

❖ 特约专栏 ❖

一种适用于空空导弹的激光灰度成像引信技术

王小驹, 马 珩, 张顺法

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 针对空空导弹激光引信易受云烟雾、地海杂波干扰的问题, 提出了一种适用于空空导弹的激光灰度成像引信技术。采用推扫式线阵成像探测方式, 即随着弹目交会运动并根据激光回波幅度对目标逐行扫描灰度成像。通过渐进式目标识别算法处理逐行累积而成的灰度轮廓像可实现激光引信精细化探测, 从而提高其抗干扰的能力。原理样机试验验证数据表明, 激光灰度成像技术可较好地运用到激光引信中, 验证试验获取的图像、数据, 为激光引信抗干扰研究提供了技术储备。

关键词: 激光灰度成像引信; 推扫式线阵成像; 抗干扰

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0303002

Laser gray imaging fuze technology for air-to-air missile

Wang Xiaoju, Ma Heng, Zhang Shunfa

(China Air Borne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Aiming at the problem that air to air missile laser fuze is easily interfered by cloud, smoke and ground sea clutter, a laser gray imaging fuze technology for air to air missile was proposed. The push broom linear array detection method was used, which was progressive scanning gray imaging with the intersection motion of missile and target according to amplitude information of laser echo. The progressive target recognition algorithm was used to deal with the gray outline image accumulated by line to realize the precise detection of laser fuze, so its anti-interference ability can be improved. The test results of the prototype show that the scheme of the laser gray imaging fuze technology is feasible, the hardware realizability is high, and the image data obtained from the test can provide technical reserve for anti-jamming research of laser fuze.

Key words: laser gray imaging fuze; push broom linear array imaging; anti-interference

收稿日期: 2017-10-10; 修订日期: 2017-11-20

作者简介: 王小驹(1979-), 男, 工程师, 主要从事激光引信方面的研究。Email: lyxjwang@sina.com

0 引言

激光引信因其探测目标的距离分辨率高,对电磁干扰不敏感以及方向性强等特点,在空空导弹中得到了广泛的应用^[1]。但是,激光引信也存在一些不可忽视的问题,如易受云雾、空气悬浮粒子后向散射,地物背景杂波影响,使得激光引信在某些条件下的应用受到一定的限制。

激光成像引信技术为引信精细化探测的主要研究方向,即满足精细化探测所要求的方位、角度等信息,又可获取目标的外形轮廓、表面回波强弱等图像信息。通过表面回波特性区分目标和背景干扰等,理论上可有效地识别目标与干扰;而且还可利用图像获取目标特定部位和脱靶方位等,实时给出目标特定部位和引炸信息,配合定向战斗部更有效地毁伤目标,较好地解决能量型激光引信的问题。

文中扼要介绍了一种适用于空空导弹的激光灰度成像引信的系统组成和工作原理,并对目标灰度图像处理识别系统和识别算法的实现,以及原理仿真验证、原理样机试验等方面进行了较详细的阐述。

1 系统组成和工作原理

激光灰度成像引信采用 6 象限线型阵列推扫成像探测方式^[2],每象限由 2 套 16 路收/发系统组成,按主要功能模块可将引信划分为:光束整形发

射系统、激光器驱动模块、线型阵列接收系统、高速预处理模块、灰度成像信号处理及目标识别系统、电源模块及总体结构模块^[3],系统功能组成框如图 1 所示。

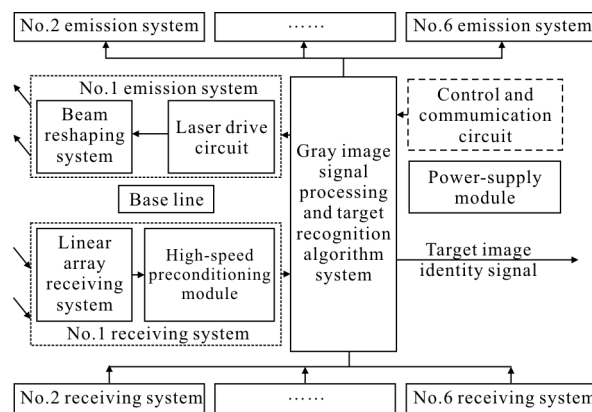


图 1 激光灰度成像引信组成框图

Fig.1 Functional block diagram of the laser gray imaging fuze

工作原理及流程如图 2 所示。发射电路驱动激光发射系统按设定时序产生主动激光束照射目标;线型阵列接收机接收到目标表面反射回波光信号,经光电转换传送到预处理模块;经信号放大、比较后输入到激光灰度成像引信图像处理及目标识别系统;信号处理系统将各像元信号进行灰度鉴别得到灰度等级等信息,图像生成模块按时序进行像元组成,实时生成目标行图像,通过交会过程的延续累计多行图像形成目标图像,提供给目标识别算法进行图像识别处理,最终给出识别结果。

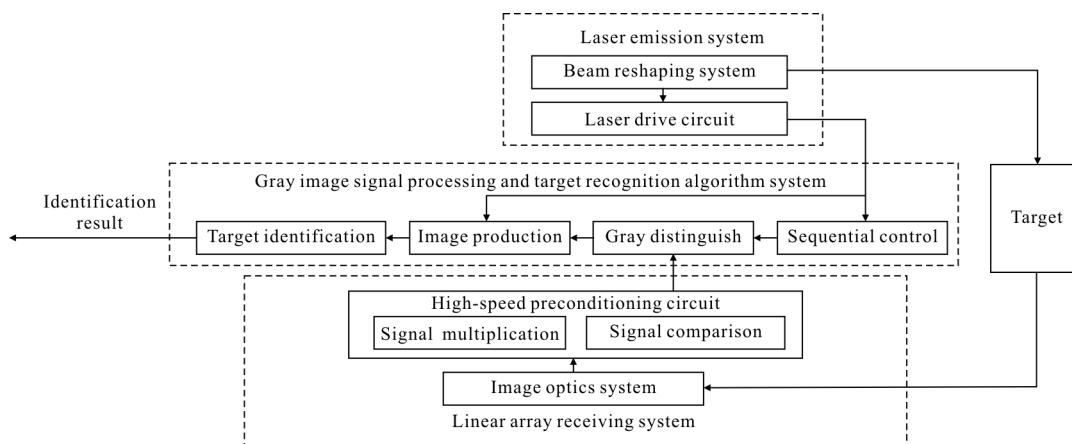


图 2 激光灰度成像引信工作原理及流程图

Fig.2 Working principle and flow chart of the laser gray imaging fuze

2 系统的实现原理

2.1 光束整形发射系统

光束整形发射系统的作用是对激光器产生的光束进行整形,产生水平视场 30°、垂直视场 0.5°的扇形光束,其组成如图 3 所示。

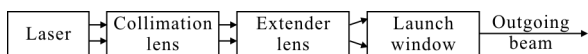


图 3 光束整形发射系统组成图

Fig.3 Composition diagram of beam reshaping emission system

2.2 激光器驱动模块

激光器驱动模块的作用是为多个激光发射子系统提供轮流发射的驱动电压,驱动激光器发出按照时序要求、具有一定脉宽及功率的脉冲激光。主要包括时序电路、脉冲形成及电压预放大电路、功率开关驱动电路以及电源变换电路等,原理框图如图 4 所示。

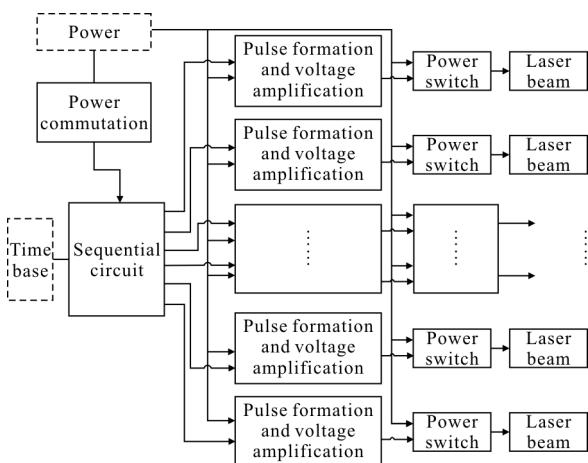


图 4 激光器驱动模块原理框图

Fig.4 Functional block diagram of the laser actuator

2.3 线型阵列接收系统

线型阵列接收系统作用是接收目标表面回波信号,并对光电转换的电信号进行放大、比较输出像元数字信号,其组成形式如图 5 所示。

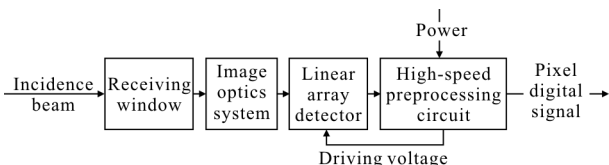


图 5 激光接收子系统组成原理框图

Fig.5 Functional block diagram of receiving system

2.4 高速预处理电路

高速预处理电路为接收系统的重要组成部分,在成像引信中需要适应高速交会的使用环境,因此,电路设计中采用高速、并行处理的方式^[4]。

高速预处理电路原理如图 6 所示,功能模块由 16 路放大电路以及 16 路比较器组成。其功能是为线阵探测器上建立偏置电压,并提取探测器上经光电转换后的微弱回波信号,经放大电路,将幅度起伏可能很大的回波脉冲放大到适合比较器使用的信号,以便供给信号处理电路进行数据综合处理。

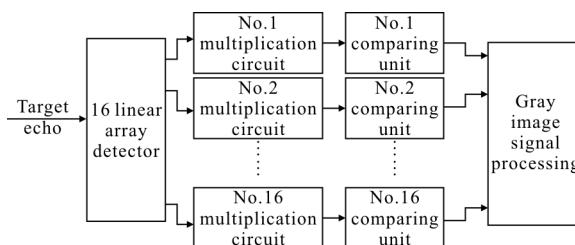


图 6 高速预处理电路原理框图

Fig.6 Functional block diagram of high-speed preprocessing system

2.5 灰度图像处理系统

激光成像引信中的灰度图像处理系统是以 FPGA 为核心,既能独立工作,又能在上位机控制下完成多路并行输入信号并行处理识别、图像存储、数据交换(通过 USB 数据接口实现信号处理板与上位机之间的数据通信)、上位机指令控制的多功能灰度图像信号处理器。

2.5.1 基于 FPGA 的图像处理系统软件功能设计

信号处理系统软件主要组成模块及各模块主要功能如图 7 所示。

(1) 时钟产生模块:由晶振输入时钟产生出所有需要时钟,包括系统工作主时钟、鉴宽时钟、USB 控制芯片工作时钟、SlaveFIFO 工作时钟、频率可调的激光发射时钟;

(2) 状态控制模块:通过一个主状态机产生状态信号,控制整个系统的工作时序;

(3) 发射时钟同步模块:根据发射同步时钟到来时刻推算其他象限发射时刻,给出各象限发射同步信号以及当前发射象限编号;

(4) 高速鉴宽模块:对输入信号进行高速采样及

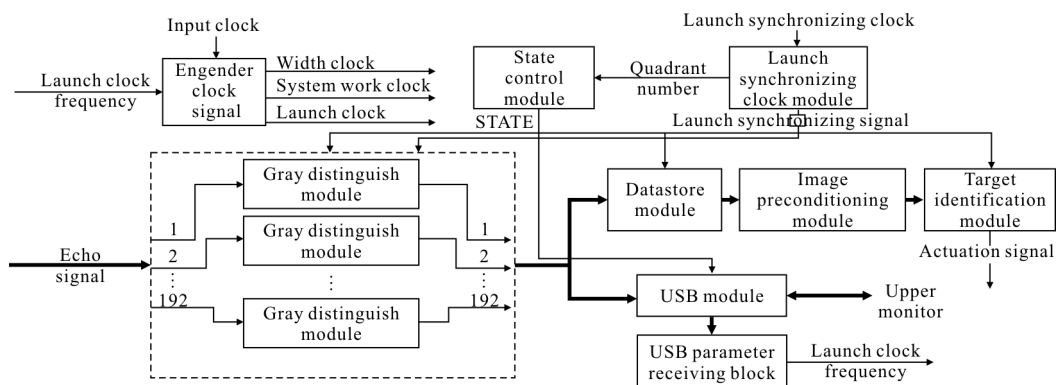


图 7 信号处理软件模块组成图

Fig.7 Composition diagram of module of signal processor software

宽度计数,得到该路输入脉冲宽度,再根据预先设定的对应关系将脉冲宽度值映射为灰度值;

(5) 数据缓存模块:将每次探测得到的灰度值缓存入 RAM 之中,作为目标识别的依据;

(6) 图像预处理模块:读取原始图像数据,根据算法对图像进行预处理,提取所需图像特征,为进行目标识别模块做准备;

(7) 目标识别模块:根据目标识别算法,对缓存的图像数据进行图像识别,分辨出是否有目标部位存在,若识别出目标部位,则给出相应指示信号;

(8) USB 通信模块:当上位机发出读指令时,将之后得到的灰度数据发送给 USB 控制芯片的缓存中,之后上传给上位机进行灰度图像显示;当上位机向信号处理板发送参数时,该模块对数据进行接收;

(9) USB 参数接收模块:该模块将 USB 通信模块接收到的数据组织为参数并进行设置。

2.5.2 灰度图像信号处理系统硬件实现

依据上述信号处理系统需要实现的功能可知,信号处理板的主要功能为:对 192 路信号进行高速采集,并对每路信号脉冲宽度进行检测,然后按照特定的映射关系将脉冲宽度转换为灰度数据,并将每个探测周期得到的灰度数据拼接成一行图像数据。根据目标识别算法对多个探测周期积累的灰度数据进行目标或干扰识别处理,若识别为目标,给出启动信号。另外,信号处理板可通过 USB 接口与上位机进行连接,当上位机发出读指令时,FPGA 将缓存的图像数据发送给 USB 控制芯片,再由

USB 控制芯片将图像数据发送给上位机。信号处理板还可以将得到的灰度图像存储在 FLASH 芯片中,当需要上传时,通过 USB 接口将图像数据发送给上位机,要功能都在 FPGA 中实现。

如图 8 所示,信号处理板的实现是以 FPGA 为信号处理核心,负责发射时钟产生、输入信号鉴宽、灰度数据生成、目标识别以及与 USB 控制芯片的通信等,因此,对 FPGA 芯片主要有以下要求:

- (1) 需要同时对 192 路信号进行高速采集,需采用有高速串并转换接口且速度性能较高的器件;
- (2) 要实现较高的采样频率,需要对输入时钟进行倍频,这就要求芯片中有内嵌的时钟管理单元;
- (3) 要缓存多个周期的灰度数据,芯片中要有足

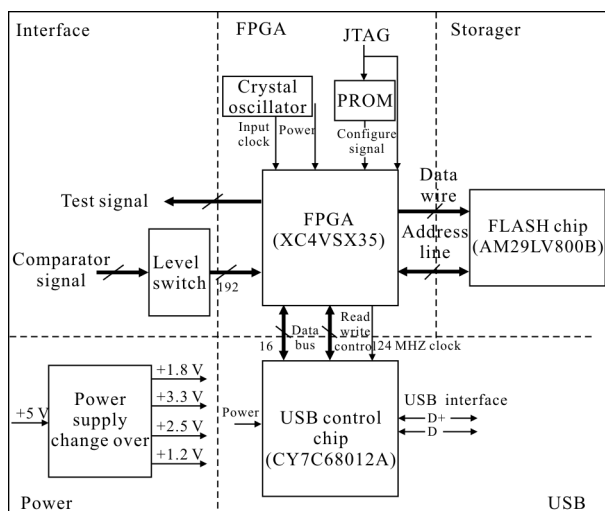


图 8 信号处理板硬件组成图

Fig.8 Composition diagram of hardware module of signal processor

够的内嵌 RAM 块。

综合考虑以上几点要求，最后选择 Xilinx 公司的 Virtex-4 系列中的 XC4VSX35 芯片。为实现与上位机进行数据交换，选择了 Cypress 公司的 FXL2P 系列的 USB 控制芯片 CY7C68013A，信号处理板实物如图 9 所示。

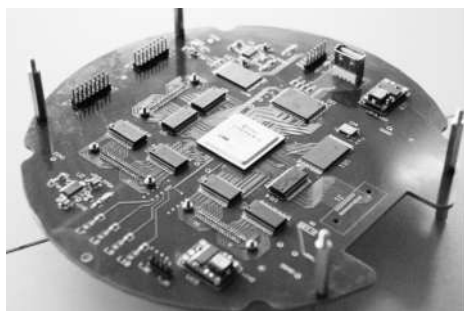


图 9 信号处理板实物图

Fig.9 Entity of signal processor

2.6 激光灰度成像引信目标识别算法

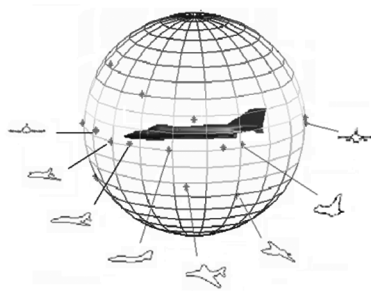
基于引信推扫式成像探测方式其图像处理具有两个显著特点^[5]：

(1) 实时不完整性

由于是线列扫描成像，因此，在某一时刻所能获取到的目标图像是不完整的。而且，在高速运动状态下，弹目的交会时间很短，一般在毫秒级，这就要求目标识别应在目标探测过程中同步完成，即在目标图像尚未全部生成时刻就需要完成目标的识别，因此，在这种应用环境下，基于全局的图像识别算法不可用，只能采用基于局部特征的图像识别算法，而且，识别算法不能过于复杂。

(2) 任意姿态成像

在空中交会状态下，飞机姿态可能是球面空间中的任意一个姿态，如图 10(a)所示，这就使得弹目交会姿态千变万化，每次弹目交会时飞机蒙皮对激



(a) 球体空间方位成像

(a) Imaging spherical space



(b) 不同姿态下成像实例

(b) Different attitude imaging samples

图 10 任意姿态下的目标图像

Fig.10 Target image of free position

光的有效散射面不同，脱靶量也不同，因此每次获取的线扫图像也各不相同(如图 10 所示)，给识别带来了很大困难。

同时，为充分利用目标灰度图像的特征，根据目标灰度图像的一些规律性特征，尝试进行了目标特定部位的识别^[6]。如机头、机翼和机尾三处的灰度变化存在一定的规律性，目标识别算法在进行目标识别的同时，也进行了此三个特定部位的识别。

文中采用的算法是基于 SURF 特征的目标渐进识别算法，激光成像引信推扫式成像具有自下而上生成和逐行扫描获取特点。算法流程图如图 11 所示。为了保证每次计算时都能尽可能地提取到它的局部变化特征，则需要将图像累积一定行数再进行特征的提取和目标的识别。该算法核心在于弹目交会过

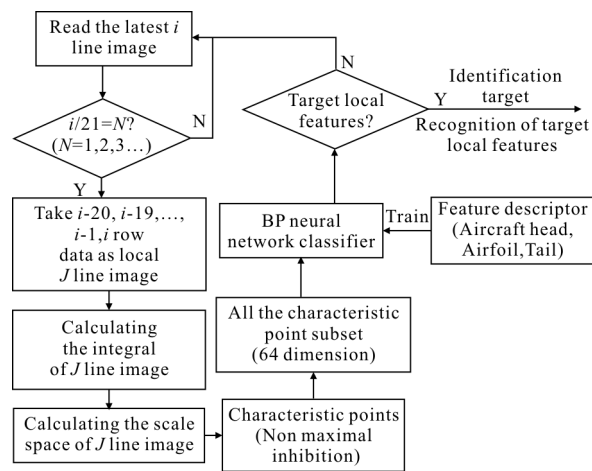


图 11 基于 SURF 特征的目标识别渐进算法流程图

Fig.11 Flow chart of the progressive target recognition algorithm based on SURF

程中不断积累目标行数据图像,当行数据达到预设值时,则对积累的多行数据形成的目标局部图像进行 SURF 特征(如:规律性形体变化、规律性灰度值变化等)提取,此方法可较好解决非完整目标的识别,提高识别率以及识别算法的普适性。同时,为满足实时性要求,应尽量减少单次特征提取和目标识别算法实现所需要的时间,因此,需要采用渐进式的识别方式。

3 目标灰度成像探测及识别试验验证

3.1 模型目标灰度成像探测试验

使用激光灰度成像引信原理样机分别对歼 7 缩比模型(10:1)、长空一号原型靶机(1:1)进行了灰度成像探测试验,模拟了部分交会姿态,分别得到部分灰度图像。

图 12 为部分交会姿态下得到的歼 7 缩比模型(10:1)灰度图像。由于缩比模型相对原理样机视场、距离落差并不明显,因此,目标图像区域基本不存在灰度变化。

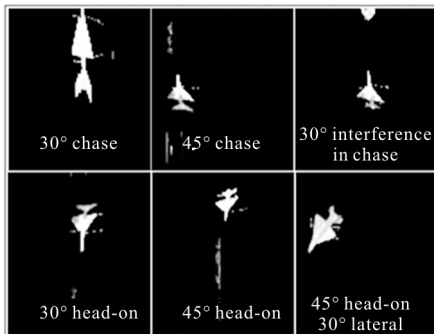


图 12 歼 7 缩比模型灰度图像

Fig.12 J7 model gray image

图 13 为部分交会姿态下长空一号原型靶机(1:1)灰度图像。从图中的灰度图像可以看出,全尺寸的目标已经可以明显得到图像区域内的灰度变化,表明获得了表面反射回波强度变化。

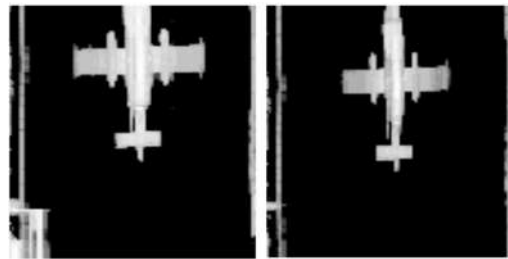
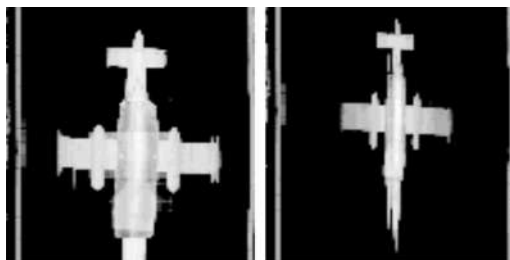


图 13 长空一号靶机灰度图像

Fig.13 CK-1 gray image

3.2 室内慢交会试验及目标识别试验

目标的识别试验采用了两种方式验证识别算法。其一,采用原理样机对目标模型慢速交会试验,实时获取识别结果,通过原理样机及上位机显示识别结果的方式。其二,由于慢速交会试验无法实现太多交会姿态的识别验证,因此运用了激光灰度成像仿真软件以获取更多的目标及交会状态图像,并在上位机中置入目标识别算法实时进行识别、给出识别结果。

将长空一号靶机吊挂在测试车上方,原理样机固定在轨道车上,控制车速以 3 m/s 从靶机下方经过,上位机控制原理样机工作,可对目标实时成像和识别,试验后可以通过上位机查看原理样机对长空一号靶机成像探测和目标识别结果,验证原理样机对靶机的成像能力和目标识别能力。

图 14 为其中一次的成像探测和目标识别结果,可以看出,由于目标为 1:1 的模型,目标所占的引信探测视场较大,交会过程(即交会时间)也越长,得到的目标灰度图像相比缩比模型变得更宽、更长,在一幅图像中灰度等级的变化也更为明显,也就更有利于使用灰度等级变化信息进行目标识别和目标特定部位识别。同时,图中目标形体不完整的一幅表示,目标识别算法已得到识别结果停止后续图像生成,与硬件识别方式保持一致。



图 14 长空靶机慢速交会试验结果

Fig.14 Test result of low speed rendezvous of CK-1

图 15 和 16 为列举的两次仿真获取的 F16 图像，通过算法识别后，显示了目标识别点及得到的目标识别结果和特定部位识别结果。



图 15 F16 灰度成像及识别仿真结果(交会角 0°,脱靶方位 0°)

Fig.15 F16 gray image and simulation result (encounter angle 0°, miss direction 0°)



图 16 F16 灰度成像及识别仿真结果(交会角 180°,脱靶方位 90°)

Fig.16 F16 gray image and simulation result(encounter angle 180°, miss direction 90°)

4 结 论

文中介绍了一种适用于空空导弹的激光灰度成像引信技术，并实现了激光引信对目标的灰度成像探测，获得了目标的灰度图像。在此基础上提出了一种基于 SURF 特征的目标渐进识别算法，它较好地满足了空空导弹高速弹目交会条件下，引信与目标之间的极短交会时间、图像实时不完整性、所得图像形变严重等问题。并得到了较好的目标识别和特定部位识别结果，为激光引信抗干扰、引战配合

提供了良好的技术基础。

参考文献:

- [1] Chen Nianjiang. Review of 3D laser imaging technology[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(10): 1152–1156. (in Chinese)
陈念江. 激光三维成像体制综述 [J]. 激光与红外, 2015, 45(10) : 1152–1156.
- [2] Liu Bo, Geng Lin, Liu Lin, et al. Scannerless laser imaging technology based on multi-channel receiving [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1206008. (in Chinese)
刘波, 耿林, 刘琳, 等. 双通道接收的无扫描激光成像技术 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1206008.
- [3] Sun Zhihui, Deng Jiahao, Wang Chang. Linear array detection mode of three-dimensional imaging laser radar[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(4): 381–385. (in Chinese)
孙志慧, 邓甲昊, 王昌. 三维成像激光雷达线阵探测模块分析[J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 381–385.
- [4] He Chenglin, Liang Qian. Study on receive circuit system of the imaging laser fuse[J]. *Aero Weaponry*, 2012(4): 30–33. (in Chinese)
何成林, 梁谦. 激光成像引信接收电路系统研究 [J]. 航空兵器, 2012(4): 30–33.
- [5] Pan Taiyu, Zhang Shunfa, Ma Huimin. A target identification algorithm of imaging technology on laser fuze based on statistical center line[J]. *Aero Weaponry*, 2011(2): 40–43. (in Chinese)
潘太玉, 张顺法, 马惠敏. 一种基于统计中心线的成像激光引信目标识别算法[J]. 航空兵器, 2011(2): 40–43.
- [6] Yuan Zheng, Sun Zhijie. Air-to-air Missile Fuze-Warhead Systems Design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
袁正, 孙志杰. 空空导弹引战系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.