

弹道导弹激光引信方案设计

张翼飞¹, 邓方林¹, 陈卫标²

- (1. 第二炮兵工程学院 自动控制系, 陕西 西安 710025;
2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要: 激光引信在弹道导弹上的作用是控制弹头战斗部的爆炸高度, 由于弹道导弹面临的作战环境复杂、战术使用要求高, 因此装备在其上的激光引信应达到一些特殊的技战术指标要求, 如高重复频率、远测程等。为此采用了二极管泵浦固体激光器、高灵敏探测组件, 运用优化背景抑制、抗干扰信号处理和目标识别等多种先进技术, 设计了一种适用于弹道导弹的激光引信方案, 所设计的激光引信具有体积小、质量轻、抗干扰能力强、测距精度高等优点, 能够较好地满足弹道导弹爆炸高度控制的要求。

关键词: 弹道导弹; 激光引信; 二极管泵浦固体激光器; 信号处理; 抗干扰

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)03-0248-05

Laser fuze design for ballistic missile

ZHANG Yi-fei¹, DENG Fang-lin¹, CHEN Wei-biao²

- (1. Department of Automation control, The Second Artillery Engineering Academy, Xi'an 710025, China;
2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, Shanghai 201800, China)

Abstract: Ballistic missile's laser fuze is used to control warhead's blasting height. Battle environment for ballistic missile is complicated and tactical request is strict, so laser fuze equipped for it needs some special indices, such as high repetition rate, long ranging, etc. So a laser fuze scheme for ballistic missile is designed applying multiple advanced technologies, including Diode-Pumped Solid-State Laser (DPSSL), high sensitive detecting component, optimal background suppression, signal processing with anti-interference and target recognizing. The designed laser fuze has small size and weight, fine performance of anti-interference and high ranging precision. So the laser fuze can perfectly fulfill the request for ballistic missile's blasting height control.

Key words: Ballistic missile; Laser fuze; Diode-Pumped Solid-State Laser (DPSSL);
Signal processing; Anti-interference

收稿日期: 2003-10-20; 修订日期: 2003-11-02

作者简介: 张翼飞(1976-), 男, 江西九江人, 博士生, 研究方向为战斗部引信系统设计与分析。

0 引言

激光引信利用了激光波束窄、方向性好、能量集中的特点,扫描目标速度快,探测视场具有尖锐的方向性,因而具有良好的抗电磁干扰能力,工作安全可靠且测距精度高,目前已在航空炸弹、火箭、飞航导弹及反坦克导弹上得到了广泛应用。根据有关资料统计,已有80%~90%的空空导弹配备了激光引信,国外反坦克导弹所使用的引信的主要型号也几乎都是激光引信。但由于技术实现上还存在一些难题,迄今为止,激光引信还未在弹道导弹上得到成功应用。目前,已有报道美国等正在加紧进行适用于弹道导弹的激光引信研制工作,不久将可能在这方面取得突破^[1]。

激光引信在弹道导弹上的作用是控制弹头战斗部的爆炸高度,而战斗部的爆炸高度又直接影响到对目标的杀伤效果,爆炸高度过高或过低,都将显著降低导弹对目标的毁伤概率。目前弹道导弹上主要使用的是无线电引信,而无线电引信的抗电磁干扰能力差,在作战中易受敌方干扰而导致战斗部提前引爆甚至失效。文中设计了一个能够满足弹道导弹爆高控制要求的高精度、抗干扰激光引信方案,下面就对该设计方案作一简单介绍。

1 弹道导弹激光引信主要特点

与飞航导弹或航空炸弹等不同,弹道导弹面临的作战环境复杂、战术使用要求高,并受到弹头自旋、质量、体积等条件限制,因此装备在其上的激光引信比装备在一般飞航导弹或航空炸弹上的激光引信具有更高的技战术指标要求,其主要特点如下^[2]:

(1) 重复频率高。激光引信采用脉冲测距法,即利用激光器对目标发射一个或一系列很窄的光脉冲,测量光脉冲到达目标并由目标返回到接收机的时间,由此计算出距目标的距离。普通激光测距系统发射脉冲的重复频率一般只有几赫兹或几十赫兹,但对应用在弹道导弹引信上的激光测距系统的脉冲重复频率要求要高得多。这是由于脉冲测距法测量的高度值是不连续的,而弹头攻击目标时速度非常快,可达一

至数千米每秒,若重复频率太低,则测量的高度间隔太大,可能错过最佳的爆炸高度,达不到应有的战术效果。为保证较高的爆高精度,引信工作的重复频率至少应大于1 kHz,才能保证引信的测高精度达到米级。

(2) 体积小、质量轻。由于弹头的空间有限,激光器的体积不能太大,质量也不能过重,否则将会加大弹头质量,减小导弹的有效射程。因此一些体积和质量较大的激光测距系统将无法在导弹上应用。

(3) 适应较高的环境温度。弹头再入时与大气剧烈摩擦,导致温度迅速升高,即使激光器安置在弹头内部,通过隔热材料和隔热材料保护可对温度的变化加以阻隔,但还是要有一定的耐高温能力。

(4) 测程远。为确保杀伤效果,弹道导弹战斗部的爆炸高度一般较高,某些子母弹弹头的解爆抛撒高度甚至可高达4~5 km。而飞航导弹上应用的激光引信的作用距离仅为几百米,故弹道导弹激光引信的下视测程要相对远得多。

(5) 信息处理量大、时间短。由于激光器的重复频率高达1 kHz,要求系统在小于1 ms的时间内完成一次脉冲发射和接收、测量脉冲时间间隔、进行相应的数据处理、排除各种干扰信号、解算得出弹头距地面的精确高度,因此信息处理任务非常繁重。

2 激光引信方案设计

2.1 激光引信总体构成

图1为激光引信原理方框图,激光引信通常由电源、激光器、发射光学系统、接收光学系统、探测器和

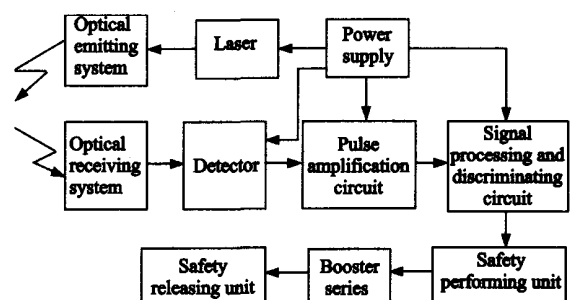


图1 激光引信原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of laser fuze

脉冲放大器、信号处理和判决电路、执行电路、安全与解除保险机构、引信爆炸序列等部分组成。其中由发射系统、接收系统、光学系统和信息处理系统等构成的激光测距系统是激光引信的主体,集中了设计的难点和关键技术。

2.2 激光发射器设计

激光发射器是激光引信最重要的组成部件。本系统中的激光发射器不仅要满足激光测距的一般要求,而且还要适应弹道导弹的特点,即:体积小、质量轻,适合在弹上应用;重复频率高,测量间隔的高度变化小;能适应较高环境温度,减小对散热装置的依赖;峰值功率高,可以达到较远的测程。

按产生激光的工作物质的不同,可将激光器分为半导体激光器、气体激光器、固体激光器等。飞航导弹或航空炸弹上广泛采用的是半导体激光器,它具有体积小、质量轻、功耗小等优点,但其峰值功率太小,并且光斑质量较差,很难整形,因此作用距离有限(最大只能达到 1 km 左右),无法满足弹道导弹引信测程的要求^[3]。气体激光器主要应用在坦克、装甲车上的激光测距系统中,具有功率大、光束质量高、束散角小、穿透烟雾能力强等优点,但由于其体积大、质量较重,不利于做成小尺寸大能量的脉冲激光器,难以在导弹上应用。综合考虑后只有固体激光器具有能量大、峰值功率高、结构紧凑、牢固耐用等优点,因而最适宜用作弹道导弹激光引信上的激光发射器。

激光二极管泵浦的固体激光器(DPSSL)技术是近年来激光技术研究领域中的一个热点,与灯泵浦的固体激光器相比,具有体积小、质量轻、结构紧凑、全固体、效率高、寿命长、发热密度小等优点,这些对提高固体激光器的输出功率和效率、改善光束质量是非常有利的。更重要的是采用二极管泵浦的固体激光器能够实现高重频激光输出,其脉冲重频可以达到几千甚至几万赫兹^[4]。目前,高功率 DPSSL 的一些关键技术已被解决,正在从实验研究向实用研究迈进,并有望在本项目中得到成功应用^[5]。

在采用激光二极管泵浦时,二极管对温度的变化非常敏感,温度稍有升高,其频带就会漂移,从而影响到晶体的吸收效率,因此必须对激光二极管进行严格

的温度控制,才能达到较高的输出效率。而受功耗和热稳定时间限制,弹上的激光引信系统难以配备大体积的温控装置,因此必须采用吸收带较宽的晶体作为固体激光器的工作介质,以减小对温控设备的要求。对波长为 1.064 μm 的 Nd:YAG、Nd:YVO₄、Yb:YAG 等晶体进行综合比较,Nd:YVO₄ 或 Yb:YAG 比现在广泛使用的 Nd:YAG 更适合作 DPSSL 的工作介质。两者都具有宽的吸收带宽,如 Nd:YVO₄ 吸收带宽接近 10 nm,而 Nd:YAG 的吸收带宽只有 2 nm。Nd:YVO₄ 具有低的泵浦阈值,而 Yb:YAG 则具有好的温度特性和高的荧光寿命^[6],在实际器件研制过程中,将从体积、功耗两个方面进行筛选,确定最终选用何种介质的激光器。

脉冲激光器采用 Cr⁴⁺:YAG 晶体进行被动调 Q,无需额外的调 Q 功耗,因而可大大减小激光器的总功耗。另外它还具有化学性质稳定、损伤阈值高、在近红外波段具有较高吸收截面的特点^[7]。

为了缩小体积、增加可靠性,激光器的整体结构将采用端面泵浦的三明治结构。端面泵浦具有效率高、模式好、工作物质的冷却结构比较简单且不影响泵浦效率的优点,可以大大缩短激光晶体的长度,减小激光器的体积^[8]。三明治结构是目前国际上先进的激光器构造方式,它将工作介质、调 Q 材料、谐振腔均粘合在一起,通过优化设计,达到最佳输出效率。采用该构造形式的激光器体积小、结构牢固,其最大优点是容易获得短脉冲,可增加峰值功率。

2.3 探测接收部件设计

从提高激光引信的测距性能方面看,提高对目标回波的接收灵敏度比提高激光发射功率更有效,因为提高接收灵敏度不会增加系统的体积、质量和功耗;而提高激光发射功率将使它们大大增加。要满足本设计方案中引信系统体积小、质量轻,且又能实现较远测程的要求,除了采用新技术设计激光发射器外,提高探测器的接收灵敏度也是一条很重要的途径。

方案中应用直接探测技术接收目标反射信号,采用硅雪崩光电二极管(Si-APD)作为探测接收器件。硅雪崩光电二极管是近红外波段激光测距系统常用的一种高灵敏度探测器,是一种具有内放大作用的

p-n 结光电二极管,在产生雪崩倍增所需的高反向偏压下工作,具有高的内部增益,倍增因子可以很大(达通型硅雪崩光电二极管具有 100 以上的倍增因子),而且暗电流很小,响应度高、响应时间快。

Si-APD 选用低噪声、快响应、低工作电压和近红外高灵敏的器件。目前,国际上生产高质量的 APD 的商家不多,主要有 EG&G Canada, Silicon Pacific 以及 Advance Photonics 等公司,国内也有单位生产相应的器件。代表性产品有 EG&G 的 C30954、C30955、C30956 等近红外增强的型号,也可采用带前置放大器的组件,如 C30950 等。这类器件在诸多激光测距仪中广泛使用,现已被美国 NASA 用于航天测量系统中。

2.4 光学系统设计

激光引信光学系统,对于主动式引信来说,是发射光学系统和接收光学系统的统称,光学系统会聚激光的功率并构成对目标的定向和定距探测的基本环节。系统中光学系统设计采用准共轴方式,考虑到弹头上的光学窗口一般为矩形结构,采用准共轴方式可以有效利用观测窗口。光学系统的整体结构如图 2(a)所示,图 2(b)为具体的接收光路图。

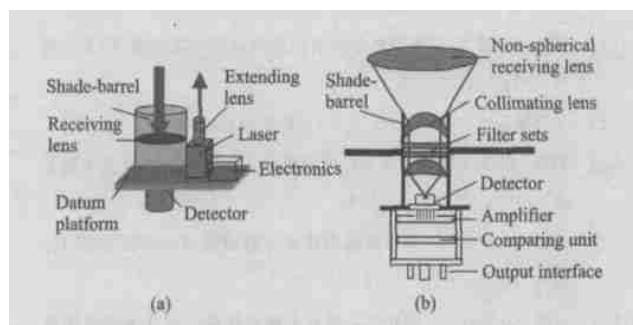


图2 光学系统和接收光路结构图

Fig. 2 Structural diagram of optical system and receiving optical path

从图中可以看到,激光发射和接收共用一个光学基准平板,所有支撑件均以此平板为基准连接,这样可以保证光轴的平行度。激光器连接一个 3 倍伽利略扩束镜,使得输出激光的发散角小于 1 mrad,光斑直径小于 8 mm,发射望远镜的口径为 15 mm。接收透镜选用直径为 50 mm 的非球面透镜,焦距 50 mm,

并放置在一个遮阳桶中,以减小阳光照射对探测器的损伤。接收的激光信号经一个非球面透镜准直后,透过一组光学滤光片,然后由聚焦透镜聚焦到 Si-APD 探测器上。探测器本身作为视场光阑,整个接收光路的接收视场角控制在 5 mrad 以内。滤光片组包括太阳背景抑制滤光片和 1.064 μm 的窄带干涉滤光片。背景抑制滤光片只透射 1.064 μm 的光,而反射所有 300 ~ 5000 nm 波长范围内的背景光,以保护窄带滤光片和探测器的安全。1.064 μm 窄带干涉滤光片的带宽控制在 5 nm 以内,峰值透射率大于 70 %。两个滤光片的工作温度设置成与弹体内的工作温度相同,防止滤光片的波长偏移。

2.5 信号处理系统设计

信号处理系统是整个激光引信的核心部分,它的作用相当于系统的大脑,在这里完成输出脉冲取样、滤波;回波脉冲信号整形、放大、匹配滤波;脉冲时间间隔测量、脉冲宽度测量以及为了抑制干扰信号而进行的距离选通、逻辑判断等,最后根据接收到的目标回波信号计算出距目标的高度。由于弹道导弹的爆炸高度较高,因而受云层干扰的影响很大。云层对激光波的后向反射所形成的回波信号会造成引信的虚警,使得弹头在过高高度提前引爆,为此必须采取专门的措施抑制云层干扰。设计方案中采用了将时变增益控制、多停止脉冲计数、距离选通、脉宽测量及逻辑判别等五项关键技术组合,利用硬软件结合、多重处理的方法对回波信号进行处理和目标识别,可有效抑制云层干扰。关于这五项关键技术限于篇幅,在此不详细介绍。以这五项关键技术为基础设计的信号处理与电子学部件整体结构如图 3 所示。

信号处理的过程为:在激光器内部设置一个激光输出脉冲的取样电路,利用器件输出窗口的微弱反射,由一个快速 PIN 光电二极管采样,通过整形后输出到距离测量电路中,并作为距离测量电路的启动信号。从图中可看到,激光输出脉冲由 PIN 管接收后,通过了一个低通滤波器,然后经过比较器,再输出距离门控制器的控制脉冲和多路时间间隔测量仪的启动脉冲。由 Si-APD 探测器通过光学系统接收目标的回波信号,为提高信号的信噪比,采用偏置高压控制

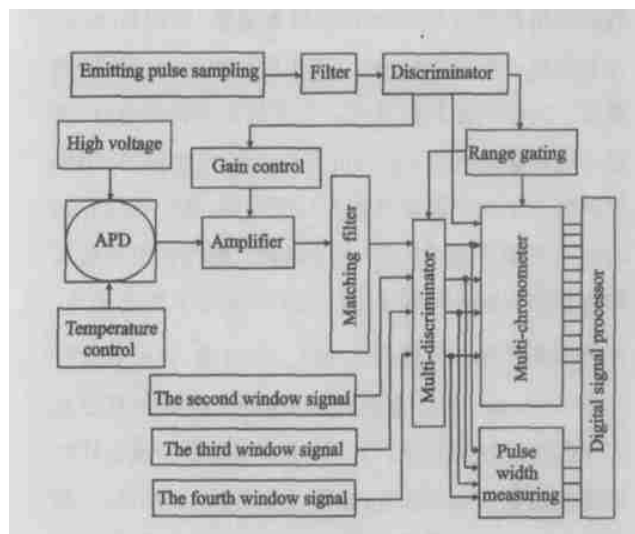


图 3 信号处理及电子学部件结构图

Fig. 3 Structural diagram of signal processing
and electronic components

线路给探测器施加高压,同时为了降低探测器的噪声,采用半导体制冷器对探测器进行制冷。探测器输出信号首先经过增益控制放大器,使输出信号与一个随时间变化的增益信号进行相乘,近距离的增益非常小,对云信号衰减;而远距离的增益逐渐增加,这样可以对地面目标回波进行放大。近距离的散射信号则可以通过距离门控制器利用距离选通技术来消除。放大器输出信号经过一个匹配滤波器进行匹配滤波,对信号波形进行调理,以减小噪声,提高信噪比。滤波器输出信号由一个常数阈值甄别电路完成,进行比较后,产生时间间隔测量单元的停止信号,这里采用了高速多通道时间数字转换器来实现多停止信号测量。在进行时间间隔测量的同时,进行脉冲宽度测量,以区分究竟是云层还是地面的反射信号。回波信号经上述一系列的检测和识别过程后,将被送至 DSP 处理器中进行处理,进行最后的逻辑判别,并根据得到的真实信号计算出弹头距地面的精确高度。

器件的选择基于如下考虑:时间间隔测量仪的计数时钟拟采用 100 MHz,其等效距离分辨率可达到 1.5 m。目前,采用 FPGA 或者专用 TDC 芯片研制 100 MHz 计数率的 TDC,从技术上看已经较成熟了,主要难题是确定功耗大小,这需要在实际研制中进行验证。为了提高运算速度,DSP 采用定点 16 位运算的

芯片。目前,DSP 芯片种类较多,以美国 TI 公司的系列产品最为成功,其 TMS320 系列是目前国内信号处理的主导芯片,因此,在该系统中,也采用该公司的产品。此外,为了减轻 DSP 芯片的计算压力,保证系统的单次处理时间小于 1 ms,还采用专用的 FFT 芯片来完成信号的频谱分析功能^[9]。

3 结 论

激光引信若要在弹道导弹上成功应用,除了引信自身的设计方案必须先进合理外,还需要解决引信在弹头的安装方式以及窗口玻璃材料防烧蚀等问题。经过广泛调研和试验研究,已经有了解决这些问题的方法。总体看来,所设计的激光引信具有抗干扰能力强、测距精度高、体积小、质量轻等优点,适合于在弹道导弹上应用,具有较高的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 李玉清. 近 20 年来国外导弹引信技术研究与发展概况[J]. 制导与引信, 2002, 23(3): 1-8.
- [2] 王国雄. 弹头技术[M]. 北京:宇航出版社, 1993.
- [3] 刘锋. 脉冲半导体激光测距机的研制及应用[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(2): 118-122.
- [4] 吕百达, 马虹. 二极管泵浦固体激光器研究的一些新进展[J]. 激光与红外, 2000, 30(2): 67-70.
- [5] 吕百达, 邵怀宗. 高功率二极管泵浦固体激光器技术和应用前景的分析[J]. 红外与激光工程, 1997, 26(6): 29-33.
- [6] 柳强, 巩马理, 闫平, 等. LD 泵浦的 Yb:YAG 激光器最新进展[J]. 激光与红外, 2002, 32(1): 3-6.
- [7] 陈卫标, Nobuo Takeuchi. LD 抽运的 Cr^{4+} :YAG 被动调 Q Nd:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2002, 29(5): 385-388.
- [8] 过振, 王石语, 文建国, 等. 高重复频率二极管泵浦激光器窄脉宽调 Q 技术[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(4): 208-210.
- [9] 庄志洪, 祝龙石, 张清泰. 导弹引信高速信号处理[J]. 制导与引信, 1996, 17(3): 6-10.