❖特约专栏❖

脉冲激光引信的信号特征提取方法及应用(特邀)

蔡克荣,仇理宽,高瑞林

(上海机电工程研究所,上海 201109)

摘　要: 激光引信具有抗电磁干扰能力强、定角/测距精度高和系统体积小等优点,因较高的虚警率在防空导弹领域未得到的广泛应用。通过对信号特征提取方法的等级分析,讨论了激光引信回波信号的能量、延时、脉宽特征提取方法以及信息融合对抗干扰性能和引战配合效率的贡献。以防空导弹周视激光引信为背景,采用线阵探测器,设计了一种基于多特征的目标识别算法,明显提高了目标探测的可靠性,具备在 110 m 能见度下正确检测典型反舰导弹目标的能力。

关键词: 激光引信;　信号处理;　特征提取

中图分类号: TJ43^{+}4.2　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.3788/IRLA201847.0303004

Feature extraction methods and applications of signal feature for pulse laser fuze(*Invited*)

Cai Kerong, Qiu Likuan, Gao Ruilin

(Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: The laser fuze has advantages of strong anti-electromagnetic interference, high fixed angle and ranging precision, and small size. However, laser fuze′s application isn′t wide in air defense missiles because of the high false alarm rate. By analyzing the levels of signal feature extraction methods, the contributions of laser echo signal′s features to anti-jamming performance and coordinated efficiency of fuze and warhead were discussed, including its energy, delay, pulse width, and information fusion. Then, based on an air defense missile′s panoramic laser fuze, the target recognition algorithm was designed using linear array detector. The reliability of target detection is improved obviously, while the visibility of smoke coming down to 110 m, the laser fuze can still detect target exactly.

Key words: laser fuze;　signal processing;　feature extracting

收稿日期: 2017-10-11;　**修订日期:** 2017-11-10

作者简介: 蔡克荣(1984-),男,高级工程师,博士,主要从事激光探测与目标识别方面的研究。Email: caikerong@163.com

0 引 言

激光引信以激光为信息载体，透过传输介质在目标表面产生漫反射光，再经由传输介质后被光电探测器接收形成回波信号，对其进行处理后即可控制战斗部起爆以毁伤目标。激光引信具有抗电磁干扰能力强、定角/测距精度高和系统体积小等优点，目前已在各国的便携式、舰空、空空等防空导弹中得到应用。由于工作在近红外波段，激光引信易受烟雾雨雪、海面或者地表背景等干扰，回波信号的特征提取方法也就成了国内外学者抗干扰技术研究的主要内容之一。虽然光学交叉、距离门、波门压缩[1]等设计在部分应用中取得了一定效果，偏振探测[2-3]、双色探测[4-5]、干扰仿真[6-7]等技术也提供了一些新途径，但在防空导弹领域，激光引信的广泛应用还是受限于较高的虚警率。文中以脉冲激光引信为背景，分析了信号特征提取的等级及其应用效果，设计了一种采用线阵探测器的防空导弹周视激光引信的目标识别算法，降低了虚警率，为引战系统的总体设计和引信抗干扰设计等提供技术支撑。

1 防空导弹激光引信

脉冲激光引信组成如图 1 所示。脉冲信号控制驱动电路工作，激励激光器发射纳秒级脉宽的激光，激光光束经发射光学系统整形后照射到目标表面形成散射光源，部分散射光经接收光学系统汇聚后在探测器上响应形成微弱电流(即光电转换)，之后经低噪声前置放大和主放电路将回波信号逐级放大。由于回波信号脉宽仅为几十纳秒，难以快速地进行高采样率的信号处理，因此激光引信的回波信号处理通常是以脉冲串、数字化的方式实现的，即通过阈值比较电路将钟形回波信号处理成脉冲信号进行分析。虽然阈值比较的过程会导致回波信号中信息的部分丢失，但在有限体积和质量的条件下是可取的工程途径。

在防空导弹应用中，为了有效拦截来袭的导弹类目标，通常要求引信具备全向探测能力。激光引信通过在周向均匀布置多套激光收发系统即可实现全向无盲区探测，一种八通道激光引信如图 2 所示，φ 为探测视场倾角。

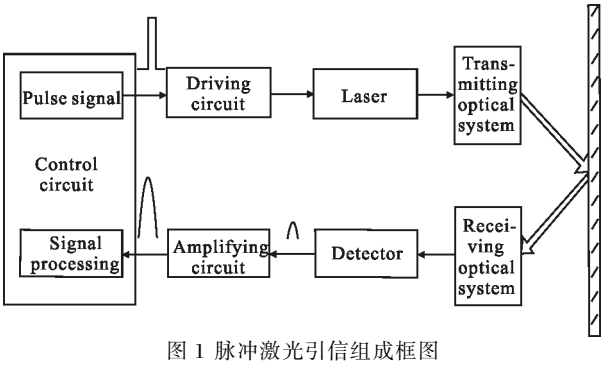

图 1 脉冲激光引信组成框图

Fig.1 Block diagram of pulse laser fuze

(a) 结构图 (b) 侧视图

(a) Structure block (b) Side view

(c) 正视图

(c) Front view

图 2 周视激光引信视场分布示意图

Fig.2 Schematic of field distribution of panoramic laser fuze

2 特征提取等级分析

在脉冲激光引信中，不论其光学系统是小视场还是大视场，抗干扰性能始终是关键技术指标。随着光电探测器和信号处理器等元器件技术的发展，在有限体积内已经有可能实现复杂的特征提取与信号处理，激光引信也逐步摒弃简单的回波脉冲计数方法，利用多特征识别方法提高目标和干扰判别的准确度，以适应复杂的弹道环境。

2.1 等级一：阈值比较和峰值保持

脉冲激光引信为了在较低平均功率条件下获得足够的探测距离，并具有良好的抗干扰能力，其发射脉宽通常在 20 ns 以内。激光回波信号相比于发射

信号有一定程度的展宽，若要对其进行数字采样仍需高达百兆级的采样率，对模数转换和信号处理器等硬件的要求很高。因此，目前常用的方法是对激光回波信号的钟形波进行阈值比较，将其转换为易于后续处理的方形波，对方形波进行计数后即可适时给出起爆控制信号。这一过程实际是以变速率、非线性方式对激光回波信号进行采样，保留了部分能量信息，但丢失了波形信息和幅值信息(如图 3 所示)。

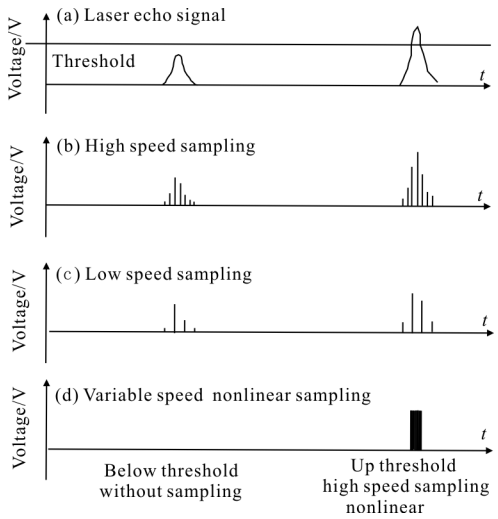

图 3 激光回波信号阈值比较示意图

Fig.3 Schematic of threshold comparison of laser echo signal

工程应用中，在此基础上发展出了双阈值比较和峰值保持技术[8]。双阈值比较技术实质是对单个回波的幅值变化率进行了一次判别，而峰值保持技术实质是对多个回波的幅值变化率进行了识别。如果激光引信的动态范围足够大，就能在弹目交会过程中观测到回波能量由弱变强的趋势，据此可一定程度上提高目标识别能力。但整体而言，信号处理水平还较低，特别是对单发杀伤概率要求很高的防空导弹来说，综合抗干扰性能还不够好。

2.2 等级二：延时和脉宽分析

经过阈值比较电路后，激光引信的钟形回波信号转换为方形波，对该方形波进行简单的计时处理可得到每个回波脉冲的延时 Δt_i 和脉宽 Δw_i 信息(如图 4 所示)。

一方面，激光引信测得的延时 Δt 和弹目距离 d 之间满足 $d=c\times\Delta t/2$ 的规律；另一方面，在固定阈值比较时，回波脉宽越宽意味着激光回波能量 P_r 越大。因此，在激光引信研制过程中，可通过地面试验测得典型目标在不同距离 dx 上的延时 Δt_x 和脉宽 Δw_x，统计后作为目标信号判据，即可将不符合该判据的回波脉冲作为干扰信号剔除，能大幅提高目标识别准确度。当然，采用恒比定时技术[9-10]和高精度时延芯片还可进一步提高延时和脉宽的检测精度，而且由延时计算得到的弹目距离还有助于提高引战配合效率。

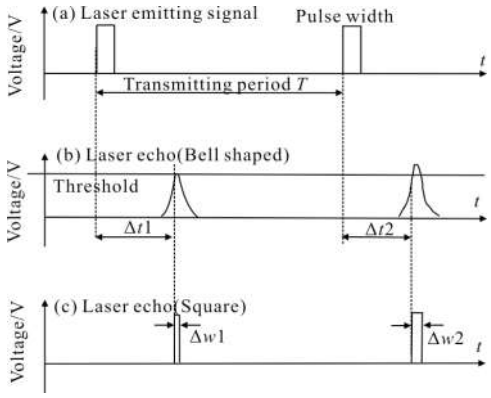

图 4 激光回波信号延时和脉宽分析示意图

Fig.4 Schematic of delay and width analysis of laser echo signal

2.3 等级三：多探测通道信息融合

防空导弹激光引信通常采用多通道探测方式覆盖 360°区域，实现无盲区探测，如图 2 所示。因此，在单通道对回波信号特征提取后，还可对多通道的回波信号进行融合，进一步提取目标信息。

(1) 目标类型识别

防空导弹的各类典型目标和烟雾雨雪等干扰在形态、体积等方面存在较大差异，其形成的回波信号特征也有所不同。比如，反舰导弹类目标为细长型，最多只能同时进入两个探测通道 (激光引信共八个探测通道)；直升机和固定翼飞机类目标尺寸较大，最多能同时进入四个探测通道；烟雾雨雪等悬浮颗粒物为弥漫型，最多能同时进入所有探测通道。据此可以设计目标类型识别准则，不仅能够剔除部分干扰，还能针对不同目标类型设计最优的引战配合规律，提升防空导弹的整体作战性能。

(2) 脱靶方位识别

防空导弹面临越来越严峻的导弹和制导炸弹威胁，由于传统破片或杆式战斗部的毁伤元素在周向近似均匀分布，因此只有少数毁伤元素能够命中目

标，战斗部的能量利用率低，目标毁伤效果差强人意。随着定向战斗部技术的发展[11](如图 5 所示),对目标脱靶方位识别的需求日益迫切，而周视多通道激光引信在此具有先天优势，综合判断各探测通道回波信号的有无即可识别目标脱靶方位。

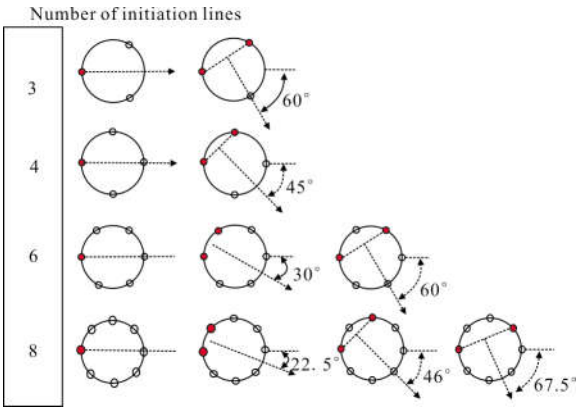

图 5 不同起爆点实现毁伤元定向飞散示意图

Fig.5 Different initiation number and position for lethal element directional distribution

2.4 等级四:与其他传感器的信息融合

激光引信通常采用半导体激光器，工作在近红外波段,波长小于 1 μm,烟雾雨雪、海面或者地表背景均会对其产生后向散射,导致虚警率较高。随着毫米波、静电、磁等体制引信技术的发展,特别是小型化、低成本得以工程实现后,激光引信与其他体制引信进行复合可显著提高抗干扰性能，将具备更广阔的应用前景。

3 多特征目标识别算法设计

以八通道周视脉冲激光引信为应用背景，单通道采用某型三元线阵探测器进一步细分探测视场,经三路独立的前置放大后输出,相继经主放电路、峰值保持电路、阈值比较电路后送 FPGA 芯片进行处理,一个周期内共处理 24 路信号,分别检测延时和脉宽信息。八个探测通道分别以 10 kHz 频率轮流工作,每个三元线阵探测器共用一套光学系统,在一个周期内同时工作。基于多特征识别方法的目标和干扰判别算法设计如下。

(1) 一个周期内，若存在回波脉冲大于等于 12 路,则判为干扰,本周期不检测目标。

(2) 一个周期内，若存在回波脉冲大于等于六路,引战延时采用大目标规律;否则,引战延时采用小目标规律。

(3) 每路信号经延时-脉宽识别判据，不满足则剔除该脉冲的峰值、延时和脉宽数据;若连续六个周期内的剔除数大于三个,则剔除全部六个周期数据。

(4) 每路信号采用移位法检测连续六个周期内的回波信号峰值增长速率,不满足判据则剔除。

(5) 若满足判据(4),则认为该路信号存在目标,根据最后一个脉冲的延时和目标类型自适应调整引战配合延时,延时结束后送出起爆信号。

(6) 若存在目标时,根据目标存在情况判断目标脱靶方位;若多个通路判断存在目标,则取其方位的平均值作为目标脱靶方位；目标脱靶方位先于起爆信号送出。

八通道周视激光引信原理样机应用上述目标识别算法后的测试结果表明，具备在 110 m 能见度下检测典型反舰导弹目标的能力，达到了工程应用的技术指标要求，对激光引信总体和抗干扰设计具有借鉴意义。

4 结 论

脉冲激光引信的信号特征提取方法历经多年发展已逐步趋于完善,回波信号的能量、延时和脉宽信息普遍得以应用,取得了较好的抗干扰效果,推动了激光引信的工程应用。防空导弹因其对目标的无盲区探测需求发展出了周视多通道激光引信，文中在八通道激光引信采用三元线阵探测器的基础上,设计了多特征目标识别算法，实现了能见度 110 m 烟雾干扰环境下对目标的高可靠探测，同时可为引战配合提供目标类型和弹目距离信息，显著提高了导弹的整体作战效能，在与其他体制引信进行复合后将具备更广阔的应用前景。

参考文献:

[1] Chen Huimin, Li Ping, Yan Xiaopeng, et al. Laser fuze detection techniques using different methods [J]. ***Optical Technique***, 2006, 32(S): 348-350. (in Chinese)
陈慧敏, 栗苹, 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(S): 348-350.

[2] Meng Xiangsheng. Applications of the polarization detection in laser fuse anti-environmental interference [J]. ***Infrared and***

Laser Engineering, 2013, 42(7): 1716-1719. (in Chinese)
孟祥盛. 偏振技术在激光引信抗烟雾干扰中的应用分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1716-1719.

[3] Chen Huimin, Liu Xinyang. Backscattering polarization characteristics of pulsed laser fuze with coaxial optical system in water fog [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2015, 23(3): 626-631. (in Chinese)
陈慧敏, 刘新阳. 收发同轴脉冲激光引信在水雾中的后向散射偏振特性[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(3): 626-631.

[4] Ren Hongguang, Yu Haishan, Huo Lijun, et al. Anti-interference of dual-wavelength laser fuze [J]. ***Journal of Detection & Control***, 2015, 37(1): 1-4. (in Chinese)
任宏光, 于海山, 霍力君, 等. 基于双色探测的激光引信抗干扰方法[J]. 探测与控制学报, 2015, 37(1): 1-4.

[5] Xie Shaoyu, Zhao Yiqiang, Wang Jinhua, et al. Laser fuze anti-surf based on two-wavelength detection [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(4): 49-53. (in Chinese)
谢绍禹, 赵毅强, 王金花, 等. 双色探测激光引信抗海浪技术[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 49-53.

[6] Cai Kerong, Jia Dao, Chen Ming. Model and simulation of sea clutter echo power of the omnidirectional pulse laser fuze [J]. ***Optical Technique***, 2016, 42(6): 552-556. (in Chinese)
蔡克荣, 贾岛, 陈铭. 周视脉冲激光引信海杂波回波功率建模与仿真[J]. 光学技术, 2016, 42(6): 552-556.

[7] Frederic Schwenger, Endre Repasi. Simulation of laser beam reflection at the sea surface [C]// SPIE, 2011, 8014: 80140R1-12.

[8] Xiong Yan, Lu Yaodong, Zhu Min, et al. Design of peak holding circuit for narrow laser pulse [J]. ***Laser & Infrared***, 2012, 42(12): 1377-1380. (in Chinese)
熊焱, 陆耀东, 祝敏, 等. 窄脉冲激光信号峰值保持电路设计[J]. 激光与红外, 2012, 42(12): 1377-1380.

[9] Liu Peng, Li Ping, Chen Huimin, et al. Fluctuating threshold circuit based on constant fraction discrimination for pulse laser fuze [J]. ***Journal of Detection & Control***, 2009, 31(3): 19-23. (in Chinese)
刘鹏, 栗苹, 陈慧敏, 等. 脉冲激光引信恒比定时浮动阈值电路[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(3): 19-23.

[10] Yao Pingping, Tu Bihai, Wang Xiangjing, et al. Design and application of high -precision threshold circuit for laser proximity fuze [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(4): 1156-1161. (in Chinese)
姚萍萍, 涂碧海, 王相京, 等. 高精度激光近炸引信阈值电路设计与应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1156-1161.

[11] Li Junlong, Li Bensheng, Wang Jingyu, et al. Review on anti-TBM warhead technology [J]. ***Chinese Journal of Energetic Materials***, 2015, 23(2): 189-198. (in Chinese)
李俊龙, 李本胜, 王晶禹, 等. 反 TBM 战斗部技术研究现状及趋势[J]. 含能材料, 2015, 23(2): 189-198.