

基于合作目标的激光水下定位

刘艳,张超,李卿
(91550部队,辽宁大连116023)

摘要:为了准确获取水下运动目标的运动轨迹,提高测量的数据率,提出了一种基于合作目标的激光水下定位方法。通过在被测目标上加装合作目标,利用合作目标的全反射特性,实现了脉冲式激光水下测角与测距的功能。介绍了激光水下定位的方法和系统组成,给出了水下定位的数学模型及测量结果。模拟实验结果表明,该方法具有一定的工程应用价值。最后,结合工程应用,对激光水下定位需要解决的一些实际问题进行了分析。

关键词:激光水下测量;蓝绿激光;水下定位;合作目标

中图分类号:TN247 文献标识码:A

Underwater laser localization method using cooperative targets

LIU Yan, ZHANG Chao, LI Qing

(Army 91550 Unit, Dalian 116023, China)

Abstract: A underwater laser localization method using cooperative targets was proposed to acquire the moving trajectories of underwater moving objectives to improve the tracking data precisely. By installing cooperative targets with total reflection characteristics on a measured objective, the angles and distances between the detection system and the objective could be measured by a pulse-laser. The localization method and system structure for underwater detection were introduced and a digital model and measured results for the underwater laser localization were also given. Simulated results show that the proposed method is worth applying to engineering. According to engineering application, some practical problems about underwater laser localization to be solved were analyzed.

Key words: underwater laser detection; blue-green laser; underwater localization; cooperative target

1 引言

水下定位是指对水下目标的探测和测量以及确定水下目标的地理位置及运动轨迹^[1]。不同的测量技术手段,获得目标运动信息的方法也不同。在可见光波段,水下吸收最小的是 450 ~ 580 nm 的蓝绿光。蓝绿激光作为可见光波段的海水窗口,穿透力很强,衰减系数 $< 0.2 \sim 0.4 \text{ m}^{-1}$ ^[2],在近海 530 nm 处为衰减的极小区。因此,蓝绿光成为水下测量的理想光源。激光具有高亮度性、高准直性、高相干性的特点,与蓝绿可见光相比,激光在水下传播过程中受海水的吸收和散射比较小,因此能传播距离较远。但激光的发散角较小,难以实现现在全视场内测量目标的运动轨迹。特别是受运动载体、目标特性和水下应用环境的限制和影响,使得激光在水下定位的应用受到一定的限制,实现对大目标的准确测量有一定的难度。针对这一难题,有人提出了采取在被测目标上加装合作目标,并且对加装合作目标的位置进行标定;然后利用脉冲测距和四象限测角方法来实现对水下大目标的定位。目前,对水下目标的测量通常采用声纳测量,而提出的基于合作目标的激光水下定位方法,定位精度高于声纳测量方法;并且,由于光在水中的传播速度比声在水中的传播速度快,使得激光水下测量的数据率高于声测量得到的定位数据。因此,基于合作目标的激光水下定位方法是解决水下大目标高

精度测量、获取试验数据的一种有效手段。

2 激光水下定位及系统组成

2.1 激光水下定位

激光水下定位要求在被测目标上加装一定的合作目标。加装的合作目标可以是角反射体或是玻璃微珠,但它们必须是全反射体。激光作用在这种反射体上,可 100% 的反射回去。加装合作目标的位置是激光的测量点,须对此位置与目标的质心位置进行标定。测距采用脉冲测距法,测量光脉冲到达目标再由目标反射到接收系统的时间,然后计算出目标的距离。测角参照单脉冲雷达的定向原理,从单脉冲回波信号中获得目标的角度信息。这种定向方法是采用四象限接收的处理方式,利用激光回波信号中振幅特性提取方向信息,利用振幅一和差式处理方法,获得光斑偏离中心的脱靶量^[3],从而测量目标的方位和俯仰,确定目标的准确位置或运动轨迹。较高的脉冲能量、较窄的脉冲宽度,有利于提高探测系统的信噪比。采用距离选通成像方式,接收端采用距离选通门,成像距离可在 6 倍衰减长度以上的距离识别目标,视距可达 2.5 ~ 3 倍能见度^[4]。

2.2 激光水下定位测量系统的组成

激光水下定位测量系统由发射系统、接收系统、信息处理系统和伺服控制系统等主要部分组成。其组成框图如图 1 所示。

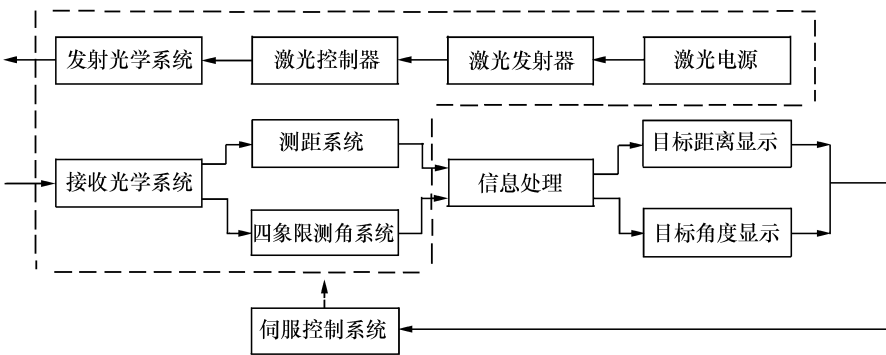


图 1 激光水下定位系统组成框图

Fig. 1 Structure of underwater laser localization system

2.3 激光水下定位的测量原理

2.3.1 激光水下测距原理

脉冲法测距是利用脉冲激光器对目标发射一个或一系列很窄的光脉冲,测量光脉冲到达并由目标返回到接收器的时间,由此计算出目标的距离。假设目标距离为 R ,光脉冲往返时间为 t ,光在水中传播速度为 c/n , n 为海水的折射率,则有:

$$R = \frac{ct}{2n}, \quad (1)$$

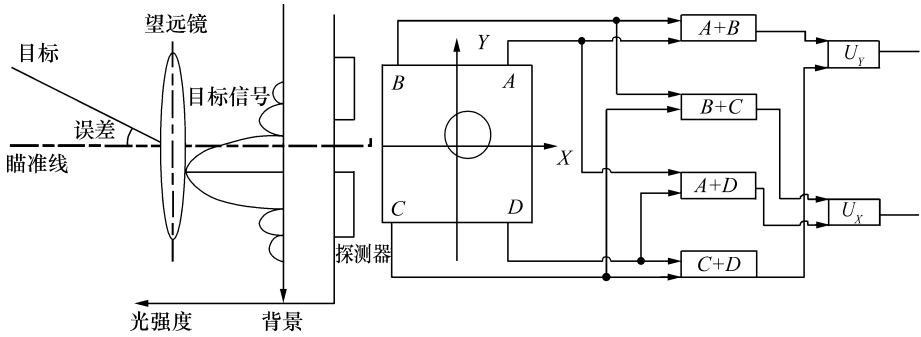


图2 激光水下测角原理示意图

Fig.2 Underwater laser angle measurement

图中 A 、 B 、 C 、 D 分别代表四象限管中各单管接收到的激光功率,光斑很小时,近似按线性关系可以求得目标的坐标为:

$$U_x = \frac{k(A - B - C + D)}{(A + B + C + D)}, \quad (2)$$

$$U_y = \frac{k(A + B - C - D)}{(A + B + C + D)}, \quad (3)$$

其中, k 为角度和功率之间的变换系统。

3 激光水下定位的数学模型及测量结果

3.1 激光水下定位的数学模型

利用激光水下定位系统对带有合作目标的运动目标进行测量,可分以下步骤进行:1) 试验前标定合作目标相对于目标质心的位置;2) 测量目标相对于测量设备的距离、方位角、俯仰角;3) 对测量点相对于运载平台的质心的位置进行标定,经过坐标平移,获得测量设备相对于运载平台质心的位置;4) 运载平台在运动过程中,利用自身实时测量的航速、航向、横摇、纵摇运动参数,经过

2.3.2 激光水下测角原理

参照单脉冲雷达的定向原理,跟踪系统只需一个激光回波脉冲信号就可以确定目标的方向。从单脉冲回波信号中获取的目标角度信息,需采用多路接收系统。利用回波信号中振幅特性提取方向信息。发射向合作目标的激光反射回来后,经接收光学系统聚焦到四象限探测器上,转换成电信号,采用振幅-和差式单脉冲体制,确定光斑中心偏离原点的坐标^[3]。测角原理如图2所示。

坐标旋转,获得测量点的姿态。以上端离开运动平台处为坐标原点,获得目标质心随时间变化的运动轨迹。带有合作目标的激光水下定位工作示意图如图3所示。

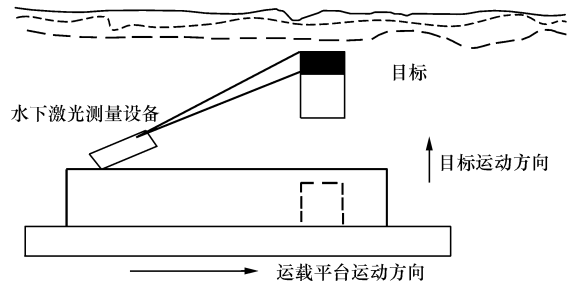


图3 带有合作目标的激光水下定位工作示意图

Fig.3 Underwater laser localization using cooperative target

假设的参数为:运动平台的深度、目标运动速度、设备安装高度、距目标的水平距离,合作目标安装在靠近测量设备一侧的长×宽,水下激光测量设备测量点相对于平台质心的位置,目标顶端

离开运动平台处相对于平台质心的位置,合作目标相对于目标质心的位置,运动平台的航速、航向

Δk 、横摇 Φ 、纵摇 θ 。

其坐标转换公式可表示为:

$$\mathbf{X}_X = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} X_X + X_{OX} \\ Y_X + Y_{OX} \\ Z_X + Z_{OX} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{OX} \\ Y_{OX} \\ Z_{OX} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \cos\Delta k & 0 & -\sin\Delta k \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\Delta k & 0 & \cos\Delta k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix}, \quad (5)$$

\mathbf{F} 为摇摆转换矩阵; Δk 为航向偏差角,右偏为正; θ 为纵摇角,平台前部抬头为正; ϕ 为横摇角,平台右倾为正。

$[X_X Y_X Z_X]$ 为测量设备相对于设备质心的测量位置; $[X_{OX} Y_{OX} Z_{OX}]$ 为目标顶端相对于运动平台质心的位置。

平台坐标系中: X 平行于平台纵向,向后为正; Y 在平台纵向对称面内,垂直于 OX ,向上为正; Z 按右手法则确定。

3.2 激光水下定位的测量结果

蓝绿激光器采用脉冲式电光调 Q 的 Nd^{3+} :YAG 倍频激光器,这种激光器是目前最成熟的固体激光器。 Nd^{3+} :YAG 倍频激光器其单脉冲能量 $> 20 \text{ mJ}$,脉冲宽度为 $10 \sim 20 \text{ ns}$,激光波长为 $1.064 \mu\text{m}$,采用光泵浦,经倍频后的绿光波长为 $0.53 \mu\text{m}$,接近近海海水窗口的中心波长。倍频晶体的转换效率一般为 $20\% \sim 40\%$ 。调 Q Nd^{3+} :YAG 倍频激光器输出特性如表 1 所示。

表 1 调 Q Nd^{3+} :YAG 倍频激光器的输出特性

Tab. 1 Output characteristics of Q modulation Nd^{3+} :YAG doubling-frequency laser

工作参数	脉冲参量/ mJ	脉冲宽度/ ns	峰值功率/ MW	重复率/ Hz	稳定度/ %	转换效率	寿命/ a	体积 cm × cm × cm	重量/kg
典型值	50 ~ 150	7 ~ 20	5 ~ 10	10 ~ 100	5 ~ 10	0.1 ~ 0.4	3.6×10^7	$17 \times 17 \times 60$	40 ~ 60
最高值	800	3.5	114	100	1.5	1.1			

加装的合作目标需选择具有全反射特性的玻璃微珠或角反射体。玻璃微珠材料价格便宜,重量轻,加装方便,具有理想的回波反射特性,反射回波发散角大。角反射体加装、固定、平衡有一定难度,反射回波发散角小。选择在目标上加装玻

璃微珠,形成有效光学反射带,不影响目标的运动特性,不影响其它测量设备工作。具体的作法是:在目标的顶端靠近测量设备侧粘贴一定面积的玻璃微珠,测量合作目标的中心与目标质心的位置。合作目标特性及安装位置如表 2 所示。

表 2 合作目标特性及安装位置

Tab. 2 Characteristics of cooperative target and its installation

合作目标参数	微珠直径/cm	发散角/mrad	长度/m	宽度/m	安装位置/m
数值	1.6 ~ 2.0	20 ~ 30	4.0	0.6	$1.0 \times 1.0 \times 2.7$

在实验室条件下,利用以往的运动平台姿态数据,结合目标特性和加装的合作目标位置,根据

国内外现有激光测量系统的研制资料,初步设计出满足水下激光测量战技要求的定位系统。这种

测量方法的使用范围在 100 m 以内、测距精度优于 0.5 m、测角精度优于 1° 、重复频率为 40 Hz, 目标为柱体。结合模拟的目标和平台模型, 测量得到某时段数据如表 3 所示。

表 3 目标某时段的模拟测量数据

Tab. 3 Simulation measurement data of objective in a certain interval

$T_1 - T_2$ (s)	X (m)	Y (m)	Z (m)
0.301	0.344 9	0.980 3	-0.289 5
0.326	0.378 3	2.179 5	-0.548 6
0.351	0.395 4	3.357 6	0.084 5
0.376	0.408 4	4.539 5	0.385 4
0.401	0.420 1	5.774 8	-0.353 9
0.426	0.446 4	6.895 6	0.074 2
0.451	0.463 0	7.864 7	-0.137 4
0.476	0.479 8	8.983	0.639 1
0.501	0.495 3	9.916 3	0.410 2

4 工程应用中需要解决的问题

基于合作目标的激光水下定位系统用于在水下特定的运动平台上对垂直向上运动的大目标进行运动轨迹测量。目标在水下运动的时间短、运动的速度大、运动角速度变化大, 要求在运动载体上摇摆运动状态下准确测量动目标。这种特殊的测量要求, 使得激光水下测量设备应具有快速的反应时间、较高的测量精度和较近的作用距离。在工程应用中, 为了准确获得目标运动的轨迹, 使用激光测量目标相对于测量点的位置, 可利用现有的电子罗经、多普勒测速仪等参数测量设备测量以下参数:

- (1) 运动平台的航速、航向、横摇、纵摇参数的测量;
- (2) 运动平台的大地坐标测量;
- (3) 相对于运动平台质心定位系统的安装位置的测量;
- (4) 被测目标上有加装合作目标的位置, 并标定出合作目标相对于目标质心的坐标。

测量设备布置位置一定程度上受运动载体的空间大小限制, 但由于设备少、重量轻, 可在现有条件下解决激光测量设备的安装位置与运动载体空间限制的矛盾以及水平的最大作用距离受运动

载体长短限制的矛盾。设计中需考虑改变激光发射功率, 克服激光的最小作用距离与激光的测量盲区矛盾; 改变激光发射重复频率, 解决被测量目标运动时间短与测量数据率要求高的矛盾。

目前, 激光水下定位测量的工程应用中主要存在以下问题:

- (1) 近距离测量与快速反应时间的问题;
- (2) 被测目标表面积大与激光发散角小的问题。

以上问题的解决, 是激光水下定位测量的关键技术所在。

5 结 论

测量水下大目标的运动轨迹一直是水下测量工作的难题。目标在水下具有运动速度快、运动距离短、体积庞大等特点。为了准确定位目标, 要求测量设备具有快速反应、测量精度高的特点。

声纳水下定位目前存在着不足。此方法采用全视场覆盖、多台交汇的方式, 要求事后人工判读, 但这种方法一定程度上存在判读误差和交汇误差。在短距离内还存在噪声、盲区、声速、空泡等影响, 使得声纳测量数据率低、测量误差大。

基于合作目标的激光水下定位增加了一种测量手段。此方法利用蓝绿激光作为光源, 采用激光雷达测量原理, 加装合作目标来完成测量与定位。加装的合作目标可以弥补水下光学测量设备对最小探测要求, 增加水下目标的有效反射面积、反射率、反射发散立方体角等目标特性, 并且不改变目标原有的目标特性, 对激光具有全反射的作用, 使得激光的回波强度进一步增强。利用激光雷达的测角测距原理, 可对水下大目标进行测量。单台设备就可实现对目标的定位测量, 不需要人工判读, 有效地提高了数据率, 提高了测量精度。这种测量方法的应用, 在一定程度上是对声纳水下测量的补充。

早在 20 世纪 80 年代末期, 就开展了激光用于水下目标测量的工作。而用于快速运动的目标测量还止于实验室阶段, 工程中的应用还需要科研技术人员进一步攻关。特别是随着问题的解决, 这种基于合作目标的激光水下定位方法具有

广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 杨榜林,岳全发. 军事装备试验学[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
YANG B L, YUE Q F. *Armament Test Theory*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [2] 王冬梅,张涛,闫丰. 基于距离选通的激光主动照明技术的研究[J]. 微计算机信息, 2006, (19):48-50.
WANG D M, ZHANG T, YAN F. Study of positive illumination technology of laser based on range gating[J]. *Micro-computer Inform.*, 2006, (19):48-50. (in Chinese)
- [3] 熊辉丰. 激光雷达[M]. 北京:宇航出版社,1994.
XIONG H F. *Laser Radar*[M]. Beijing: Navigation and Avigation Press, 1994 (in Chinese)
- [4] 徐啟阳,杨坤涛,王新兵,等. 蓝绿激光雷达海洋探测[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
XU Q Y, YANG K T, WANG X B, *et al.*. *Ocean Detection Using Blue-green Laser Radar*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. (in Chinese)

作者简介:刘 艳(1968—),女,吉林东辽人,高级工程师,主要从事海军武器装备靶场水下测量研究。

E-mail:youyou135790@163.com

张 超(1982—),男,山东烟台人,助理工程师,主要从事海军武器装备靶场水下测量研究。