

# 基于流体驱动的水下激光自主扫描近程方位探测方法

甘霖\*, 张合

南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 针对水下近程来袭目标的探测问题, 提出一种利用流体动力驱动的随机定位方法; 利用航行水动力驱动单光束脉冲激光进行动态扫描, 利用磁传感器记录扫描周期; 基于重尾函数推导目标回波方程, 建立磁探测系统磁偶极子等效模型, 采用峰值和阈值检测法分别解算光磁信号; 建立水下近程目标捕获模型和方位探测精度等效模型, 研究激光发射功率、脉宽、阈值和噪声对测量精度的影响机理。结果表明: 方位角测量精度和目标捕获率随着激光发射功率的增大而提高, 随着脉宽和接收电路噪声电压的增大而降低; 方位角测量精度在检测阈值为 300 mV 时达到最大, 目标捕获率随着阈值的增大有轻微变化, 当阈值接近回波脉冲峰值时, 目标捕获率迅速降低。

**关键词** 测量; 随机定位; 流体驱动; 水下探测; 探测精度; 目标捕获

中图分类号 TJ43

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0304004

## Underwater Laser Autonomous Scanning Short-Range Azimuth Detection Method Based on Fluid-Driven

Gan Lin\*, Zhang He

School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

**Abstract** Aiming at the problem of underwater short-range detection of incoming targets, a random positioning method driven by fluid dynamics is proposed. The single-beam pulse laser driven by the navigation hydrodynamic force is used to dynamically scan, and the scanning periodic is recorded by the magnetic sensor. Based on the heavy tail function, the target echo equation is derived, and the magnetic dipole equivalent model of the magnetic detection system is established. The optical magnetic measurement signals are calculated respectively by using the peak detection method and the threshold detection method. The underwater short-range target acquisition model and the azimuth detection accuracy equivalent model are established. The influence mechanism of laser emission power, pulse width, threshold, and noise on measurement accuracy is studied. The results show that the azimuth measurement accuracy and target capture rate increase with the increase of the laser emission power, and decrease with the increase of the pulse width and the receiving circuit noise voltage. The azimuth measurement accuracy reaches the maximum when the detection threshold is 300 mV. The capture rate varies slightly with the increase of the threshold. When the threshold is close to the peak of the echo pulse, the target capture rate decreases rapidly.

**Key words** measurement; random positioning; fluid-driven; underwater detection; detection accuracy; target capture

**OCIS codes** 120.4820; 120.1880; 140.3538; 140.3460

## 1 引言

近年来,从海洋经济规划到“一带一路”倡议中的“海上丝绸之路”,从东海钓鱼岛问题到南海诸岛争端,我国的海洋权益和安全正面临着日趋严峻的挑战<sup>[1]</sup>。随着现代高性能智能鱼雷技术的迅猛发

展,水面舰艇和 underwater 潜艇受到的威胁日益严重<sup>[2]</sup>。小型反鱼雷鱼雷(ATT)具有灵活、主动的特点,因此能有效应对来袭鱼雷,是近年海军积极研发的硬杀伤武器<sup>[3-5]</sup>。

在水下战场环境中,小型 ATT 难以采用传统测量方法实现水下超近程方位测量。其原因归纳为

收稿日期: 2018-10-10; 修回日期: 2018-11-21; 录用日期: 2018-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(51605227)、中央高校基本科研业务费专项资金(NUST30915011303)

\* E-mail: kg568605@163.com

3点:1)鱼雷可能以各种方式来袭,相对运动条件复杂;2)作为快速机动小目标,现代鱼雷速度大( $\geq 40$  kn),长度小(3~8 m),目标强度小,且伴随非金属复合壳体材料和现代消声隐形技术的发展,传统水下超近程探测方法(主动电磁、主动声)方位测量难度显著增加;3)小型ATT有限的空间与功耗严重限制了传统方位测量方法的应用。

激光具有方向性好、精度高、抗干扰性强等优点,特别适合鱼雷等小目标的探测,因此蓝绿激光成为声呐水下超近程探测的重要补充<sup>[6-8]</sup>。传统的水下激光方位测量方法包括成像法和多窗口法,其中成像法探测单元多且算法复杂<sup>[9-10]</sup>,多窗口法体积大且功耗高<sup>[8,11]</sup>。文献[11]和文献[12]提出激光同步扫描法,但是系统中的双向电机占用了较大的空间和能量,并且带来了额外的干扰。

针对水下小型运动体要求探测系统具有小型化、低功耗和稳定性强的特点<sup>[12]</sup>,本文提出一种基于流体动力的水下超近程方位测量方法,利用航行水动力驱动激光同步扫描,结合扫描周期信号解算

目标方位。基于重尾函数推导目标回波方程,建立磁探测系统磁偶极子(MD)等效模型,采用峰值检测法和阈值检测法分别解算光磁测量信号。讨论激光发射参数、检测阈值和接收电路噪声对目标捕获概率的影响。

## 2 探测系统工作原理

图1所示为流体驱动近程随机定位系统。系统工作流程如图2所示。在水下小型运动体航行过程中,利用涡轮产生动力,带动全反平面镜旋转,单束脉冲激光穿过中空反射镜,照射到平面镜被反射后在空间动态扫描目标;在涡轮转轴上安置磁芯,在涡轮旋转的同时,利用微型磁传感器测量周期旋转磁信号,从而获取扫描探测周期;当射出激光束遭遇目标后,漫反射回波信号经过透光窗口到达第1块平面反射镜,经1次反射后被中空反射镜2次反射,然后被接收系统探测,该信号为测量终点信号。结合激光信号和磁周期信号,即可测量目标方位信息。

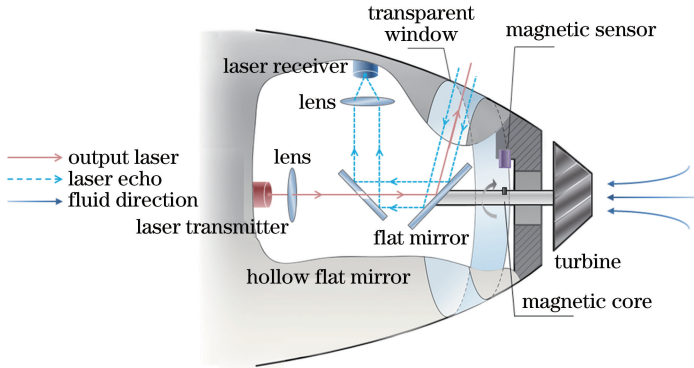


图1 流体驱动近程随机定位系统

Fig. 1 Fluid-driven short-range random positioning system

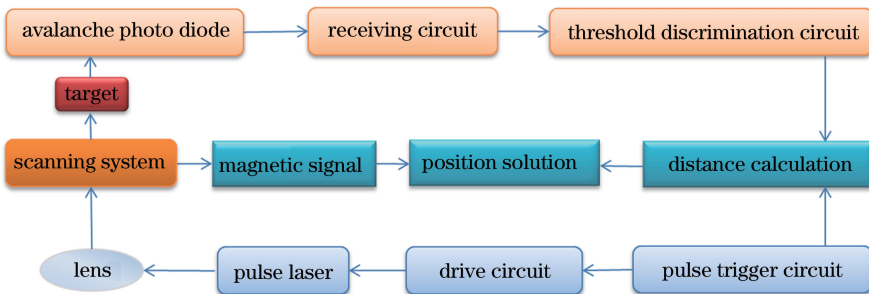


图2 流体驱动近程随机定位系统工作流程

Fig. 2 Workflow of fluid-driven short-range random positioning system

## 3 探测信号建模与解算方法

$f(t)$ 为

$$f(t) = (t/\tau)^2 \exp(-t/\tau), \quad (1)$$

式中: $t$ 为时间; $\tau$ 为激光发射脉宽。

激光发射波形采用重尾函数表示,其时空分布

脉冲激光回波  $j(t)$  为

$$j(t) = f(t) \otimes h(t), \quad (2)$$

$$h(t) = 4\pi\rho(\alpha)g(s)\delta(t - 2d/c), \quad (3)$$

式中： $\otimes$ 为并矢运算符号； $h(t)$ 为脉冲冲击响应，与目标表面特性有关； $\alpha$ 为入射角； $\rho(\alpha)$ 为目标表面反射特性，通常采用双向反射分布函数(BRDF)表示； $s$ 为光束中心与横截面上点的距离； $g(s)$ 为光强分布； $d$ 为目标与探测系统的距离； $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数； $c$ 为光速。

采用 BRDF 表示目标表面反射特性  $\rho(\alpha)$ ，即

$$\rho(\alpha) = \frac{A}{\cos^6\alpha} \exp(-\tan^2\alpha/\xi^2) + C \cos^n\alpha, \quad (4)$$

式中： $A$ 、 $C$ 分别为镜面反射和漫反射的反射幅度； $\xi$ 为被照射表面斜率； $n$ 为漫反射系数； $\frac{A}{\cos^6\alpha} \exp(-\tan^2\alpha/\xi^2)$ 为镜面反射部分； $C \cos^n\alpha$ 为漫反射部分。

采用高斯函数表示脉冲半导体激光器出射光束，其光强分布公式<sup>[13]</sup>为

$$g(s) = \frac{2P}{\pi\omega_0^2 \{1 + [\lambda d / (\pi\omega_0^2)]^2\}} \times \exp\left\{\frac{-2s^2}{\omega_0^2 \{1 + [\lambda d / (\pi\omega_0^2)]^2\}}\right\}, \quad (5)$$

式中： $P$ 为激光功率； $\omega_0$ 为光束束腰半径； $\lambda$ 为激光波长。

根据以上推导过程，脉冲激光回波函数  $j(t)$  可表示为

$$j(t) = \frac{2\sqrt{2\pi}\rho(\alpha)Pc \cos\gamma}{\omega_0 \sqrt{1 + [\lambda d / (\pi\omega_0^2)]^2}} \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\left\{\frac{c\tau \cos\gamma}{\sqrt{2}\omega_0 \sqrt{1 + [\lambda d / (\pi\omega_0^2)]^2}}\right\}^2\right\} \left(\frac{t-\tau}{\tau_0}\right)^2 \times \exp\left(\frac{\tau-t}{\tau_0}\right) d\tau, \quad (6)$$

式中： $\gamma$ 为激光束发散角； $\tau_0 = \sqrt{2}\omega \tan \frac{\alpha}{c}$ 。

对于系统中永磁体磁芯的磁场空间分布，可采用 MD 等效模型描述，将磁源视为 MD，因此对于圆柱永磁体磁芯，其外部任意位置的磁感应强度  $\mathbf{B}$  为

$$\mathbf{B}(\mathbf{m}, \mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi r^5} [3(\mathbf{r} \cdot \mathbf{m})\mathbf{r} - r^2 \mathbf{m}], \quad (7)$$

式中： $\mathbf{m}$ 为磁偶极矩，将其设为  $(0, m)$ ， $m$ 为磁偶极矩大小； $\mathbf{r}$ 为场源间矢径； $r$ 为场源间矢径大小；相对磁导率参数  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb}/(\text{A} \cdot \text{m})$ 。将向量坐标代入(7)式，可求得

$$\begin{cases} B_{xm} = \frac{3m\mu_0}{4\pi r^5} L \sin\theta(L \cos\theta - r) \\ B_{ym} = \frac{m\mu_0}{4\pi r^5} [2(L \cos\theta - r)^2 - L^2 \sin^2\theta] \end{cases}, \quad (8)$$

式中： $B_{xm}$ 和  $B_{ym}$ 分别为磁感应强度  $\mathbf{B}$  在磁芯随动坐标系中的横轴和纵轴分量； $L$ 为磁传感器与磁芯运动轨迹中心的距离； $\theta$ 为磁芯位置处与运动轨迹中心和水平方向的夹角。根据模型中 2 个坐标系变换关系，磁芯在  $y$  轴方向产生的磁场分量为

$$B_y = B_{xm} \sin\theta + B_{ym} \cos\theta = \frac{3m\mu_0}{4\pi r^5} L \sin^2\theta(L \cos\theta - r) +$$

$$\frac{m\mu_0}{4\pi r^5} \cos\theta [2(L \cos\theta - r)^2 - L^2 \sin^2\theta]. \quad (9)$$

基于光磁信号特征分析，建立光磁方位角解算数学模型，如图 3 所示，其中  $T$  为时间， $U$  为信号电压幅值， $t_{p1}$ 和  $t_{p2}$ 分别为相邻的 2 个峰值时刻， $t_L$ 为目标回波时刻。

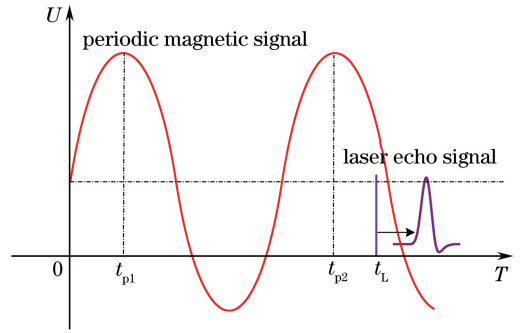


图 3 光磁方位角解算数学模型

Fig. 3 Optics-magnetic azimuth solving mathematical model

采用峰值检测法测量相邻 2 个峰值时刻  $t_{p1}$ 和  $t_{p2}$ ，则系统的扫描周期为

$$T_0 = t_{p2} - t_{p1}. \quad (10)$$

同时，激光探测系统探测目标回波信号，记录目标回波时刻  $t_L$ ，目标回波与第 2 个峰值点时间间隔为

$$T_r = t_L - t_{p2}. \quad (11)$$

则目标方位角可以解算为

$$\varphi_t = 2\pi \frac{T_r}{T_0}. \quad (12)$$

#### 4 近程目标探测概率分布特性

脉冲激光回波检测方法中，通过设置阈值判别时刻是最常用的时间检测方法。该方法的目标捕获概率<sup>[13]</sup>为

$$p(t, V_{th}) = \int_{V_{th}}^{\infty} G[V_n + j(t)] dV_{sn}, \quad (13)$$

式中:  $V_{th}$  为激光回波检测阈值;  $V_n$  为激光接收电路的噪声电压;  $V_{sn}$  为噪声和回波的叠加信号;  $G(\cdot)$  为概率密度函数。

激光接收电路噪声由背景和电路噪声组成, 通常由高斯分布表示其概率分布<sup>[14]</sup>为

$$G(V_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{V_n^2}{2\sigma^2}\right), \quad (14)$$

式中:  $\sigma$  为等效方均根噪声电压。

表 1 理论仿真及实验参数

Table 1 Theoretical simulation and experimental parameters

$m / (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	Magnetic induction $B / \text{T}$	$r / \text{mm}$	$L / \text{mm}$	Rotating speed $\omega / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	Gain
$8.95 \times 10^5$	1.1	1	10	2000	200
Equivalent noise voltage $\sigma_n / \text{mV}$	Threshold level / mV	Magnetic resolution / $\mu\text{T}$	Laser emission power / W	Laser emission pulse width / ns	Analog digital sampling frequency / MHz
10~60	100~600	0.012	10~20	5~30	100

#### 4.1 激光发射脉冲峰值功率与探测概率的关系

讨论激光发射功率对目标捕获率和方位角测量概率分布的影响。设置脉冲激光波形宽度为 15 ns, 检测阈值为 300 mV, 接收电路噪声等效电压为 30 mV, 脉冲激光的脉冲峰值功率为 10~20 W。不同激光发射功率的激光回波信号如图 4 所示, 与之相应的目标捕获率和方位角测量概率分布如图 5 所示。由图 4 和图 5 可知, 随着脉冲激光发射功率的增大, 回波信号功率增大, 方位角测量精度和目标捕获率提高, 但目标捕获率变化曲线的斜率逐渐减小。这主要是因为回波信号斜率直接影响阈值检测法的捕获概率, 随着发射功率的增大, 回波信号上升沿

应用蒙特卡罗方法, 结合 MD 信号模型和方位角解算模型, 研究方位角探测精度分布特性。首先设定初始参数, 根据初始参数获取周期磁信号。在磁信号上叠加由概率密度函数产生的随机噪声, 模拟实际磁测量信号。采用峰值检测法处理该信号, 从而获取  $t_{p1}$  和  $t_{p2}$ 。结合脉冲激光回波时刻, 根据(12)式解算目标方位角。将流程重复 10000 次, 从而获取目标方位角探测概率特性。相关参数设置如表 1 所示。考察激光发射功率、激光发射脉宽、不同阈值电压, 以及接收电路噪声对方位测量概率统计分布的影响。

斜率增大, 因此捕获概率增大并趋近于 1。

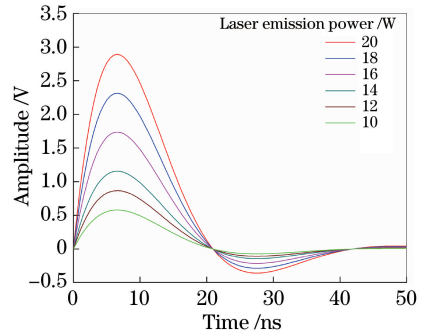


图 4 不同激光发射功率时的激光回波信号  
Fig. 4 Laser echo signals with different laser emission powers

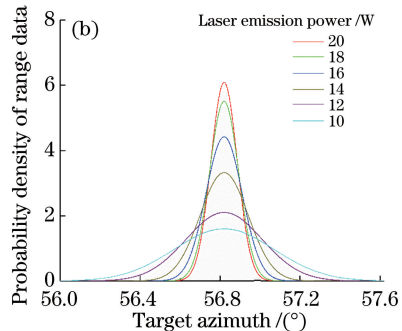
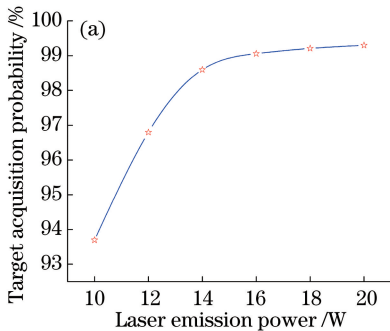


图 5 不同激光发射功率时的(a)目标捕获率与(b)方位角测量概率分布

Fig. 5 (a) Target capture rate and (b) probability distribution of azimuth measurement with different laser emission powers

#### 4.2 激光发射脉宽与探测概率的关系

研究激光发射脉宽对目标捕获率的影响。调整发射功率为 16 W, 脉宽变化范围为 5~30 ns, 其他

参数不变。不同激光发射脉宽时的激光回波信号如图 6 所示, 对应的目标捕获率和方位角测量概率分布分别如图 7 所示。由图 7 可知, 回波脉宽与发射

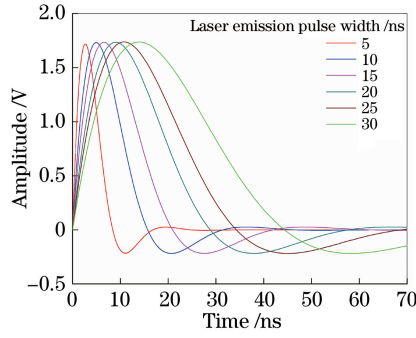


图 6 不同激光发射脉宽时的激光回波信号

Fig. 6 Laser echo signals with different laser emission pulse widths

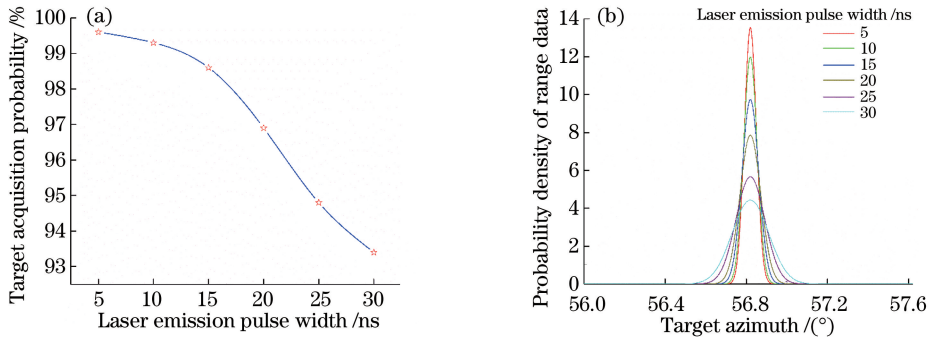


图 7 不同激光发射脉宽时的(a)目标捕获率与(b)方位角测量概率分布

Fig. 7 (a) Target capture rate and (b) probability distribution of azimuth measurement with different laser emission pulse widths

脉宽的变化保持一致,但方位测量精度和目标捕获率随着发射脉宽的增大而降低。这主要是因为回波脉宽随着发射脉宽的增大而展宽,回波信号上升沿斜率减小,因此方位测量精度和目标捕获率逐渐降低。

### 4.3 阈值电压对探测概率的影响

分析阈值电压与目标捕获率的关系。将阈值电压设置为 100~600 mV,其他参数不变。不同阈值电压对应的目标捕获率和方位角测量概率分布如图 8 所示。由图 8 可知,随着阈值电压的增大,概率密度分布呈现先集中后分散的趋势。当阈值增大至 300 mV 时,概率密度分布最集中;当阈值小于

300 mV 时,概率密度分布出现缓慢的上升沿和陡峭的下降沿;当阈值大于 300 mV 时,概率密度分布出现陡峭的上升沿和缓慢的下降沿。随着阈值的增大,概率密度分布向较大的角度移动,这主要是因为随着阈值的增大,被检测点的斜率呈现先增大后减小的趋势,且被检测点所处时刻延后,导致概率密度分布先集中后分散,且向较大的角度移动。随着阈值电压的增大,目标捕获率有轻微的降低,但变化幅度很小。当阈值电压接近回波脉冲峰值时,目标捕获率迅速降低,其主要原因是回波峰值处曲线斜率接近于 0,导致阈值检测法的目标捕获概率迅速降低。

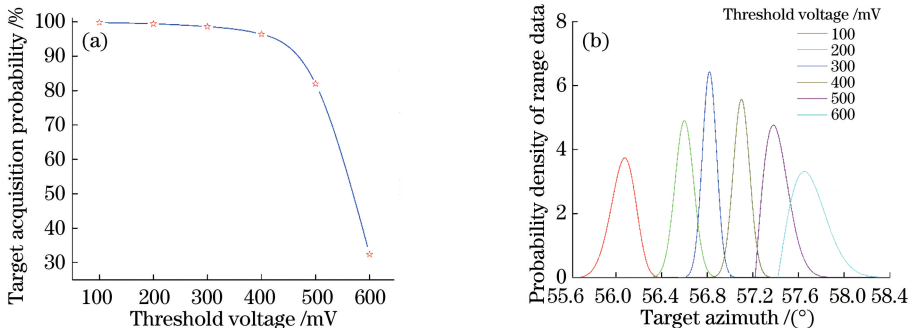


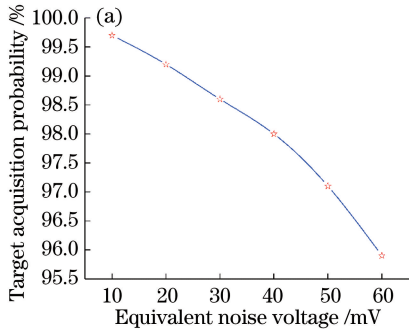
图 8 不同阈值电压时的(a)目标捕获率与(b)方位角测量概率分布

Fig. 8 (a) Target capture rate and (b) probability distribution of azimuth measurement with different threshold voltages



#### 4.4 等效噪声电压对探测概率的影响

研究接收电路噪声对目标捕获率的影响。将接收电路噪声电压设置为 10~60 mV,其他参数保持不变,目标方位角测量概率分布和捕获率变化曲线



如图 9 所示。由图 9 可知,随着等效噪声电压的增大,方位角测量分布曲线的脉宽增大,幅值减小,捕获率降低,目标方位角测量精度和捕获率随着接收电路噪声电压的增大而降低。

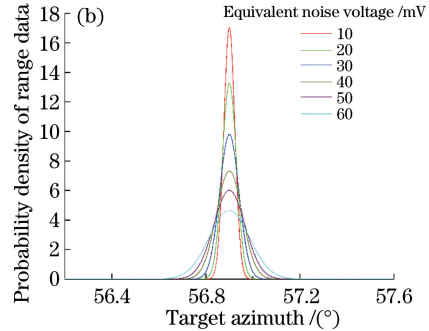


图 9 不同接收电路等效噪声电压时的(a)目标捕获率与(b)方位角测量概率分布

Fig. 9 (a) Target capture rate and (b) probability distribution of azimuth measurement with different equivalent noise voltages in the receiving circuit

## 5 结 论

针对水下近程来袭目标的探测问题,提出了一种利用流体动力驱动的随机定位方法。采用光、磁 2 种测量手段探测目标方位信息,基于重尾函数推导了目标回波方程,建立了磁探测系统 MD 等效模型,采用峰值检测法和阈值检测法分别解算光磁测量信号。应用蒙特卡罗方法,结合 MD 信号模型和方位角解算模型,研究方位角探测精度分布特性。结果表明:方位角测量精度和目标捕获率随着脉冲激光发射功率的增大而提高,但目标捕获率变化曲线的斜率逐渐减小;方位角测量精度和目标捕获率随着发射脉宽的增大而降低;随着阈值电压的增大,方位角测量精度在检测阈值为 300 mV 时达到最大,目标捕获率有轻微的降低但变化幅度很小,当阈值电压接近回波脉冲峰值时,目标捕获率迅速降低;方位角测量精度和目标捕获率随着接收电路噪声的增大而降低。所提出的水下探测方法降低了系统功耗,精度高,稳定性好,扩大了系统作用范围,为水下目标全向探测提供了一种新的流体驱动简易自主探测方法,在水下小型运动体中具有良好的应用前景。

### 参 考 文 献

[1] Liu Z M. China's maritime security strategy under the changing international situation: a structural study[J]. *International Review*, 2011(3): 1-9.  
刘中民. 国际海洋形势变革背景下的中国海洋安全战略: 一种框架性的研究[J]. *国际观察*, 2011(3): 1-9.

[2] Xiao C M, Li H, Peng P. Development of torpedo defence systems of foreign surface ships[J]. *Torpedo Technology*, 2014, 22(2): 150-156.  
肖昌美, 李恒, 彭佩. 国外水面舰艇鱼雷防御系统发展现状及趋势[J]. *鱼雷技术*, 2014, 22(2): 150-156.

[3] David E. Pre-emptive defence: guarding against the modern torpedo [J]. *Jane's International Defence Review*, 2011, 44: 48-53.

[4] Kreisher O. Torpedo defence against state of the art torpedos[J]. *Naval Forces*, 2009, 30(4): 84-88.

[5] Wang X H, Yang Y H, Heng H, *et al.* Anti-torpedo torpedo development status and operational use[J]. *Winged Missiles Journal*, 2012(5): 54-58.  
王新华, 杨迎化, 衡辉, 等. 反鱼雷鱼雷发展现状及作战使用[J]. *飞航导弹*, 2012(5): 54-58.

[6] Wang F, Zhao Y, Zhang Y, *et al.* Range accuracy limitation of pulse ranging systems based on Geiger mode single-photon detectors [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(29): 5561-5566.

[7] Xu X B, Zhang H, Zhang X J, *et al.* Effect of plane target characteristics on ranging distribution for pulse laser detection [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65 (21): 210601.  
徐孝彬, 张合, 张祥金, 等. 脉冲激光探测平面目标特性对测距分布的影响[J]. *物理学报*, 2016, 65 (21): 210601.

[8] Guo J, Zhang H, Wang X F. Beam spread characteristics of laser fuze in the rain [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 0113001.  
郭婧, 张合, 王晓锋. 激光引信在降雨中的光束扩展特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0113001.

[9] Schwartz S A, Wallenstein K J, Lee D S. Automatic

- target recognition system for detection and classification of objects in water: US7916933 [P]. 2011-03-29.
- [10] Bruno F, Bianco G, Muzzupappa M, *et al.* Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66(4): 508-518.
- [11] Gan L, Zhang H, Zhang X J. Research on large FOV single transceiver bidirectional-driving detection technology for laser fuze [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(8): 942-947.  
甘霖, 张合, 张祥金. 激光引信双向驱动单发单收大视场探测技术研究 [J]. 兵工学报, 2013, 34(8): 942-947.
- [12] Tan Y Y, Zhang H, Zha B T. Underwater single beam circumferentially scanning detection system using range-gated receiver and adaptive filter [J]. Journal of Modern Optics, 2017, 64(16): 1648-1656.
- [13] Jiang H J, Lai J C, Yan W, *et al.* Theoretical distribution of range data obtained by laser radar and its applications [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 278-284.
- [14] Zhang W, Zhang H, Chen Y, *et al.* Angle measurement uncertainty statistical distribution of pulsed laser quadrant photodetector[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(1): 012901.  
张伟, 张合, 陈勇, 等. 脉冲激光四象限探测器测角不确定性统计分布 [J]. 物理学报, 2017, 66(1): 012901.