

周视激光成像引信设计及仿真

刘博虎, 宋承天, 段亚博

(北京理工大学 机电学院, 北京 100081)

摘要: 激光成像探测是引信技术发展中的一个重要方向, 周视成像探测技术可以有效提高引信系统的探测能力。文中首先提出一种简易周视激光成像引信原理和结构, 在弹目交会过程中可实现 360° 周视探测的目标成像; 其次建立弹目交会模型和目标 3D 模型, 模拟简易周视激光成像引信对空和对地面目标成像探测的过程; 最后设计简易周视激光成像引信的仿真软件, 用于生成引信在不同弹目交会条件下的仿真数据, 包括目标灰度图像、二值图像、回波信号等, 可为周视成像引信的图像识别电路设计和最终的工程化实现提供可靠依据。

关键词: 激光引信; 成像探测; 仿真系统

中图分类号: TJ43+9.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0406003

Design and simulation of a panoramic laser imaging fuze

Liu Bohu, Song Chengtian, Duan Yabo

(School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Laser imaging detection is an important direction of fuze technology development. The panoramic imaging detection technology can effectively improve the detection capability of the fuze system. In this paper, a simple panoramic laser imaging fuze principle and structure were firstly proposed that can realize 360° panoramic detection and create a target image in the process of missile-target encounter. Secondly, the model of missile-target encounter and the 3D model of target were established. The process of aerial and ground target imaging detection was simulated, and the images of the target were generated. Finally, the simulation software of panoramic laser imaging fuze was designed to generate the simulation data of imaging fuze under various missile-target encounter conditions, including target gray image, binary image, echo signal and so on. It is great favourable for the design of image recognition circuit and the panoramic laser imaging fuze's final engineering realization.

Key words: laser fuze; imaging detection; simulation system

收稿日期: 2017-11-12; 修订日期: 2017-12-15

基金项目: 总装备部装备预研基金

作者简介: 刘博虎(1985-), 男, 博士生, 主要从事目标智能探测与识别、自动测试系统等方面的研究。Email: 306638927@qq.com

导师简介: 宋承天(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事目标智能探测与识别、自动测试系统等方面的研究。Email: songct@bit.edu.cn

0 引言

在现代战争中,引信系统能够获取目标信息量的多少对于提高武器系统作战效能起了至关重要的作用^[1-2]。图像信息包含了丰富的目标特征,成像探测能更有效地对目标进行识别和分类,是当前国内外引信技术的一个重要发展方向^[3]。激光探测不易受电磁干扰,结合成像探测对目标的识别可有效地提高武器系统的杀伤力,是适应未来战争的有效措施。激光成像引信为获取更多有效探测数据,应尽可能扩大光学系统扫描视场以达到 360°扫描探测,同时结合目标轮廓信息可快速准确识别目标^[4-6]。

大视场探测激光引信的空间光束布局有多辐射、分区、分区扫描和同步扫描等四种方案。其中多辐射、分区方案的激光接收器与发射器数量相等且收发视场位置匹配,发射、接收窗口在弹体周围均匀分布;分区扫描方案的发射器光束经扫描形成探测视场,由多个探测器分区接收;同步扫描方案是通过驱动高速电机带动单个发射、接收系统进行探测。目前 Python4-2 怪蛇型空空导弹引信采用多辐射方案,美国 Thales 导弹引信采用分区方案,英国 Thomson-Thorn 公司的引信采用分区扫描方案^[7],同步扫描方案常用于空载激光雷达。

采用多辐射和分区的引信通常是通过光学系统对发射光束在弧矢方向进行扩束、在子午方向进行压缩,形成一定角度内能量集中的扇形窄带状光束,均匀分布在导弹弹体四周,达到周视探测目的,同时采用大视场光学系统接收激光回波信号^[8-12]。这种方法虽然可以扩大激光探测的视角,但只能粗略估计目标相对引信的距离和角度,成像效果不佳。

采用单光束同步扫描方案实现周视探测,须将直流电机及全反射镜等部件安装在弹体中轴线上。受弹体结构和引信安装位置的限制,发射和接收视窗须在弹体中部环绕弹体,因而无法保证结构强度要求。这种情况下,采用四象限分区方案则安装位置相对灵活,同时在相同电机转速和探测时间的条件下,四象限分区相比单光束可获得四倍的扫描频率,可降低对直流步进电机的要求,减少工程化的难度,提高系统的冗余性和可靠性。

文中结合四象限分区方案和同步扫描方案设计

一种简易周视激光成像引信,实现 360°周视探测,在弹和目标交会过程中通过扫描目标成像,获取目标表面轮廓特征。同时,由于弹目交会的复杂性,飞行试验难以获取全面的激光成像引信目标图像,不能满足成像引信进一步信号处理及引战配合的研究需要。因此,必须通过仿真模拟获取目标图像,这也是成像引信研究的关键和难点。文中设计了成像引信仿真软件,建立了周视激光成像仿真模型,利用弹目交会模型和目标模型,仿真获取设定弹目交会条件下的典型对空、对地目标的灰度图像和功率图像,作为研究和测试成像引信信号处理的依据。

1 简易周视激光引信成像原理

简易周视激光成像引信由四个单象限探测单元和控制中心单元等部件组成。四个单象限探测单元分布在导弹赤道面的圆周上覆盖 360°视场。每个单象限探测单元由激光发射系统(半导体激光器及发射光学系统、激光器驱动电路)、高速扫描系统(直流步进电机、全反射镜)、激光接收系统(接收光学系统、光电探测器、放大等电路)、信号处理及控制系统组成,探测单元结构示意图如图 1 所示。

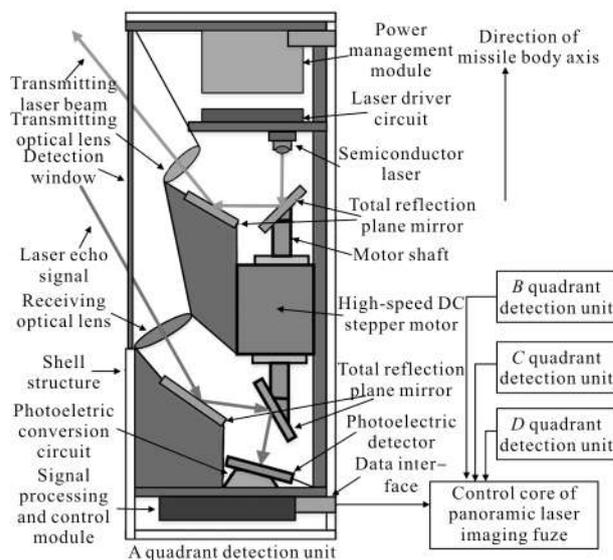


图 1 周视引信探测单元结构示意图

Fig.1 Diagram of panoramic laser fuze detection unit

简易周视激光成像引信的工作原理:引信供电,各个探测单元的信号处理与控制系统控制激光器驱动电路驱动激光器发射脉冲信号,同时控制电机带

动两个全反射平面镜旋转,激光束照射到发射全反射镜上,随反射镜的转动改变出射角度,并经光学透镜准直,遇到目标后形成回波信号。回波信号由接收透镜汇聚后经接收全反射平面镜进入光电探测器,再经放大等电路后进入信号处理系统。信号处理及控制系统计算回波功率、目标距离信息,综合生成目标图像。

为探测弹体前方的目标,激光成像引信采用激光前倾发射、前倾接收的方式,激光发射、接收视场与弹轴成锐角,如图 2 所示,其中 β 为发射系统前倾角。

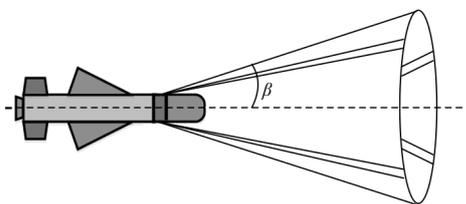


图 2 激光引信周视探测示意图

Fig.2 Diagram of laser fuze panoramic detection

弹目交会时成像引信扫描过程如图 3 所示,图中 \vec{v}_M 和 \vec{v}_D 分别为目标和导弹的飞行速度, β 为发射系统前倾角, d_1 至 d_3 为 t_1 到 t_3 时刻导弹在飞行方向上不同的位置。引信利用弹目相对运动,在 d_1 至 d_3 等不同点上扫描目标,逐次获取目标各部分的外形轮廓。

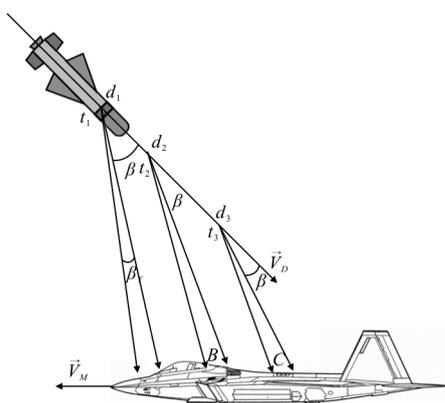


图 3 激光成像引信扫描过程

Fig.3 Scanning process of laser imaging fuze

成像引信生成目标图像为二维图像,其中一维的分辨率与成像引信激光发射器扫描的角分辨率有关,另一维的分辨率与引信在时间轴上的采样频率

和弹速有关。分析成像引信的成像精度,可以假设将 360° 周向视野再分成 x 个探测元,每个探测元覆盖 $(360/x)^\circ$ 的视野范围,每一象限包含 $(x/4)$ 个探测元,每个探测元的输出对应目标图像中一个像素点的信息。若电机转速为 n ,扫描探测频率为 S ,则采样间隔 T 如公式(1)所示:

$$T = \frac{1}{S} = \frac{1}{xn} \quad (1)$$

若脉冲激光发射频率为 F ,即每秒发射 F 束激光,则 T 秒发射 $T \cdot F$ 束激光, V_D 为弹速度,则扫描角分辨率 $\Delta\theta$ 和距离分辨率满足:

$$\begin{cases} \Delta\theta = \frac{360}{xTF} = \frac{360}{x} \frac{S}{F} = \frac{360n}{F} \\ \Delta y = T \cdot V_D \end{cases} \quad (2)$$

由公式(1)和(2)分析可知,为提高目标图像分辨率应尽可能增加探测元数 x 、扫描探测频率 S 和脉冲激光发射频率 F 。此时若取探测元数 $x=72$ 、 $S=2\ 000\ \text{Hz}$ 、 $F \geq 10\ \text{kHz}$,则角分辨率 $\Delta\theta$ 可以达到 $\Delta\theta \leq 1^\circ$;若取导弹速度在 $300 \sim 900\ \text{m/s}$ 之间,则目标图像的距离分辨率 Δy 约在 $0.1 \sim 0.5\ \text{m}$ 之间,可以得到较为精确的目标图像。

因此在研究过程中选择合适的探测元数、扫描探测频率和激光发射频率等参数,为整个成像引信系统的模拟仿真和工程实现提供参考。

2 简易周视激光成像引信仿真

激光成像引信前期研究主要通过仿真方法进行成像机理和模拟研究。仿真时首先需要建立弹目交会模型和目标模型,然后计算引信探测视线与目标模型是否有交点而获得仿真模拟二值图像。另外,可以计算交点处的激光回波功率,并将功率值灰度化处理可获得目标灰度图像。

2.1 弹目交会模型建立

为能对弹目交会过程进行数学描述,需要建立弹目交会模型。建立弹目交会模型基于以下几点假设:

- (1) 忽略弹体、目标机体上存在的振动力、风力和地球引力等因素对导弹和目标的影响。
- (2) 弹体和目标机体视为刚体。
- (3) 目标和导弹各自独立地作匀速直线运动。
- (4) 假设导弹无姿态角,即导弹轴线与导弹速度

方向一致。

在以上假设条件下建立弹目交会模型,如图 4 所示:在交会过程中,导弹质点在 V 平面内沿某一直线做匀速运动,目标质点在 U 平面内同样沿某一直线做匀速运动,规定 U 平面和 V 平面相互平行,各坐标系定义 UV 平面的基础上。

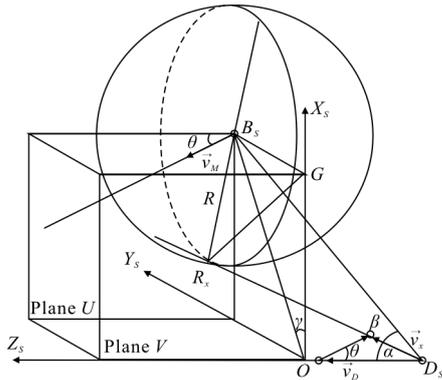


图 4 弹目交会模型图

Fig.4 Diagram of missile-target encounter model

在图 4 所示弹目交会模型中,进一步引入导弹体坐标系、目标坐标系和交会时空坐标系,得到对空探测时弹目交会模型坐标系如图 5 所示。

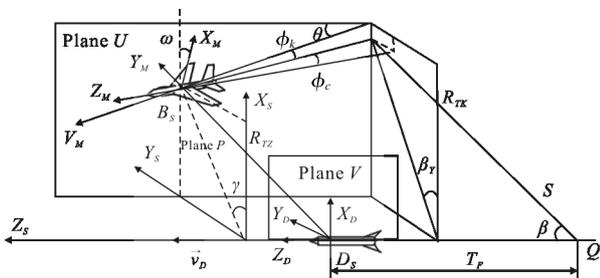


图 5 空中弹目交会模型坐标系

Fig.5 Coordinate system of aerial missile-target encounter model

图 5 中各坐标系定义如下:

(1) 弹体坐标系 $D_s X_D Y_D Z_D$: 坐标原点为引信探测窗口中心 D_s , Z_D 轴与弹体轴线重合, 假定弹体轴线与导弹速度矢量 \vec{v}_D 重合, X_D 轴在导弹运动 V 平面内, Y_D 轴由右手法则确定。

(2) 目标坐标系 $B_s X_M Y_M Z_M$: 坐标原点为目标脱靶中心 B_s , Z_M 轴与目标运动方向轴线重合, 以运动方向为正方向, 如目标是飞机, 则假设 X_M 在垂直尾翼平面内, Y_M 轴按右手法则确定。

(3) 时空坐标系 $O X_s Y_s Z_s$: 引信视场中心通过目

标脱靶中心 B_s 点的瞬时作为坐标系的时间原点, 通过两条分别与目标速度矢量 \vec{v}_M 、弹速度矢量 \vec{v}_D 重合的直线作互相平行的 UV 平面, 通过 B_s 点作平面 P 与弹速度矢量 \vec{v}_D 垂直并相交于 O 点, 令 O 点为时空坐标系原点, Z_s 轴与弹速度矢量 \vec{v}_D 重合且方向一致, X_s 轴在弹运动平面内, Y_s 轴按右手法则确定。

坐标系中主要参数定义如下: R_{TZ} 为引信窗口中心到目标脱靶中心的距离; V_D 为弹速度; V_M 为目标速度; α 为相对速度矢量 \vec{v}_x 和弹速度矢量 \vec{v}_D 之间的夹角; θ 为交会角, 定义为 \vec{v}_M 和 \vec{v}_D 在 U, V 平面内的夹角; γ 为脱靶方位角, 定义为 P 平面内 OB_s 与 X_s 轴的夹角; ω 为目标滚动姿态角, 定义为以 Z_M 轴为旋转轴, 从 Z_M 轴正半轴方向观察, X_M 轴按顺时针转动角度; ϕ_k 为目标迎面姿态角, 定义为以 Y_M 轴为旋转轴, 从 Y_M 轴正半轴方向观察, Z_M 轴按顺时针转动角度; ϕ_c 为目标侧滑姿态角, 定义为以 X_M 轴为旋转轴, 从 X_M 轴正半轴方向观察, Z_M 轴按顺时针转动角度; β 为引信视场倾角; β_V 为引信视野角, 引信视线简化为一条直线, β_V 为其在赤道面内与基准线的夹角; S 为引信探测视线上一点; F 为引信探测到目标时目标所处的位置; Q 为引信探测到目标时弹所处位置; R_{TK} 为弹在 Q 位置时引信窗口中心到目标脱靶中心的距离。

对于地面目标, 如坦克等, 由于运动速度远小于弹, 因此对地面目标的探测, 还可以增加以下两点假设, 在一般目标弹目交会模型基础上进一步简化, 作为弹目交会模型的一种特殊情况。

(1) 假设坦克目标相对于地面静止不动。

(2) 假设时空坐标系与坦克目标坐标系重合, 以坦克目标几何中心作为坐标原点。

简化后周视激光引信对地探测弹目交会模型相关参数定义和空中目标弹目交会模型一致。

2.2 目标模型建立

仿真成像引信探测过程需建立目标模型并将其纳入到弹目交会模型中。3DS Max 软件具有操作简便、建模精细、输出模型文件兼容性强等优点, 可高效完成目标模型的建立工作。

在 3DS Max 环境中建立目标模型采用部位分解法和板块元法, 将目标分解为若干标准立体图形, 如: 长方体、圆柱体、锥体等。每一个立体图形都是

由三角面元组成,三角形的顶点由空间坐标描述。同时模型文件中也包含所有三角面元的索引,以此可快速查找目标模型中指定的三角面元,方便进行坐标变换和激光束与模型表面交点的运算。建立目标 3D 模型既须保证模型具有一定精细程度,包含目标的主要特征信息,又要尽量减少目标模型表面的三角面元数量,提高仿真系统效率。以坦克目标模型为例,在 3DS Max 环境中生成的三维模型如图 6 所示。



图 6 3DS Max 环境中的坦克目标模型

Fig.6 Tank model in 3DS Max

2.3 引信探测视线与目标交点计算

研究成像引信探测过程,可将探测视线简化为一条射线 L ,射线起点为引信探测窗口中心 D_s 。 L 在弹体坐标系中可用其在子午面内与轴线的夹角 β_x 和在赤道面内与基准线的夹角 β_y 来表示。弹体坐标系中引信窗口中心 D_s 坐标为:

$$\begin{cases} x_{ds}=0 \\ y_{ds}=0 \\ z_{ds}=0 \end{cases} \quad (3)$$

设 S 是引信探测视线上与引信窗口中心距离为 1 的点,经 S 和 D_s 两点可在空间中定义激光探测视线。在弹体坐标系中 S 点坐标为:

$$\begin{cases} x_{ss}=\sin\beta_x\cos\beta_y \\ y_{ss}=\sin\beta_x\sin\beta_y \\ z_{ss}=\cos\beta_x \end{cases} \quad (4)$$

成像引信扫描目标表面的过程,是在目标坐标系中,求解引信探测视线与目标模型表面三角面元交点的过程。弹体坐标系中引信探测视线上的 (x_{ds}, y_{ds}, z_{ds}) 和 (x_{ss}, y_{ss}, z_{ss}) 两点根据给定参数进行坐标转换,投影到目标坐标系中的坐标分别为 (x_d, y_d, z_d) 和 (x_s, y_s, z_s) ,由此可得探测视线在目标坐标系中的方程:

$$\frac{x-x_d}{x_s-x_d}=\frac{y-y_d}{y_s-y_d}=\frac{z-z_d}{z_s-z_d} \quad (5)$$

求探测视线与目标表面的交点需选取目标模型表面所有三角面元参与计算。设某一个三角面元的三个顶点为:

$$A(x_a, y_a, z_a), B(x_b, y_b, z_b), C(x_c, y_c, z_c)$$

则三角面元所在平面内的两个方向向量为:

$$\begin{cases} \overrightarrow{AB}=(x_b-x_a, y_b-y_a, z_b-z_a) \\ \overrightarrow{AC}=(x_c-x_a, y_c-y_a, z_c-z_a) \end{cases} \quad (6)$$

若该平面的法向量为 $\vec{n}=(I, J, K)$ 则:

$$\begin{cases} I=(y_b-y_a)(z_c-z_a)-(z_b-z_a)(y_c-y_a) \\ J=(z_b-z_a)(x_c-x_a)-(x_b-x_a)(z_c-z_a) \\ K=(x_b-x_a)(y_c-y_a)-(y_b-y_a)(x_c-x_a) \end{cases} \quad (7)$$

平面经过点 $A(x_a, y_a, z_a)$ 且法向量为 \vec{n} ,由此可得该平面在目标坐标系中的解析方程:

$$I(x-x_a)+J(y-y_a)+K(z-z_a)=0 \quad (8)$$

联立探测视线方程(5)和三角面元所在平面方程(7)、(8)并求解,若方程组无解,则认为探测视线与该三角面元所在平面无交点;当方程组存在解析解,则认为探测视线与该平面存在交点 S 。交点 S 的坐标如公式(9)所示。

$$\begin{cases} x=x_d+(x_s-x_d)\cdot t \\ y=y_d+(y_s-y_d)\cdot t \\ z=z_d+(z_s-z_d)\cdot t \end{cases} \quad (9)$$

式中: t 为方程参数,表达式为:

$$t=\frac{I(x_d-x_a)+J(y_d-y_a)+K(z_d-z_a)}{I(x_s-x_a)+J(y_s-y_a)+K(z_s-z_a)} \quad (10)$$

根据以上公式计算得出交点坐标,仅表示探测视线与目标表面三角面元所在平面存在交点,还需要进一步判断点 S 与 ΔABC 的位置关系,当点 S 处于 ΔABC 范围内时,认为引信探测视线与 ΔABC 有交点。选择目标模型中所有的三角面元重复上述计算过程,可求得该探测视线与目标模型表面所有交点的坐标。同一条探测视线可能与目标的不同部位相交,但目标表面上的交点与导弹中心距离最小。交点与探测视窗中心的距离 R_{12} 可由公式(11)求得:

$$R_{12}=\left[(X_1-X_2)^2+(Y_1-Y_2)^2+(Z_1-Z_2)^2\right]^{-1/2} \quad (11)$$

式中: (X_1, Y_1, Z_1) 和 (X_2, Y_2, Z_2) 分别为交点坐标和弹中心坐标。将求得的多个交点坐标依次代入公式(11),重复上述过程,最终选择与探测视窗中心最小的点为引信视线与目标交点。

2.4 激光回波功率仿真计算

仿真计算激光回波功率，可假设激光照射到目标表面形成激光脚印，将激光脚印划分为若干采样区。回波信号为所有采样区内脉冲发射信号与对应目标散射面单位冲击响应卷积值的累加。脉冲激光回波功率 P_{ref} 计算方法如公式(12)所示。

$$P_{ref}(t) = \sum_{S=1}^{n_{subs}} [I_S(\theta_x, \theta_y, R) \cdot P_t(t) \otimes h_s(t)] \quad (12)$$

式中： \otimes 为时间卷积计算； P_{ref} 为脉冲激光回波信号功率； n_{subs} 为激光脚印内方形采样区个数； I_S 为照射到第 S 个采样区的激光能量分布，如公式(13)所示。

$$I_S(\theta_x, \theta_y, R) = \left(\frac{I_0}{R^2}\right) \cdot \exp\left[-2\left(\frac{\theta_x}{\alpha_x}\right)^{2G_x} - 2\left(\frac{\theta_y}{\alpha_y}\right)^{2G_y}\right] \quad (13)$$

式中： $\theta_x = \arctan(d_x/R)$ ， $\theta_y = \arctan(d_y/R)$ ； d_x 和 d_y 为采样区横纵向尺寸； I_0 为发射脉冲能量； R 为探测距离； α_x 和 α_y 为激光束发散角； G_x 和 G_y 为高斯因子； P_t 为激光发射脉冲功率，如公式(14)所示。

$$P_t(t) = (t/\tau)^2 \cdot \exp(-t/\tau) \quad (14)$$

式中： $\tau = T_{1/2}/3.5$ ， $T_{1/2}$ 为激光脉冲的半值宽度。

h_s 为激光脉冲在第 S 个采样区的单位冲击响应，如公式(15)所示。

$$h_s(t) = \pi \rho_s(x, y, \theta) \frac{\delta(t - kT)}{n_f - n_c + 1} F(t) \quad k = n_c, \dots, n_f \quad (15)$$

式中： T 为采样周期； $\delta(t)$ 为单位冲击函数； $n_c T$ 和 $n_f T$ 为近散射点采样时刻和远散射点采样时刻； $\rho_s(x, y, \theta)$ 为第 S 个采样区散射面上的散射率，如公式(16)所示。

$$\rho_s(x, y, \theta) = \frac{A}{\cos^6 \theta} \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta}{S^2}\right) + B \cos^m \theta \quad (16)$$

式中： A 和 B 为目标镜面反射和漫反射分量系数； θ 为光束入射方向与散射面法向量的夹角； S 为斜率均方根，反映目标表面围观轮廓的斜率均值； m 为描述散射面的参数，通常取 2。

$F(t)$ 为接收功率因子，如公式(17)所示。

$$F(t) = \exp(-2\psi_{atten} R) \frac{D_{rec}^2}{4\pi R^2} \eta_{sys} \quad (17)$$

式中： ψ_{atten} 为大气衰减系数； D_{rec} 为探测器的孔径； η_{sys} 为光学系统效率。

在仿真过程中探测距离 R 、激光束入射方向、目标

散射面法向量夹角 θ 由仿真所得，其余参数如表 1 所示。

表1 用于仿真的激光探测系统各参数

Tab.1 Parameters of laser detection system used in simulation

Item	Number
I_0/W	70
λ/nm	970
n_{subs}	225
$d_x/cm, d_y/cm$	0.67
α_x, α_y	2
G_x, G_y	1
$T_{1/2}/ns$	50
A	0.5
B	0.5
S	0.8
m	2
η_{sys}	0.95
ψ_{atten}	0.02
D_{rec}/mm	40

将仿真所得激光回波功率值和回波功率的峰值相比，进行 0~255 的灰度化后，获得目标灰度图像。在目标灰度图像中，目标表面不同部位会存在明显差异，反应了目标的细节特征，可作为引信识别目标或目标部位的有效依据。

3 简易周视激光成像引信仿真软件设计

基于以上理论模型，文中设计仿真软件，可根据设置的弹目交会条件参数和目标模型生成目标图像和相关数据，仿真软件的主界面如图 7 所示。



图 7 成像引信仿真软件主界面

Fig.7 Main interface of the imaging fuze simulation software

仿真软件工作流程如图 8 所示。

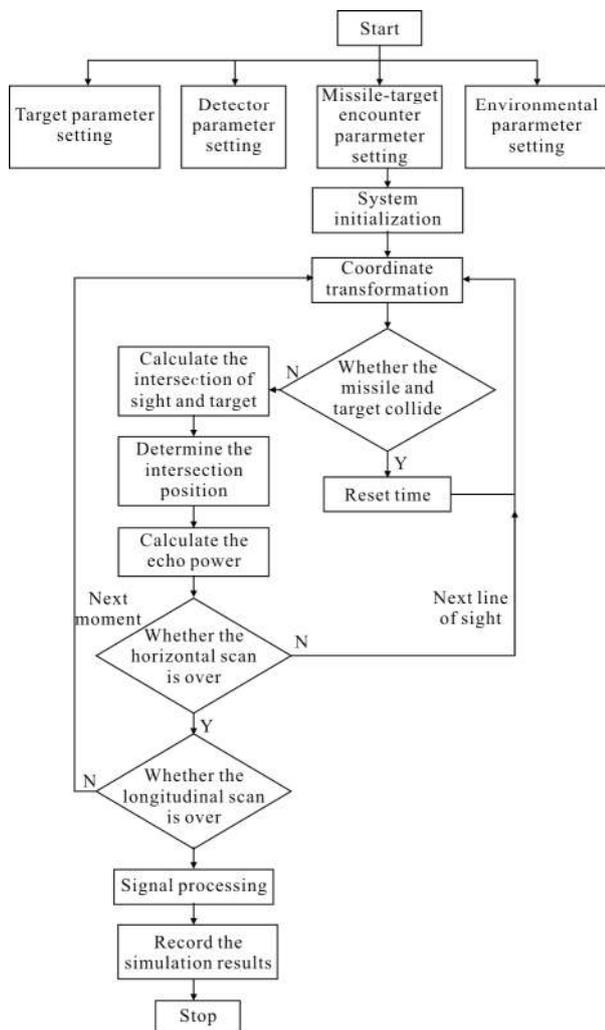


图 8 激光成像引信仿真流程图

Fig.8 Simulation flow chart of laser imaging fuze

仿真软件可生成目标回波功率数据、距离灰度数据、交点距离等类型的数据。如图 9 所示为部分交会条件下仿真得到的飞机目标的二值图像和坦克目标灰度图像。

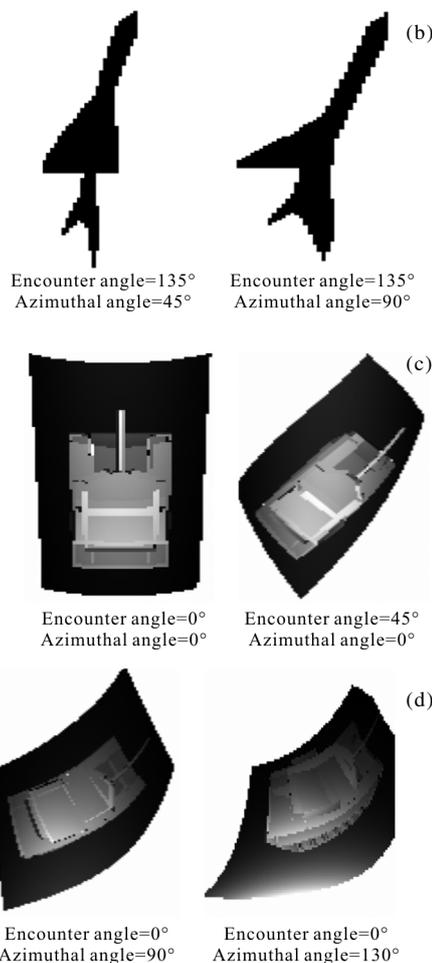
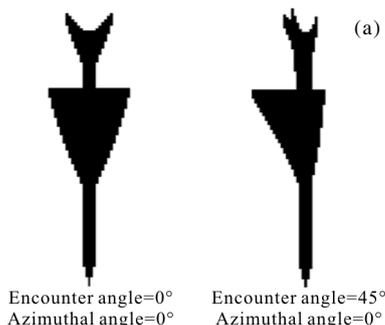


图 9 不同弹目交会条件下坦克与飞机的图像

Fig.9 Images of tank and plane under different missile-target encounter conditions

由图 9 可知仿真生成的目标图像可反映在不同弹目交会条件下的目标特征。使用该仿真软件建立目标样本库和各种交会条件下的目标图像库，可为成像引信的图像识别电路和信号处理系统的设计研究提供有效数据。

4 结论

文中设计了一种周视激光成像引信原理与结构,其可以在弹目交会过程中实现周视探测,获取较高精度的目标图像,具备工程化实现的可能。通过对成像引信探测机理的仿真,获取了引信在不同弹目交会条件下的输出数据,以此建立典型目标样本库,为引信的图像识别电路设计提供依据,对周视激光成像引信的研究起到了进一步的推动作用。

在后续研究中还须丰富目标模型库,建立更多种类的目标模型,并对各种目标模型进行细化,包括外形细节、散射特征等。增加复杂环境背景的建模仿真,再与真实现场实验所得的探测数据进行对比,改进仿真软件。

参考文献:

- [1] Cui Zhanzhong, Song Shihe. The Principle of Proximity Fuze [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009: 162-169. (in Chinese)
崔占忠, 宋世和. 近炸引信原理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 162-169.
- [2] Zhang He, Zhang Xiangjin. Theory and Technology of Pulsed Laser Near Field Target Detection [M]. Beijing: Science Press, 2013: 6-15.
张合, 张祥金. 脉冲激光近场目标探测理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 6-15.
- [3] Ji Yunfei, Geng lin, Feng Guoxu, et al. New development of laser imaging technology [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45 (12): 1413-1417. (in Chinese)
季云飞, 耿林, 冯国旭, 等. 激光成像技术的新发展[J]. 激光与红外, 2015, 45(12): 1413-1417.
- [5] Zhang Tengfei, Zhang Hexin, Hui Junjun, et al. A review development and application of laser-guided weapons [J]. *Electronics Optics & Control*, 2015, 22(10): 62-67. (in Chinese)
张腾飞, 张合新, 惠俊军, 等. 激光制导武器发展及应用概述[J]. 电光与控制, 2015, 22(10): 62-67.
- [6] Xu Zhengping, Shen Honghai, Xu Yongsen. Review of the development of laser active imaging system with direct ranging[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 28-38. (in Chinese)
徐正平, 沈宏海, 许永森. 直接测距型激光主动成像系统发展现状[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 28-38.
- [7] 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. (in Chinese)
甘霖, 张合, 张祥金, 等. 激光近炸引信单光束脉周向探测技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 84-89.
- [8] Zhang Qiuchen, Shi Rui, Li Zhuo. Modeling method of laser imaging target simulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 112-117. (in Chinese)
张秋晨, 施蕊, 李卓. 激光成像目标模拟器建模方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 112-117.
- [9] Huang Fuyu, Shen Xueju, He Yongqiang, et al. Performance analysis of super-wide field of view imaging system used for space target detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3134-3140. (in Chinese)
黄富瑜, 沈学举, 何永强, 等. 超大视场成像系统对空间目标的探测能力分析 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3134-3140.
- [10] Xie Hongbo, Yao Lijuan, Li Yong, et al. Design of panoramic laser receiving optical system based on prism[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(5): 586-589. (in Chinese)
谢洪波, 姚丽娟, 李勇, 等. 基于棱镜的激光周视接收系统的设计[J]. 激光技术, 2014, 38(5): 586-589.
- [11] Fan Dapeng, Zhou Yuan, Lu Yafei, et al. Overview of beam steering technology based on rotational double prisms [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 136-150. (in Chinese)
范大鹏, 周远, 鲁亚飞, 等. 旋转双棱镜光束指向控制技术综述[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 136-150.
- [12] Liu Bingqi, Zhou Bin, Wu Dongsheng, et al. Dual-channel active laser detection system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 241-246. (in Chinese)
刘秉琦, 周斌, 武东生, 等. 双通道激光主动探测系统[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(2): 241-246.