为海洋资源探索的有力手段,匹配相应的水下测距工具^[1],建设更加安全、可靠、经济、精确的测距系统已成为海洋探测行业的首要目标。

目前水下距离测量的方法主要有声学探测、重力探测、光学探测、磁力探测等。声呐是目前水下声学探测的主流技术手段之一,可以实现中远程距离的测量,精度较低,一般为测距范围的0.5%~1%^[2-3]。重力探测^[4]多用于海底地形测绘,但布放组网复杂,成本高。光学探测^[5]主要有水下多目视觉测深^[1]、水下激光三维扫描^[6]、水下激光测距仪^[7]等技术方法。其中水下激光测距范围较短,但具有测距速度快、测距精度高、系统结构简单、体积小、功率低、使用方便等优点^[8],这也使得水下激光测距系统成为目前水下高精度近距离测距的理想仪器之一。

激光具有良好的准直性、单色性、相干性和高亮度,在陆地近距离测距中广泛使用。水下使用时,由于水体(包括水、水中溶解和悬浮物质等)对激光的吸收和散射作用,激光在传输过程中能量会受到极大的衰减^[9-10],因此激光测距的准确性及其动态测量范围也会受到影响。同时在较浑浊水体中,水体的散射作用也会对目标的精确探测产生极大的影响^[11]。目前,尚未发现有关水下相位式激光测距定标和水体浊度对其测距动态范围和测距精度的影响研究。

文中主要基于相位式激光测距的工作原理,研究了相位式激光测距的水下测距定标算法,同时探究了水体浊度对相位式激光测距范围和测距精度的影响。相较于通过研究设计激光测距系统硬件电路、高精度的测相算法等用来提高测距精度的方案,探究水体浊度对测距精度的影响可以用于水下测距定标算法的校准,从而进一步提高测量精度。

文中的创新点在于将陆地上的相位式激光测距仪应用于水下激光测距中,提出水下相位式激光测距仪的测距定标算法,为水下相位式激光测距的应用提供了支撑。

1 水体对激光传输的影响

激光在水中的传播主要受水体吸收、散射和折

射的影响。

激光在传输距离为 L m 后的总能量衰减主要来自水体的吸收和散射作用,经衰减后的激光能量如公式(1)表示:

$$I = I_0 \exp(-L(\theta(\lambda) + \varphi(\lambda))) \quad (1)$$

式中: I 为经水体衰减后的激光能量; I_0 为激光的初始能量; L 为激光传输距离; $\theta(\lambda)$ 和 $\varphi(\lambda)$ 分别为与激光波长有关的吸收和散射衰减系数。

由公式(1)可知,随着激光水下传输距离的增加,激光能量呈指数衰减。因此水的吸收作用直接导致激光束能量降低,进而缩短激光的传输距离。

水的散射作用降低激光束的方向性^[12],进而使激光测距系统的测距精度大大降低。同时激光在水中和真空中的波长满足:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (2)$$

式中: λ 和 λ_0 分别为激光在水中和真空中的波长; n 为水的折射率。

由公式(2)可知,激光在水中的波长与水的折射率有关。首先,水的折射率高于空气的折射率,所以激光在水中传播时的波长比空气中的短。其次,水中的激光波长会随着折射率的变化而变化,水的折射率与水的密度、温度和压强有关,水的盐度、温度、压力和速度分布也会引起水体折射率分布不均匀,文中暂不考虑折射率分布不均匀的影响。这些水体因素对激光测距系统的测距精度和测距范围均有一定的影响。

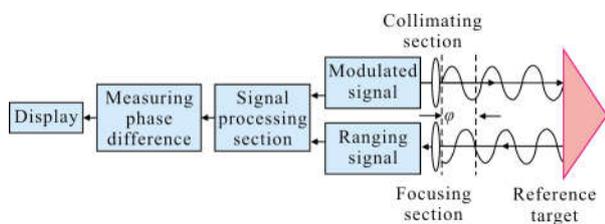
由此可见,探究水下相位式激光测距定标算法和水体浊度对激光测距精度和范围的影响还是十分有必要的,可以进一步提高水下相位式激光测距的测距精度。

2 相位式激光测距仪原理

根据测量精度和测量距离的不同,目前采用的激光测距方法主要分为三角测距法、相位测距法和脉冲测距法^[13-14]。文中水下测距范围为米级,所以选用主要用于中远距离测量的相位式激光测距仪。

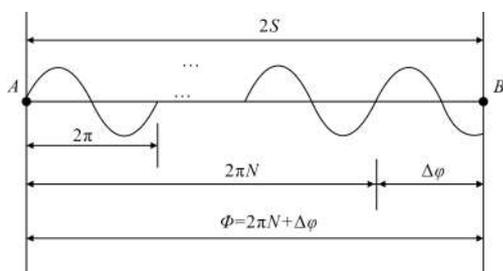
相位式激光测距仪,其基本原理^[13]为先利用高频频率的正弦信号连续调制激光源的发光强度,再通过测量调制激光信号在往返目标物测量距离一次

所产生的相位延迟,最后再根据调制激光信号的波长计算出该相位延迟所代表的距离,也就是用测量相位变化的间接方法代替直接测量激光的飞行时间,从而获得被测距离信息,如图 1(a)所示。



(a) 相位式激光测距系统图

(a) Schematic of phase-based laser ranging



(b) 相位式激光测距原理图

(b) Principle of phase-based laser ranging

图 1 相位式激光测距系统及原理图

Fig.1 Schematic and principle of phase-based laser ranging

假设激光的调制频率为 f , 波长为 λ , 调制波形为正弦波, 发射激光的位置在 A 点, 测距仪激光发射点与待测目标间的距离为 S , 接收激光的位置在 B 点, 实际上 A 与 B 为同一点, 此时 $AB=2S$, 调制信号经过 AB 后的相位差为 φ , 激光传输时间为 t , 如图 1(b) 所示。测距激光往返目标物的时间 t 与光波相位变化的关系^[13]为:

$$t = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{\varphi}{2\pi f} = \frac{2\pi f + \Delta\varphi}{2\pi f} \quad (3)$$

式中: f 为调制光波的频率; N 为激光传输整波长的个数; $\Delta\varphi$ 为不足一个波长的相位位数。

当激光往返时间为 t , 光速为 c 时, 测量距离 S 为:

$$S = \frac{1}{2} ct = \frac{1}{2} \frac{c}{f} \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \quad (4)$$

3 水下相位式激光测距仪实验系统结构

水下相位式激光测距系统的结构示意图如图 2

所示, 系统由激光调制发射系统、石英光学窗口玻璃、目标物体、光电探测接收系统、信号处理(本振信号产生、混频、滤波及整形放大等)、相差检测以及 PC 控制、显示部分组成^[15]。

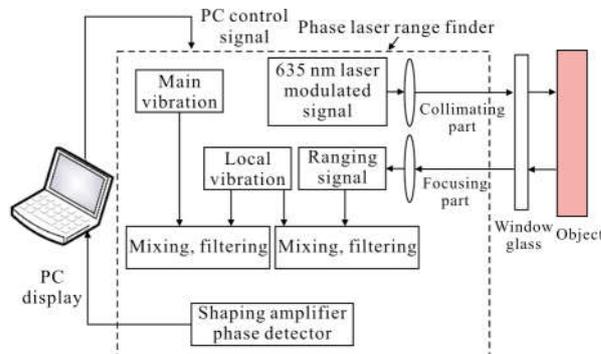


图 2 激光测距系统结构图

Fig.2 Structure diagram of laser range finder system

上位机发送测距指令信号, 主控振荡器产生测距信号对激光进行光强调制。调制信号经准直透镜后先透过光学窗口玻璃再发射到水中目标物上, 经目标物反射的测距光波也先透过光学窗口玻璃再经汇聚透镜聚焦到光电探测器上, 将光信号转变为电信号。接收到的测距信号经过与参考信号比较, 进行信号处理(混频、滤波、整形放大、鉴相等)得到相应的相位差信息, 再根据相位激光测距的原理将相位信息转换为激光测距仪到被测目标物的距离信息, 最后再将距离值传输到 PC 上显示。

如图 2 所示, 相位式激光测距过程中激光会在系统与目标物间的水体中进行双向传输, 水的折射率与空气的折射率不同, 同时激光传输过程中水体的光学性质(如水体浊度)也会对测距结果造成影响。

4 实验与结果分析

4.1 实验装置

水下相位式激光测距系统实验装置如图 3 所示, 系统主要由水下相位式激光测距仪、目标反射板、水槽、浊度计、带刻度线的标尺等组成。

水下相位式激光测距仪采用激光波长为 638 nm、激光功率约为 1 mW 的相位式激光测距仪, 通过一个水密接插件(MCBH6F / M, SEACON, 美国)与电脑相连进行供电和数据通信, 其光学窗口使用 8 mm 厚的石英玻璃进行防水密封。目标反射板采用方形

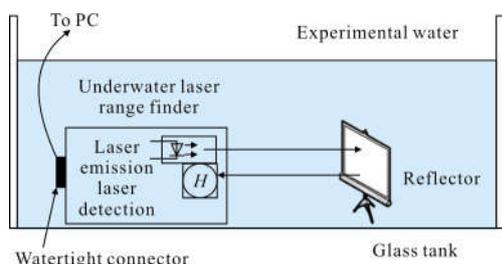


图 3 激光测距实验装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of laser ranging experimental device

的塑料观察屏幕(EDU-VS1, Thorlabs, 美国), 放置在玻璃水槽中作为待测目标物。水槽(长 300 mm×宽 250 mm×高 250 mm) 使用 10 mm 厚的石英玻璃制成。浊度计(SGZ-200BS, 上海粤丰, 中国)的测量范

围为 0–200 NTU, 测量精度为 0.1 NTU。

水下相位式激光测距仪放置在水槽内, 位置固定, 带刻度线的标尺贴在玻璃水槽底部。实验中, 沿着标尺以 100 mm 的间隔依次移动反射板, 分别记录标尺对应的实际距离值和水下激光测距仪的测距示数值。

探究水体浊度对水下相位式激光测距仪测距精度和测距极限的影响, 依次在清水中加入定量(2.5 ml)牛奶, 各水体的实际浑浊程度和浊度值(浊度计多次测量的平均值) 如图 4 所示。在上述 9 种不同浊度的水体中分别进行测距实验, 每组实验中分别记录水下相位式激光测距仪的测量示数与米尺对应的实际距离值。

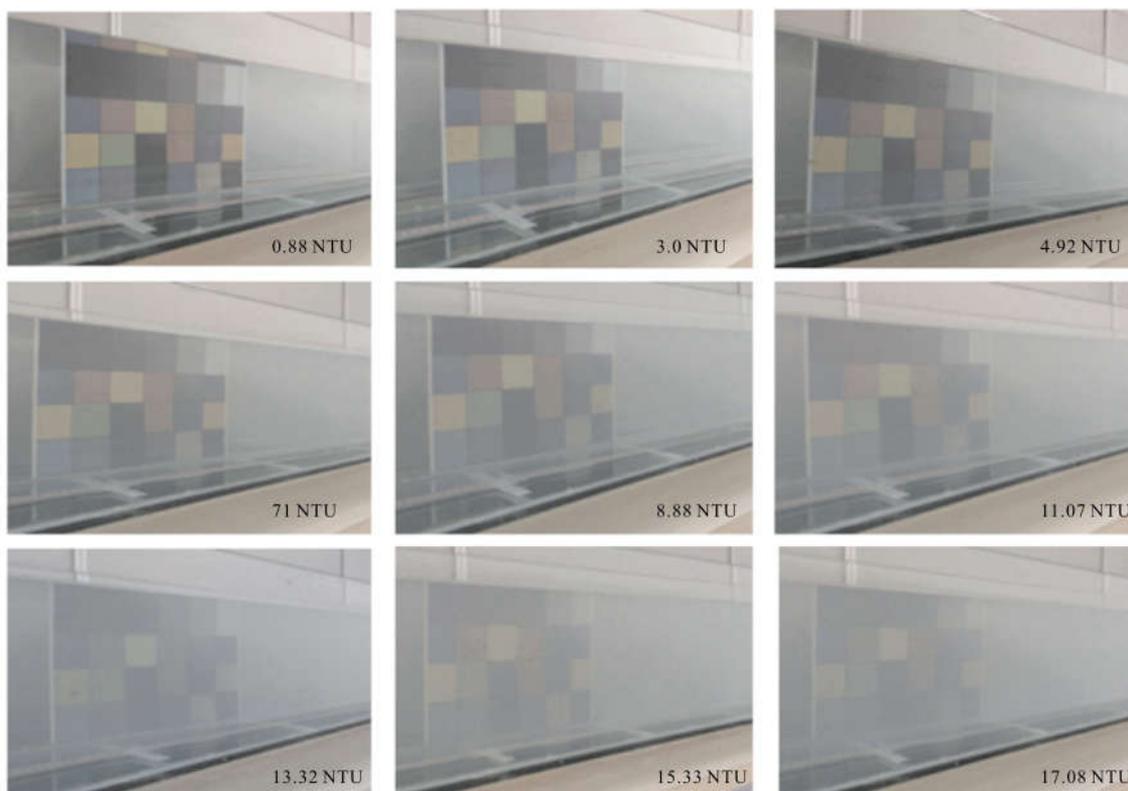


图 4 各水体浊度的实物图

Fig.4 Schematic diagram of water turbidity

4.2 水下相位式激光测距定标算法

相位式激光测距仪的测量距离 S 满足公式(4), 激光波长 λ 为:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (5)$$

将公式(5)代入公式(4)可得距离 S :

$$S = \frac{1}{2} \lambda \left(N + \frac{\Delta\phi}{2\pi} \right) \quad (6)$$

当相位式激光测距仪实际用于水下距离测量时, 设水体折射率为 n , 在不考虑其它因素情况下实际波长 λ' 满足:

$$\lambda' = \frac{\lambda}{n} \quad (7)$$

此类相位式激光测距仪测距处理程序中默认使用波长为 λ , 所以水下使用时测量距离 L' 的计算

公式为:

$$L' = \frac{1}{2} \lambda \cdot \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \quad (8)$$

水下实际距离 L 为:

$$L = \frac{1}{2} \lambda \cdot \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \quad (9)$$

因此水下相位式激光测距仪测距距离 L' 与实际距离 L 间的关系为:

$$L' = nL \quad (10)$$

由公式(10)可知,水下相位式激光测距仪测量距离与实际距离满足线性函数关系,且线性函数系数与水的折射率有关。

基于空气和清水中的激光测距实验,数据拟合处理可得图 5 所示的空气和清水中实际距离与激光测距读数间的关系曲线,均为线性函数形式。

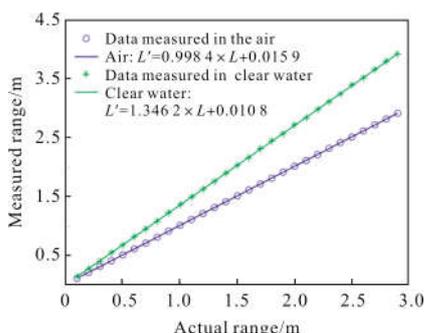


图 5 空气和清水中实际距离与激光测距读数间的关系
Fig.5 Relationship between actual distance and distance measured by laser ranger in air and clear water

由图 5 可知,空气中的测距曲线拟合系数与空气的折射率接近,约为 1;清水中的测距曲线拟合系数与清水的折射率接近,处于 1.345 0~1.363 6;水体的折射率随着水体的浊度增大而增大,但增加的幅度不大,进一步对相位式激光测距仪测量距离与实际距离间的线性关系式(10)进行了验证,同时也说明了将相位式激光测距方法用于水下测距的可行性。因此水下相位式激光测距仪的测距定标算法应采用线性函数的形式。

设相位式激光测距仪定标后的测量距离列矩阵的列向量为 $\hat{L}_1, \hat{L}_2, \dots, \hat{L}_n$; 相位式激光测距仪定标前的测量距离列矩阵的列向量为 L'_1, L'_2, \dots, L'_n ; k_1, k_2 为测距定标系数,则有如下矩阵关系式:

$$\begin{bmatrix} \hat{L}_1 \\ \hat{L}_2 \\ \dots \\ \hat{L}_n \end{bmatrix} = k_1 \begin{bmatrix} L'_1 \\ L'_2 \\ \dots \\ L'_n \end{bmatrix} + k_2 \quad (11)$$

将测距定标系数 k_1, k_2 整合为矩阵,可得:

$$\begin{bmatrix} \hat{L}_1 \\ \hat{L}_2 \\ \dots \\ \hat{L}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L'_1 & 1 \\ L'_2 & 1 \\ \dots & \dots \\ L'_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

求解测距定标系数矩阵得:

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} L'_1 & 1 \\ L'_2 & 1 \\ \dots & \dots \\ L'_n & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} L'_1 & 1 \\ L'_2 & 1 \\ \dots & \dots \\ L'_n & 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} L'_1 & 1 \\ L'_2 & 1 \\ \dots & \dots \\ L'_n & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \hat{L}_1 \\ \hat{L}_2 \\ \dots \\ \hat{L}_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

在实际水体中使用水下相位式激光测距仪测距时,水下激光测距仪测得的初始距离值为 \hat{L} , 则定标后的距离值 \hat{L} 为:

$$\hat{L} = k_1 L' + k_2 \quad (14)$$

基于 9 种不同水体浊度中的测距实验数据,数据处理后得表 1 所示的 9 种不同浊度水体中的测距定标系数及其均方根误差值 RMSE。

表 1 测距定标系数(k_1, k_2)与均方根误差值
Tab.1 Correction coefficients (k_1, k_2) and RMSE

Water turbidity /NTU	Calibration coefficient and error		
	k_1	k_2	RMSE
0.88	0.743 5	0.005 7	0.001 3
3.00	0.743 0	0.005 1	0.002 2
4.92	0.742 3	0.005 6	0.003 2
7.10	0.740 3	0.007 1	0.002 6
8.88	0.740 2	0.007 0	0.004 1
11.07	0.739 3	0.007 0	0.005 4
13.32	0.739 1	0.006 7	0.001 9
15.33	0.731 2	0.009 0	0.002 1
17.08	0.733 2	0.007 7	0.001 9

由表 1 中测距定标系数可知, 浊度范围为 0~20 NTU 时, 测距定标系数 k_1 的范围为 0.731 2~0.743 5, k_2 的范围为 0.005 1~0.009 0, 变化均很小。因此, 使用 9 种水体浊度中的所有测距数据进行数据处理, 获得统一的激光测距定标公式:

$$\hat{L}=0.743 \ 2L'+0.004 \ 7 \quad (15)$$

4.3 水体浊度对水下相位式激光测距的影响

定标后的测距示数与实际距离间的差值即为水下相位式激光测距仪定标后的测距误差, 数据处理分别求得上述 9 种浊度水体中的测距误差平均值、最大值和均方根误差值, 如图 6 所示。

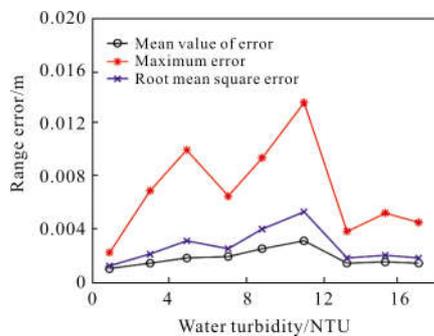


图 6 水体浊度与各测距误差间的关系

Fig.6 Relation between calibrated error of test data and water turbidity

由图 6 可知, 水下相位式激光测距仪在上述 9 种水体中的测距误差平均值均在 4 mm 以下, 测距误差最大值不超过 14 mm, 其中清水中(浊度为 0.88 NTU)激光测距误差最大值为 2.3 mm。同时定标后测距误差平均值随着浊度的增加, 变化仅为 2 mm, 充分说明了该测距定标算法的准确性。

根据测距定标系数 k_1 和定标后测距误差平均值均呈现随水体浊度增大变化缓慢的特性, 可知水体浊度对水下相位式激光测距仪的测距定标精度影响小。充分利用 9 种浊度水体的测距数据, 可得如图 7 所示的统一激光测距定标曲线。在水下 3.5 m 的测量范围内测距误差平均值小于 3 mm, 测距误差最大值为 1.5 cm。

实验过程中, 可明显观察到水体浊度对激光传输距离有很大的影响: 水体浊度值越高, 激光测距极限值越小。因此对水体浊度对激光测距动态范围的影响进行了探究, 在上述 9 种浊度水体的测距实验

中分别记录相位式激光测距仪所能测到的距离极限值, 实验处理后得到如图 8 所示的水体浊度与激光测距极限的关系曲线图。

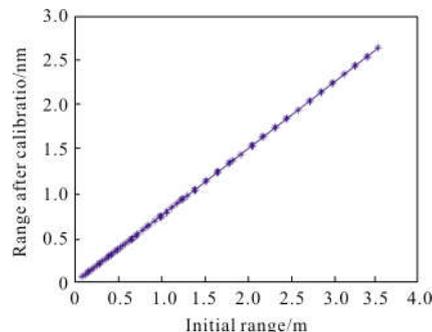


图 7 9 种水体浊度下的统一激光测距定标曲线

Fig.7 Unified laser ranging calibration curve for 9 kinds of water turbidity

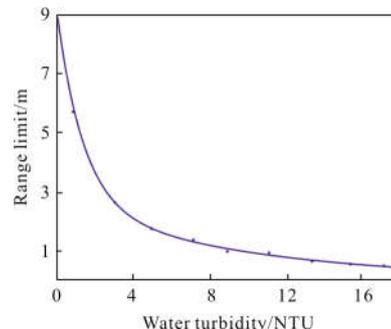


图 8 水体浊度与测距极限间的关系曲线

Fig.8 Relation between water turbidity and range limit

由图 8 可知: 水体浊度对激光测距极限值的影响较大, 测距动态范围随着水体浊度的增大呈现指数衰减, 水体浊度与激光测距极限值的拟合关系式为:

$$z=2.60 \cdot \exp(-0.10t)+6.34\exp(-0.73t) \quad (16)$$

式中: z 为水下相位式激光测距仪的测距极限值; t 为水体浊度值; 残差平方和(SSE)为 0.02379, 均方根误差(RMSE)为 0.068 97。

5 结 论

文中基于陆地上相位式激光测距仪的工作原理, 分析了将其用于水下测距的可行性。基于不同浊度水体中的激光测距实验提出了水下相位式激光测距的定标校正算法。首先, 根据水中激光测距示数与实际距离间的线性相关关系, 理论推导并验证了测距定标算法的准确性, 其次, 水体浊度对水下相位式激光测距仪测距精度影响小, 但测距动态范围随着

水体浊度的增大呈现指数衰减现象。经定标校正后的水下相位式激光测距仪在水下 3.5 m 范围内测距误差平均值不超过 3 mm,可用于水下目标近距离的精确测距。

参考文献:

- [1] Heng Jingjing. Design and implementation of underwater vision ranging system [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2013. (in Chinese)
衡靓靓. 水下视觉测距系统的设计与实现[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013.
- [2] Wan Guangnan. Research on underwater target detection based laser and ultrasound [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
万广南. 基于激光和超声的水下目标探测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [3] Cai Wenyu. Research on underwater ranging technology based on laser transmission vision processing [J]. *Journal of Hangzhou Dianzi University*, 2015, 35(4): 1-5. (in Chinese)
蔡文郁. 基于激光透射视觉处理的水下测距技术研究[J]. 杭州电子科技大学学报, 2015, 35(4): 1-5.
- [4] Jin Xianglong. The development of marine geophysical technology [J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 2004, 27(1): 6-13. (in Chinese)
金翔龙. 海洋地球物理技术的发展[J]. 东华理工学院学报, 2004, 27(1): 6-13.
- [5] Kocak D M, Dalgleish F R, Caimi F M, et al. A focus on recent developments and trends in underwater imaging [J]. *Marine Technology Society Journal*, 2008, 42(1): 52-67.
- [6] Liu Z, Krysz D. The use of laser range finder on a robotic platform for pipe inspection [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 31: 246-257.
- [7] Zhang Y, Wei Y G H, Lou L, et al. Influence of water on underwater distance measurement by a laser range finder [C]//OCEANS 2017-Aberdeen, IEEE, 2017: 1-5.
- [8] Gomaa W, El -Sherif A F, El -Sharkawy Y H. Underwater laser detection system [C]//Solid State Lasers XXIV: Technology and Devices[J]. *International Society for Optics and Photonics*, 2015, 9342(934221): 1-19.
- [9] Laux A, Mullen L, Perez P, et al. Underwater laser range finder [C]//Ocean Sensing and Monitoring IV. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8372(83721B): 1-11.
- [10] Illig D W, Jemison W D, Lee R W, et al. Optical ranging techniques in turbid waters [C]//Ocean Sensing and Monitoring VI. International Society for Optics and Photonics, 2014, 9111(91110R): 1-14.
- [11] Lee R W, Laux A, Mullen L J. Hybrid technique for enhanced optical ranging in turbid water environments [J]. *Optical Engineering*, 2013, 53(5): 1-10.
- [12] Chen Ying, Qu Fengzhong, Song Hong, et al. Marine Technology Course [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2012: 69-85. (in Chinese)
陈鹰, 瞿逢重, 宋宏, 等. 海洋技术教程[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2012: 69-85.
- [13] Sun Ting. Research on handheld laser range finder [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
孙婷. 手持式激光测距仪的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [14] Pan Jia. Research and design of short-range handheld excursion distance meter [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2014. (in Chinese)
潘佳. 短程手持式激光测距仪的研究与设计 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2014.
- [15] Jin Chenghao. Study on short-range phase laser ranging [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
金成浩. 短程相位式激光测距的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.