

脉冲激光周向探测地面目标捕获建模与仿真

陈杉杉, 张 合, 徐孝彬

(南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

摘 要: 针对对地攻击火箭弹单发毁伤概率低的问题, 设计了一种激光周向探测系统, 旨在提高对地攻击火箭弹的目标捕获概率。推导了平面目标脉冲激光回波波形的解析式及最小可探测光功率, 并结合对地攻击火箭弹的末端弹道特性, 建立了激光周向探测系统的弹目交会模型。运用蒙特卡罗算法仿真分析了对地攻击火箭弹采用不同探测系统时目标捕获概率随脉冲激光重复频率和扫描转速的变化规律, 探讨了弹速和命中精度对于目标捕获概率的影响, 获得最佳激光重复频率与扫描转速。仿真结果表明: 当脉冲激光重复频率为 5 kHz, 扫描转速为 10000r/min 时能实现目标的有效捕获; 采用激光周向探测系统能有效提高目标捕获概率, 提升单发毁伤效能, 为激光周向探测系统在对地攻击火箭弹上的应用提供了理论依据。

关键词: 脉冲激光; 目标捕获; 蒙特卡罗; 双向反射分布函数; 目标回波
中图分类号: TJ43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0206001

Modeling and simulation of acquisition for ground target by pulsed laser circular-viewing detection

Chen Shanshan, Zhang He, Xu Xiaobin

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

Abstract: Aiming at improving the damage probability of ground attack rocket effectively, the laser circular-viewing detection system was adopted to capture the target credibly. Computational formulas for the laser echo and the minimal detectable optical power were proposed to establish the model of the missile-target encounter based on the terminal trajectory characteristics of ground attack rocket. The change regulation of laser repetition frequency and motor scanning speed on the target capture probabilities using different detection systems were analyzed by using Monte-Carlo method to select the optimal repetition frequency and scanning speed. And the effects of rocket projectile velocity and hit accuracy on target capture probabilities were discussed. The experimental results show that the damage probability of single guided rocket projectile is increased effectively by using the laser circular-viewing detection system. Meanwhile the laser repetition frequency is 5 kHz, and scanning speed is 10 000 r/min. Simulated outcome provides the basis for the application of the laser circular-viewing detection system on guided rocket projectile.

Key words: pulsed laser; target acquisition; Monte Carlo; BRDF; target echo

收稿日期: 2017-08-10; 修订日期: 2017-10-28

基金项目: 武器装备预先研究项目(51305020104)

作者简介: 陈杉杉(1991-), 男, 博士生, 主要从事激光探测方面的研究。Email: njstcss@126.com

导师简介: 张合(1957-), 男, 教授, 博士, 主要从事智能探测与控制技术方面的研究。Email: hezhangz@mail.njust.edu.cn

0 引言

对地攻击火箭弹可通过加装制导配件具备精确打击能力,是直升机机载武器的重要发展方向之一^[1]。受限于弹体自身结构与成本,对地攻击火箭弹的命中精度不理想,目标捕获概率较低,单发毁伤效果较差。脉冲激光具有方向性好、瞬时功率大和抗干扰能力强等优点^[2],在工业、军事、科研等领域得到了广泛的应用。利用脉冲激光束进行全周向探测的激光周向探测系统具有较高的测距和定位精度,可用于对地攻击火箭弹,实现目标的有效捕获,提高对地攻击火箭弹的单发毁伤概率。

激光周向探测系统常用的布局方案有多辐射方案、分区方案、分区扫描方案和同步扫描方案^[3]。针对采用同步扫描方案的激光周向探测系统的研究较少。甘霖等通过建立弹目交会模型进行来袭目标的捕获情况的研究^[4],但没有考虑到交会态势的影响。查冰婷等研究了最低脉冲频率和扫描转速的变化规律^[5],但其只适用于低速交会的情况,无法直接应用于高速交会情况。徐孝彬等研究了激光脉冲频率和扫描转速对目标捕获概率的影响,并选取最佳脉冲频率和扫描转速^[6],但以扫描光束是否在最大测程内照射到目标作为捕获依据,忽略了目标表面散射特性对于激光回波的影响。谭亚运等以目标激光回波功率作为捕获依据,分析了该系统应用于水下时的捕获情况^[7],但没有考虑到噪声对于探测性能的影响,获得的结论有一定的局限性。

文中在设计新型激光周向探测系统的基础上,先建立了平面目标回波功率的计算模型,根据探测概率和虚警概率得到最小可探测光功率,建立了弹目交会模型,最后结合上述内容采用蒙特卡罗算法仿真模拟弹目交会过程,分析了不同弹目交会条件下不同的探测系统对对地攻击火箭弹目标捕获的影响。

1 激光周向探测系统

激光周向探测系统采用同步扫描方案,由脉冲激光发射系统、高速扫描系统、脉冲激光接收系统和

信号处理系统组成,组成示意图如图 1 所示。

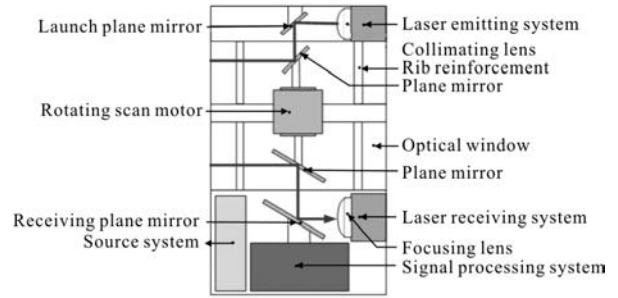


图 1 激光周向探测系统组成示意图

Fig.1 Component diagram of laser circular-viewing detection system

系统工作原理:对地攻击火箭弹发射后,电源系统开始供电,经一定延时后,发射系统驱动半导体激光器发射一个高峰值功率的脉冲激光光束。该脉冲激光先经过发射透镜准直,再依次通过全反平面镜进行光路折转。随着扫描系统的高速旋转,折转后的反射光束通过光学窗口在大气中传输探测。脉冲激光照射在目标表面上,形成后向散射光信号。后向散射光信号通过光学窗口和两个全反平面镜后被接收聚焦透镜接收,聚焦到光电探测器的光敏面上,得到激光回波信号。信号处理系统处理激光回波信号得到目标信息。激光周向探测系统工作原理框图如图 2 所示。

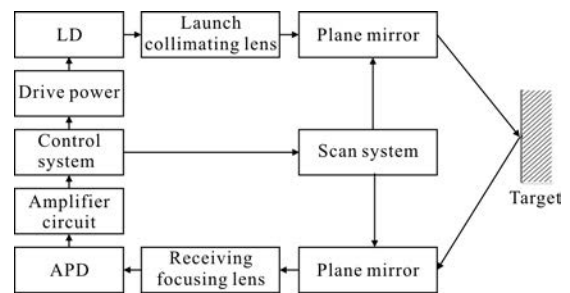


图 2 激光周向探测系统工作原理框图

Fig.2 Principle block diagram of laser circular-viewing detection system

2 脉冲激光近程探测目标回波特性

在激光周向探测系统中,由于收发间隙较小,且发射口径和接收孔径远小于系统与目标之间的距离,因此探测激光束和激光回波可认为在同一点发出和接收^[8]。其探测平面目标的坐标系如图 3 所示。平面目标与 $O_0x_0y_0z_0$ 平面重合,探测激光束从点 M 发

出,其中心与平面目标相交于点 N , MN 间距为 l_0 , 光束与 $o_0y_0z_0$ 平面成角 θ 。

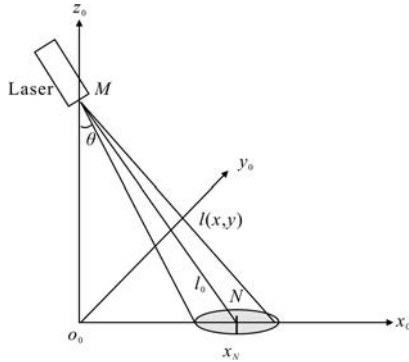


图 3 激光周向探测系统探测平面目标的坐标系
Fig.3 Coordinate system of detecting the plane target for laser circular-viewing detection system

假设激光周向探测系统半导体激光器发出的光束经过光学透镜组准直和整形后成高斯光束,其光强分布为^[9]:

$$g(r) = \frac{2P}{\pi\omega^2} \exp(-2r^2/\omega^2) \quad (1)$$

式中: r 为激光束横截面上的点到激光束中心的距离; P 为激光功率; ω 为高斯光束在目标处的半径, $\omega = \omega_0 \sqrt{1 + [\lambda l / (\pi\omega_0^2)]^2}$, l 为目标距离, ω_0 为高斯光束在光源处的束腰半径, $\omega_0 = 2\lambda / (\pi\phi)$, ϕ 为光束发散角, λ 为脉冲激光的波长。

采用重尾函数来描述激光发射脉冲的时域波形,相较于常用的高斯函数,重尾函数能够准确地描述激光发射脉冲上升沿陡峭和下降沿平缓的特征^[6]。

$$p(t) = \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 \varepsilon(t) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2)$$

式中: $\tau = T_{1/2} / 1.22$, $T_{1/2}$ 是激光脉冲的半峰宽度; $\varepsilon(t)$ 为单位阶跃函数。

激光回波脉冲波形响应与目标表面的特性有关,脉冲响应 $h(t)$ 可表示为:

$$h(t) = 4\pi\rho(\theta)g(r)\delta\left(t - \frac{2l(x,y)}{c}\right) \quad (3)$$

式中: $\delta(\cdot)$ 为冲激函数; $\rho(\theta)$ 为目标表面单位面元的双向分布函数; $l(x,y)$ 为目标表面单位面元到激光周向探测系统的距离; c 为光速。

$\rho(\theta)$ 可根据双向分布函数获得^[10-11],

$$\rho(\theta) = \frac{k_b k_r^2 \cos\alpha \ln(1 + \cos^2 \theta)}{\pi \ln 2 \left[1 + (k_r^2 - 1) \cos\alpha\right]} \times \exp\left[-|b| (1 - \cos\gamma)^d\right] + \frac{k_d (\cos\theta)^{2f_d}}{\pi} \quad (4)$$

其中

$$\cos\alpha = \frac{\cos\theta}{\cos\gamma} \quad (5)$$

$$\cos^2\gamma = \frac{(\cos^2\theta + \sin^2\theta \cos\varphi + 1)}{2} \quad (6)$$

式中:公式(4)等号右边第一、第二部分分别代表粗糙表面的相干分量和朗伯分量; α 为微观小平面对法线方向与平面法线之间的夹角; γ 为微观平面上本地坐标系的入射角; k_b, k_r, k_d, b, d 和 f_d 为待定参数。

激光光束与目标平面任一点的距离可简化为:

$$l(x,y) = \frac{x}{\sin\theta} \quad (7)$$

令 $t' = 2x_0 / c \sin\theta$, $\tau_0 = \sqrt{2} \omega / c \sin\theta$, 则脉冲响应可表示为^[12]:

$$h(t) = \frac{4\sqrt{\pi} \rho(\theta) P}{\tau_0} \exp\left[-\left(\frac{t-t'}{\tau_0}\right)^2\right] \quad (8)$$

激光脉冲回波波形是激光发射脉冲波形与目标脉冲响应的卷积^[13],最终可得到回波波形为:

$$q(t) = \frac{2\sqrt{\pi} \rho(\theta) P}{\tau^2} \times \left[\alpha_1 \tau_0 \exp\left(-\frac{\alpha_1^2}{\tau_0^2}\right) + \sqrt{\pi} \left(\alpha_1 + \frac{\tau_0^2}{2}\right) \operatorname{erfc}\left(-\frac{\alpha_1}{\tau_0}\right) \right] \times \exp\left[-\left(\alpha_1 + \frac{\tau_0^2}{4\tau}\right) / \tau\right] \quad (9)$$

式中: $\alpha_1 = t - t' - \tau_0^2 / 2\tau$; $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为互补误差函数。

激光周向探测系统是近程探测系统,忽略大气扰动和散斑效应的影响,最终可得回波功率方程为:

$$P_r(t) = \frac{\pi\sqrt{\pi} D^2 \eta_r \eta_t \tau_a^2}{2d^2} \times \left[\alpha_1 \tau_0 \exp\left(-\frac{\alpha_1^2}{\tau_0^2}\right) + \sqrt{\pi} \left(\alpha_1 + \frac{\tau_0^2}{2}\right) \operatorname{erfc}\left(-\frac{\alpha_1}{\tau_0}\right) \right] \times \exp\left[-\left(\alpha_1 + \frac{\tau_0^2}{4\tau}\right) / \tau\right] \quad (10)$$

式中: D 为光学接收口径; η_t 为发射系统的光学效率; η_r 为接收系统的光学效率; τ_a 为单程大气传输系数; d 为目标距离。

激光回波脉冲是激光发射脉冲经过大气传输、背景辐射、目标散射和光电接收与转换等环节作用

后形成的。形成过程中回波信号与多种噪声信号相混叠，极易造成脉冲激光周向探测系统的虚警或漏探测。根据探测概率和虚警概率确定最小可探测光功率，当回波信号峰值功率超过最小可探测光功率时，即认为系统成功探测到目标。

设有无回波信号时的均值电流分别为 I_1 和 I_2 ，有无回波信号时的电流均方差分别为 σ_1 和 σ_2 ，其表达式为^[14]：

$$\begin{cases} I_1=R_i(P_b+P_r)M+I_d \\ I_2=R_iP_bM+I_d \\ \sigma_1^2=2e[(P_b+P_r)R_i+I_d]M^\kappa B_w+\frac{4kTB_w}{R_1} \\ \sigma_2^2=2e(P_bR_i+I_d)M^\kappa B_w+\frac{4kTB_w}{R_1} \end{cases} \quad (11)$$

式中： R_i 为探测器的电流响应度； P_r 为探测器接收的回波功率； M 为探测器的倍增因子； I_d 为暗电流； P_b 为探测器的背景光功率； B_w 为噪声频谱带宽； e 为单位电荷； k 为波尔兹曼常数； R_1 为 APD 探测器的负载电阻； T 为绝对温度； κ 为一个与探测器所用材料相关的常数。

令 $\alpha_d=\frac{(I_d-I_1)}{\sqrt{2}\sigma_1}$ ， $\xi=\frac{(I_1-I_2)}{\sqrt{2}\sigma_2}$ ，最终可得最小可探测光功率为^[15]：

$$P_{\min}=\frac{2\sqrt{2}(\xi+\alpha_d)\sigma_2+4\alpha^2eB_wM^{x-1}}{2R_iM} \quad (12)$$

令 $\alpha_d=0.06$ (对应于探测概率为 0.93)， $\xi=2.63$ (对应于虚警概率为 10^{-4})，结合表 1 中的参数^[16]，计算可得最小可探测光功率为 1.46×10^{-7} W。

表 1 系统参数

Tab.1 System parameters

Parameters	Value	Parameters	Value
$R_i/A\cdot W^{-1}$	0.38	P_b/nW	4
M	100	I_d/nA	10
κ	2.4	$R_1/k\Omega$	1.2
B_w/MHz	40	T/K	343

3 激光周向探测系统目标捕获模型

对地攻击火箭弹在攻击地面目标的过程中，以地面目标的顶部中心点作为瞄准点，其末段弹道近

似为与地面成一定夹角的直线。由于瞄准点距离地面有一定的高度，对地攻击火箭弹在地面的散布中心与瞄准点在地面的垂直投影不重合，其末段弹道与地面的交点大部分落在地面目标的后方^[17]。当采用常用的触发引信引爆战斗部时，对地攻击火箭弹的落点散布中心位于目标的后方，直接导致捕获目标的概率较小，对目标的毁伤效果较低。当弹道倾角较小时、瞄准点较高时，捕获概率进一步降低，对地攻击火箭弹甚至无法实现对目标的有效毁伤。

针对这种特殊的弹目交会情况，采用激光周向探测系统实现对目标的有效捕获，提高对地攻击火箭弹对目标的毁伤效果。采用触发引信的对地攻击火箭弹的炸点散布示意图如图 4 所示。

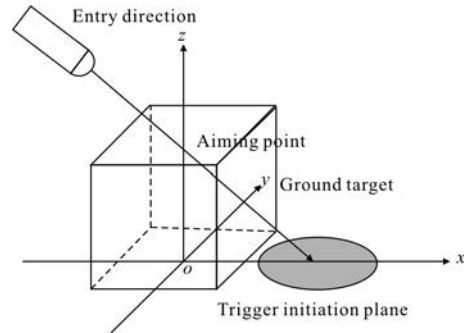


图 4 炸点散布示意图

Fig.4 Schematic diagram of the trigger point spread

3.1 坐标系及其转换关系

研究脉冲激光周向探测系统的捕获率时做如下假设：

- (1) 对地攻击火箭弹的末段弹道简化为一直线，做匀速直线运动，地面目标位于开阔平坦地域；
- (2) 地面目标视为平行六面体；
- (3) 不考虑对地攻击火箭弹攻角和滚转角的影响，即在弹道末段，弹轴与弹道重合^[17]。

为研究弹药在弹道末段与目标的交会模型，建立地面坐标系 $oxyz$ 和弹体坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 。地面坐标系原点为目标中心位置， ox 轴在水平面内沿着发射方向向前， ox 轴铅直向上， oz 轴与 ox 轴和 oy 轴构成右手坐标系；弹体坐标系原点取自脉冲激光发射点，其 o_1x_1 轴沿弹药纵轴方向， o_1y_1 轴垂直于 o_1x_1 轴向上， o_1z_1 轴与 o_1x_1 轴和 o_1y_1 轴构成右手坐标系。弹目交会模型如图 5 所示。

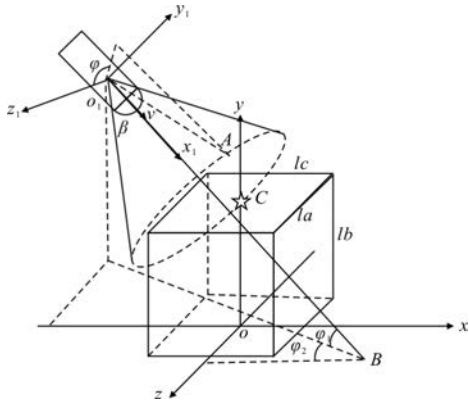


图 5 弹目交会模型

Fig.5 Model of missile-target encounter

弹体坐标系与地面坐标系之间的关系为：

$$[x_1 \ y_1 \ z_1]^T = A[x \ y \ z]^T \quad (13)$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 & \sin\varphi_1 \cos\varphi_2 & -\sin\varphi_2 \\ -\sin\varphi_1 & \cos\varphi_1 & 0 \\ \cos\varphi_1 \sin\varphi_2 & \sin\varphi_1 \sin\varphi_2 & \cos\varphi_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中：\$\varphi_1\$ 和 \$\varphi_2\$ 分别为弹体坐标系相对于地面的俯仰角和偏航角；\$A\$ 为地面坐标系到弹体坐标系的转换矩阵。

3.2 探测模型

如图 5 所示，\$o_1\$ 点为脉冲激光束的出射位置，弹丸以速度 \$v\$ 沿 \$o_1x_1\$ 方向作匀速直线运动，激光束周向扫描出射，\$\beta\$ 为激光周向探测系统的探测方向与弹体速度方向的夹角，速度延长线与地面的交点为 \$B\$ 点，弹头到 \$o_1\$ 点的距离为 \$K\$。

在弹体坐标系中，扫描光束的坐标方位为：

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L\cos\beta \\ L\sin\beta\sin(n\alpha t + \varphi_0) \\ L\sin\beta\cos(n\alpha t + \varphi_0) \end{bmatrix}, n=0,1,\dots \quad (15)$$

式中：\$\alpha=2\pi n/(60f)\$，\$n\$ 为电机扫描转速，\$f\$ 为脉冲激光重复频率；\$L\$ 为脉冲激光光束照射距离；\$\varphi_0\$ 为电机初始方位。

脉冲激光周向探测系统采用四个周向对称均匀分布的加强筋来支撑上下结构，假设每个盲区的方位角大小为 \$\gamma\$，则盲区范围为 \$[-\gamma+k\pi/2, \gamma+k\pi/2]\$，\$k=0,1,\dots\$。

通常情况下，对地攻击火箭弹在以目标顶面中心为瞄准点的靶平面内的制导系统误差为 0，在 \$x\$ 轴和 \$z\$ 轴上的偏差 \$\Delta x\$ 和 \$\Delta z\$ 服从正态分布，即 \$\Delta x \sim N(0, \sigma_x^2)\$，\$\Delta z \sim N(0, \sigma_z^2)\$。通常两者相互独立且 \$\sigma_x = \sigma_z =

CEP/1.177 4, CEP 为圆概率误差。

由图可知弹体速度 \$V\$ 在弹体坐标系中的坐标为 \$(v, 0, 0)^T\$，在地面坐标系中，弹体速度为 \$V_N = A_M V\$，\$A_M = A^{-1}\$ 为弹体坐标系到地面坐标系的转换矩阵。对地攻击火箭弹在靶平面内的落点坐标为 \$(\Delta x, lb, \Delta z)^T\$，参考起始点的坐标为 \$(x_0, y_0, z_0)^T = (\Delta x, lb, \Delta z)^T - V_N \Delta t\$，\$\Delta t\$ 为起始时间量，则扫描光束在地面坐标系中的坐标为：

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + x_t \\ y_0 + y_t \\ z_0 + z_t \end{bmatrix} + A_M V t \quad (16)$$

由图 5 可知，目标表面方程为：

$$\begin{cases} lc/2 \geq x \geq -lc/2 \\ y = lc \\ la/2 \geq z \geq -la/2 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} x = \pm lc/2 \\ lb/2 \geq y \geq 0 \\ la/2 \geq z \geq -la/2 \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} lc/2 \geq x \geq -lc/2 \\ lb/2 \geq y \geq 0 \\ z = \pm la/2 \end{cases} \quad (19)$$

联立公式(16)~(19)，并根据光束传播特性判断扫描光束是否与目标表面有交点。若存在交点，计算扫描光束与目标表面的夹角 \$\theta\$ 和距离 \$R\$。结合激光周向探测系统的参数，根据公式(16)得到回波峰值功率，当回波峰值功率超过最小回波功率时，可认为系统探测到目标。

4 仿真设置

运用蒙特卡罗算法对对地攻击火箭弹采用触发引信、激光周向探测系统和复合探测系统这三种不同探测系统时的目标捕获情况进行仿真分析。

配备触发引信的对地攻击火箭弹，计算其弹道，当弹体最终直接碰击目标时，认为目标被捕获。配备激光周向探测系统的对地攻击火箭弹，当目标的回波峰值功率超过最小可探测功率时，认为目标被捕获。配备两者结合的复合探测系统的对地攻击火箭弹，当弹体直接碰击目标或目标的回波峰值功率超过最小可探测功率时，认为目标被捕获。

设火箭弹末端俯仰角 φ_1 在 $[0, \pi/2]$ 内均匀分布, 偏航角 φ_2 在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 内均匀分布, φ_0 在 $[0, \pi]$ 之间均匀分布。

脉冲激光重复频率和扫描转速是影响脉冲激光周向探测系统的探测性能的重要因素, 而文中主要考察利用脉冲激光周向探测系统提高对地攻击火箭弹的目标捕获概率, 因此在仿真中采用脉冲激光重复频率和扫描转速作为自变量。

仿真流程为:

(1) 首先输入激光周向探测系统和对地攻击火箭弹的初始参数, 包括脉冲激光重复频率、扫描转速、弹速、圆概率误差和地面目标尺寸等;

(2) 根据 3.2 节的内容随机抽样对地攻击火箭弹在靶平面的落地坐标、俯仰角和偏航角等参数, 最后得到对地攻击火箭弹的参考起始点坐标;

(3) 从对地攻击火箭弹的参考起始点出发, 根据俯仰角和偏航角计算其末端弹道, 若与目标表面有交点, 则认为在此次仿真中, 采用触发引信的的对地攻击火箭弹能实现对目标的有效捕获;

(4) 从参考起始点出发, 每经过 $1/f$ 的时间间隔, 根据 3.2 节的内容计算弹体坐标和扫描光束的运动轨迹。若扫描光束与目标表面有交点, 则根据第 2 节的内容计算此时的回波功率, 若回波峰值功率超过最小可探测回波功率, 就认为此次仿真中采用激光周向探测系统的对地攻击火箭弹有效地捕获了目标;

(5) 若采用了激光周向探测系统的对地攻击火箭弹成功捕获目标或火箭弹在整个弹道都没有捕获到目标最终直接打在地面上, 就认为完成了此次仿真。若在步骤(3)或(4)中完成了目标的捕获, 则认为此次仿真中采用复合探测系统的对地攻击火箭弹成功捕获目标;

(6) 重复步骤(2)~(5) 1 000 次, 采用触发引信捕获到目标的次数比上总仿真次数即可得到此扫描转速和重复频率下的目标捕获概率, 同理可计算采用激光周向探测系统和复合探测系统的目标捕获概率;

(7) 扫描转速 $n \in [1\ 000, 60\ 000]$, 步长为 1 000, 重复频率 $f \in [500, 15\ 000]$, 步长为 500。依次选取不同的 n 和 f , 重复步骤(1)~(6)。

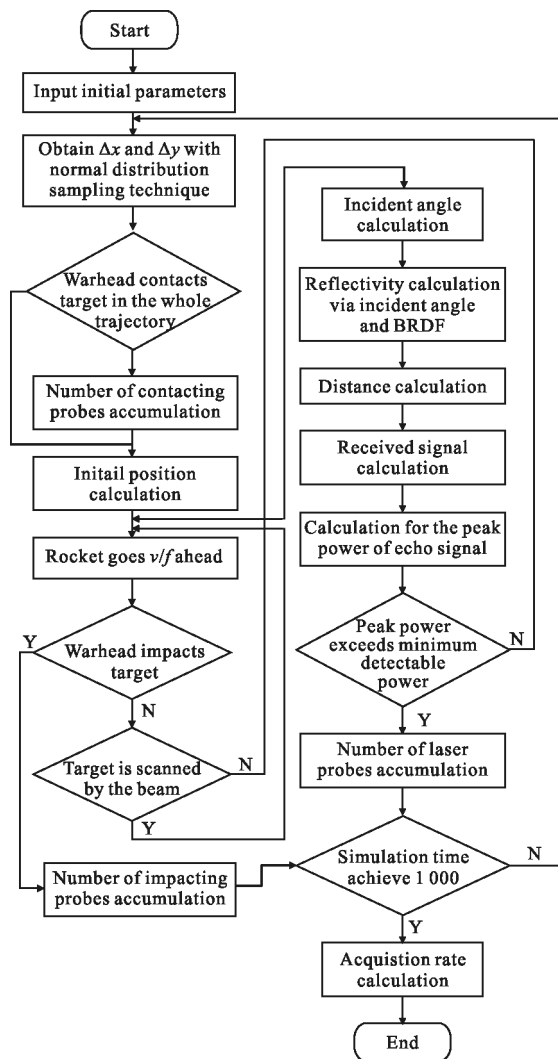


图 6 目标捕获仿真流程图

Fig.6 Simulation flowchart of target acquisition

仿真参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数

Tab.2 Simulation parameters

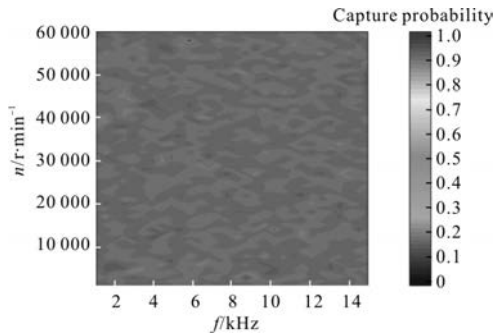
Parameters	Value	Parameters	Value
ϕ/rad	0.1	k_b	0.193 2
$T_{1/2}/\text{ns}$	8	k_r	11.899 9
η_t	0.7	k_d	0.372 3
η_r	0.74	b	-39.567 9
D/mm	15	a	0.825 9
τ_a	0.98	f_d	0.042
P/W	30	la/m	3
λ/nm	905	lb/m	2.5
β	0	lc/m	2.5

5 仿真结果分析

5.1 目标捕获概率总体变化情况

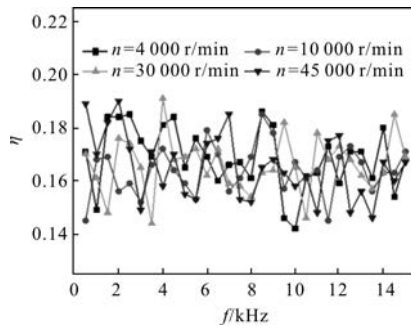
图 7~9 是速度为 240 m/s 和圆概率误差为 5 m 时, 对地攻击火箭弹采用不同探测系统时的目标捕获概率图。

从图 7 中可知, 采用触发引信时, 对地攻击火箭弹的目标捕获概率保持在 0.165 左右, 此时的目标捕获概率与脉冲激光重复频率和扫描转速无关。



(a) 目标捕获总体情况

(a) Capture probability in all cases



(b) 特定转速下的目标捕获情况

(b) Acquisition probability at specific scanning speeds

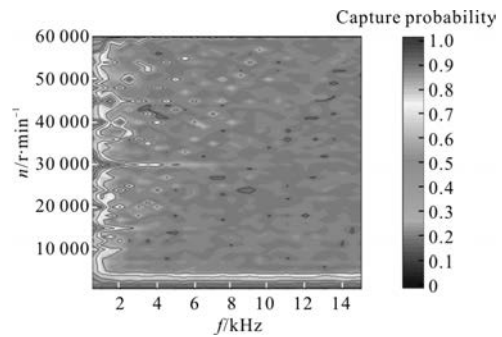
图 7 采用触发引信时的目标捕获情况

Fig.7 Target capture probabilities of contact fuze

从图 8 中可知, 采用脉冲激光周向探测系统时, 对地攻击火箭弹的目标捕获概率与脉冲激光重复频率和扫描转速相关。当 $n \leq 5\ 000\ \text{r/min}$ 时, 目标捕获概率先随着扫描转速的提高而提高, 但很快就在一个固定的数值上保持不变, 且这个数值随着扫描转速的提高而提高。这是由于扫描转速较低时, 相同的交会时间内可进行探测的扫描圈数是有限的, 即使提高脉冲激光重复频率也无法有效捕获目标, 而扫描圈数随着扫描转速的提高而提高。

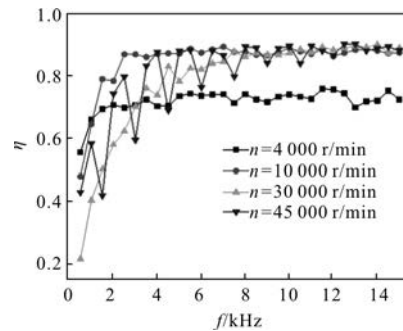
当 $n > 5\ 000\ \text{r/min}$ 时, 目标捕获概率先随着脉冲激光重复频率的提高而提高, 最终在不同的脉冲激光重复频率下收敛于 0.87。这是由于在较高的扫描转速和脉冲激光重复频率的条件下, 决定目标捕获概率的是弹体与目标之间的交会态势, 此时的扫描转速和脉冲激光重复频率是匹配的。

当 $n \leq 10\ 000\ \text{r/min}$, 目标捕获概率不能迅速收敛, 有较大的波动, 扫描转速越高, 收敛时所需的脉冲激光重复频率也越高。这是由于在扫描转速较高的条件下, 当脉冲激光重复频率较低时, 激光周向探测系统扫描一圈能有效发出的脉冲激光束较少, 有效探测光束之间的夹角过大, 漏过目标的概率较大, 此时的扫描转速与脉冲激光重复频率不匹配。



(a) 目标捕获总体情况

(a) Capture probability in all cases



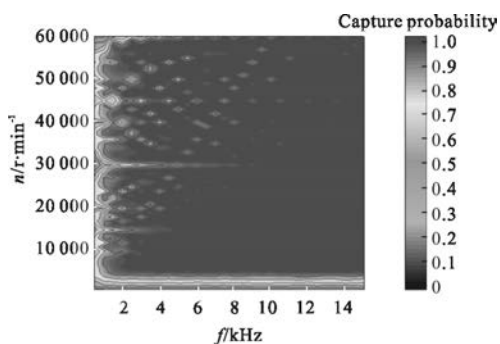
(b) 特定转速下的目标捕获情况

(b) Acquisition probability at specific scan speeds

图 8 采用激光周向探测系统时的目标捕获情况

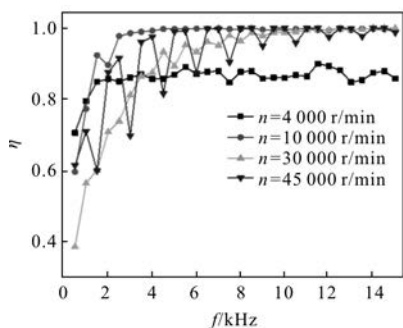
Fig.8 Target capture probabilities of laser circular viewing detection system

从图 9 中可知, 采用复合探测系统时, 目标捕获概率的变化情况与图 8 基本保持一致, 但其收敛数值更高。当 $n > 5\ 000\ \text{r/min}$ 时, 目标捕获概率最终收敛到 1。



(a) 目标捕获总体情况

(a) Capture probability in all cases



(b) 特定转速下的目标捕获情况

(b) Acquisition probability at specific scanning speeds

图 9 采用复合系统时的目标捕获情况

Fig.9 Target capture probabilities of compound system

由图 8~9 可知,当 $n \leq 15\,000$ r/min 时,目标捕获概率能在较低的脉冲激光重复频率下实现收敛。而实现 $n > 15\,000$ r/min 和 $f > 10$ kHz 所需的成本极高,不利于实际的工程应用。因此为了选取最佳的扫描转速和脉冲激光重复频率,分析在 $n \leq 15\,000$ r/min 和 $f \leq 10$ kHz 的条件下,弹速和命中精度对目标捕获概率的影响。

5.2 弹速对目标捕获概率的影响

在命中精度保持不变的情况下,采用触发引信的对地攻击火箭弹的目标捕获概率不随弹速的变化而变化^[17]。

在不同弹速下,采用激光周向探测系统和复合探测系统的对地攻击火箭弹的目标捕获概率随脉冲激光重复频率和扫描转速的变化情况如图 10~11 所示。图 10~11 是在圆概率误差为 5 m 的条件下进行的仿真。

由图 10 可知,采用激光周向探测系统时,其总体变化情况与图 8 保持一致。但随着弹速的增加,目

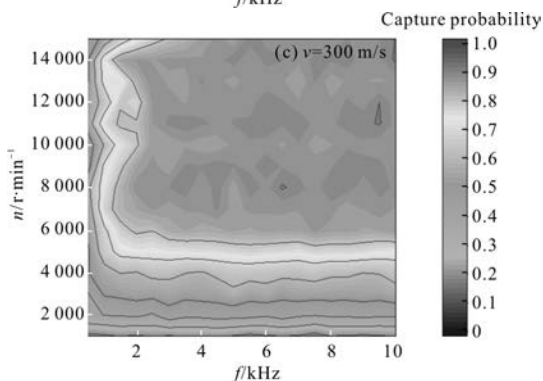
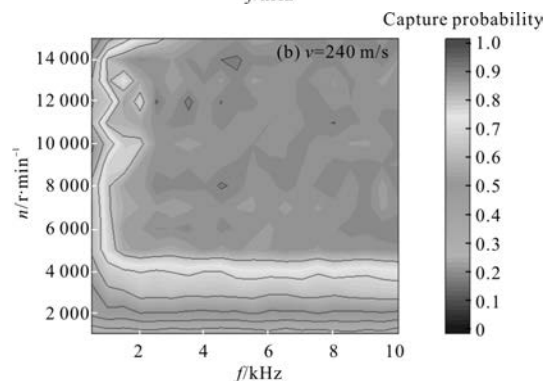
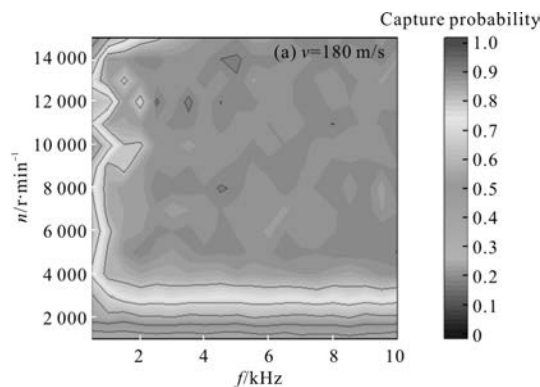


图 10 不同弹速下采用激光周向探测系统时的目标捕获概率

Fig.10 Target capture probabilities of laser circular viewing detection system under different projectile velocity

标捕获概率的收敛速度逐渐减小,收敛区间向高脉冲激光重复频率和高扫描转速方向移动,且收敛数值随着弹速的增加而减少。这是由于弹体与目标的交会时间随着弹速的增加而减小,相同的脉冲激光重复频率和扫描转速下,激光周向探测系统进行有效探测的时间减少。

由图 11 可知,采用复合探测系统时,其总体变化情况与图 9 保持一致。但随着弹速的提高,目标捕获概率的收敛速度逐渐减小,收敛区间向高脉冲激光重复频率和高扫描转速方向移动,而收敛数值保持为 1。可通过提高扫描转速和脉冲激光重复频率

的方式使得目标捕获概率为 1，保证对地攻击火箭弹对目标的有效毁伤。

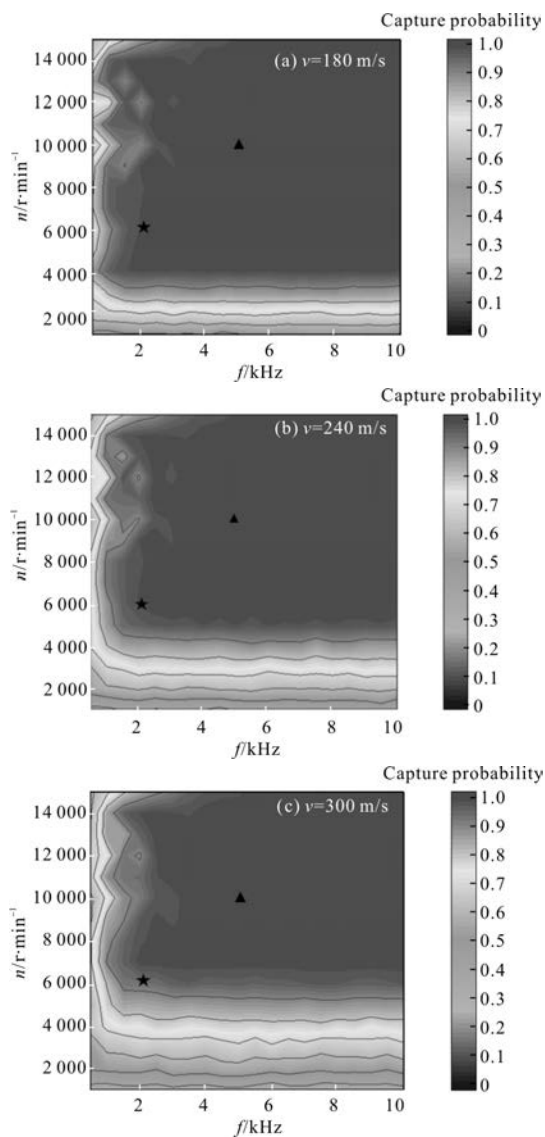


图 11 不同弹速下采用复合探测系统时的捕获概率
Fig.11 Target capture probabilities of compound detection system under different projectile velocity

5.3 命中精度对目标捕获概率的影响

对地攻击火箭弹的主要目的是实现对目标的低成本高效毁伤。成本是制约命中精度的关键因素，命中精度越低，所需的成本越小^[16]。而对于采用触发引信的对地攻击火箭弹来说，目标捕获概率随着命中精度的提高而增加的^[17]。

不同命中精度下，对地攻击火箭弹采用激光周向探测系统时的目标捕获概率仿真如图 12~13 所示。图 12~13 是在弹速为 240 m/s 的条件下进行的仿真。

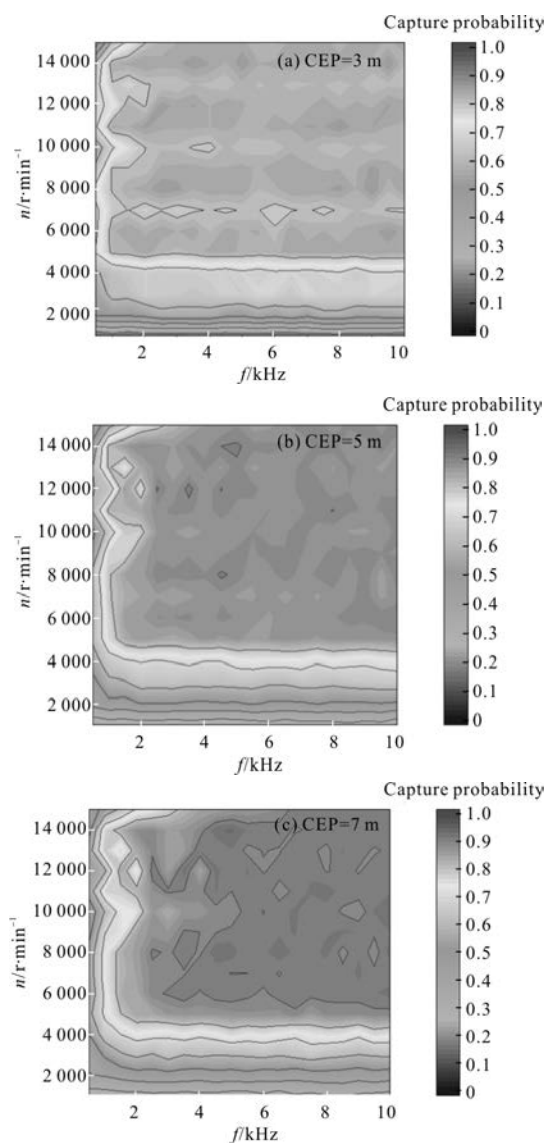


图 12 不同命中精度下采用激光周向探测系统时的捕获概率
Fig.12 Target capture probabilities of laser circular viewing detection system under different hit accuracy

由图 12 可知，采用激光周向探测系统时，其总体变化情况与图 8 和图 10 保持一致。但随着命中精度的减小，收敛数值逐渐增加，收敛区间向低扫描转速和低脉冲激光重复频率方向移动。这是由于弹体与目标之间的相对距离增加，对地攻击火箭弹与目标之间的交会态势更有利于激光周向探测系统进行探测。

由图 13 可知，采用复合探测系统时，其总体变化情况与图 9 和图 11 基本保持一致。但随着的命中精度的减小，目标捕获概率的收敛数值能保持为 1，收敛区间向高扫描转速和高脉冲激光重复频率方向

移动。这是由于当扫描转速与脉冲激光重复频率相匹配时,采用激光周向探测系统能有效弥补采用触发引信时目标捕获概率随命中精度的降低而降低的缺陷。

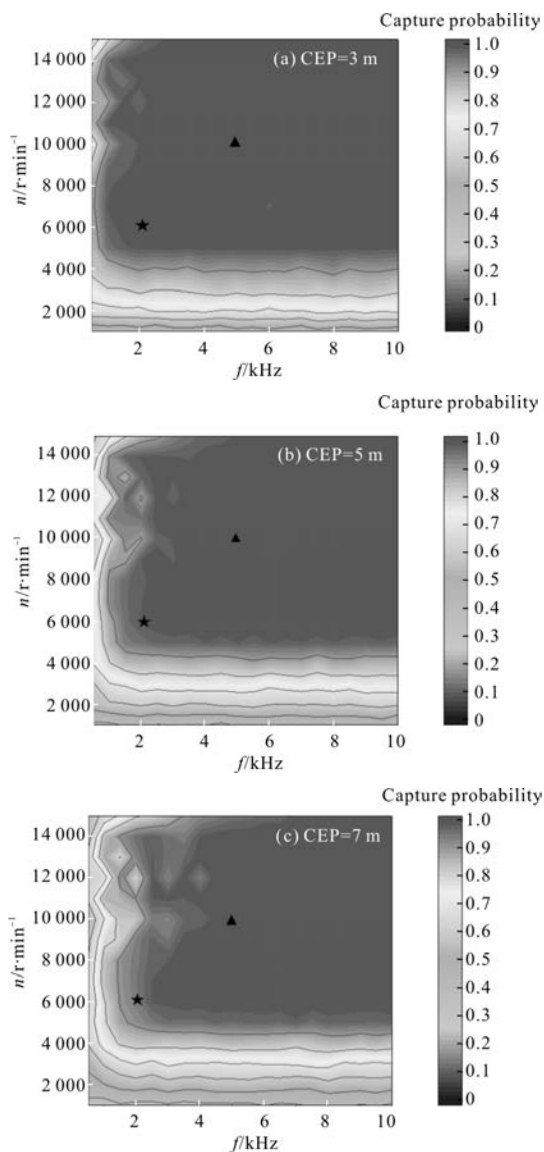


图 13 不同命中精度下采用复合探测系统时的捕获概率

Fig.13 Target capture probabilities of compound detection system under different hit accuracy

由图 11 和图 13 可知,采用复合探测系统时,在不同弹速和命中精度下,目标捕获概率保持为 1 的最低扫描转速和激光重复频率为 6 000 r/min 和 2 kHz 时(图中五角星标出)。但在实际应用中,为了使系统可靠工作,这两个参数必须留有一定的余量。且在后续的目标识别和最佳起爆控制中,需要尽可能多的目标信息支持。而这需要激光周向探测系统在较高的扫描转速和脉冲激光重复频率下工作,保证较短

的交会时间内目标被探测到的次数,所以上述的扫描转速和脉冲激光重复频率未能满足要求。并且在实际应用中,扫描系统能在 10 000 r/min 的转速下稳定工作,脉冲激光探测系统能保持在 5 kHz 的脉冲激光重复频率下稳定工作,同时保持较好的工作性能。因此将最佳扫描转速定为 10 000 r/min,最佳脉冲激光重复频率定为 5 kHz。(图中三角形标出)。由以上分析可知,在选取了合适的脉冲激光重复频率和扫描转速之后,采用激光周向探测系统可有效提高对地攻击火箭弹的目标捕获概率。而采用触发引信和激光周向探测系统复合的方式能保证对地攻击火箭弹在复杂弹目交会条件下对目标的捕获概率能达到 1,实现对目标的低成本有效毁伤。

6 结论

根据激光周向探测系统工作原理及目标表面激光散射特性推导了平面目标的回波功率方程。根据系统的探测性能计算最小可接收光功率作为激光周向探测系统捕获目标的依据,并结合对地攻击火箭弹的末端弹道特性建立弹目交会捕获模型。该模型能实现激光周向探测系统在复杂弹目交会情况下的目标捕获的有效仿真。并以该目标捕获模型为基础,运用蒙特卡罗算法对采用不同探测系统的对地攻击火箭弹的目标捕获概率进行了仿真分析,选取最佳扫描转速及脉冲激光重复频率。

仿真结果表明:对地攻击火箭弹可通过采用激光周向探测系统实现复杂弹目交会情况下对目标的有效捕获,提高单发毁伤概率,而脉冲激光重复频率与扫描转速是影响目标捕获概率的重要因素,当扫描转速一定时,目标捕获概率随脉冲激光重复频率的提高而逐渐收敛;当脉冲激光重复频率一定时,目标捕获概率随扫描转速的增加而逐渐收敛。选取最佳扫描转速为 10 000 r/min,最佳脉冲激光重复频率为 5 kHz。

参考文献:

[1] Liu Mancang, Wang Penghui, Han Liangliang, et al. Fast combat system of airborne small laser-guided rocket [J]. *Fire Control & Command Control*, 2013, 38(7): 174-177. (in Chinese)
刘满仓,王鹏辉,韩亮亮,等.机载小型激光制导火箭弹快

- 速打击系统 [J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(7): 174-177.
- [2] Lv Hua, Yao Hongbao, Chen Ping. Target identifying of large visual angle to the laser fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 427-429. (in Chinese)
吕华, 姚宏宝, 陈平. 大视场激光引信目标识别方法研究 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 427-429.
- [3] Zhang Zhenghui, Yang Ming, Xu Shiwen. Analysis of FOV configuration in laser proximity fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6): 700-704. (in Chinese)
张正辉, 杨明, 许士文. 激光引信光束布局方式的选择与分析 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(6): 700-704.
- [4] Gan Lin, Zhang He, Zhang Xiangjin, et al. Research on large FOV single transceiver bidirectional-driving detection technology for laser fuze [J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(8): 942-947. (in Chinese)
甘霖, 张合, 张祥金, 等. 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.
- [5] Zha Bingting, Zhang He. Scanning frequency and pulse frequency of single-beam pulsed laser fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2081-2086. (in Chinese)
查冰婷, 张合. 单光束脉冲激光引信扫描频率和脉冲频率研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2081-2086.
- [6] Xu Xiaobin, Zhang He. Optimal pulsed frequency and scanning speed of laser circumferential detection system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0508002. (in Chinese)
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): 0508002.
- [7] Tan Yayun, Zhang He, Zha Bingting. Modeling and simulation of underwater single-beam scanning laser fuze acquisition rate [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(11): 67-72. (in Chinese)
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.
- [8] Xu Wei, He Weiji, Chen Qian, et al. Analysis for the influence of time-domain broadening on correlation detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 875-879. (in Chinese)
徐伟, 何伟基, 陈钱, 等. 时域展宽特性对相关检测性能的影响分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 875-879.
- [9] Steinval O. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(24): 4381-4391.
- [10] Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Practical six-parameter bidirectional reflectance distribution function model for rough surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0229001. (in Chinese)
杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 一种实用型粗糙面六参数双向反射分布函数模型 [J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0229001.
- [11] Cao Yunhua, Wu Zhensen, Zhang Hanlu, et al. Research on visible light scattering of spatial targets based on spectral BRDF of target samples [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(11): 2264-2268. (in Chinese)
曹运华, 吴振森, 张涵璐, 等. 基于粗糙样品光谱 BRDF 的空间目标可见光散射研究 [J]. 光子学报, 2008, 37(11): 2264-2268.
- [12] 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.
- [13] Gronwall C, Steinvall O, Gustafsson F, et al. Influence of laser radar sensor parameters on range-measurement and shape-fitting uncertainties [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(10): 101-111.
- [14] Huang Bo, Qiu Qi. A Calculation of minimal detectable power of laser radar in space [J]. *Journal of University of Electronic Science & Technology of China*, 2004, 33(1): 35-38. (in Chinese)
黄波, 邱琪. 空间激光雷达最小接收光功率的计算 [J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(1): 35-38.
- [15] Dong Jihui, Hu Qiquan. Detecting space debris with lidar[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 185-187. (in Chinese)
董吉辉, 胡企铨. 空间碎片的激光雷达探测 [J]. 激光技术, 2007, 31(2): 185-187.
- [16] Hu Chunsheng. Investigation into the high-speed pulsed laser diode 3D-imaging lidar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005: 79-85. (in Chinese)
胡春生. 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2005: 79-85.
- [17] Zhang Zhen, Ma Dengwu, Zhu Defang. Fuze-warhead matching for air-to-ground anti-radiation missile with blast warhead [J]. *Journal of Ballistics*, 2012, 24(3): 31-35. (in Chinese)
张真, 马登武, 诸德放. 反辐射导弹爆破式战斗部引战配合 [J]. 弹道学报, 2012, 24(3): 31-35.
- [18] Qiu Ruihong. Study on system of simple guided air-launched rocket [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007: 2-5. (in Chinese)
邱瑞宏. 简易对地攻击火箭总体技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007: 2-5.