

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311005

基于光锥扩束机理的单脉冲激光近程静态探测方法*

甘霖, 张合

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室 南京 210094)

摘要:针对激光近程全向探测问题,在激光近程动态周向扫描探测机理研究基础上,提出了基于光锥扩束机理的单脉冲激光近程静态周向探测方法。基于激光近场探测理论和静态探测场空间几何分布,推导出基于光锥扩束机理的单脉冲激光近程静态探测回波方程。构建了单脉冲激光近程测距概率分布模型并搭建了实验室静态探测实验平台,研究了脉冲激光发射功率、倒置反射光锥角、脉冲激光束发散角和目标尺寸投影面积对激光近程周向探测概率分布的影响机制。结果表明:随着发射功率和目标投影尺寸分别从10 W和0.01 m²增加到30 W和0.25 m²,回波信号幅值亦随之从0.16和0.43 μV提升到4.22和5.95 μV,随着倒置反射光锥角和光束发散角分别从30°和10 mrad增加到120°和30 mrad,回波信号幅值随之从3.18和2.52 μV降低到0.88和1.92 μV;周向探测概率分布随着发射功率和目标投影尺寸的增加而半宽减小且峰值增加并向左偏离,随着倒置反射光锥角和光束发散角的增加半宽增大且峰值降低并向右偏离;探测分布对称性并不受以上4种因素影响。

关键词: 近程探测;单脉冲激光;光锥扩束;概率分布

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Short-range static detection method of single pulse laser based on light cone beam expansion mechanism

Gan Lin, Zhang He

(Intelligent ammunition of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The problem of laser short-range omnidirectional detection is considered. Based on the research of laser short-range dynamic circumferential scanning detection mechanism, a single-pulse laser short-range static circumferential detection method based on light cone beam expansion mechanism is proposed. Based on the theory of laser near-field detection and the spatial geometric relationship of static detection field, the echo equation of single pulse laser short-range static detection using the mechanism of light cone expansion is derived. The probability distribution model of single pulse laser short-range ranging is formulated and the laboratory static detection experiment is established. The influence mechanism of pulse laser emission power, inverted reflection cone angle, pulse laser beam divergence angle and target size projection area on the probability distribution of laser short-range circumferential detection is studied. The results show that as the transmit power and the target projection size increase from 10 W and 0.01 m² to 30 W and 0.25 m², the echo signal amplitude also increases from 0.16 and 0.43 μV to 4.22 and 5.95 μV. As the inverted reflective cone angle and beam divergence angle increase from 30° and 10 mrad to 120° and 30 mrad, the echo signal amplitude decreases from 3.18 and 2.52 μV to 0.88 and 1.92 μV. The circumferential detection probability distribution decreases with the increase of the transmission power and the target projection size, and the peak increases and deviates to the left. With the increase of the inverted reflected light cone angle and the beam divergence angle, the half width increases and the peak decreases and deviates to the right. The symmetry of detection distribution is not affected by the above 4 factors.

Keywords: proximity detection; single pulse laser; light cone expansion; probability distribution

0 引言

脉冲激光近程探测技术是武器装备重要的近程感知探测手段^[1-2],例如典型的北约NF2000、美国PX581迫弹,以色列Python5空空导弹以及我国AJK10舰空导弹等^[3],均采用激光近程探测技术识别目标距离信息。然而,现代战争环境对激光近程探测技术提出更高要求,例如基于主动防护概念的各类“硬杀伤”拦截弹药^[4]、基于定向聚能起爆理念的高效精确打击弹药^[5-7],均要求激光近程探测技术需在原有点对点线状探测基础上拓展范围,具备全向覆盖面状探测能力。

针对激光近程全向探测问题,Castillón等^[8]采用水下主动光学3D扫描技术探测水下微小类目标,徐国权等^[9]利用条纹相机方法实现激光探测目标3D成像,以上近程探测方法分辨率较高,但面阵探测器探测单元多、计算方法复杂、成像时间长;此外,美国Thales导弹、英国THOMSON-THORN导弹以及北京理工大学和8358研究所等^[10-11],通过布置多个激光器与探测器,实现激光空间全向探测,该类方法覆盖的探测空间大,但多组探测收发器和探测窗口势必增大体积且降低稳定性;区别于上述激光近程静态全向探测方法,文献[12-14]提出了激光近程动态全向探测方法,以电机带动双侧反射镜周期旋转实现脉冲激光近程动态扫描探测,然而电机和双侧反射镜的加入,造成空间布局冗余、电磁环境干扰复杂^[15]。

本文针对激光近程全向探测问题,在前期大量激光近程动态周向扫描探测机理研究基础上^[16-18],提出了基于光锥扩束机理的单脉冲激光近程静态周向探测方法。研究了单脉冲激光光锥扩束近程静态周向探测回波特性,基于激光近场探测理论和静态探测场空间几何关系,在激光回波方程一般形式上,推导出基于光锥扩束机理的单脉冲激光近程静态探测回波方程,构建了单脉冲激光近程测距概率分布模型,结合实验室探测对比实验,从理论与实验两方面入手,探讨了脉冲激光发射功率、倒置反射光锥角、脉冲激光束发散角和目标尺寸投影面积对单脉冲激光近程静态周向距离探测概率分布的影响机制。

1 单脉冲激光光锥扩束近程静态周向探测回波特性

单脉冲激光光锥扩束近程静态周向探测原理如图1所示。其主要由扩束光锥和激光近程探测系统构成,激光器被驱动电路触发点亮,同时,触发信号同步扮演距离探测起点信号,脉冲激光束经透镜整形后,透过中空全反射镜,由光锥扩束后形成静态周向探测场,目标信号由光锥

搜集反射至中空全反射镜,经二次反射后被接收透镜聚焦至光敏探测器,最后进行光电信号处理与运算,完成目标静态周向探测。

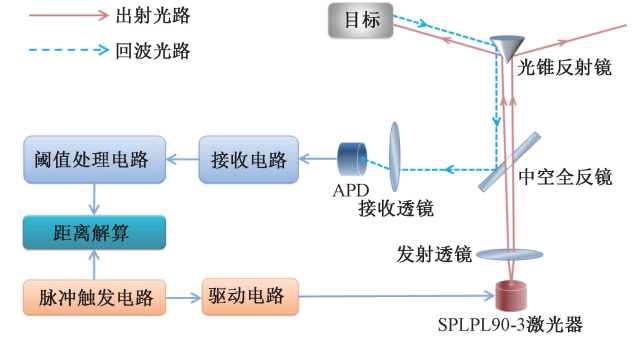


图1 单脉冲激光光锥扩束近程静态周向探测原理图

Fig.1 Short-range static circumferential detection principle of single-pulse laser cone beam expansion

在脉冲激光近程探测过程中,激光回波方程一般形式为^[2]:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R_t^2} \frac{\sigma}{4\pi R_r^2} \frac{\pi D^2}{4} \eta_a \eta_s \quad (1)$$

其中, P_t 代表激光发射功率, G_t 为发射增益, R_t 和 R_r 分别脉冲发射和接收系统与目标间距,为目标距离, σ 为目标激光散射面积, D 为接收系统通光口径, η_a 和 η_s 分别为大气以及探测光学系统激光透过率。

雷达散射截面方程可通过单位面元的单站雷达散射截面方程积分获取:

$$\sigma = \iint 4\pi f_r(\beta) \cos^2 \beta dA \quad (2)$$

其中, $f_r(\cdot)$ 为双向反射分布函数, β 为入射角, dA 为散射截面单位面元。

从而激光回波方程的积分形式又可表示为:

$$P_r(t) = \frac{\pi D^2}{4R_r^2} \eta_a \eta_s \iint E(x, y, z) P_t(t') f_r(\beta) \cos \beta dx dy \quad (3)$$

其中, $E(x, y, z)$ 代表高斯分布光照度, x 和 y 分别为脉冲激光散射截面单位面元的横坐标和纵坐标。

高斯分布光照度可表示为:

$$E(x, y, z) = \frac{2}{\pi \omega_0^2 (1 + (\lambda d_0 / (\pi \omega_0^2))^2)} \times \exp\left(-2 \left(\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2 (1 + (\lambda d_0 / (\pi \omega_0^2))^2)}\right)\right) \quad (4)$$

其中, ω_0 为光源处激光束腰半径, $\omega_0 = 2\lambda / \pi \phi$, ϕ 为激光束散角, λ 是脉冲激光波长, d_0 为目标与高斯光束中心间距。

以重尾函数来拟合激光器输出脉冲,其形式为:

$$f(t) = P_0(t/\tau)^2 \exp(-t/\tau) \quad (5)$$

其中, P_0 代表脉冲激光的峰值发射功率, τ 为激光脉宽。

将式(2)、(3)代入式(5), 可得:

$$P_r(t) = \frac{P_0 D^2}{2\omega_0^2(1 + (\lambda d_0 / (\pi\omega_0^2)) R_r^2)} \eta_a^2 \eta_s \times \iint \exp\left(-2\left(\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2(1 + (\lambda d_0 / (\pi\omega_0^2)) R_r^2)}\right)\right) \times \exp\left(-\left(\frac{t - 2R_r/c - 2x \tan\beta/c}{\tau}\right)\right) \times \left(\frac{t - 2R_r/c - 2x \tan\beta/c}{\tau}\right)^2 f_r(\beta) \cos\beta dx dy \quad (6)$$

由于本文采用倒置反射光锥扩展单脉冲激光扫描探测范围, 脉冲激光发射光束照射到光锥后, 形成周向静态扫描探测场, 感知超近程来袭目标, 规定光锥顶点为坐标原点, 光锥中轴线竖直向下为 Z 轴, 水平向右方向为 Y 轴, 依据右手螺旋定则建立如图2所示坐标系, 设置半锥角为 θ , 圆锥顶点距离激光探测平面距离为 d 。

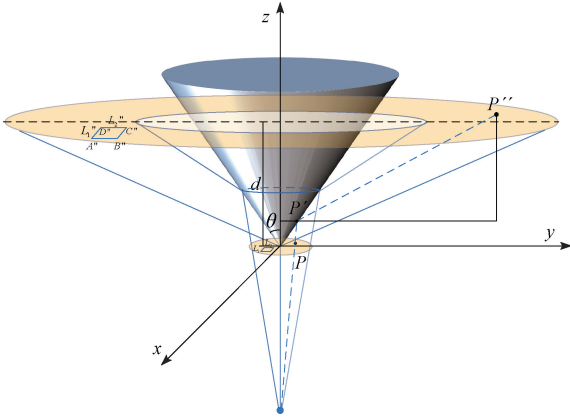


图2 激光静态探测场空间分布模型

Fig.2 Spatial distribution model of laser static detection field

假设目标在激光探测平面照射部分投影为 $L_1' \times L_2'$ 部分, 该投影部分4顶点分别为 A'' 、 B'' 、 C'' 、 D'' , 设定目标在激光探测平面照射部分投影在光锥顶点处激光发射光束平面的投影为 $L_1 \times L_2$, 该投影部分四顶点分别为 A 、 B 、 C 、 D , 则该部分投影产生的脉冲激光回波功率为:

$$P_r(t) = \frac{P_0 D^2 f_r(\beta) \cos\beta}{2\omega_0^2(1 + (\lambda d_0 / (\pi\omega_0^2)) R_r^2)} \eta_a^2 \eta_s \int_{x_D}^{x_A} \exp\left(-2\left(\frac{x^2}{\omega_0^2(1 + (\lambda d_0 / (\pi\omega_0^2)) R_r^2)}\right)\right) \times \exp\left(-\left(\frac{t - 2R_r/c - 2x \tan\beta/c}{\tau}\right)\right) \left(\frac{t - 2R_r/c - 2x \tan\beta/c}{\tau}\right)^2 \times \int_{y_A}^{y_B} \exp\left(-2\left(\frac{y^2}{\omega_0^2(1 + (\lambda d_0 / (\pi\omega_0^2)) R_r^2)}\right)\right) dy \quad (7)$$

其中, x_D 、 x_A 分别为顶点 D 、 A 对应横坐标, $x_A - x_D = L_1$, y_A 、 y_B 分别为顶点 A 、 B 对应纵坐标, $y_B - y_A = L_2$ 。取激光探测平面任意一点 p'' , 其在反射光锥面和光锥顶点处激光发射光束平面的光路投影分别为 p' 点和 p 点, 设 p 点坐标为 $(x, y, 0)$, 依据光学传播理论和模型位置几何关系, 则 p'' 点坐标对应为 $(x, y + (d - \sqrt{x^2 + y^2} / \tan\theta) \tan 2\theta, d)$ 。

基于回波轮廓波形与回波功率的关系:

$$j(t) = 4P_r(t) R_r^2 / \eta_a^2 \eta_s \pi D^2 \quad (8)$$

从而基于光锥扩束机理的单脉冲激光近程静态探测回波轮廓波形方程可表示为:

$$j(t) = \frac{2P_0 f_r(\beta) \cos\beta}{\omega_0^2 \pi (1 + (\lambda d_0 / (\pi\omega_0^2)) R_r^2)} \times \int_{x_D}^{x_A} \exp\left(-2\left(\frac{x^2}{\omega_0^2(1 + (\lambda d_0 / (\pi\omega_0^2)) R_r^2)}\right)\right) \times \exp\left(-\left(\frac{t - 2R_r/c - 2x \tan\beta/c}{\tau}\right)\right) \left(\frac{t - 2R_r/c - 2x \tan\beta/c}{\tau}\right)^2 \times dx \int_{y_A}^{y_B} \exp\left(-2\left(\frac{y^2}{\omega_0^2(1 + (\lambda d_0 / (\pi\omega_0^2)) R_r^2)}\right)\right) dy \quad (9)$$

2 单脉冲激光近程静态周向探测概率分布

2.1 单脉冲激光近程测距概率分布模型

本文提出的基于光锥扩束机理的单脉冲激光近程静态周向探测系统的噪声由背景噪声和电路噪声组成, 该系统噪声可用高斯分布表示, 其概率分布为^[18]:

$$\rho(V_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{V_n^2}{2\sigma^2}\right) \quad (10)$$

其中, σ 代表电路等效均方根噪声电压, V_n 是探测系统信号接收电路噪声电压。

综合探测系统噪声信号和脉冲激光回波信号, 探测信号概率分布由两者叠加表示为:

$$\rho(V_{sn}) = \rho[V_n + j(t)] \quad (11)$$

本文以阈值检测法作为激光回波信号处理方法, 在时刻 t 之前的目标探测概率可用积分形式表示为:

$$P(t, V_{th}) = \int_{V_{th}}^{\infty} \rho[V_n + j(t)] dV_{sn} \quad (12)$$

其中, V_{th} 为回波信号阈值电压。上式可推导为:

$$P(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\int_{V_{th}}^{\infty} \rho[V_n + j(t + \Delta t)] dV_{sn} - \int_{V_{th}}^{\infty} \rho[V_n + j(t)] dV_{sn} \right) / \Delta t \quad (13)$$

根据偏导数以及微积分相关定理, 上述公式可表述为:

$$P(t) = \rho[V_{th} - j(t)] \cdot j'(t) \quad (14)$$

将 $t = 2r/c$ 代入,以探测系统和目标之间的距离 r 代替时间 t , 可得系统距离探测概率密度分布为:

$$P(r) = \rho[V_{th} - j(r)] \cdot j'(r) \cdot \frac{2}{c} \quad (15)$$

经过上述推导,结合式(9)和(15)可以看出,单脉冲激光近程静态周向探测概率分布函数和激光发射功率 P_0 成正比,同时与倒置反射光锥角 θ 、光束发散角 ϕ 、目标投影尺寸面积等因素密切相关,接下来分别探讨上述因素对单脉冲激光近程静态周向探测概率分布的影响规律,相关仿真计算参数如表 1 所示。

表 1 仿真计算模型参数设置

Table 1 Simulation calculation model parameter setting

参数	取值	参数	取值
P_0/W	10~30	τ/ns	15
$\theta/(\circ)$	30~120	V_{th}/mV	100
$\phi/mrad$	10~30	λ/nm	905
$L_1^* \times L_2^*/cm^2$	$10 \times 10 \sim 50 \times 50$	$c/(m \cdot s^{-1})$	3×10^8
d_0/m	8	σ/mV	50
$\beta/(\circ)$	45	γ/m	8

2.2 脉冲激光发射功率对周向探测分布及精度的影响

脉冲激光发射功率是单脉冲激光近程静态周向探测概率分布函数中的重要参数,首先研究单脉冲激光近程静态周向距离探测概率分布和脉冲激光发射功率的内在关系。设定光束发散角为 20 mrad,目标尺寸投影面积为 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$,倒置反射光锥角 75° ,激光发射功率从 10 W 增加到 30 W,步长为 5 W,在不同脉冲激光发射功率下的脉冲激光回波轮廓如图 3 所示,静态周向距离探测概率分布和目标探测概率分别如图 4、5 所示。随着脉冲激光发射功率的增加,脉冲激光回波轮廓幅值随之提高,静态周向距离探测概率分布对称性保持不变,概率分

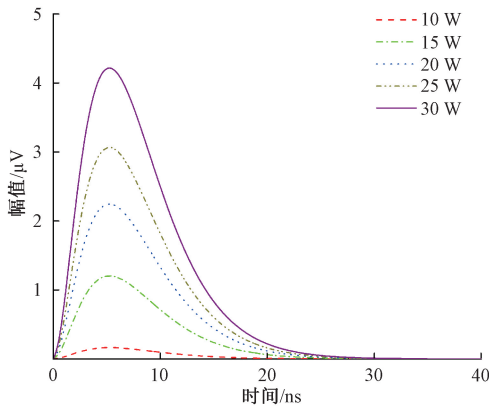


图 3 不同发射功率激光回波信号

Fig. 3 Laser echo signals with different transmit power

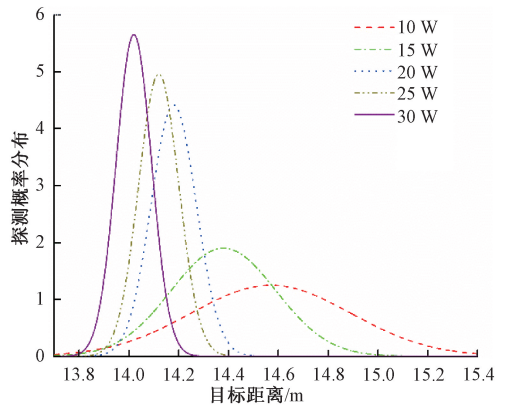


图 4 不同发射功率周向探测概率分布

Fig. 4 Circumferential detection probability distribution of different transmission power

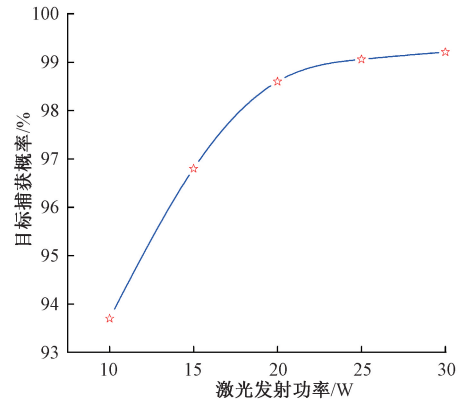


图 5 不同发射功率目标探测概率

Fig. 5 Target detection probability of different transmission power

布半宽减小且峰值增加,逐渐向左偏离真实值,目标探测概率提高但斜率逐渐减小,其原因为阈值检测点的斜率随着回波幅值的增加而变陡,导致检测点被测时间减小,从而距离测量结果向左偏移且探测概率逐渐增大并趋近于 1。

2.3 倒置反射光锥角对周向探测分布及精度的影响

倒置反射光锥是本文核心部件,其锥角控制着单脉冲激光束的空间分布范围,决定了激光探测目标的回波功率,从而影响目标探测概率。为了探寻倒置反射光锥角对单脉冲激光近程静态周向距离探测概率分布的影响规律,设定激光发射功率为 20 W,光束发散角为 20 mrad,目标尺寸投影面积为 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$,倒置反射光锥角从 30° 增加至 120° ,步长为 15° ,在不同倒置反射光锥角下的脉冲激光回波轮廓如图 6 所示,静态周向距离探测概率分布和目标探测概率分别如图 7、8 所示。随着倒置反射光锥角的增加,脉冲激光回波轮廓幅值随之降低,静态周向距离探测概率分布对称性保持不变,概率分布半宽增大且峰值降低,逐渐向右偏离真实值,目标探测

概率逐渐降低,因为阈值检测点的斜率随着回波幅值的减小而变缓,导致检测点的被测时间增大,从而距离测量结果向右偏移且目标探测概率降低。

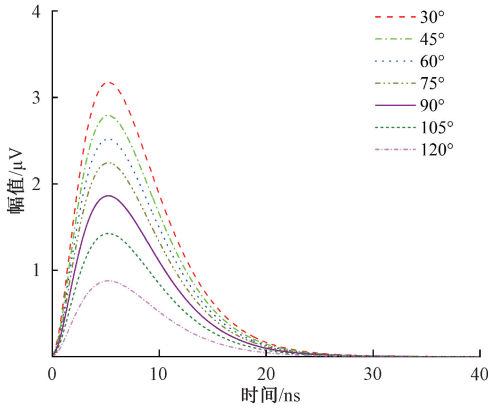


图6 不同光锥角激光回波信号

Fig. 6 Laser echo signals with different cone angles

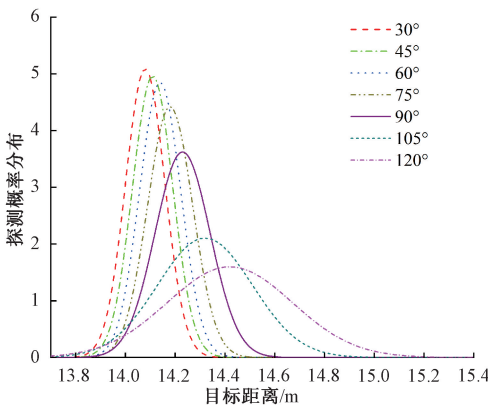


图7 不同光锥角周向探测概率分布

Fig. 7 Circumferential detection probability distribution of different light cone angles

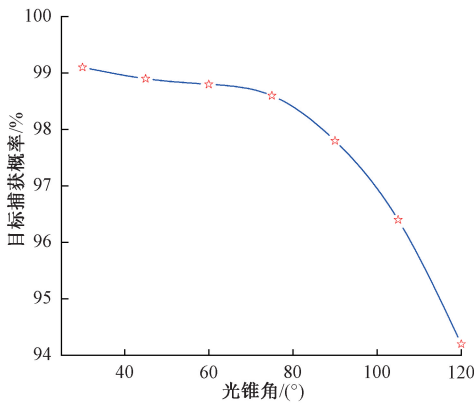


图8 不同光锥角目标探测概率

Fig. 8 Target detection probability of different light cone angles

2.4 脉冲激光光束发散角对周向探测分布及精度的影响

由于本文利用单脉冲激光束扩展方式提高空间探测范围,光束发散角会对反射光锥扩束效果产生影响,从而改变扩展光束静态探测范围,影响目标回波功率和探测概率分布,最后分析光束发散角对系统探测性能的影响。设定激光发射功率为20 W,目标尺寸投影面积为30 cm×30 cm,倒置反射光锥角为75°,光束发散角从10 mrad 增加至30 mrad,步长为5 mrad,在不同光束发散角下的脉冲激光回波轮廓如图9所示,静态周向距离探测概率分布和目标探测概率分别如图10、11所示。随着光束发散角的增加,脉冲激光回波轮廓幅值随之降低,静态周向距离探测概率分布对称性保持不变,概率分布半宽增大且峰值降低,逐渐向右偏离真实值,目标探测概率逐渐降低,其原因为阈值检测点的斜率随着回波幅值的减小而变缓,导致检测点的被测时间增大,从而距离测量结果向右偏移且目标探测概率降低。

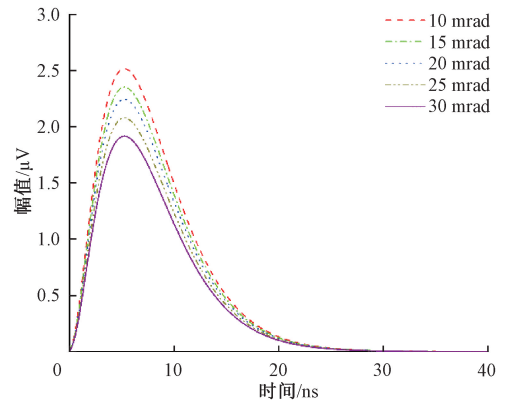


图9 不同激光束散角激光回波信号

Fig. 9 Laser echo signals of different laser beam divergence angles

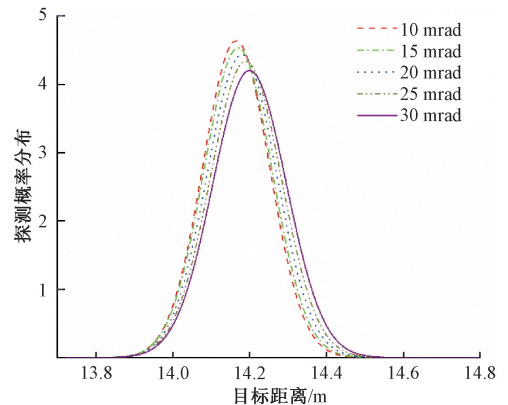


图10 不同激光束散角周向探测概率分布

Fig. 10 Circumferential detection probability distribution of different laser beam divergence angles

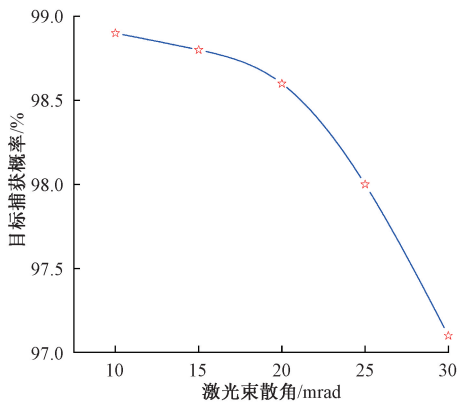


图 11 不同激光束散角目标探测概率

Fig. 11 Target detection probability of different laser beam divergence angles

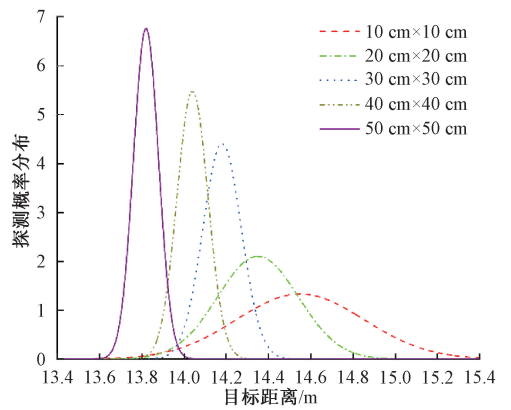


图 13 不同目标投影面积周向探测概率分布

Fig. 13 Circumferential detection probability distribution of different target projection area

2.5 目标投影面积对周向探测分布及精度的影响

目标投影尺寸面积代表目标被激光周向探测场覆盖范围,而目标回波功率正是该部分面积光照产生的冲激响应,接下来考察在不同目标投影尺寸面积下单脉冲激光近程静态周向距离探测概率分布情况。设定激光发射功率为 20 W,光束发散角为 20 mrad,倒置反射光锥角为 75°,目标尺寸投影面积从 10 cm×10 cm 增加至 50 cm×50 cm,在不同目标尺寸投影面积下的脉冲激光回波轮廓如图 12 所示,静态周向距离探测概率分布和目标探测概率分别如图 13、14 所示。随着目标尺寸投影面积的增加,脉冲激光回波轮廓幅值随之提高,静态周向距离探测概率分布对称性保持不变,概率分布半宽减小且峰值增加,逐渐向左偏离真实值,目标探测概率提高但斜率逐渐减小,其原因为阈值检测点的斜率随着目标尺寸投影面积的增加而变陡,导致检测点的被测时间减小,从而距离测量结果向左偏移且探测概率逐渐增大并趋近于 1。

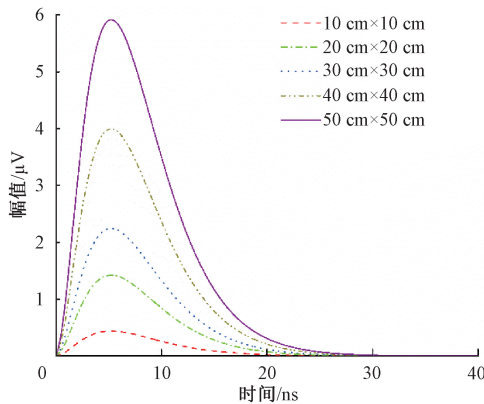


图 12 不同目标投影面积激光回波信号

Fig. 12 Laser echo signals of different target projection areas

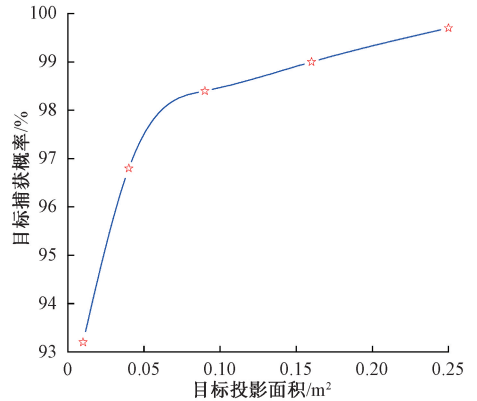


图 14 不同目标投影面积目标探测概率

Fig. 14 Target detection probability of different target projection area

3 实验与分析

在理论构建和模型数值分析基础上,为进一步探寻单脉冲激光近程静态周向探测性能以及影响因素,构建实际激光静态周向探测平台进行实验分析验证,倒置光锥单脉冲激光静态周向探测平台如图 15 所示。该探测平台由静态周向扫描系统(倒置反射光锥、透光整流罩)和激光信号探测系统(脉冲激光发射系统、脉冲激光接收系统、中空全反镜、解算电路、电源等)组成。探测流程和原理如下:脉冲激光发射系统调制出脉冲周期信号,驱动点亮激光二极管,脉冲激光光源经过发射准直透镜聚焦整形后,照射至倒置反射光锥,经光锥反射,形成周向静态扫描探测场,目标回波激光信号由光锥反射至中空全反镜,二次反射后进入激光接收系统光电转换,最后由解算电路测量目标距离信息。



图 15 倒置光锥单脉冲激光静态周向探测实验平台

Fig. 15 Inverted light cone single pulse laser static circumferential detection experimental platform

首先验证脉冲激光发射功率对单脉冲激光近程静态周向距离探测概率分布及精度的影响。调整脉冲激光发射准直光学系统将光束发散角控制在 20 mrad , 改变目标尺寸将投影面积控制在 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, 选择光锥角为 75° 的倒置反射光锥, 调整脉冲激光发射系统参数, 以 5 W 为递增步长, 将发射功率控制在 $10 \sim 30 \text{ W}$ 之间, 在不同脉冲激光发射功率下每组静态探测实验进行 200 次。实测探测结果概率密度分布和目标探测概率分别如图 16、17 所示。实验结果与理论推导均表现为高斯分布, 发射功率增加会导致分布半宽减小、峰值提高且目标探测概率提高但斜率逐渐减小, 因实验样本量偏小以及实测激光回波与理论回波的信号差异等影响因素, 导致实测均值低于理论均值, 实测分布较理论分析向左迁移, 且随着发

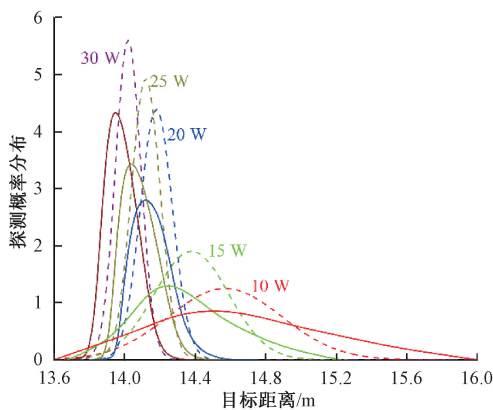


图 16 不同激光发射功率周向探测实测概率分布

Fig. 16 Measured probability distribution of circumferential detection with different transmission power

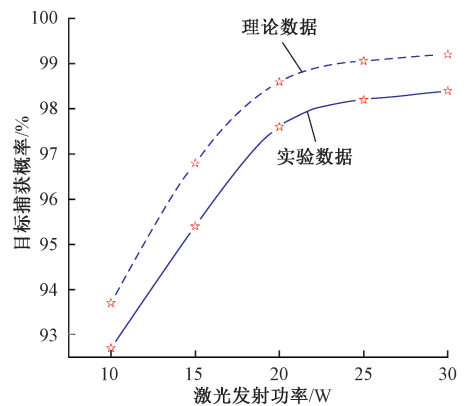
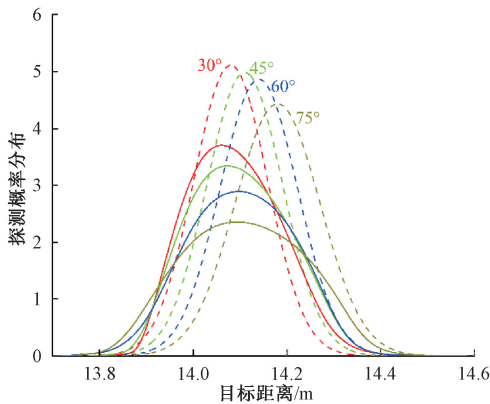


图 17 不同发射功率实测探测概率

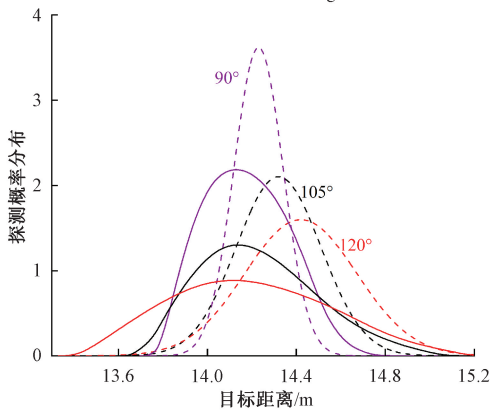
Fig. 17 Measured detection probability of different transmission power

射功率的增加, 回波信号脉宽被压缩, 信号检测点斜率提升, 导致左迁趋势渐弱。

其次验证倒置反射光锥角对单脉冲激光近程静态周向距离探测概率分布及精度的影响。调整脉冲激光发射系统将光束发散角控制在 20 mrad , 脉冲激光发射功率控制在 20 W , 改变目标尺寸将投影面积控制在 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, 选择不同锥角的倒置反射光锥, 使其以 15° 步长从 30° 增加至 120° , 在不同倒置反射光锥角下每组静态探测实验进行 200 次。实测探测结果概率密度分布和目标探测概率分别如图 18、19 所示。由于本组有 7 项不同光锥角对应曲线, 现将 7 组曲线分两图显示, 以便更清晰呈现实验与理论对比差异, 实验与理论推导均表现为高斯分布, 反射光锥角增加会导致分布半宽增大、峰值降低且目



(a) 光锥角 $30^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 时周向探测实测概率分布
(a) Measured probability distribution of circumferential detection with the light cone $30^{\circ}\sim 75^{\circ}$



(b) 光锥角 $90^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 时周向探测实测概率分布
(b) Measured probability distribution of circumferential detection with the light cone $90^{\circ}\sim 120^{\circ}$

图 18 实测探测结果概率分布

Fig. 18 Measured probability distribution of circumferential detection

标探测概率逐渐降低,同样因实验样本量以及实测与理论回波信号差异等因素,导致实测均值低于理论均值,实测分布较理论分析向左迁移,且随着反射光锥角的增加,回波信号脉宽扩展,信号检测点斜率降低,导致左迁趋势渐强。

接下来验证光束发散角对单脉冲激光近程静态周向距离探测概率分布及精度的影响。调整脉冲激光发射系统将脉冲激光发射功率控制在 20 W,改变目标尺寸将投影面积控制在 $30\text{ cm}\times 30\text{ cm}$,选择光锥角为 75° 的倒置反射光锥,调整脉冲激光发射准直光学系统,将光束发散角控制在以 5 mrad 为步长,从 10 mrad 递增至 30 mrad,在不同光束发散角下每组静态探测实验进行 200 次。实测探测结果概率密度分布和目标探测概率分别如图 20、21 所示。实验与理论推导均表现为高斯分布,光束发散角增加会导致分布半宽增大、峰值降低且目标探测概率逐渐降低,因实验样本量以及实测与理论回波信号差异等因素,导致实测均值低于理论均值,实测分布较理论分析向左迁移,且随着光束发散角的增加,回波信号脉宽扩展,信号检测点斜率降低,以至于左迁趋势渐强。

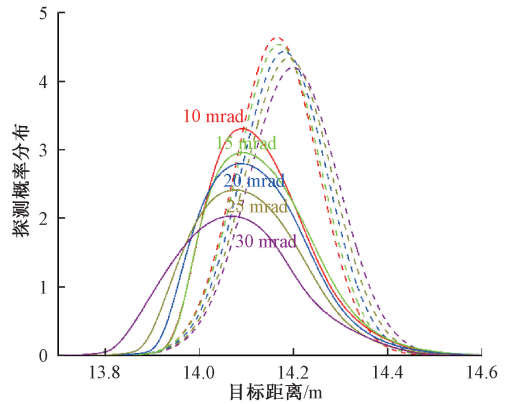


图 20 不同光束发散角周向探测实测概率分布

Fig. 20 Measured probability distribution of circumferential detection with different beam divergence angles

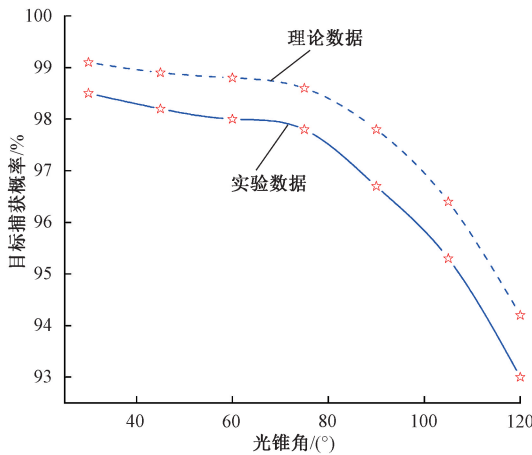


图 19 不同光锥角实测探测概率

Fig. 19 Measured detection probability of different light cone angles

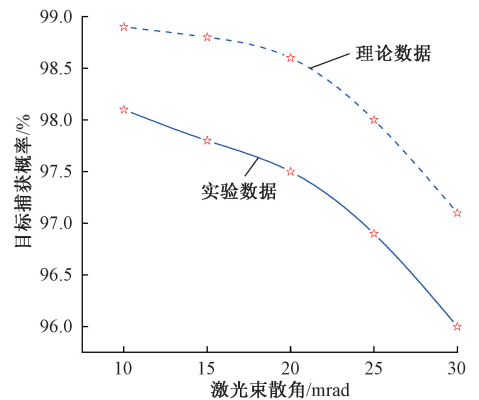


图 21 不同激光束散角实测探测概率

Fig. 21 Measured detection probability of different laser beam divergence angles

最后实验探讨目标尺寸投影面积对单脉冲激光近程静态周向距离探测概率分布及精度的影响。调整脉冲激光发射系统将光束发散角控制在 20 mrad, 脉冲激光发射功率控制在 20 W, 选择光锥角为 75° 的倒置反射光锥, 调整目标尺寸, 将投影面积控制在 10 cm×10 cm 增加至 50 cm×50 cm, 在不同目标尺寸投影面积下每组静态探测实验进行 200 次。实测探测结果概率密度分布和目标探测概率分别如图 22、23 所示。实验结果表现为近高斯分布, 目标尺寸投影面积增加会导致分布半宽减小、峰值提高且目标探测概率逐渐提高, 实验样本量以及实测与理论回波信号差异等影响因素同样导致了实测均值低于理论均值, 实测分布较理论分析向左迁移, 且随着目标尺寸投影面积的增加, 回波信号脉宽压缩, 信号检测点斜率变陡, 以至于左迁趋势渐弱。

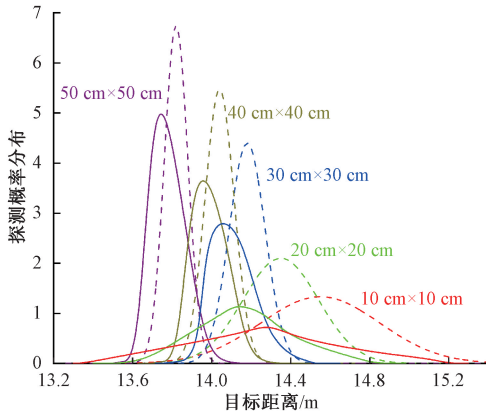


图 22 不同目标尺寸投影面积周向探测实测概率分布
Fig. 22 Measured probability distribution of circumferential detection with different target projected area

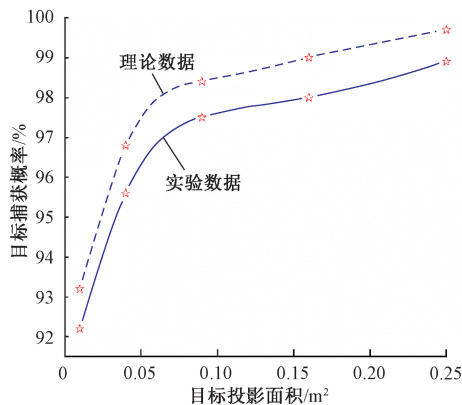


图 23 不同目标投影面积实测探测概率
Fig. 23 Measured detection probability of different target projection area

4 结 论

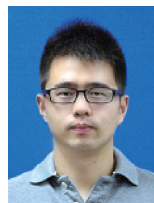
本文针对激光近程全向探测问题, 提出了基于光锥扩束机理的单脉冲激光近程静态周向探测方法。在激光近场探测理论和静态探测场空间几何关系基础上, 推导出基于光锥扩束机理的单脉冲激光近程静态探测回波方程, 构建了单脉冲激光近程测距概率分布模型并搭建了实验室静态探测实验, 结果表明: 1) 随着发射功率的增加, 回波幅值提高, 探测分布半宽减小且峰值增加并向左偏离且探测概率逐渐增大并趋近于 1; 2) 随着倒置反射光锥角的增加, 回波幅值降低, 探测分布半宽增大且峰值降低并向右偏离且探测概率逐渐降低; 3) 随着光束发散角的增加, 回波幅值降低, 探测分布半宽增大且峰值降低并向右偏离且探测概率逐渐降低; 4) 随着目标投影尺寸的增加, 回波幅值提高, 探测分布半宽减小且峰值增加并逐渐向左偏离且探测概率逐渐增大。除上述特征表现外, 探测分布对称性并不被上述因素影响。本文提出的激光近程全向探测方法在最低功耗条件下, 扩大了探测系统作用范围, 为目标全向探测提供了一种新的静态易行探测方法。

参考文献

- [1] 查冰婷, 袁海璐, 马少杰, 等. 单光束扩束扫描激光周视探测系统参数对探测能力的影响[J]. 物理学报, 2019, 68(7): 79-88.
ZHA B T, YUAN H L, MA SH J, et al. Influence of single-beam expanding scanning laser circumferential detection system parameters on detection capability[J]. Acta Physical Sinica, 2019, 68(7): 79-88.
- [2] 陈杉杉, 张合, 徐孝彬. 脉冲激光引信探测平面目标的回波特性研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(6): 1095-1102.
CHEN SH SH, ZHANG H, XU X B. Echo characteristic of planar target in pulsed laser fuze detection[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(6): 1095-1102.
- [3] 吴越, 黄中华, 过凯, 等. 激光引信无源干扰技术发展及应用研究[J]. 光电技术应用, 2021, 36(4): 1-4.
WU Y, HUANG ZH H, GUO K, et al. Research on development and application of laser fuze passive jamming technology[J]. Electro-Optic Technology Application, 2021, 36(4): 1-4.
- [4] 刘昭涛, 陈日明, 黄家露. 主动拦截防护系统坐标变换方法研究[J]. 火控雷达技术, 2022, 51(3): 31-35.
LIU ZH T, CHEN R M, HUANG J L. Research on coordinate conversion of an active interception and protection system[J]. Fire Control Radar Technology, 2022, 51(3): 31-35.

- [5] 赵聘,陈朗,李金河,等. 聚能射流侵彻隔板形成的前驱冲击波起爆不同温度炸药特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(1): 45-55.
ZHAO P, CHEN L, LI J H, et al. The characteristics of explosives initiated by precursor shock waves in shaped charge jet penetrating a bulkhead at different temperatures[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(1): 45-55.
- [6] SVIRSKY O V, VLASOVA M A. On the penetration capability of shaped charges with conical and hemispherical liners [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2019, 55: 739-743.
- [7] FEDOROV S V, LADOV S V, SVIRSKY O V, et al. Analysis of the penetration of shaped charges with hemispherical and semi-ellipsoidal liners of degressive thickness [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2021, 57: 620-634.
- [8] CASTILLÓN M, PALOMER A, FOREST J, et al. State of the art of underwater active optical 3D scanners[J]. Sensors, 2019, 19(23): 5161.
- [9] 徐国权, 张一帆, 万建伟, 等. 高分辨率三维成像激光雷达的应用[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 1628002.
XU G Q, ZHANG Y F, WAN J W, et al. Application of high-resolution three-dimensional imaging lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1628002.
- [10] GAN L, ZHANG H, LIU B, et al. Influence of high overload on the collimating lenses of laser ranging systems[J]. Defence Technology, 2020, 16(2): 354-361.
- [11] 蔡克荣, 余曜, 高志林, 等. 激光引信在防空导弹高效引战配合中的应用研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(4): 16-21.
CAI K R, YU Y, GAO ZH L, et al. Research on application of laser fuze for efficient fuze-warhead coordination in the air-defense missile[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 16-21.
- [12] 徐孝彬, 张合. 激光周向探测系统最佳脉冲频率与扫描转速[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 195-201.
XU X B, ZHANG H. Optimal pulsed frequency and scanning speed of laser circumferential detection system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 195-201.
- [13] 谭亚运, 张合, 查冰婷. 水中单光束扫描激光引信捕获率建模与仿真[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(11): 67-72.
TAN Y Y, ZHANG H, ZHA B T. Modeling and simulation of underwater single-beam scanning laser fuze acquisition rate [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(11): 67-72.
- [14] 陈杉杉, 张合, 徐孝彬. 脉冲激光周向探测地面目标捕获建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 1-11.
CHEN SH SH, ZHANG H, XU X B. Modeling and simulation of acquisition for ground target by pulsed laser circular-viewing detection [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(2): 1-11.
- [15] 甘霖, 王科, 许子涵, 等. 周期扫描磁信号特征对光磁复合方位探测统计分布的影响[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 235-243.
GAN L, WANG K, XU Z H, et al. Influence of periodically scanning magnetic signal characteristics on the statistical distribution of laser-magnetic composite azimuth detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 235-243.
- [16] GAN L, ZHANG H. Short-range azimuth measurement method based on the adaptive filtering mechanism using laser and magnetism [J]. Applied Optics, 2018, 57(20): 5749-5757.
- [17] 甘霖, 张合. 光-磁复合方位动态探测概率密度统计分布[J]. 兵工学报, 2018, 39(12): 2338-2344.
GAN L, ZHANG H. Statistical probability density distribution of azimuth dynamic detection based on laser and magnetism [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(12): 2338-2344.
- [18] 甘霖, 张合. 基于流体驱动的水下激光自主扫描近程方位探测方法[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0304004.
GAN L, ZHANG H. Underwater laser autonomous scanning short-range azimuth detection method based on fluid-driven [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0304004.

作者简介



甘霖(通信作者), 2009年于南京理工大学获得学士学位, 2014年于南京理工大学获得博士学位, 现为南京理工大学副教授, 主要研究方向为激光探测制导以及近程方位测量技术。

E-mail: kg568605@163.com

Gan Lin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2009, and received his Ph. D. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2014. He is currently an associate professor at Nanjing University of Science and Technology. His main research interests include laser detection guidance and short range azimuth measurement technology.