

激光周向探测系统最佳脉冲频率与扫描转速

徐孝彬 张合

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 针对单光束激光周向探测系统中的扫描频率与电机转速的匹配难点问题,进行了单光束脉冲激光周向探测系统的目标探测研究。为提高单光束脉冲激光周向探测系统探测概率,建立了周向探测系统的弹目交汇模型,运用蒙特卡罗算法分析了激光脉冲频率和电机扫描转速对周向探测系统探测目标概率的影响,并选取最佳脉冲频率与电机扫描转速。根据最佳激光脉冲频率与电机扫描转速设计了原理样机并进行模拟探测实验。实验结果表明,当脉冲激光频率为 20 kHz,电机扫描转速为 30000 r/min 时,在 3 m 探测距离范围内周向探测系统能有效探测目标。为单光束激光周向探测系统的最佳激光脉冲频率和电机扫描转速设计提供依据。

关键词 激光器;脉冲激光;探测概率;蒙特卡罗算法;最佳激光脉冲频率;最佳电机扫描转速

中图分类号 TJ43 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0508002

Optimal Pulsed Frequency and Scanning Speed of Laser Circumferential Detection System

Xu Xiaobin Zhang He

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

Abstract Aiming at the problem of matching between the scanning frequency and the speed of the motor of a single beam pulse laser detection system, the research on target detection of the single beam pulse laser detection system is carried out. In order to improve the detection probability of the laser detection system, a model of the missile's target intersection is established. The influence of laser pulsed frequency and motor scanning speed on the detection target probability of the circumferential detection system is analyzed by using Monte-Carlo method. According to the optimal laser pulsed frequency and motor speed, the principle prototype is designed and the simulating experiment is carried out. The experimental results show that in the case of 3 m detection range the detection system can detect the target effectively when the laser emission frequency is 20 kHz and motor speed is 30000 r/min, which provide the basis for the optimum laser emission frequency and the scanning frequency of the motor for the single pulse laser.

Key words lasers; pulsed laser; detection probability; Monte-Carlo algorithm; optimal laser pulsed frequency; optimal motor scanning speed

OCIS codes 140.3538; 140.3460; 120.1880

1 引言

激光近炸引信是通过发射系统发出激光束向目标照射,碰到目标产生漫反射,其中一部分沿原路返回进入接收系统,经放大电路处理后,进行信号处理,最终输出满足要求的引爆信号^[1]。激光近炸引信因其主动性好、方向性强,且测距精度高^[2-3],在常规弹药和导弹中得到广泛应用,如挪威 NF2000M 和 PX581 迫弹,美国的 Thales 导弹等^[4-5]。为实现激光引信大视场探测、定位准确、炸点控制精确的功能,需采用大探测场体制,提高光束扫描到目标的可能性以及扩大对目标的覆盖范围^[6-7]。

收稿日期: 2015-12-03; 收到修改稿日期: 2015-12-28

基金项目: 武器装备预先研究项目(51305020104)、中央高校基本科研业务费专项(30915011334)

作者简介: 徐孝彬(1990—),男,博士研究生,主要从事激光探测与目标识别方面的研究。E-mail: njstxxb@163.com

导师简介: 张合(1957—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事探测制导与控制方面的研究。

E-mail: hezhang@mail.njust.edu.cn

激光引信大视场光束布局方案主要有多辐射方案、分区方案、分区扫描方案和同步扫描方案。同步扫描方案是将单个发射系统和接收系统作同步扫描探测目标,需要制作专门的高速旋转扫描系统。由于弹体在空中可能与攻击目标以各种不同的情况交汇,且弹目相对运动速度较大,同步扫描方案中激光脉冲频率和电机扫描转速的匹配直接影响探测系统探测目标的概率^[8]。激光脉冲发散角较小,脉冲持续时间短,能量集中,具有较大的瞬时功率,保证了激光脉冲的有效探测距离^[9]。本文研究的重点是基于保证有效探测距离情况下研究激光脉冲频率和电机扫描转速的匹配。针对同步扫描方案中激光脉冲频率与电机扫描转速匹配问题,甘霖等^[10-11]建立了弹目交汇模型并进行了目标捕获分析,获得了脉冲频率、电机扫描转速与捕获率之间的匹配关系,其只考虑迎面交汇情况,并不适用于其他交汇条件。查冰婷等^[12]建立最低脉冲频率和扫描转速计算模型,获得最低脉冲频率和最低扫描频率的变化规律,其只研究低速交汇过程,无法直接应用于常规高速弹药。

本文在设计单光束脉冲激光周向探测系统的基础上,建立弹目交汇探测概率模型,分析了激光发射频率和电机扫描转速对激光周向探测系统探测目标概率的影响,并选取最佳激光脉冲频率与电机扫描转速进行实验验证。

2 单光束脉冲激光周向探测系统

单光束脉冲激光周向探测系统采用同步扫描方案。系统由脉冲激光发射系统(脉冲激光发射电路,半导体激光器,激光准直透镜)、高速扫描系统(高速直流电机,全反平面镜)、脉冲激光接收系统、方位角检测系统和信号处理系统组成,脉冲激光周向探测系统组成示意图如图 1 所示。

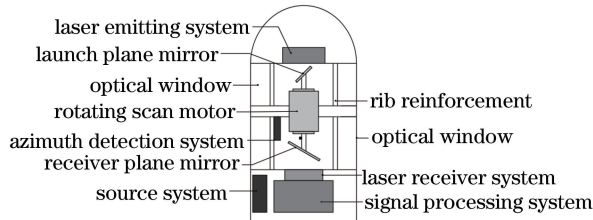


图 1 脉冲激光周向探测系统组成示意图

Fig. 1 Component diagram of pulsed laser circumferential detecting system

脉冲激光周向探测系统工作原理:工作弹丸发射后,供电系统开始工作,经一定延时后,电路中产生周期脉冲信号,点亮激光器。激光器发出激光束后经过准直透镜出射,光束入射到发射全反平面镜上。随着反射平面镜高速旋转,反射光束通过透光窗口在空气中传输,遇到目标后形成漫反射光束,漫反射光束通过透光窗口从接收反射平面镜反射到激光接收聚焦透镜上,光束会聚进入光电探测器,获取回波信号,再经过信号处理系统计算目标距离。同时方位角探测模块输出电信号计算电机转速,并将回波信号输入方位角探测模块中计算方位角。脉冲激光周向探测系统工作原理框图如图 2 所示。

根据上述单光束脉冲激光周向探测系统的组成、工作原理和激光引信近程探测及毁伤率要求,以及常规弹药引信的低成本、低功耗、小型化,设计制作了单光束脉冲激光周向探测系统。其中主要参数:激光器选择 SPLLL90-3,脉冲峰值功率为 70 W;经过非球面透镜准直后快轴方向发散角为 10 mrad,激光器脉冲宽度为 30 ns,设计的最大有效探测距离为 10 m。以此作为目标探测概率研究的基本系统。

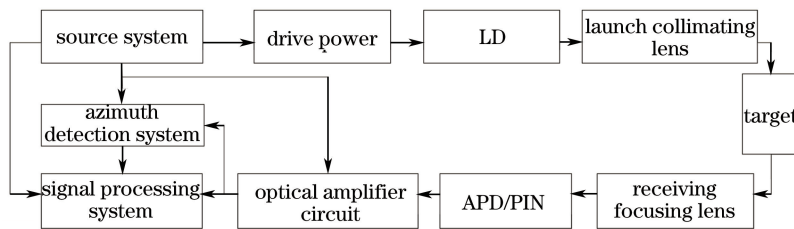


图 2 脉冲激光周向探测系统工作原理框图

Fig. 2 Principle block diagram of pulsed laser circumferential detecting system

3 脉冲激光周向探测系统探测目标概率模型

3.1 坐标系建立

为研究脉冲激光周向探测系统弹目交汇模型,建立了三种坐标系分别是地面坐标系 $OXYZ$ 、弹体坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 和目标坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 。地面坐标系原点为弹丸发射点, OX 轴在发射点的水平面内, OY 轴铅直向上, OZ 轴按右手法则确定为垂直于射击面指向右方。弹体坐标系其 O_1X_1 沿弹丸纵轴方向, O_1Y_1 在弹体对称面内指向上, O_1Z_1 右手法则确定为垂直于 $O_1X_1Y_1$ 面向右为正。目标坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 其 O_2X_2 沿目标纵轴的方向, O_2Y_2 在目标对称面内指向上, O_2Z_2 右手法则确定为垂直于 $O_2X_2Y_2$ 平面向右为正。弹目交汇坐标系如图 3 所示。

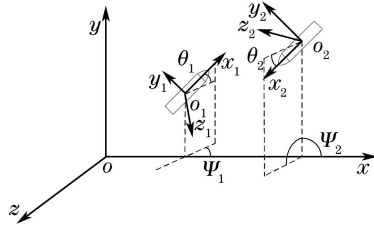


图 3 弹目交汇坐标系

Fig. 3 Coordinates of missile target intersection

弹体坐标系与目标坐标系之间的关系为

$$[x_1 \quad y_1 \quad z_1]^T = \mathbf{A}_{1N} \mathbf{A}_{2N}^T [x_2 \quad y_2 \quad z_2]^T, \quad (1)$$

$$\mathbf{A}_{1N} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos \psi_1 & \sin \theta_1 & -\cos \theta_1 \sin \psi_1 \\ -\sin \theta_1 \cos \psi_1 & \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \sin \psi_1 \\ \sin \psi_1 & 0 & \cos \psi_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{2N} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \psi_2 & \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 \sin \psi_2 \\ -\sin \theta_2 \cos \psi_2 & \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \sin \psi_2 \\ \sin \psi_2 & 0 & \cos \psi_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 ψ_1, θ_1 分别为弹体坐标系相对于地面坐标系的偏航角和俯仰角, ψ_2, θ_2 分别为目标坐标系相对于地面坐标系的偏航角和俯仰角。 \mathbf{A}_{1N} 和 \mathbf{A}_{2N} 是弹体坐标系和目标坐标系与地面坐标系之间的转换矩阵。

3.2 弹目交汇探测模型

脉冲激光周向探测系统在探测来袭目标时,弹丸和目标交汇时间较短,这里作如下假设:1)弹体与目标均做匀速直线运动;2)假设目标为圆柱体,质心在几何中心,总长为 K ,直径为 D 。

弹体脉冲激光周向探测系统与来袭目标交汇情况如图 4 所示。 O_1 点为弹体激光光速出射位置, C 点为目标几何中心,弹丸以 V_1 速度沿 O_1X_1 方向匀速直线运动,激光束周向扫描出射,来袭目标以 V_2 速度沿目标轴 O_2X_2 方向作匀速直线运动。 β 为激光引信的探测方向与弹体速度方向的夹角。

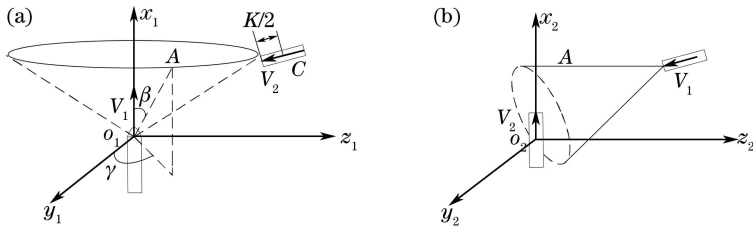


图 4 弹目交汇模型

Fig. 4 Model of missile target intersection

周向探测系统中 4 根加强筋(用于支撑上下机械结构、增加结合面刚度、达到抗冲击目的的结构件)对称分布,假设周向探测系统每个盲区方位角为 α ,探测盲区的范围为 $[-\alpha + k\pi/2, \alpha + k\pi/2], k=0, 1, 2, 3, \dots$ 。

在弹体坐标系中,扫描光束坐标方位为

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \cos \beta \\ L \sin \beta \cos(\omega t_1 + \gamma) \\ L \sin \beta \sin(\omega t_1 + \gamma) \end{bmatrix}, \quad 0 < L < R, \quad (3)$$

式中 $\omega = 2\pi(n_1 + n_2)/60$, n_1 为弹体转速, n_2 为电机转速(也称为电机扫描转速),且自转方向与弹体转速方

向相同, γ 为电机初始方位, $t_1 = j/f, j = 0, 1, 2, \dots, R$ 为激光近炸引信最大测程, f 为激光脉冲的重复频率(也称为激光脉冲频率), L 为脉冲激光光束照射距离。

由图 4 可得, 弹体速度 \mathbf{V}_1 在弹体坐标系中的坐标为 $(v_1, 0, 0)$, 目标速度 \mathbf{V}_2 在目标坐标系中的坐标 $(v_2, 0, 0)$, 在弹体坐标系中, 目标速度为 $\mathbf{V}_r = \mathbf{A}_{1N}\mathbf{A}_{2N}^T\mathbf{V}_2^T - \mathbf{V}_1^T = [v_{rx} \ v_{ry} \ v_{rz}]^T$ 。将目标长度投影在相对位移上, 得脉冲激光能照射到目标的时间 t_{\max} 为

$$t_{\max} = \frac{L'}{v_r} = \frac{Kv_{rx}}{v_{rx}^2 + v_{ry}^2 + v_{rz}^2}, \quad (4)$$

假设目标在弹体坐标系中的初始位置为 $[x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ 。则扫描光束在目标坐标系中坐标为

$$[x_2 \ y_2 \ z_2]^T = \mathbf{A}_{2N}\mathbf{A}_{1N}^T [x_1 \ y_1 \ z_1]^T - \mathbf{A}_{2N}\mathbf{A}_{1N}^T [x_0 \ y_0 \ z_0]^T, \quad (5)$$

由图 4 可知, 目标的几何中心位置在坐标原点时, 目标表面方程为

$$\begin{cases} z^2 + y^2 \leq \pi D^2/4, & x = \pm K/2 \\ z^2 + y^2 = \pi D^2/4, & -K/2 \leq x \leq K/2 \end{cases}, \quad (6)$$

根据坐标系的变换, 弹体速度在目标坐标系中的相对速度为

$$\mathbf{V}'_r = \mathbf{A}_{2N}\mathbf{A}_{1N}^T\mathbf{V}_1^T - \mathbf{V}_2^T = [v'_{rx} \ v'_{ry} \ v'_{rz}]^T, \quad (7)$$

光束在目标坐标系的运动轨迹为

$$[x_3 \ y_3 \ z_3]^T = [x_2 \ y_2 \ z_2]^T - \mathbf{V}'_r t, \quad (8)$$

联立(6)、(8)式可判激光束是否与目标表面有交点, 在 t_{\max} 内若相交且交点到射线原点的距离在最大探测距离之内, 则认为该脉冲激光束发现目标。

4 仿真与分析

运用蒙特卡罗算法对不同激光脉冲频率和电机扫描转速的探测概率进行仿真分析, 选取最优激光脉冲频率和电机扫描转速。假设来袭目标为导弹, 且为迎击状态, 其参数为 $K=3 \text{ m}, D=1 \text{ m}, R=5 \text{ m}, v_1=300 \text{ m/s}, n_1=0, \alpha=2.5^\circ, \psi_1=0, \theta_1=0$ 。 σ_i 为 $[0, 1]$ 的均匀分布的随机变量。设目标的俯仰角 θ_2 在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 内均匀分布, 则 $\theta_2 = \pi\sigma_1 - \pi/2$, 目标的偏航角 ψ_2 在 $[\pi/2, 3\pi/2]$ 内均匀分布, 则 $\psi_2 = \pi\sigma_2 + \pi/2$ 。只考虑弹体能探测到目标情况下的探测概率, 假设目标中心在弹体中坐标: $x_k = r\cos\beta, y_k = r\sin\beta\cos\xi, z_k = r\sin\beta\sin\xi, r$ 在 $[0, R]$ 均匀分布, 则 $r = R\sigma_3, \xi$ 在 $[-\pi, \pi]$ 内均匀分布, 则 $\xi = 2\pi\sigma_4 - \pi$ 。则初始位置为 $x_0 = r\cos\beta + t_{\max}v'_{rx}/2, y_0 = r\sin\beta\cos\xi + t_{\max}v'_{ry}/2, z_0 = r\sin\beta\sin\xi + t_{\max}v'_{rz}/2$ 。 γ 在 $[0, \pi]$ 内均匀分布, $\gamma = \pi\sigma_5$ 。 $n_2 \in [1000, 60000]$, 步长为 1000; $f \in [500, 20000]$, 步长为 500, 每次取不同的 n_2 与 f 。每次仿真 400 次。

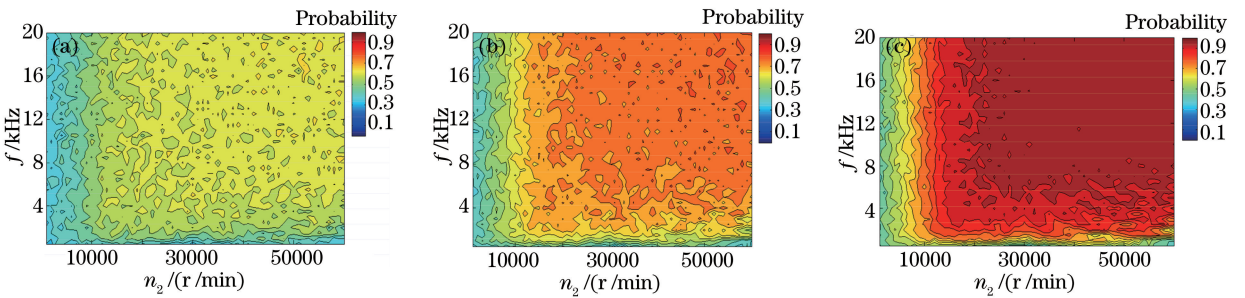


图 5 不同的探测角度下激光脉冲频率和电机扫描转速的目标探测概率。(a) $\beta = \pi/3$; (b) $\beta = 7\pi/18$; (c) $\beta = 4\pi/9$

Fig. 5 Target detection probability of laser pulse frequency and motor scanning speed under different detection angles.

(a) $\beta = \pi/3$; (b) $\beta = 7\pi/18$; (c) $\beta = 4\pi/9$

仿真结果如图 5~7 所示。图 5 是当 $v_2 = 500 \text{ m/s}$ 时, 激光引信的探测方向与弹体速度方向的夹角、激光脉冲频率和电机扫描转速之间关系的探测概率图。从图 5(a)~(c) 可得, 当 $f \leq 1 \text{ kHz}$ 时, 探测概率随着电机扫描转速探测概率基本不变。当电机扫描转速很高, 发射频率较低时, 有一些概率不连续的点。这是由于电机扫描一圈中能有效发出的激光脉冲很少, 导致弹体从两束相邻的脉冲激光中穿过, 电机转速与频率不匹配, 即使电机转速很高, 探测时仍会丢失目标。当 $n_2 < 11000 \text{ r/min}$ 时, 周向探测系统探测目标的概率随

着频率的变化很小,当电机扫描转速低时,在交会时间内扫描不到一圈,捕获不到目标,即使发射频率较高也无法提高探测概率。当 $f > 1$ kHz 且 $0 < n_2 < 20000$ r/min 时,探测概率随着电机扫描转速的增加而增加。当 $f > 1$ kHz 且 $n_2 \geq 20000$ r/min 时,探测目标概率开始收敛,概率分别收敛于 0.7、0.8 和 0.95。对比图 5 (a)、(c),当 $f > 1$ kHz 或 $n_2 \geq 11000$ r/min 时,探测概率随着 β 的增加而增大。设计系统时提高 β 能有效提高探测概率。最佳脉冲频率与电机转速为 $f \geq 10$ kHz, $n_2 \geq 30000$ r/min。

图 6 是研究当 $\beta = \pi/3$ 时,目标速度、激光脉冲频率和电机扫描转速之间关系的探测概率图。从图 6 中可知,随着目标速度的增加,探测目标的概率收敛逐渐减小。且收敛区间向高发射频率和高扫描转速方向移动。当目标速度增加时,提高扫描转速和发射频率能提高探测概率。

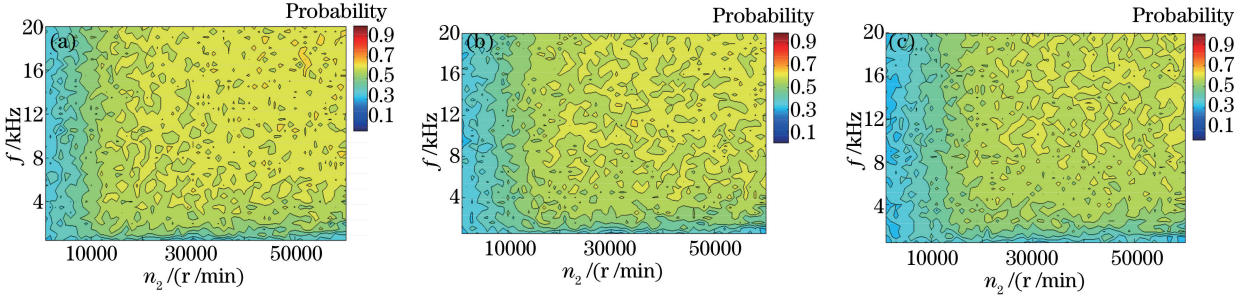


图 6 不同的目标速度下激光脉冲频率和电机扫描转速的目标探测概率。(a) $v_2 = 500$ m/s; (b) $v_2 = 600$ m/s; (c) $v_2 = 700$ m/s

Fig. 6 Target detection probability of laser pulse frequency and motor scanning speed under different target velocities. (a) $v_2 = 500$ m/s; (b) $v_2 = 600$ m/s; (c) $v_2 = 700$ m/s

图 7 是在其他参数既定的情况下,当 $\beta = \pi/3$ 时激光脉冲频率和电机扫描转速之间关系的探测概率图。在电机扫描转速和激光脉冲频率相同的条件下,目标探测概率随着最大探测距离的增加而减小。即使扫描转速和发射频率达到 $f = 20$ kHz, $n_2 = 60000$ r/min,探测概率仍然很低。这是因为探测距离的增加,探测系统可获得的扫描角度变小,减小了激光扫描的空间范围,同时随着距离增加,回波信号减弱会降低探测目标概率。在目标探测时,选择较小的最大探测距离可有效提高探测概率。

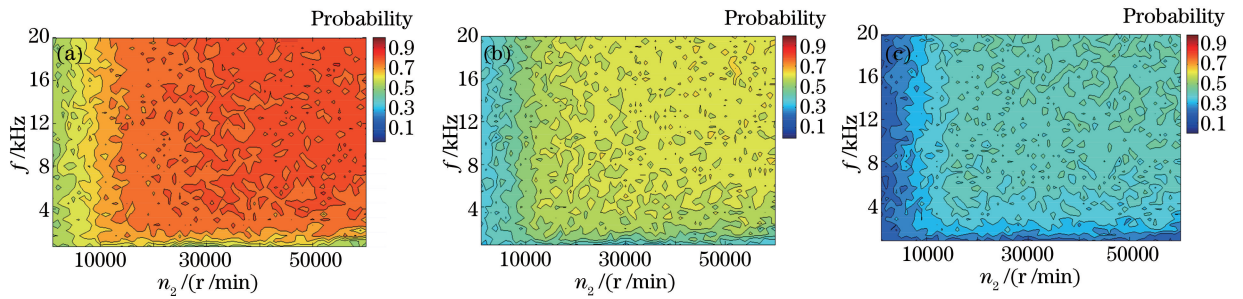


图 7 不同的弹目间距离下激光脉冲频率和电机扫描转速的目标探测概率。(a) $R = 3$ m; (b) $R = 5$ m; (c) $R = 10$ m

Fig. 7 Target detection probability of laser pulse frequency and motor scanning speed under different projectile-target distances. (a) $R = 3$ m; (b) $R = 5$ m; (c) $R = 10$ m

5 原理样机设计及实验

根据仿真分析获得的激光脉冲频率和电机转速,选用 ORSRAM 的 SPLLL90-3 激光器设计连续可调频率脉冲激光发射电路。并定制微型高速双向直流扫描电机,电机转速为 60000 r/min,电机尺寸为 $\phi 14$ mm \times 25 mm。根据仿真可得探测目标概率随着 β 增大而增大。选择 $\beta = \pi/2$ 。最佳发射频率为 $f \geq 10$ kHz, $n_2 \geq 30000$ r/min, SPLLL90-3 激光器随着脉冲频率上升脉冲能量会下降,为保证探测性能激光器最高发射频率低于 25 kHz,同时增加激光脉冲频率能减小相邻两次发射的激光束间的夹角,因此将激光器发射频率选定在 20 kHz;电机转速的提高会带来动平衡问题,将电机转速加载到 30000 r/min 保证系统稳定。为验证激光发射频率与电机转速匹配,依据选定器件与参数设计加工原理样机。调整接收系统接收视场角,保证接收

视场与发射视场空间匹配。以圆柱形弹体模拟目标,目标长为 1.1 m,直径为 125 mm。将目标放置在 3、5 和 10 m 处进行探测实验。不同距离处的回波波形分别如图 8(a)~(c)所示。在 3 m 处有输出目标回波信号,且输出幅值为 5 V,每周期内能探测到目标;在 5 m 处有目标回波信号,但幅值有所下降,且探测到目标次数减少,探测概率降低;在 10 m 处能探测到目标,与 5 m 处探测结果相比,探测回波次数减小,探测概率降低。实验结果与上述的仿真结果一致,随着距离的增加,探测概率降低。目标实验结果表明,在 $f = 20 \text{ kHz}$, $n_2 = 30000 \text{ r/min}$ 的条件下 3 m 处能有效探测目标。完全能满足激光引信近程探测要求。

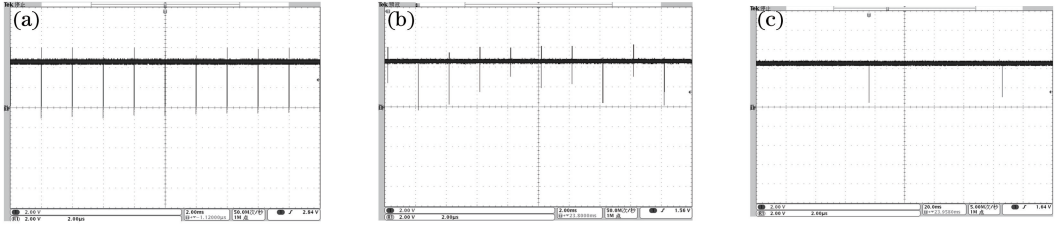


图 8 (a) 3 m 处回波信号; (b) 5 m 处回波信号; (c) 10 m 处回波信号

Fig. 8 (a) Echo signal at 3 m; (b) Echo signal at 5 m; (c) Echo signal at 10 m

6 结 论

根据单光束脉冲激光周向探测系统工作原理,在目标坐标系中建立弹目交汇探测模型。运用蒙特卡罗算法对不同电机扫描转速和脉冲激光发射频率的探测概率进行仿真。仿真分析可得,目标探测概率随激光引信的探测方向与弹体速度方向夹角的增大而增大,随着距离的增加而减小,随着目标速度的增加而减小。当电机扫描转速一定时,目标探测概率随脉冲激光频率的增加而增加;当脉冲激光频率一定时,目标探测概率随电机扫描转速的增加而增加。从中获取了最佳脉冲激光频率为 20 kHz,最佳电机扫描转速为 30000 r/min,并用实验验证了结论的正确性,该结论可应用于各类交汇条件的目标探测。

参 考 文 献

- 1 Chen Huimin, Li Ping, Yan Xiaopeng, *et al.*. Laser fuse detection techniques using different methods [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(Z1): 348-350.
陈慧敏, 栗 萍, 闫晓鹏, 等. 基于不同作用体制的激光引信探测技术 [J]. *光学技术*, 2006, 32(Z1): 348-350.
- 2 Gan Lin, Zhang He, Zhang Xiangjin. Research on multi-level aspheric collimating lens of laser proximity fuze [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0702009.
甘 霖, 张 合, 张祥金. 激光近炸引信多级光学准直整形透镜研究 [J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0702009.
- 3 Guo Jing, Zhang He, Wang Xiaofeng. Beam spread characteristics of laser fuze in the rain [J]. *Chinese J 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.
- 4 Buzzard G. Advanced laser proximity fuzing [C]. *First Annual International Missile and Rocket Symposium*, 2000.
- 5 Buzzard G. Modeling the interaction of a laser target detection device with the sea surface [C]. *54th Annual Fuze Conference*, 2010, 4: 67-69.
- 6 Lü 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.
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.
- 7 Zhang Zhenghui, Yang Ming, Xu Shiwen. Analysis of FOV configuration in laser proximity fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6): 700-704.
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.
- 8 Tao Min, Wang Zhuo, Bai Xiuyu. The choice and analysis of laser fuze beam position [J]. *Journal of Missiles and Guidance*, 2007, 27(2): 162-165.
陶 敏, 王 卓, 白修宇. 激光引信光束布局方式的选择与分析 [J]. *弹箭与制导学报*, 2007, 27(2): 162-165.
- 9 Kou Tian, Wang Haiyan, Wang Fang, *et al.*. Research on pulse echo characteristic of airborne laser detecting air target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0414001.

- 寇 添, 王海晏, 王 芳, 等. 机载激光探测空中目标脉冲回波特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0414001.
- 10 Gan Lin, Zhang He, Zhang Xiangjin. 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.
- 11 Gan Lin, Zhang He, Zhang Xiangjin, *et al.*. Single-beam pulse circumferential detection technology of laser proximity fuze [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 84-89.
- 甘 霖, 张 合, 张祥金, 等. 激光近炸引信单光束脉冲周向探测技术研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 84-89.
- 12 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.
- 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.