

## 同步扫描周视脉冲激光引信多探测点最佳起爆建模及仿真

张 合, 李红霞, 丁立波\*, 查冰婷

(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:** 周视激光引信通常仅根据单次测量的目标方位和距离解算最佳起爆时间和起爆方位角, 精度不高, 另一方面, 引信无法判别目标真伪, 易发生“虚警”或误炸。基于同步扫描周视脉冲激光引信工作原理, 分析了弹目交会过程中多个探测点的方位、距离及其位置坐标, 建立了基于多探测点的目标速度模型, 对目标速度进行计算以辨别目标真伪。解算了目标特征几何中心位置, 建立了最佳起爆时间和方位角计算模型, 使战斗部获得最大毁伤效能, 并分析了最佳起爆时间和方位角的影响因素。研究可为周视激光引信目标真伪辨别和定向起爆控制提供参考。

**关键词:** 周视激光引信; 目标探测; 定向战斗部; 最佳起爆模型

中图分类号: TJ43 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0403001

## Modeling and simulation of multi-detection point optimal initiation of synchronous scanning panoramic pulse laser fuze

Zhang He, Li Hongxia, Ding Libo\*, Zha Bingting

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

**Abstract:** Panoramic laser fuze usually calculates the optimal initiation time and initiation azimuth only based on single measured target direction and distance, the calculation accuracy is low. On the other hand, fuze can not distinguish the authenticity of targets, it is easy to cause "false alarm" or accidental bombing. Based on the working principle of the synchronous scanning panoramic pulse laser fuze, the direction, distances and position coordinates of multiple detection points were analyzed. The target velocity model based on multiple detection points were established, which can calculate the target speed and judge whether the target was true. The geometric center position of the target feature was solved, and the optimal initiation time and azimuth calculation model were established to obtain the maximum damage effectiveness of the warhead. The influence factors of the optimal initiation time and azimuth were analyzed. The research can provide a reference for the target identification and directional initiation of the panoramic laser fuze.

**Key words:** panoramic laser fuze; target detection; aimed warhead; optimal initiation model

收稿日期:2020-02-10; 修订日期:2020-03-26

基金项目:国家自然科学基金(51709147)

作者简介:张合(1957-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为目标探测与识别。Email: hezhangz@njjust.edu.cn

通讯作者:丁立波(1977-),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向为近程探测与控制。Email: ding\_libo@hotmail.com

## 0 引言

激光探测由于精度高、方向性好、抗电磁干扰能力强,常用于近炸引信实现高精度定距和方位识别<sup>[1-2]</sup>。周视激光引信能探测 360°范围内的目标,测量目标距离、识别目标与引信的相对方位。若将周视激光引信配装于定向战斗部,可在最佳时机向最佳方位起爆战斗部,实现目标的高效毁伤,其中起爆时机和方位的解算结果将直接影响战斗部的毁伤效果<sup>[3-8]</sup>。与此同时,由于激光探测本身不具备识别目标特性的能力,激光引信探测过程中易受干扰目标的影响,发生“虚警”或误炸。

文中针对脉冲激光同步扫描体制的周视激光引信,基于在探测过程中获取的多个目标探测点的距离和方位信息,建立目标速度模型,通过对目标速度进行估算,以辨别目标真伪。同时综合目标上多探测点信息,预估目标特征几何中心位置,解算引信最佳起爆时间和方位角,使战斗部获得最大毁伤效能。

## 1 脉冲激光同步扫描周视探测原理

脉冲激光同步扫描系统通过单根脉冲激光束 360°旋转扫描探测周向目标,随扫描装置的旋转,激光束将形成如图 1 所示的圆锥状光束场。同时激光接收系统随扫描装置与发射光束同步旋转,接收来自目标反射的回波信号<sup>[9]</sup>。在探测目标的过程中,系统将逐点扫描目标表面的多个位置,形成探测点,根据各探测点反射的光脉冲信号,可获得各点的距离和方位角。

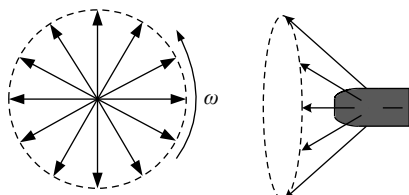


图 1 脉冲激光同步扫描探测方案

Fig.1 Pulse laser synchronous scanning detection scheme

## 2 坐标系建立与探测点坐标计算

以弹丸发射点  $o_0$  为原点,建立大地坐标系  $o_0x_0y_0z_0$ ,  $x_0$  轴在水平面内沿弹丸发射方向,  $y_0$  轴铅直向上,  $z_0$  轴与  $x_0$  轴、 $y_0$  轴构成笛卡尔坐标系。以激光探测系统的发射中心  $o_m$  为原点,建立弹体坐标系

$o_mx_my_mz_m$ ,  $x_m$  轴沿弹丸轴线指向其前进方向,  $y_m$  轴沿弹轴垂直方向指向上,  $z_m$  轴与  $x_m$  轴、 $y_m$  轴构成笛卡尔坐标系。以目标的几何特征中心  $o_t$  为原点,建立目标坐标系  $o_tx_ty_tz_t$ ,  $x_t$  轴沿目标轴线并指向其头部,  $y_t$  轴沿目标轴线垂直方向,  $z_t$  轴与  $x_t$  轴、 $y_t$  轴构成笛卡尔坐标系。

若弹丸和目标的俯仰角为  $\beta_m$  和  $\beta_t$ , 偏航角为  $\psi_m$  和  $\psi_t$ , 所有角度以逆时针方向为正, 可得三个坐标系之间的转换关系。弹体坐标系到大地坐标系的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = C_0^m \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $C_0^m$  表示弹体坐标系到大地坐标系的方向余弦矩阵。

$$C_0^m = \begin{bmatrix} \cos\beta_m \cos\psi_m & -\sin\beta_m \cos\psi_m & \sin\psi_m \\ \sin\beta_m & \cos\beta_m & 0 \\ -\cos\beta_m \sin\psi_m & \sin\beta_m \sin\psi_m & \cos\psi_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

大地坐标系与目标坐标系的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = C_t^0 \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $C_t^0$  表示从大地坐标系到目标坐标系的方向余弦矩阵。

$$C_t^0 = \begin{bmatrix} \cos\beta_t \cos\psi_t & \sin\beta_t & -\cos\beta_t \sin\psi_t \\ -\sin\beta_t \cos\psi_t & \cos\beta_t & \sin\beta_t \sin\psi_t \\ \sin\psi_t & 0 & \cos\psi_t \end{bmatrix} \quad (4)$$

则弹体坐标系与目标坐标系之间的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = C_t^m \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = C_t^0 C_0^m \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

假设在周视激光引信探测过程中次序接收到目标表面  $F_1$ 、 $F_2$ 、...、 $F_k$  点反射的光脉冲信号,并解算出上述各探测点在弹体坐标系中的距离和方位角,从而能够获得各点在弹体坐标系中的三维坐标。图 2 表示探测点  $F_k$  在弹体坐标系  $o_mx_my_mz_m$  中的位置。

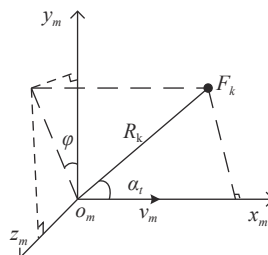


图 2 目标探测点  $F_k$  在弹体坐标系  $o_mx_my_mz_m$  中的位置示意图

Fig.2 Location diagram of target detection point  $F_k$  in missile coordinate system  $o_mx_my_mz_m$

图 2 中, 光束倾斜角  $\alpha_t$  表示激光束与弹体坐标系  $x_m$  的夹角, 探测点  $F_k$  到原点  $o_m$  的距离为  $R_k$ , 方位角  $\varphi$  为原点  $o_m$  和探测点  $F_k$  的连线在  $y_m o_m z_m$  平面上的投影与  $y_m$  轴的夹角。根据投影定理和三角形法则, 可知探测点  $F_k$  在弹体坐标系中的坐标  $({}^m x_k, {}^m y_k, {}^m z_k)$  为:

$$\begin{aligned} ({}^m x_k, {}^m y_k, {}^m z_k) &= (R_k \cos \alpha_t, R_k \sin \alpha_t \cos \psi_k, \\ &R_k \sin \alpha_t \sin \psi_k) \end{aligned} \quad (6)$$

### 3 基于多探测点的目标速度模型

在大地坐标系  $o_0 x_0 y_0 z_0$  中激光探测系统探测目标如图 3 所示。

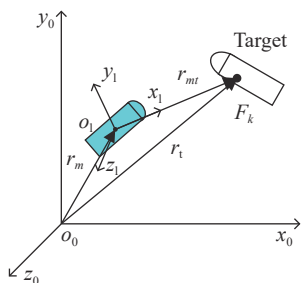


图 3 大地坐标系  $o_0 x_0 y_0 z_0$  中系统探测目标示意图

Fig.3 System detecting target in geodetic coordinate system  $o_0 x_0 y_0 z_0$

在图 3 中, 定义激光坐标系  $o_1 x_l y_l z_l$ , 坐标系原点  $o_l$  与  $o_m$  重合, 激光出射方向为  $x_l$  轴。激光坐标系  $o_1 x_l y_l z_l$  可以看作先将弹体坐标系  $o_m x_m y_m z_m$  绕  $z_m$  轴逆时针旋转  $\alpha_t$ , 再绕  $y_m$  轴旋转  $\varphi$  形成的, 令  $C_m^l$  为激光坐标系  $o_1 x_l y_l z_l$  和弹体坐标系  $o_m x_m y_m z_m$  之间的方向余弦矩阵, 则有:

$$C_m^l = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \alpha_t & -\sin \alpha_t & -\sin \varphi \cos \alpha_t \\ \cos \varphi \sin \alpha_t & \cos \alpha_t & -\sin \varphi \sin \alpha_t \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (7)$$

故激光坐标系与弹体坐标系之间的转换为:

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = C_m^l \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} \quad (8)$$

联立公式 (1), 得激光坐标系与大地坐标系之间的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = C_0^m C_m^l \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} \quad (9)$$

图 3 中,  $r_i$  为探测点在大地坐标系上的位矢,  $r_m$  为弹体坐标系和激光坐标系原点的位矢,  $r_{mt} = r_i - r_m$  为探测点在激光坐标系上的位矢。根据速度的定义, 可

知在大地坐标系下目标的速度矢量  $v_t$ 、弹丸的速度矢量  $v_m$  和目标与弹丸的相对速度矢量  $v_{mt}$  分别为:

$$v_t = \frac{dr_t}{dt}, v_m = \frac{dr_m}{dt}, v_{mt} = \frac{dr_{mt}}{dt} \quad (10)$$

将  $v_{mt}$  在激光坐标系上投影, 可得

$${}^l v_{mt} = (C_0^m C_m^l)^T ({}^0 v_t - {}^0 v_m) \quad (11)$$

式中: 左上标表示其所处的坐标系, 其中

$${}^l v_{mt} = \begin{bmatrix} {}^l v_{mtx} \\ {}^l v_{mty} \\ {}^l v_{mtz} \end{bmatrix}, {}^0 v_t = \begin{bmatrix} {}^0 v_{tx} \\ {}^0 v_{ty} \\ {}^0 v_{tz} \end{bmatrix}, {}^0 v_m = \begin{bmatrix} {}^0 v_{mx} \\ {}^0 v_{my} \\ {}^0 v_{mz} \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据探测点  $F_k$  的回波信号, 可得点  $F_k$  到弹体坐标系原点  $o_m$  的距离  $R_k$ 。由多个探测点的距离  $R_k$ , 求解出  ${}^l v_{mt}$  中的第一个元素  ${}^l v_{mtx}$ , 即在激光坐标系下弹丸与目标之间的相对速度  $v_{mt}$  在  $x_l$  轴上的投影。由于采样频率较高, 相邻探测点探测间隔时间短, 可以计算相邻探测点的平均速度代替目标瞬时速度, 已知  $|r_{mt}| = R_k$ , 可得:

$${}^l v_{mtx} = \frac{R_{k+1} - R_k}{\Delta t} \quad (13)$$

式中:  $\Delta t$  表示探测相邻点  $F_k$  和  $F_{k+1}$  的时间间隔, 一般情况下即为探测系统的脉冲周期  $T_m$ 。为提高目标运动速度的计算精度, 通过探测目标上多个相邻点来计算  ${}^l v_{mtx}$  的平均值。

令

$$L = (C_0^m C_m^l)^T = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{bmatrix} \quad (14)$$

联立公式 (12)~(14), 得:

$$\begin{bmatrix} {}^l v_{mtx} \\ {}^l v_{mty} \\ {}^l v_{mtz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^0 v_{tx} - {}^0 v_{mx} \\ {}^0 v_{ty} - {}^0 v_{my} \\ {}^0 v_{tz} - {}^0 v_{mz} \end{bmatrix} \quad (15)$$

提取公式 (15) 中的第一个方程:

$$l_{11} {}^0 v_{tx} + l_{12} {}^0 v_{ty} + l_{13} {}^0 v_{tz} = {}^l v_{mtx} + l_{11} {}^0 v_{mx} + l_{12} {}^0 v_{my} + l_{13} {}^0 v_{mz} \quad (16)$$

仅考虑目标做平面运动, 其绝对速度矢量为  ${}^0 v_t$ , 而在公式 (16) 中包含  ${}^0 v_{tx}$ 、 ${}^0 v_{ty}$ 、 ${}^0 v_{tz}$  三个未知量, 可联立三个探测点信息的计算方程构成方程组:

$$\begin{cases} l_{11}^1 {}^0 v_{tx} + l_{12}^1 {}^0 v_{ty} + l_{13}^1 {}^0 v_{tz} = {}^l v_{mtx}^1 + l_{11}^1 {}^0 v_{mx} + l_{12}^1 {}^0 v_{my} + l_{13}^1 {}^0 v_{mz} \\ l_{11}^2 {}^0 v_{tx} + l_{12}^2 {}^0 v_{ty} + l_{13}^2 {}^0 v_{tz} = {}^l v_{mtx}^2 + l_{11}^2 {}^0 v_{mx} + l_{12}^2 {}^0 v_{my} + l_{13}^2 {}^0 v_{mz} \\ l_{11}^3 {}^0 v_{tx} + l_{12}^3 {}^0 v_{ty} + l_{13}^3 {}^0 v_{tz} = {}^l v_{mtx}^3 + l_{11}^3 {}^0 v_{mx} + l_{12}^3 {}^0 v_{my} + l_{13}^3 {}^0 v_{mz} \end{cases} \quad (17)$$

根据公式 (17), 通过三个探测点的回波信息即可求解目标运动速度的各个分量, 从而计算出目标速度矢量 ${}^0\mathbf{v}_t$ , 采用多次测量求平均的方法可进一步提高测量精度。当弹药被用于攻击某一特定目标时, 可预先在周视激光引信中装定攻击目标的速度范围, 在激光探测目标过程中, 通过目标上多探测点信息估算目标速度, 并与既定目标速度范围进行比较, 实现真伪目标的辨别, 避免引信发生“虚警”或误炸。

#### 4 基于多探测点的最佳起爆模型

对于爆破战斗部, 为实现最大毁伤效能, 应使爆炸最大密度破片恰好攻击目标的易损部位<sup>[10]</sup>。通常简化认为目标几何中心为其易损部位, 则要求引信能够在探测过程中尽可能准确地估计出目标的特征几何中心位置。

在大地坐标系中, 系统对目标的探测过程如图 4 所示。

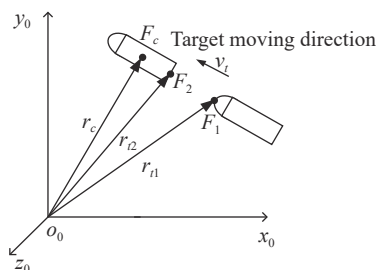


图 4 目标表面起始探测点与终止探测点示意图

Fig.4 Diagram of start detection point and end detection point on target surface

图 4 中的 $F_1$ 、 $F_2$ 分别表示目标的起始探测点和终止探测点, 对应在大地坐标系中的位矢分别为 $\mathbf{r}_{11}$ 和 $\mathbf{r}_{12}$ , 两点间的距离为 $|\mathbf{r}_{12}-\mathbf{r}_{11}|$ , 探测两点的的时间间隔为 $t$ , 则有:

$$\frac{|\mathbf{r}_{12}-\mathbf{r}_{11}|+L}{|{}^0\mathbf{v}_t|} = t \quad (18)$$

公式 (18) 中 $L$ 表示目标体的特征长度, 由于 $|{}^0\mathbf{v}_t|$ 、 $t$ 和 $|\mathbf{r}_{12}-\mathbf{r}_{11}|$ 均已知, 则根据公式 (18) 即可求解出 $L$ , 从而计算探测结束时刻目标几何中心点 $F_c$ 的位矢 $\mathbf{r}_c$ :

$$\mathbf{r}_c = \mathbf{r}_{12} + \frac{L}{2} \frac{{}^0\mathbf{v}_t}{|{}^0\mathbf{v}_t|} \quad (19)$$

假设弹丸静止时, 爆炸后的破片以速度 $v$ 沿垂直弹轴方向飞散, 作用半径为 $R$ , 且在飞散过程中速度

不衰减。探测结束 $\Delta T$ 时间后起爆弹丸, 破片与目标交会模型如图 5 所示。

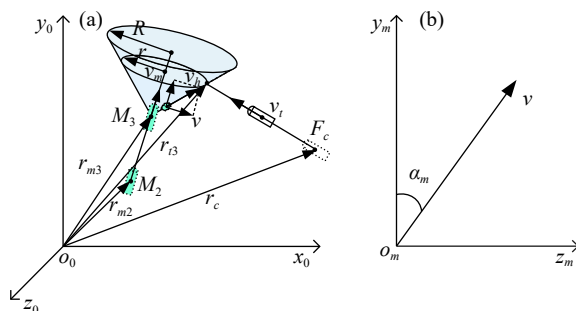


图 5 破片与目标交会模型。(a) 大地坐标系中破片与目标交会过程; (b) 弹体坐标系中起爆方位角

Fig.5 Fragment and target intersection model. (a) Intersection process of fragments and targets in the geodetic coordinate system; (b) Initiation azimuth in the projectile coordinate system

在图 5(a) 中点 $M_2$ 和 $M_3$ 分别为弹丸探测结束和最终起爆位置,  $\mathbf{r}_{m2}$ 和 $\mathbf{r}_{m3}$ 分别表示点 $M_2$ 和 $M_3$ 的位矢,  $\mathbf{v}$ 和 $\mathbf{v}_m$ 分别表示破片静态飞散速度矢量和弹丸运动速度矢量。考虑弹丸速度, 战斗部爆轰后破片作用范围如图 5(a) 中阴影部分所示, 则破片的绝对速度 $\mathbf{v}_h$ 可表示为:

$$\mathbf{v}_h = \mathbf{v} + \mathbf{v}_m \quad (20)$$

如图 5(b) 所示, 起爆方位角 $\alpha_m$ 为弹体坐标系中破片静态飞散速度矢量 $\mathbf{v}$ 与 $y_m$ 轴之间的夹角, 则有:

$$\mathbf{v}_h = \begin{bmatrix} |\mathbf{v}_m| \\ |\mathbf{v}| \cos \alpha_m \\ |\mathbf{v}| \sin \alpha_m \end{bmatrix} \quad (21)$$

最佳起爆条件应使弹丸起爆 $\Delta T_h$ 时间后破片恰好击中目标的易损部位即其特征几何中心点, 此时距探测结束已历经了 $\Delta t = \Delta T + \Delta T_h$ 的时间, 目标的特征几何中心点的位置为:

$$\mathbf{r}_{t3} = \mathbf{r}_c + (\Delta T + \Delta T_h)\mathbf{v}_t \quad (22)$$

最佳起爆条件满足:

$$\mathbf{r}_{m3} + \Delta T_h {}^0\mathbf{v}_h = \mathbf{r}_c + (\Delta T + \Delta T_h) {}^0\mathbf{v}_t \quad (23)$$

其中,

$$\mathbf{r}_{m3} = \mathbf{r}_{m2} + \Delta T \mathbf{v}_m \quad (24)$$

联立公式 (19)、(23)、(24), 得:

$$(\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_t)\Delta T + (C_0^m \begin{bmatrix} |\mathbf{v}_m| \\ |\mathbf{v}| \cos \alpha_m \\ |\mathbf{v}| \sin \alpha_m \end{bmatrix} - \mathbf{v}_t)\Delta T_h = \frac{L}{2} \frac{\mathbf{v}_t}{|\mathbf{v}_t|} + \mathbf{r}_{m2} \quad (25)$$

式中:  $\mathbf{r}_{m2} = \mathbf{r}_{12} - \mathbf{r}_{m2}$ , 表示探测结束时刻的弹目距离,

其值可以通过探测点回波脉冲信号直接得到。在大地坐标系下, 弹丸速度 $v_m$ 为:

$$v_m = C_0^m [ |v_m| \ 0 \ 0 ]^T \quad (26)$$

公式 (25) 中,  $v_m$ 、 $v_i$ 、 $|v|$ 、 $r_{m2}$ 、 $L$  可以通过多探测点数据, 基于目标速度模型求解, 代入即可求解同步扫描周视激光脉冲探测系统的最佳起爆时间 $\Delta T$ 、最佳起爆方位角 $\alpha_m$ 和起爆后破片击中目标时间 $\Delta T_h$ 。

### 5 最佳起爆模型仿真分析

根据上述建立的最佳起爆模型可知, 最佳起爆时间 $\Delta T$ 和最佳起爆方位角 $\alpha_m$ 与弹丸自身俯仰角 $\beta_m$ 、偏航角 $\psi_m$ 、速度大小 $|v_m|$ 、破片静态飞散速度大小 $|v|$ 、目标速度 $v_i$ 、弹目距离 $r_{m2}$ 以及目标特征长度 $L$ 有关。

#### 5.1 破片静态飞散速度对最佳起爆模型影响

假设已知 $\psi_m = -\frac{\pi}{4}$ ,  $|v_m|=500$  m/s,  $r_{m2}=[3 \ 5 \ 6]^T$  m,  $R=10$  m,  $L=2.5$  m,  $v_i=700\left[-\frac{\sqrt{3}}{6} \ -\frac{\sqrt{3}}{2} \ -\frac{1}{3}\right]^T$  m/s, 代入公式 (25), 可得最佳起爆时间和方位角与破片飞散速度 $|v|$ 的变化关系如图 6 所示。

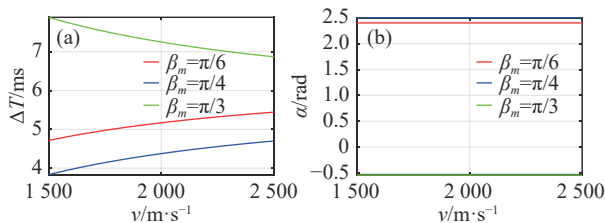


图 6 最佳起爆时间和方位角与破片飞散速度变化关系。(a) 最佳起爆时间与破片飞散速度关系图; (b) 最佳起爆方位角与破片飞散速度关系图

Fig.6 Relationship between the optimal initiation time, initiation azimuth and the fragment speed. (a)Optimal initiation time vs fragment speed; (b)Optimal initiation azimuth vs fragment speed

由图 6 可知在既定破片作用范围内, 弹丸俯仰角 $\beta_m$ 为 $\pi/6$ 、 $\pi/4$ 时, 破片飞散速度越大, 最佳起爆时间越长,  $\beta_m$ 为 $\pi/3$ 时, 破片飞散速度越大, 最佳起爆时间越短; 弹丸俯仰角确定时, 最佳起爆方位角为定值, 不随破片飞散速度发生变化; 同一破片飞散速度情况下,  $\beta_m$ 为 $\pi/3$ 时, 最佳起爆方位角最小,  $\beta_m$ 为 $\pi/4$ 时, 最佳起爆方位角最大。

#### 5.2 弹丸速度对最佳起爆模型影响

假设已知 $\psi_m = -\frac{\pi}{4}$ ,  $|v|=2000$  m/s,  $r_{m2}=[3 \ 5 \ 6]^T$  m,

$R=10$  m,  $L=2.5$  m,  $v_i=700\left[-\frac{\sqrt{3}}{6} \ -\frac{\sqrt{3}}{2} \ -\frac{1}{3}\right]^T$  m/s, 代入公式 (25), 可得最佳起爆时间和方位角与弹丸速度 $|v_m|$ 的变化关系如图 7 所示。

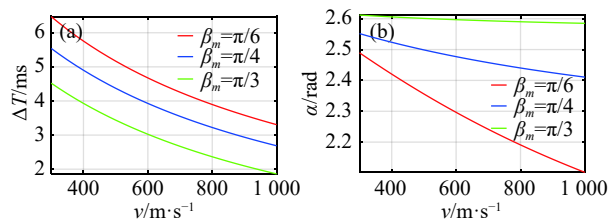


图 7 最佳起爆时间和方位角与弹丸速度变化关系。(a) 最佳起爆时间与弹丸速度关系图; (b) 最佳起爆方位角与弹丸速度关系图

Fig.7 Relationship between the optimal initiation time, initiation azimuth and the projectile speed. (a)Optimal initiation time vs projectile speed; (b)Optimal initiation azimuth vs projectile speed

由图 7 可知在既定破片作用范围内,  $\beta_m$ 为 $\pi/6$ 、 $\pi/4$ 、 $\pi/3$ 时, 弹丸速度越大, 最佳起爆时间越短, 最佳起爆方位角越小; 弹丸自身俯仰角越大, 最佳起爆方位角变化越缓慢。相同目标特征长度情况下,  $\beta_m$ 分别为 $\pi/6$ 、 $\pi/4$ 、 $\pi/3$ 时, 弹丸俯仰角越大, 最佳起爆时间越短, 最佳起爆方位角越大。

#### 5.3 弹目距离对最佳起爆模型影响

假设已知 $\psi_m = -\frac{\pi}{4}$ ,  $|v|=2000$  m/s,  $|v_m|=500$  m/s,  $r_{m2}=|r_{m2}|\left[\frac{3}{\sqrt{70}} \ \frac{5}{\sqrt{70}} \ \frac{6}{\sqrt{70}}\right]^T$  m,  $R=10$  m,  $v_i=700\left[-\frac{\sqrt{3}}{6} \ -\frac{\sqrt{3}}{2} \ -\frac{1}{3}\right]^T$  m/s, 代入公式 (25), 可得最佳起爆时间和方位角与弹目距离 $|r_{m2}|$ 的变化关系如图 8 所示。

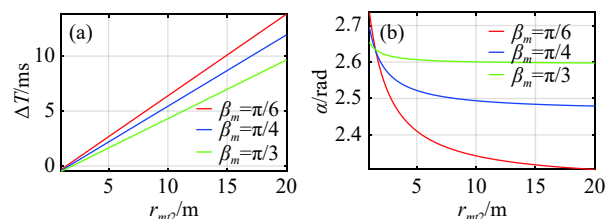


图 8 最佳起爆时间和方位角与弹目距离变化关系。(a) 最佳起爆时间与弹目距离关系图; (b) 最佳起爆方位角与弹目距离关系图

Fig.8 Relationship between the optimal initiation time, initiation azimuth and the distance between the projectile with the target.(a)Optimal initiation time vs the distance between the projectile and target;(b)Optimal initiation azimuth vs the distance between projectile and target



由图 8 可知在既定破片作用范围内, 弹丸俯仰角  $\beta_m$  为  $\pi/6$ 、 $\pi/4$ 、 $\pi/3$  时, 令最佳起爆时间为 0 时弹目距离为临界弹目距离, 弹目距离小于临界弹目距离时, 最佳起爆时间为负值, 表示探测结束时已错过最佳起爆时机, 此时应立即起爆战斗部; 弹目距离大于临界弹目距离时, 最佳起爆时间越短, 最佳起爆方位角越大, 最佳起爆时间随弹目距离变化呈线性关系; 弹丸自身俯仰角越大, 最佳起爆方位角变化越缓慢。相同目标特征长度情况下,  $\beta_m$  分别为  $\pi/6$ 、 $\pi/4$ 、 $\pi/3$  时, 弹丸俯仰角越大, 最佳起爆时间越短, 最佳起爆方位角越大。

### 5.4 目标特征长度对最佳起爆模型影响

假设已知  $\psi_m = -\frac{\pi}{4}$ ,  $|v|=2\ 000\ \text{m/s}$ ,  $|v_m|=500\ \text{m/s}$ ,  $r_{m2}=[3\ 5\ 6]^T\ \text{m}$ ,  $R=10\ \text{m}$ ,  $v_i=700\left[-\frac{\sqrt{3}}{6}\ -\frac{\sqrt{3}}{2}\ -\frac{1}{3}\right]^T\ \text{m/s}$ , 代入公式 (25), 可得最佳起爆时间和方位角与目标特征长度  $L$  的变化关系如图 9 所示。

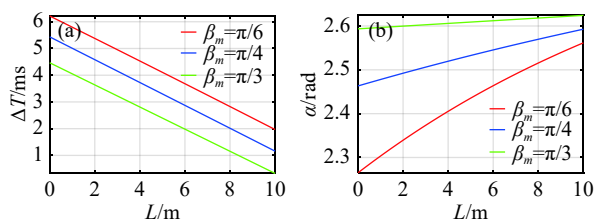


图 9 最佳起爆时间和方位角与目标特征长度变化关系。(a) 最佳起爆时间与目标特征长度关系图; (b) 最佳起爆方位角与目标特征长度关系图

Fig.9 Relationship between the optimal initiation time, initiation azimuth and the target characteristic length.(a)Optimal initiation time vs the target characteristic length;(b)Optimal initiation azimuth vs the target characteristic length

由图 9 可知在既定破片作用范围内, 弹丸俯仰角  $\beta_m$  为  $\pi/6$ 、 $\pi/4$ 、 $\pi/3$  时, 目标特征长度越大, 最佳起爆时间越短, 最佳起爆方位角越大, 最佳起爆时间随目标特征长度呈线性关系; 弹丸自身俯仰角越大, 最佳起爆方位角变化越缓慢。相同目标特征长度情况下,  $\beta_m$  分别为  $\pi/6$ 、 $\pi/4$ 、 $\pi/3$  时, 弹丸俯仰角越大, 最佳起爆时间越短, 最佳起爆方位角越大。

### 5.5 目标速度大小对最佳起爆模型影响

若已知  $\psi_m = -\frac{\pi}{4}$ ,  $|v|=2\ 000\ \text{m/s}$ ,  $|v_m|=500\ \text{m/s}$ ,  $r_{m2}=[3\ 5\ 6]^T\ \text{m}$ ,  $R=10\ \text{m}$ ,  $L=2.5\ \text{m}$ ,  $v_i=|v_i|\left[-\frac{\sqrt{3}}{6}\ -\frac{\sqrt{3}}{2}\ -\frac{1}{3}\right]^T\ \text{m/s}$ 。

代入公式 (25) 可得最佳起爆时间和方位角与目标速度的变化关系如图 10 所示。

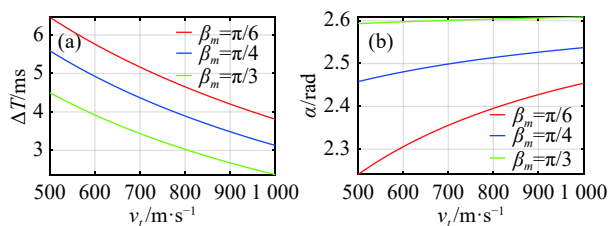


图 10 最佳起爆时间和方位角与目标速度变化关系。(a) 最佳起爆时间与目标速度关系图; (b) 最佳起爆方位角与目标速度关系图

Fig.10 Relationship between the optimal initiation time, initiation azimuth and the target speed. (a)Optimal initiation time vs target speed; (b)Optimal initiation azimuth vs target speed

由图 10 可知在既定破片作用范围内, 弹丸俯仰角  $\beta_m$  为  $\pi/6$ 、 $\pi/4$ 、 $\pi/3$  时, 目标速度越大, 最佳起爆时间越短, 最佳起爆方位角越大; 弹丸自身俯仰角越大, 最佳起爆方位角变化越缓慢。目标速度相同情况下,  $\beta_m$  为  $\pi/6$ 、 $\pi/4$ 、 $\pi/3$  时, 弹丸俯仰角越大, 最佳起爆时间越短, 最佳起爆方位角越大。

## 6 结 论

文中阐述了同步扫描周视脉冲激光引信的工作原理, 分析了目标探测过程中可探测的多个目标位置点, 计算了各探测点在弹体坐标系中的位置坐标。根据各探测点的距离和方位信息, 建立了基于多探测点的目标速度模型, 通过目标速度模型对目标速度进行解算, 与攻击目标正常速度范围进行比对, 来辨别目标真伪。在目标速度模型的基础上, 以破片攻击目标特征几何中心为目的, 求解出引信最佳起爆时间和方位角, 并分析了最佳起爆模型的影响因素及其对最佳起爆时间和方位角的影响。

### 参考文献:

[1] 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.  
[2] Kong Dehao, Lu Ming, Su Yide. Multi-beam circum-directional laser fuze and aimed warhead [J]. *Journal of Terahertz Science*

- and Electronic Information Technology*, 2019, 17(3): 402–407. (in Chinese)  
孔德浩, 路明, 苏益德. 多光束周视激光引信与定向战斗部的配合[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(3): 402–407.
- [3] Guo Zerong, Li Luo, Wen Yuquan, et al. Study on the optimum detonating azimuth of six laser range-finder for aimed wared [J]. *Journal of Beijing University of Science and Technology*, 2015, 35(4): 347–350, 356. (in Chinese)  
郭泽荣, 李洛, 温玉全, 等. 六光束脉冲激光探测定向战斗部最佳起爆方位角研究[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(4): 347–350, 356.
- [4] Shi Zhibin, Gao Min, Yang Suochang, et al. Lethal radius and initiation delay of gimbaled warhead [J]. *Modern Defense Technology*, 2014, 42(3): 1–5, 30. (in Chinese)  
石志彬, 高敏, 杨锁昌, 等. 瞄准式战斗部威力半径与起爆延时研究[J]. 现代防御技术, 2014, 42(3): 1–5, 30.
- [5] Wang Mafa, Lu Fangyun, Li Xiangyu. Calculation model of optimum delay time of detonation of warhead and its application [J]. *Journal of Ballistics*, 2011, 23(4): 95–99. (in Chinese)  
王马法, 卢芳云, 李翔宇. 战斗部最佳起爆延时的计算模型及其应用研究[J]. 弹道学报, 2011, 23(4): 95–99.
- [6] Steinvall O. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(24): 4381–4391.
- [7] Nyongesa H O, Kent S. Genetic programming for anti-air missile proximity fuze delay-time algorithms [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2001, 16(1): 41–45.
- [8] Liu Bohu, Song Chengtian, Duan Yabo. Design and simulation of a panoramic laser imaging fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0406003. (in Chinese)  
刘博虎, 宋承天, 段亚博. 周视激光成像引信设计及仿真[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4): 0406003.
- [9] Zha Bingting, Yuan Hailu, Ma Shaojie, et al. Influence of single-beam expanding scanning laser circumferential detection system parameters on detection capability [J]. *Journal of Physics*, 2019, 68(7): 79–88. (in Chinese)  
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.
- [10] Qin Shuai, Yang Suochang, Li Le, et al. The research on optimal detonation delay control of aimed warhead [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2012, 32(4): 92–94. (in Chinese)  
秦帅, 杨锁昌, 李乐, 等. 瞄准式战斗部最佳起爆延时控制研究[J]. 火箭与制导学报, 2012, 32(4): 92–94.