

偏振技术在激光引信抗烟雾干扰中的应用分析

孟祥盛

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 激光引信如何抗云、烟环境干扰一直以来为该领域的研究热点。利用人工实体目标反射与烟雾后向散射回波的偏振度差异, 设计了一种基于偏振探测的激光引信。该探测系统对烟雾后向散射信号产生消光效应远大于目标探测信号, 选择性的降低了引信接收烟雾后向散射信号的能力。并结合激光引信的阈值探测原理和探测概率曲线, 理论计算了该偏振探测系统对烟雾的探测概率降低到原探测系统的 0.4%。最后结合工程研制经验, 分析了该探测系统通过系列措施, 既能保证其对目标的探测, 又可大幅降低对烟雾的探测概率, 而有望成为本质提高激光引信抗环境干扰的新方法。

关键词: 激光引信; 偏振; 阈值检测; 抗环境干扰

中图分类号: TJ43+4.2 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)07-1716-04

Applications of the polarization detection in laser fuse anti-environmental interference

Meng Xiangsheng

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Anti-interference of cloud and smoke is a hard problem for laser fuse. In this paper, a technology of polarization detection was presented based on the polarization degree difference in reflection of artificial entity targets and backscattering of smoke. The backscattering signal received by laser fuse was reduced selectively as the extinction effect on smoke backscattering signal was much larger than the target reflection signal. The detection probability calculated theoretically has been reduced to 0.4% of the original detection system by using the principle of threshold detection and detection probability curve. Finally, analysis shows that the system was expected to be a new anti-interference method since it can not only detect the target but also reduce the detection probability of the smoke significantly according to the experience in engineering development.

Key words: laser fuse; polarization; threshold testing; anti-environmental interference

收稿日期: 2012-11-05; 修订日期: 2012-12-15

基金项目: 中航工业重点实验室基金

作者简介: 孟祥盛(1980-), 男, 工程师, 主要从事光电探测装置及光学系统方面的研究。Email: 21181446@qq.com

0 引言

激光引信作为一种主动探测的近炸引信,因其具有抗电磁干扰能力强、体积小和启动精度高等优点,在战术导弹领域得到了广泛的应用。但由于体制的原因,装备在空空导弹上激光引信存在易受高浓度的云、烟雾等气溶胶环境的干扰,这使激光引信不能成为一个“全天候”作战引信。因此,如何提高激光引信抗烟雾等环境干扰问题已成为其发展的关键问题。目前虽有“窄脉冲探测”、“激光成像”等方法试图解决该难题,但都因存在各自问题而没有一个明显的发展趋势。

目前,利用反射回波的偏振信息来提取目标特性已成为信息识别领域中一个研究热点^[1-3]。而在激光引信方面出现了利用偏振光对目标与干扰物两种反射回波偏振信息差异进行抗干扰的应用研究^[4]。该方案通过接收系统检测与发射激光束(椭圆偏振光)相同偏振角的反射回波来完成对目标的检测和识别,达到提高抗干扰能力的目的。但其探测系统较复杂,体积受限其很难应用于空空导弹上。而通过研究线偏振光分别经过实体军事目标反射和干扰物后向散射后的消偏差异,设计出一种结构简单,易于工程化的利用偏振信息探测的空空导弹激光引信,有望成为本质提高激光引信抗云、烟干扰的新方法。

1 人工实体反射和烟雾后向散射的偏振度差异对比

1.1 人工实体反射

由于目标材质和表面粗糙度对反射回波偏振度有一定的影响。一般来说,对于粗糙度不高的实体表面的单次反射回波都为偏振度较高的部分偏振光^[5-6]。在波长为 1 064 nm 的线偏振光垂直入射到不同粗糙度的目标表面时,实验测出散射光的 Stock 矢量,初步地描绘出散射光的偏振的形态,如参考文献[7]中图 5.3 所示,见图 1。4 条扁椭圆线代表不同粗糙度的反射目标的回波偏振状态可见,回波的偏振度较高,并且其主振动方向和发射光夹角很小,在 5°以内。

对空导弹激光引信通常探测由飞机蒙皮(金属材料)反射后的回波能量来实现近炸功能。其发射与接收视场夹角很小(通常在 1°以内),与上述试验情况类似。

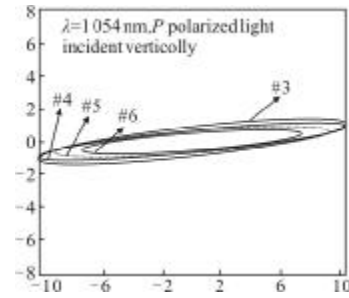


图 1 线偏振光垂直入射到不同目标表面反射光中偏振光形态
Fig.1 Linearly polarized light's polarization state by different target surface reflected

1.2 烟雾等悬浮粒子散射

当线偏振光入射到烟雾等悬浮粒子时,由于多次散射有较强的消偏作用,导致散射光的偏振度较低,甚至变成完全非偏振光^[8]。而激光引信为能抑制一定浓度烟雾的干扰,通常在近距视场设置“盲区”。此光学探测视场就造成引信在一定浓度的烟雾条件下,发射光必经近距烟雾的多次散射才能进入接收视场,见图 2。因此,能被这类引信探测系统接收到的散射光偏振度很低。

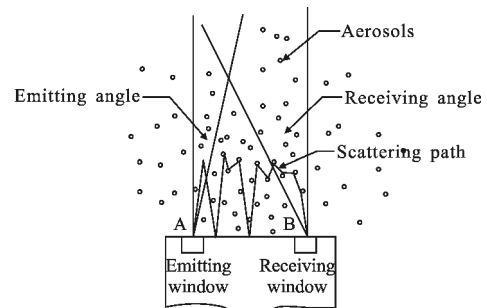


图 2 激光引信近距烟雾散射示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser fuze near aerosol scattering

2 探测原理分析

激光引信的探测原理与激光雷达相近,通常其探测到的回波能量大于系统的阈值并符合目标判据时,便给出近炸信号。而引信为满足对远距小目标具有足够的探测灵敏度及启动概率,须具有很大能量响应范围。这就造成烟雾的后向散射能量也能超过引信的探测阈值,形成虚警。目前采用的拉大收发窗口的间距,增大近距探测盲区的方法只对一定浓度烟雾有效,对浓烟并没有达到理想效果。

根据上述分析,线偏振光经过人工实体反射和烟

雾后向散射的偏振度存在一定差异。引信的探测系统如采用一定的检偏技术可利用此差异产生不同的消光系数,相当于提高烟雾和目标的“对比度”,以改善其抗烟雾干扰薄弱问题。图 3 是利用偏振的探测原理图。

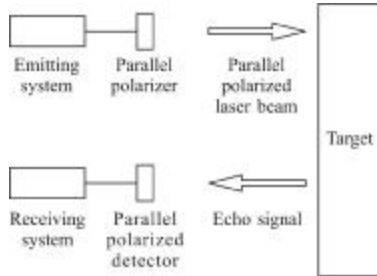


图 3 利用偏振探测原理图

Fig.3 Schematic diagram of using polarization detection

该探测原理与原系统基本一致,只是在发射和接收系统前加装偏振器,且两者的透过轴一致。由于激光引信的发射和接收视场的夹角很小,基本可看做是对目标体的垂直探测。根据以上分析,当发射光束经起偏镜形成的线偏振光遇到的反射体为目标时,由于反射回波保持较高的偏振度,且振动方向基本不变,因此,接收系统前的检偏镜对回波的消光作用有限,即有较大的回波能量进入接收系统。而当反射体为烟雾时,由于引信有近距盲区,后向散射光须经过多次散射后进入接收视场,其偏振度已经非常低,检偏镜对此回波产生较大消光作用。因此,通过此方法可选择性的降低进入探测系统的烟雾散射能量,以实现提高抗烟雾干扰的能力。

3 该系统的抗烟雾干扰和探测性能分析

3.1 抗烟雾干扰

引信的探测概率为系统正确发现目标信号的概率。当系统对一定烟雾的探测概率不接近于零时,系统就可能产生误动作。如果系统对相同的烟雾具有更低的探测概率,则认为其抗烟雾干扰能力强。因此,在对目标探测灵敏度相同的情况下,两种系统抗烟雾干扰能力可通过对比两者对一定烟雾的探测概率的大小来评估。

引信在其他参数一定的情况下,其对反射物的探测概率主要由单个脉冲的探测概率决定。而此系统仍属于阈值探测,其单次脉冲的探测概率通常可用高斯误差函数近似表示为^[9]:

$$P_d = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{V_s - V_t}{\sqrt{2} V_n} \right) \right] \quad (1)$$

式中: P_d 表示探测概率; $\operatorname{erf}(x)$ 为高斯误差函数; V_s 为信号电压; V_t 为阈值电压; V_n 为噪声电压的均方根值。

根据以上分析和马吕斯定理,在相同环境下,当系统利用偏振信息时,目标反射回波进入接收系统的能量 $V_{SM} = 0.8V_{IM}$ (V_{IM} 为目标的反射回波能量,0.8 为检偏镜对目标反射回波的理论消光系数);烟雾散射回波进入接收系统的能量 $V_{SY} = 0.5V_{IY}$ (V_{IY} 为烟雾散射回波能量,0.5 为检偏镜对烟雾散射回波的理论消光系数),当设置阈值电压 V_t 为 1 V,噪声电压 V_n 为 0.2 V 时,两类反射体单脉冲的探测概率 P_M 和 P_Y 可根据公式 1 分别表示为:

$$P_M = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{0.8V_{IM} - 1}{\sqrt{2} \times 0.2} \right) \right] \quad (2)$$

$$P_Y = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{0.5V_{IY} - 1}{\sqrt{2} \times 0.2} \right) \right] \quad (3)$$

以回波信号的幅值为 X 轴,单脉冲回波探测概率为 Y 轴,用 MATLAB 软件将 3 个方程绘制在同一坐标,可比较出两类系统在相同的回波能量下,探测概率的变化情况。见图 4。对于原系统,烟雾和目标都满足同一曲线(左边第一根);而偏振系统由于对烟雾和目标的回波能量有不同的消光系数,形成两个曲线(中间为目标反射,右边为烟雾散射)。

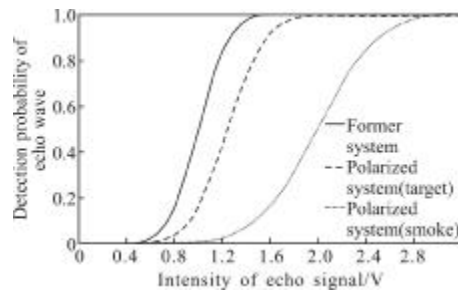


图 4 烟雾和目标探测概率对比曲线

Fig.4 Detection probability curve against smoke and target

通过图 4 可知,在相同烟雾环境下,偏振系统对烟雾的探测概率相对原系统则大幅下降。比如当烟雾散射回波信号为 1.6 V 时,原系统的探测概率近似为 1,而偏振系统仅 0.16。

上述分析仅是单个脉冲的探测过程,而该类系统为保证极低的虚警率,通常需要多个脉冲连续超过探测阈值。因此,引信系统的探测概率 $P = Pd^N$ (N 为引信所需的连续脉冲数)。假如脉冲数 $N=3$,上述情况引信

对烟雾的探测概率仅为 0.163(0.4%)。而原系统探测概率仍然近似为 1。因此,利于偏振系统较大程度降低了对烟雾的探测概率,抗烟雾干扰能力有很大提高。

3.2 对目标的探测性能分析

根据以上分析,由于偏振系统的消光作用,该系统(相对原系统)对同一目标的探测概率有所降低(见图 4)。而此问题最终体现在对目标探测距离的下降。因此,为了保证该系统对目标有足够的探测距离,须调整部分系统的参数。比如,在系统噪声不变或者降低的条件下,适当降低系统阈值电压,可达到提高探测概率和灵敏度的目的。图 5 为偏振系统降低阈值电压后的曲线图。从图中可知,当阈值电压 V_t 由 1 V 降为 0.8 V,噪声电压不变时($V_n=0.1$ V),偏振系统对目标的探测概率曲线基本上和原系统重合。

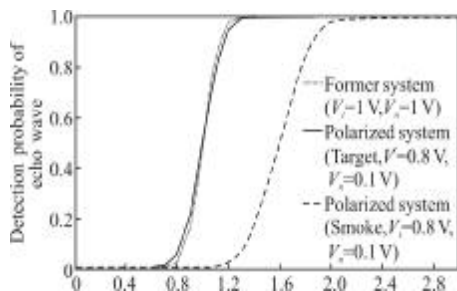


图 5 降低阈值电压的探测概率曲线图

Fig.5 Detection probability curve applying lower threshold voltage

由于目标反射回波的偏振度与目标表面特性有关,因此,偏振系统对于不同目标存在探测距离差异。为了保证偏振系统对主要的几类典型目标都有足够的作用距离,可在系统对高浓度烟雾不敏感的前提下,适当采用提高发射能量和探测器响应度等措施来提高系统的探测灵敏度。由于偏振系统对烟雾散射能量的消光系数大于目标反射,因此,提高探测能量的措施对提高目标探测能力的贡献更为“显著”。而此系统因上述原因对不同类目标可能形成的最大探测距离的差异,可通过设置“距离波门”等的措施来保证引信具有一定的截止距离。

由于线偏振光在烟雾中传输存在一定的退偏现象,需分析该现象对此系统的影响。根据偏振激光在云雾传输中的退偏研究,光束后向散射的偏振角变化最大,而前向散射的偏振角不发生变化^[10]。此规律很好的适应该系统,这是因为前向散射光的偏振角不变能利于引信的发射光束透过浓烟雾后进行目标

探测,而浓烟雾和目标两者后向散射的回波能量叠加可有效提高引信对隐藏在烟雾等干扰物后的目标的探测灵敏度和启动概率。从另一方面来说,由于空空导弹激光引信的可靠作用距离通常在 7~8 m 以内,在距离很近的情况下,该因素对引信的目标探测与抗干扰影响较小。

4 结 论

通过上述分析与计算,利用烟雾和目标体对线偏振光消偏作用差异,设计出的一种基于偏振信息的激光引信。可在不降低对目标探测能力的情况下,大幅降低其对烟雾的探测概率。并且具有结构简单,成熟技术多的优点,对提高激光引信抗烟雾干扰性能有工程研制的意义。

参考文献:

- [1] Wang Haiyan. Target detection using pulse laser's character of polarization[J]. Acta Photonic Sinica, 2009, 38(11): 2958-2962. (in Chinese)
- [2] Tan Zuojun, Li Jun, Chen Haiqing. Application of polarization measurement in the identification of the space target [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(3): 200-203. (in Chinese)
- [3] Sun Wei, Liu Zhengkai, Shan Lie. Manmade objects recognition with polarization information [J]. Optical Technique, 2004, (4): 267-269. (in Chinese)
- [4] Liu Jian, Ke Xizheng, Hu Shuqiao, et al. Application of laser polarization in proximity fuse[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2010, 32(6): 162-165.
- [5] Li Quan, Liu Zejin. Application of polarization diversity in active imaging [J]. High Power and Laser Particle Beams, 2005, 17(3): 351-354. (in Chinese)
- [6] Liu Biliu, Shi Jiaming. Mechanism of infrared polarization detection [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(5): 777-781. (in Chinese)
- [7] Ma Langui. The experimental study of laser backscattering polarization characteristics of rough surface [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [8] Meng Xiangsheng. A laser fuse based on the polarization detection[J]. Aero Weaponry, 2008, (1): 42-45. (in Chinese)
- [9] An Yuying, Zeng Xiaodong. Photoelectric Detection System[M]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University Press, 2004. (in Chinese)
- [10] Yang Lihong, Ke Xizheng, Ma Dongdong. Depolarization characteristics of the polarized laser in atmosphere [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(11): 62-67. (in Chinese)