

## 激光近距探测装置抗云雾干扰研究

任宏光<sup>1</sup>, 张好军<sup>1\*</sup>, 孙毓凯<sup>2</sup>, 张韵雯<sup>3</sup>

- (1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471000;
2. 中国人民解放军 32381 部队, 北京 100072;
3. 郑州师范学院, 河南 郑州 450044)

**摘要:** 激光近距探测装置(AOTD)在中低空和超低空使用时,云雾是一个重要干扰源,当飞行器略过云雾时,会导致AOTD虚警,甚至误输出执行信号。为了提高AOTD的在云雾中的工作能力,文中分析了AOTD工作原理和云雾的干扰原理。结合工程应用效果,总结了截止距离法、光学盲区法、光学抑制方法、视场对消法、参考视场法、形体识别法、激光/毫米波复合抗云雾干扰方法、窄脉冲/超窄脉冲激光探测法、激光成像法等。其中,激光/毫米波复合探测方法是更高效的方法。文末对各应用效果给出了初步的对比分析,有利于提高AOTD在云雾干扰环境中的工程应用性能,这些技术的综合应用,可以基本解决云雾干扰的问题,获得有效的抗干扰效果。

**关键词:** 抗云雾干扰; 激光近距探测装置; 光学抑制法; 目标形体识别; 抗干扰效果

**中图分类号:** TN973.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0403004

## Study on techniques of anti-aerosol-interference for active optical target-detection device

Ren Hongguang<sup>1</sup>, Zhang Haojun<sup>1\*</sup>, Sun Yukai<sup>2</sup>, Zhang Yunwen<sup>3</sup>

- (1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471000, China;
2. 32381<sup>st</sup> Troops of the Chinese PLA, Beijing 100072, China;
3. Zhengzhou Normal University, Zhengzhou 450044, China)

**Abstract:** Aerosol-interference is a serious interference source for active optical target-detection device (AOTD) when it is used in lower sky or super low sky. When AOTD in a vehicle passes through aerosol, it may be wrong armed, even give out execution signal before right time. In order to increase the ability in aerosol environment, how the AOTD worked and how the aerosol interfered the AOTD were analyzed. It also showed out the techniques of anti-aerosol-interference used in engineering. The general techniques for anti-aerosol-interference were settings of cut-off distance method, weaken methods by optical parts, optical field restraining method, cancellation by symmetric views, setting reference view field, body recognition method, composite with Ka detectors, decreasing the width of transmitted pulse, image recognition method et al. Among these methods, the multimode detection method was a valuable way. Effects of different anti-interference methods were listed, the results shows integrated application of all the methods can increase the ability of AOTD.

**Key words:** anti-aerosol-interference; AOTD; interference-weaken methods by optical parts; target shape recognition; effects of anti-interference

收稿日期:2019-12-13; 修订日期:2020-01-16

作者简介:任宏光(1963-),男,研究员,博士,主要从事飞行器设计及抗干扰技术等方面的研究。Email: 13603797997@139.com

通讯作者:张好军(1971-),男,研究员,博士,主要从事飞行器设计及抗干扰技术等方面的研究。Email: lyzhanghaojun@163.com

## 0 引言

20 世纪 60 年代初美国和前苏联的学者发明了半导体激光器,从此主动激光探测进入探索研发阶段,20 世纪 60 年代末至 70 年代初,激光近距探测装置(Active Optical Target-detection Device, AOTD)逐步进入工程应用阶段,美国人首先应用于响尾蛇系列 AIM-9L<sup>[1]</sup>。短短半个世纪,其在各种系统中的应用得到了长足的发展,国外典型应用 AOTD 的飞行器有美国 AIM-9X 系列,俄罗斯 PBB-AE,欧洲 ASRAAM,以色列“怪蛇”5 和 Derby 等。基于主动光学探测工作体制,AOTD 具有启动精度高、抗电磁辐射能力强、方位分辨率高等特点,为实现探测和执行部件精确配合和目标薄弱部位识别提供了有利条件。

随着飞行器应用面的扩大,应用验证环境逐渐复杂,AOTD 的不足也逐渐暴露出来。目前应用近红外波段的 AOTD 受光学探测特性的限制,易受空中云雾、雨、雪和其它悬浮物等气象环境的干扰而引发虚警或误动作,尤其是对付中低空到超低空使用环境的目标,如各类直升机、无人机、长航时飞行器、地面雷达站等,云雾干扰是大概率事件,如俄罗斯 PBB-AE 的 AOTD 在距离地面 1 km 左右高度穿越空中云层时发生虚警。

近年来,各工业部门和高校在探索云雾对 AOTD 干扰和 AOTD 抗云雾干扰方面的研究越来越深入。张荫锡<sup>[2,3]</sup>开展了 AOTD 抗阳光/云雾干扰和抗环境干扰技术研究,提出了干扰机理分析和抗云雾干扰的初步思路;张好军<sup>[4]</sup>开展了采用双色技术的 AOTD 抗干扰技术研究,对于双色激光探测在抗云雾干扰方面的应用提出了初步思路;李源等<sup>[5]</sup>开展了基于 DPSSL 的窄脉冲激光探测抗干扰技术研究,对窄脉冲激光探测抗干扰的工程化应用提出了初步思路;王小驹等<sup>[6]</sup>开展了激光成像技术研究,提出灰度成像进行目标探测和抗干扰技术研究初步思路;张京国<sup>[7]</sup>、王凤杰<sup>[8]</sup>等分别开展了激光散射粒子与目标的激光散射特性及应用研究;谢绍禹等<sup>[9]</sup>开展了双色激光探测抗海浪干扰技术研究,对于抗云雾干扰有一定的借鉴作用;刘锡民等<sup>[10]</sup>开展了相干激光探测抗干扰技术研究,拓宽了应用相干激光抗干扰的思路;陆长平等<sup>[11]</sup>开展了激光/无线电复合探测抗干扰技术研究,提出了初步

的多模复合抗干扰思路;付春等<sup>[12]</sup>开展了调频连续波激光与无线电复合探测抗干扰的技术研究,提出初步的复合信号处理思路;陈慧敏等<sup>[13]</sup>开展了调频连续波激光探测抗干扰的技术研究,从不同的激光探测工作模式进行了抗干扰研究;裴喆<sup>[14]</sup>开展了舰空飞行器 AOTD 抗大气粒子干扰技术研究,提供了舰空飞行器 AOTD 抗干扰的初步思路。综上所述,各项技术涵盖了工作模式、探测模式、脉冲选择、多模抗干扰等诸多方面,分别在理论研究、环境研究和样机试验等方面提出了抗干扰的一些思路,对于 AOTD 的抗云雾干扰问题,还需要进一步开展工程应用的深入研究。

文中从 AOTD 工作原理出发,简析了云雾干扰机理,结合工程实践结果,给出多种解决措施,并结合试验结果和应用效果,分析了各项抗干扰措施的可行性,力图对提升抗干扰效果提供帮助。

## 1 AOTD 基本组成和工作原理

作为主动光学探测装置,AOTD 的主要功能是发射激光,照射目标,接收目标反射的激光,进行预处理,然后通过模拟或数字信息处理,识别目标和干扰,从而实现对目标的探测和正确识别。基于技术成熟度和成本等因素,目前工程上常用 AOTD 的激光器和探测器分别为半导体激光器和 Si PIN 光电探测器。

### 1.1 系统组成

AOTD 典型组成功能框图如图 1 所示,由发射光学系统、接收光学系统、发射电路、接收电路、信号处理电路、电源电路和执行电路等组成。

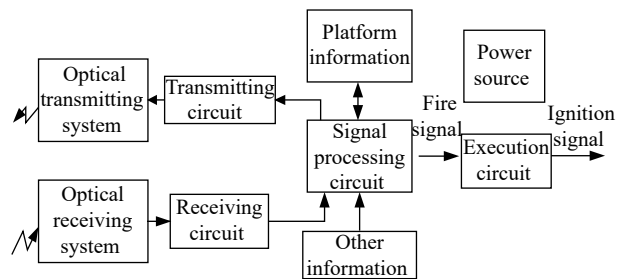


图 1 AOTD 组成功能框图

Fig.1 Block diagram of major components of AOTD

AOTD 工作原理:在飞行器电源建立之后给 AOTD 的电源电路供电,将飞行器电源变换后,供给发射电路、接收电路、信号处理电路、执行电路等工作。信

号处理电路输出时钟等信号控制发射电路工作,驱动激光器开始同时或顺序工作,半导体或固体激光器产生激光脉冲,由发射光学系统根据方向分布要求,将该激光脉冲发射到周围空间中去,如果碰到目标,便产生回波光脉冲信号,由接收光学系统收集至激光探测器的光敏面上,由其将光脉冲信号转换成电脉冲信号,接收电路对该电信号再经过放大等预处理后,送给信号处理电路,按照设定的目标和干扰准则,进行目标和干扰识别。同时参考平台其它信号进行联合判断,如果满足目标信号特征,输出执行信号,送给执行电路,毁伤目标。

### 1.2 常用的信号处理方法

飞行器和目标高速交会时,遭遇时间短至百微秒量级,目标和干扰算法需要在极短运算时间内完成。基于此,目前 AOTD 常用的信号处理方法有以下三种:目标成像方法、目标计数方法和形体识别方法。

#### 1.2.1 目标成像方法

该方法主要思路是,在飞行器和目标交会过程中,对目标进行成像识别,根据目标形状和特征点,进行目标识别。该方法在于成像精确,容易识别目标重点部位。其不足之处在于,当目标淹没在云雾中时,单一波长探测前端看到的是一团模糊,无法清晰区分出目标和云雾,同样会造成无法识别的现象。

#### 1.2.2 目标计数方法

该方法主要思路是,在飞行器和目标交会过程中,只要目标在 AOTD 的作用距离内,就能够接收到激光回波脉冲,对接收到的回波脉冲进行分路、时序处理、整形后进行脉冲计数,根据计数的大小判断是否目标。其不足之处在于,如果有云雾干扰,云雾造成的后向散射信号强度可能满足 AOTD 的探测阈值要求,如果积累足够的计数个数,就会误输出目标信号,形成虚警。

#### 1.2.3 二维形体识别方法

该方法利用离散激光光束探测的思路,在飞行器和目标交会过程中,每一个探测视场对接收到的回波脉冲进行计数,在此基础上,对多路脉冲同时进行计数处理,即同时对多个视场的回波信号进行处理,从纵向和横向两个方向进行目标的二维形体判别,不仅利用了沿飞行器轴线方向上的时序信息,而且利用了沿飞行器圆周方向的空间信息,该方法利用简单的探

测模式,实现了二维信息的综合应用,提高了抗干扰概率。其同样存在不足之处,如果遇到体积较大、浓度范围在特定区间内的云雾团,同样可产生多路回波干扰,误输出目标信号。

## 2 云雾对 AOTD 干扰机理简析

### 2.1 一般粒子的典型尺度范围

大气中悬浮粒子和云团尺度分布极广,有小至半径仅 100 pm 量级的分子团,也有大至 10 cm 的冰雹。图 2 给出了各种常见粒子的典型尺度范围<sup>[15]</sup>。

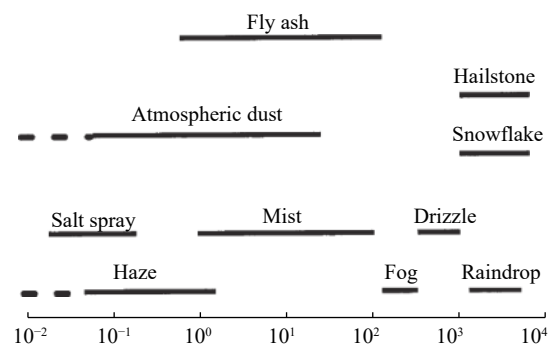


图 2 大气微粒和云雾粒子的典型尺度范围(单位:  $\mu\text{m}$ )

Fig.2 Typical size of particles in atmosphere and aerosol(Unit:  $\mu\text{m}$ )

大气悬浮粒子和云雾对激光传输的影响主要表现在以下方面:大气层气体分子和云雾对激光的选择性吸收所引起的衰减;大气中悬浮颗粒以及云雾对激光的散射及衰减;大气分子和悬浮微粒本身的尺寸、组成等物理性质变化引起的激光传输的变化,包括反射和散射。其中大气中悬浮颗粒以及云雾对激光的后向散射是造成 AOTD 干扰的主要因素。

### 2.2 云雾对 AOTD 在中的干扰机理

图 3 所示为 AOTD 发射出的激光,遇到云雾等悬浮微粒后,经过多次吸收和反射(如图示散射路径),进入 AOTD 的接收视场,对于依靠阈值门限的信号处理方法,如果强度满足设定条件,会造成虚假目标信息。一般云雾的有效作用波长区域为 0.1 ~ 100  $\mu\text{m}$ <sup>[16]</sup>,云雾主要是由液态的微粒悬浮大气中形成,如果发射的激光照射到云团表面,则会形成图 3 所示的结果。AOTD 对目标和干扰的探测信号在强度足够大时,均表现为过门限信号,但在信号细节上存在较大差异。如果是目标,则主要的作用效果为反射,如果是云雾,则存在反射、散射和衰减吸收三种效果。

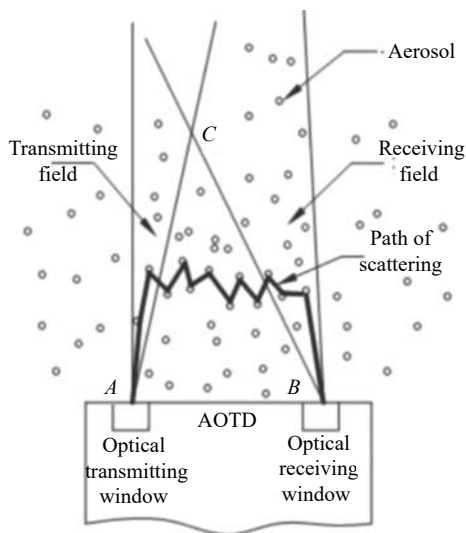


图 3 云雾对 AOTD 干扰路径示意图

Fig.3 Diagram of the influence of the aerosol interference on AOTD

微粒的成分、大小和数量会影响云雾的干扰效果,云团单位体积内微粒多,对入射激光的反射、散射和吸收效果越明显,不仅会造成计数方法和形体识别方法中误动作的发生,同样会造成成像探测方法中目标的遮挡。

对于微粒大小的影响主要分为几种情况:

当微粒直径显著大于入射光波长时,主要形成几何散射效果,微粒使得入射光主要产生反射和折射,光入射到云团上,一部分由其表面反射,另一部分被折射,即散射强度随微粒的增大而减小,体现为实体目标的作用效果。

当微粒直径显著小于入射光波波长时,符合瑞利散射规则;当微粒直径增大时,微粒对入射光的散射强度迅速增大,便形成粒子散射(也可称米散射),有实验证明当粒子直径大约与光波波长相当时,此时产生的散射最大。

当云团微粒直径接近于可见光波长时,光的散射状态变得更复杂。云团微粒不仅能散射光,而且能吸收一部分光,云团微粒将光能转化成其他能,导致接收到目标的反射光能量减弱。

云雾微粒对激光传输的影响是随着 AOTD 激光工作波长的缩短,微粒数量的增多,造成的散射和衰减吸收会加大,分子散射和粒子散射会具有显著的区别,波长较长的光波在云雾中的散射和衰减吸收会小一些。

### 3 几种常用的 AOTD 抗云雾干扰方法

基于不同粒子大小和浓度分布的云雾对 AOTD 的散射和反射效果的不同,目前已应用的几种抗云雾干扰采用以下方式:截止距离法、近距盲区法、光学抑制法、视场对消法、参考视场法、形体识别方法<sup>[2]</sup>、多模复合探测的激光/毫米波复合抗云雾干扰方法和成像探测法。

#### 3.1 发射和接收视场交叉布局形成的远区光学视场截止距离法

如图 4 和图 5 所示,通过对发射视场和接收视场交叉,形成远距截止探测范围,自动将截止距离外的干扰信号通过光学的方法抑制掉。如果云雾等出现在截止探测视场外,接收视场无法接收该区域反射回波,就不会有光回波形成的电信号进入预处理和信号处理过程,则可以避免受云雾干扰。该方法对于抗地物干扰同时有效<sup>[17]</sup>。该种方法的局限性在于对于云雾中目标,不易区分目标和干扰。

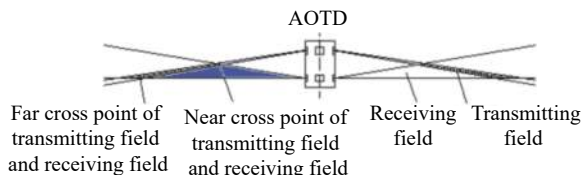


图 4 发射视场和接收视场交叉示意图

Fig.4 Cross location of transmitting field and receiving field

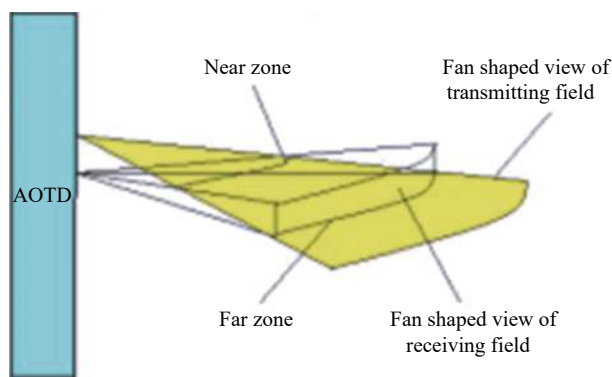


图 5 单象限发射视场和接收视场交叉示意图

Fig.5 Cross location of transmitting field and receiving field for a single part

3.2 发射和接收视场交叉布局形成的近距光学盲区法  
参考图 4 和图 5 的发射和接收视场交叉布局示意图,理论上只要发射和接收窗口不重合,其收发视

场具有近距截止区。图 3 是一种典型的 AOTD 光学收发视场交叉放大示意图,  $A$  是发射窗口,  $B$  是接收窗口, 从图中可以看出, 发射和接收视场在  $C$  处相交(对应图 4 中发射和接收近距交叉处), 由于近距接收视场接收到更少的光回波, 则接收信号强度大幅降低, 距离小于  $C$  到飞行器表面的区域 AOTD 是“看不见”的, 也被称作“近距盲区”。比  $C$  点更近的区域 AOTD 无法探测到, 更远处区域的气溶胶对 AOTD 的影响将随着距离的增加呈几何级数迅速下降, AOTD 接收到的气溶胶干扰的回波信号与距离 AOTD 窗口的远近密切相关。三角形  $ABC$  区域是理论近距盲区, 对应实体目标反射信号弱, 但当发射和接收窗口距离有限时, 有激光回波经过在悬浮物之间(或悬浮物和壳体之间)的多次反射、散射, 通过盲区并落入接收视场, 这时近距盲区的作用效果就会降低。当悬浮物的浓度一定时,  $AB$  距离越大, 经散射落入接收视场的激光回波能量就越小, 甚至达到不能到阈值门限。 $AB$  距离足够大时, 就没有多次散射回波进入接收视场。通过增大发射和接收窗口距离, 同时增大近距盲区, 是一种有效的抗云雾干扰方法。

### 3.3 降低飞行器表面杂散光分布的光学抑制方法

如图 6 所示, 在 AOTD 光学参数测试过程中, 发现在飞行器表面附近存在远大于设计视场角度的、相对较弱的光分布, 这些非预期光的存在, 在有云雾的环境中, 引起发射和接收视场的匹配失衡, 导致

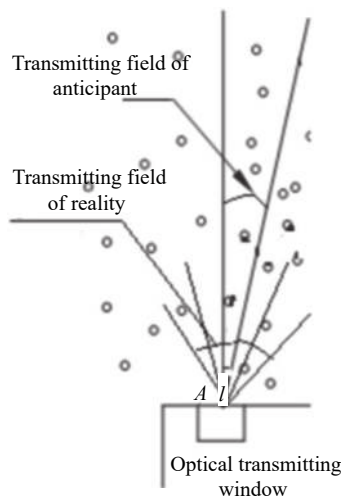


图 6 实际发射视场和其设计值的光分布对比示意图

Fig.6 Diagram of the distribution of laser energy in designation field vs reality field

AOTD 对云雾更敏感。在整个发射光传输通路各个环节增加杂散光抑制措施, 包括通道光路吸收、多级光阑抑制等措施, 可以降低云雾干扰的影响。

### 3.4 飞行器圆周对称视场的视场对消法

结合工程实际, AOTD 的发射和接收视场在飞行器圆周方向呈均匀对称分布, 而目标在一个交会过程中, 几乎不可能充满 AOTD 圆周  $360^\circ$  视场, 而云团某些情况下可以覆盖 AOTD 圆周  $360^\circ$  视场, 用圆周方向相对视场的信号对消来减弱云雾干扰的方法可以一定程度降低云雾干扰的影响<sup>[18]</sup>。

如图 7 所示, 对应一个以 4 个均匀分布象限构成圆周  $360^\circ$  视场的 AOTD, 其 4 个象限分别探测目标的存在, 而目标是具有确定外形的实体目标, 可能出现在一个象限或相邻的两个象限内, 不易同时出现在所有相对的象限内, 而云雾等大气中悬浮粒子处于不断扩展状态, 边界并不严格限定, 当飞行器进入浓密云雾区时, 飞行器近区四周均有云雾的悬浮粒子存在, 此时各象限均会有云雾的后向散射信号。在探测过程中, AOTD 整个圆周的 4 路回波信号被送进两个减法器, 分别生成一象限信号和三象限信号之差的信号、二象限信号和四象限信号之差的信号, 这两个信号分别被送进双路阈值电路, 其可根据差信号的大小、极性确定哪个象限存在目标, 因此, 差信号仅有反映目标的后向散射, 而与云雾无关。当差信号为正, 并且信号幅值大于某一阈值时, 在一(二)象限存在目

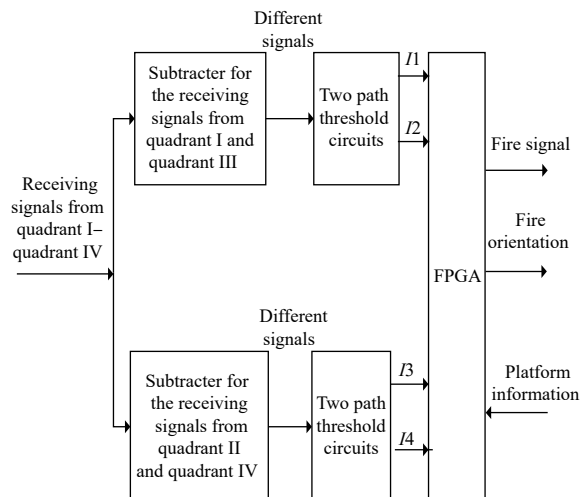


图 7 圆周视场对消法示意图

Fig.7 Diagram of cancellation method for two opposite fields of a whole circle

标,输出  $I1(I2)$  信号,当差信号为负,且信号幅值小于某一阈值时,在三(四)象限存在目标,输出  $I3(I4)$  信号。接收  $I1, I2, I3, I4$  信号后, FPGA 利用作用距离选择脉冲信号,排除作用距离之外的信号,利用特定的计数算法,抑制来自 AODT 内部和外部的单次脉冲干扰,该方法具有一定的抗云雾干扰效果。

### 3.5 基于云雾散射路径扩展的参考视场法

实体目标对激光反射,其信号具有有界性;而云雾散射路径的不规则性,导致云雾干扰信号具有扩展性,利用此不同特征信息,可以设置独立于收发单元的参考接收单元,该单元设置为完全依靠云雾的散射信号,即正常实体目标的反射信号不能进入参考接收单元,但云雾的散射信号可以进入接收单元,该思路可用于抗云雾干扰。图 8 为参考视场抗云雾干扰系统示意图。图 8 中 1 和 2 分别为接收视场和参考接收视场,3 和 4 分别为参考探测器和目标探测器,5 和 6 均为放大器,7 和 8 为峰值保持电路,9 为比较器 I,10 为比较器 II,11 为“或”电路,12 为阈值门限,13 为目标,14 为探测区,15 为云雾区。

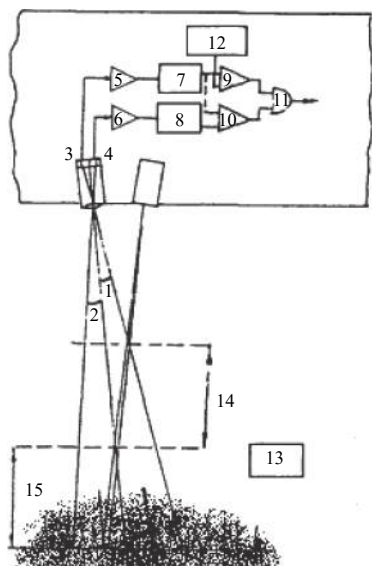


图 8 应用参考视场法示意图

Fig.8 Diagram of the application of reference view field

云雾使激光在传输过程中受到衰减以及对激光束产生后向散射,进而导致 AODT 信噪比明显下降。“云雾压制与边缘增强复合探测技术”<sup>[19]</sup>中, AODT 的每一组接收机均有一个目标探测器和一个参考探测器,其视场 1 和 2 边缘彼此直接相邻。发射机发射一

束平行激光,光束轴线与接收机彼此相邻两视场相交,从而可以确定目标反射激光束的有效区域。发射光束的能量被目标和背景的悬浮微粒反射到探测器上,通常一个真实目标形成的光斑要比探测器有效区域小,而悬浮微粒的环境形成的光斑则比探测器有效区域大。通过电路设置,将反射到目标探测器信号和反射到参考探测器上的信号做差,可以消除因悬浮微粒所引起的虚警探测。

接收机也可以采用三元探测器,分别对应不同距离的相邻 3 个探测区,目标一般出现在 1 个探测区内,而悬浮微粒充满 3 个探测区。用相邻距离区信号相减可实现分级抑制云雾杂波干扰和识别真实目标存在。

该种参考视场法既可避免由地杂波可能产生的虚警,又能于飞行器在距目标很近的地方通过时,从无关的背景信号中识别出通过 AODT 既定工作区的真实目标。该方法具有一定的抗云雾干扰效果。

### 3.6 基于时间和空间分布特征的形体识别方法

形体识别方法主要基于三个因素:具有单元目标形体大小的判别准则,具有相邻单元探测信号的时序关系的判别准则,具有多单元信号重合的云雾判别准则。

形体识别法进行目标的二维形体识别的信号处理思路为,经过飞行器和目标交会距离识别后的连续或准连续信号经由单个收发单元的目标一维形体大小识别后,再经过相邻收发单元的时序关系确定目标的另一维形体大小识别,满足目标二维形体特征则被认为是初步的真目标,如果单个视场目标太大或太小,相邻视场判别的目标尺寸太大或太小,则综合判断是目标,复位后进入下一步的目标和干扰识别过程。

云雾中含有的悬浮粒子在达到一定的浓度后,尤其是云雾达到了一定的厚度,对应波长激光对云雾具有分层穿透性和分层后向散射性、能形成后向散射的云雾区域的扩展性,会造成 AODT 形成连续或离散的目标信号,对 AODT 造成干扰。

如图 9 所示,可以依据目标形体连续性特征和云雾对应的非连续离散特征,使用特定的目标大小识别作为云雾识别的抗干扰判据<sup>[3]</sup>。

多单元重合识别:在飞行器和目标交会过程中, AODT 探测到目标在圆周方向上的分布具有非全圆

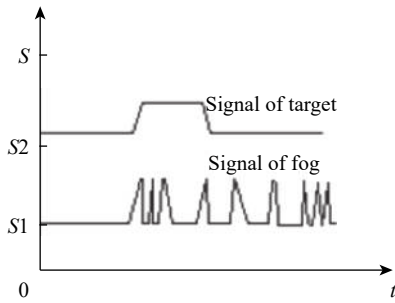


图 9 连续目标形体和离散云雾形体对比示意图

Fig.9 Continued shape of target vs discrete shape of aerosol

周 360°覆盖的特点,尤其是目标很难在一个交会过程中全部充满该小视场 AOTD 的所有收发单元,而云雾却可以做到这一点,即云雾在 AOTD 中形成的信号很有可能形成全圆周 360°覆盖,该特征可以作为一个识别云雾和目标的判据。

**目标形体特征识别:**目标的二维形体特征具有特定的逻辑关系,而云雾对应的形体特征毫无规律可言,该特征同样可以作为一个识别云雾和目标的判据。该方法具有一定的抗云雾干扰效果。

### 3.7 激光/毫米波复合抗云雾干扰方法

工作在 Ka 波段的无线电信号对一般的云雾粒子反射信号很弱,利用该特性,可以建立光学和毫米波复合探测模式,来进行抗云雾干扰。

目前基本的信息融合方式,是在 AOTD 依据设定的目标判据判定有目标存在的条件下,去判断有毫米波目标信号,如果在给定的时间间隔内,有符合目标特征(幅度、频率、计数个数等)的毫米波目标信号,则复合后给出复合执行信号;如果只有激光目标识别信号,在给定的时间内,无符合目标特征的毫米波目标信号出现,则判定为非目标信号。

随着技术成熟度的提高,可在扩展模式下使用,该复合探测方式以 AOTD 为主,毫米波探测单元为辅的方式进行,在 AOTD 能够单独识别目标的情况下,或毫米波探测单元受干扰情况下,不用参考毫米波探测单元信号,AOTD 单独识别目标;AOTD 在遇到云雾时,会产生多路闪烁信号,此时参考毫米波探测单元信号,如果满足飞行器和目标交会信号特征,则二者进行信息融合,给出目标信号;如果无 AOTD 信号,只有毫米波探测单元信号,则进行毫米波目标变化特征识别等,如果满足设定目标要求,则识别为目标。

可以充分利用激光探测信号目标识别信号和毫米波探测单元探测目标识别信号。

该方法由于激光探测单元技术比较成熟,而毫米波技术的发展相对成熟,可保证其集成和微型化,在降低综合成本方面,是一种有效的抗干扰方法。

### 3.8 窄脉/超窄脉冲激光探测抗干扰法

新型器件的发展推动了抗干扰技术的发展,尤其是应用固体激光器产生超窄脉冲激光探测技术在军事上得到应用以来,其优良的性能越来越受到各国军事研究机构的重视。对比于普通半导体激光器,固体超窄脉冲激光器具有峰值功率高、发射脉冲窄的优点。目前使用的半导体激光器的发射脉宽为 100 ns 左右,而微固体激光器发出的脉冲宽度为 3~5 ns,脉宽比半导体激光器缩小了一两个数量级,具有更强的距离分辨力,并且可以降低悬浮粒子的后向散射;半导体激光器发射脉冲的峰值功率为数百瓦左右,而微固体激光器脉冲的峰值功率可达数千瓦;窄脉冲和大峰值功率可有效提高探测信噪比、探测距离和测距精度,对于 AOTD 的抗干扰有重要意义。超窄脉冲 AOTD 采用固体激光器作为发射光学系统的光源,为得到准确的目标距离信息以及目标特征回波信息创造了条件。运用窄脉冲激光技术之后,可获得更加丰富的目标信息,包括幅度、距离和波形变化信息等,而且这些信息随着时间和空间位置而变化,沿飞行方向就形成了目标的三维信息<sup>[5]</sup>。

目标是不规则多面几何体,飞行器突然掠过该目标时,AOTD 获得一段距离突变的持续回波脉冲,其包含的回波距离信息具有特定的变化趋势。作为体目标,其各部位对于 AOTD 探测视场具有不同的张角和距离,导致其不同部位回波的幅度和相位不相同,这些回波信号在探测器上叠加并进行光电转换,经过预处理后表现为脉冲宽度变化和多峰脉冲波形,这些特征可以用来判定是否目标。

对比于目标,云雾具有体积大、浓度和边缘过渡相对平滑的特点,一般包围飞行器分布,其后向散射的强度随浓度的变化缓慢变化,不易产生距离突变和多峰脉冲波形,通过这些特征可以识别云雾。同时,若飞行器进入云雾当中,多个对称探测象限可能有回波信号存在,而目标不易出现多对称象限出现目标信号,据此也可降低云雾干扰。

飞行器掠海飞行时,海面与云雾也有相似之处,在飞行器探测视场中出现时也有一个缓慢变化的趋势。采用超窄脉冲探测,在干扰回波和目标回波同时存在时,还可以通过干扰回波峰值与目标回波峰值时域上的分离特征识别目标和干扰。

该方法难点在于激光器技术的突破,其寿命和工程化程度相对不足,需要进一步开展工程化应用研究。

### 3.9 激光成像抗云雾干扰方法

扫描成像的工作原理是,  $n$  象限激光光源按照一定的重复频率轮流发出的激光经发射光学系统整形为视野角为  $360^\circ/n$  的薄扇形光束,经发射窗口发射出去,遇到目标后,来自目标不同部位的反射信号和后向散射信号经 AOTD 的成像光学系统汇聚到线列探测器上的对应单元上形成像点,完成一次扫描后,各个象限的对应的像点组合成一系列图像,随着飞行器和目标交会的进行,最终将形成一幅目标图像,如图 10 所示。采用激光主动准成像,与依赖于对目标的红外辐射的探测的简易红外成像 OTD 相比,由于激光成像 AOTD 是通过目标所反射激光回波的探测而实

现的,因此它对目标的探测将不受目标有无红外辐射及红外辐射方位的限制,因此具有较强的区分目标与云雾等的的能力,从而具有良好的抗云雾干扰的能力<sup>[20]</sup>。

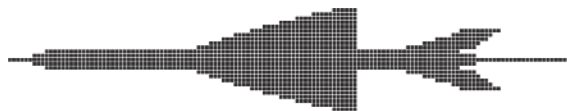


图 10 目标仿真点阵图像

Fig.10 Simulation point image of airplane

该方法难点在于激光成像器件的突破、成像均匀性的实现以及信号处理算法的快速性和有效性,需要进一步开展工程化应用研究。

## 4 验证结果

目前已应用的主要抗云雾干扰采用以下几种方法:截止距离法、近距盲区法、光学抑制法、视场对消法、参考视场法、形体识别法、激光/毫米波复合探测法、窄脉冲激光探测法、激光成像法等。其方法和效果对比见表 1。

表 1 抗云雾干扰方法和效果表

Tab.1 List of methods and effects for anti-aerosol-interference

| Types of interference | Interference characteristics                                 | Interference-weaken methods   | Effects of anti-interference | Explanation              |
|-----------------------|--|---|------------------------------|--------------------------|
| Aerosol               | Extensibility of the scattering zone                         | Settings of cut-off distance, reference view field, cancellation by symmetric view, optical field restraining | Eliminated partly            | Verified not perfectly   |
|                       | Penetrability and multi-layers scattering                    | Settings of multi-range gates and multi- thresholds   | Eliminated partly            | Verified not perfectly   |
|                       |  | Decrease the width of transmitted pulse   | Eliminated partly            | Devices in poor maturity |
|                       | Image characteristics of block or irregular shape of aerosol | Image recognition   | Eliminated partly            | Devices in poor maturity |
|                       | Aerosol in reality environment                               | Composite with Ka detectors   | Eliminated effectively       | Verified Perfectly       |
|                       | Head on and trailing attack                                  | Composite with IR detectors   | Passive closing              | Limited                  |

## 5 结 论

为了解决 AOTD 在中低空和超低空使用时云雾造成的严重干扰,文中在分析 AOTD 工作原理和信号处理方法的基础上,依据其在云雾中的传输特性,结合工程应用效果,总结了发射和接收视场交叉布局形成的远区光学视场截止距离法和近距光学盲区法、降低飞行器表面杂散光分布的光学抑制方法、飞行器圆周对称视场的视场对消法、基于云雾散射路径扩展的

参考视场法、基于时间和空间分布特征的形体识别方法、激光/毫米波复合抗云雾干扰方法、窄脉冲/超窄脉冲激光探测抗干扰法、激光成像抗云雾干扰方法等,最后对干扰特征、各种减轻/消除干扰的方法、消除效果和应用说明等进行了对比分析,更有利于抗干扰方法的应用选择,相对而言,激光/毫米波复合探测方法是更高效的方法。

除此之外,还有双色比方法、超光谱探测法、载



波调制激光探测等需要开展进一步的应用研究和验证。

#### 参考文献:

- [1] Tian Zhenhua(translator), Jin Tongtai (collator). Sidewinder AIM-9L/M [J]. *Aero Weaponry*, 1986(2): 37-39. (in Chinese)  
田振华译, 金同太校. 响尾蛇AIM-9L/M[J]. 航空兵器, 1986(2): 37-39.
- [2] Zhang Yinxi, Zhang Haojun. Analyse of technology for anti-interference from sun and smog for laser fuze [J]. *Aero Weaponry*, 2002(1): 1-5. (in Chinese)
- [3] Zhang Yinxi, Zhang Haojun. Analyse of anti- environment-interference technology for laser fuze [J]. *Guidance & Fuze*, 2002, 23(3): 34-40. (in Chinese)
- [4] Zhang Haojun, Zhao Jianlin. Dual-wave technology used in laser-fuze anti-interfere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1070-1074. (in Chinese)
- [5] Li Yuan, Liang Qian. A photoelectricity detection system of laser fuze based on DPSSL design [J]. *Aero Weaponry*, 2012(41): 24-26. (in Chinese)
- [6] Wang Xiaoju, Ma Heng, Zhang Shunfa. Laser gray imaging fuze technology for air-to-air vehicle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0303002. (in Chinese)
- [7] Zhang Jingguo, Liang Xiaogeng, Liu Jianxin, et al. Effect of pulse width on cloud-and-fog backscattering signal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(12): 1422-1426. (in Chinese)
- [8] Wang Fengjie, Chen Huimin, Ma Chao, et al. Research on the characteristics of fog backscattering laser echo [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0506002. (in Chinese)
- [9] 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): 0406005. (in Chinese)
- [10] Liu Ximin, Zhang Jianhua, Yang Dezhao, et al. Review on coherent laser fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0303001. (in Chinese)
- [11] Lu Changping, Jiang Lu, Liu Yuecong. Technology of signal processing for laser/radio compound fuze [J]. *Guidance & Fuze*, 2017, 38(3): 1-3, 9. (in Chinese)
- [12] Fu Chun, Pan Xi, Song Chengtian. Frequency modulated continuous wave laser and radio compound detecting technology [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2016, 14(1): 40-45. (in Chinese)
- [13] Chen Huimin, Liu Yang, Zhu Xiongwei, et al. Simulation of the characteristics of backscattering signals for frequency modulated continuous wavelaser fuze [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(12): 2247-2253. (in Chinese)
- [14] Pei Zhe. The anti-jamming technology for atmosphere aerosol used in sea-to-air laser fuze [J]. *Aerodynamic Vehicle Journal*, 2016(1): 44-47. (in Chinese)
- [15] Zhang Yixin. Propagation and Imaging of Light in Random Media[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [16] Yao Lujiu, Gao Junlin, Xiao Kaitao, et al. Theory and Testing Technique of Smoke[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [17] Li Donggen. Analysis of interfere for laser fuse and its anti-interference [J]. *Aero Weaponry*, 2008(5): 38-44. (in Chinese)
- [18] Tu Jianping. A novel signal processing system for laser fuze [J]. *Aero Weaponry*, 1999(6): 12-14. (in Chinese)
- [19] Mitchell, Robert R. Dual field-of-view optical target detector: US, P4532867[P]. 1985-08-06.
- [20] Pan Leyi, ZhengLian, Wang Keyong. Computer simulation of imaging infrared fuse [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, 29(3): 35-39. (in Chinese)