

烟幕干扰与复合导引头对抗策略研究

许敬^{1,2} 刘滨^{1,2} 杨俊彦^{1,2} 崔业兵¹ 吴建东^{1,2}

¹上海航天控制技术研究所,上海 201109

²中国航天科技集团公司红外探测技术研发中心,上海 201109

摘要 导引头的抗干扰能力已成为衡量导弹性能的重要指标,针对常见的烟幕干扰,提出了激光/红外(IR)复合导引头的抗干扰策略。在分析烟幕对激光/红外制导干扰机理的基础上,分别就其对透射率与作用距离的影响展开分析计算。分析了目前红外成像导引头抗烟幕干扰的策略及存在的问题,并结合激光获取的目标距离信息,提出了复合抗干扰策略。

关键词 大气光学; 导引头; 抗干扰; 目标运动估计; 烟幕干扰

中图分类号 V448.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.060101

Anti-Jamming Strategy for Smoke-Screen Jamming and Composite Seeker

Xu Jing^{1,2} Liu Bin^{1,2} Yang Junyan^{1,2} Cui Yebing¹ Wu Jiandong^{1,2}

¹ Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China

² Infrared Exploration Technology Research & Development Center of China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 201109, China

Abstract The anti-jamming capability of seekers has been one of the most important performance indexes to appraise the missile. Anti-jamming strategies of ladar/infrared (IR) composite seeker are proposed for the common smoke-screen jamming. Based on the analysis of interference mechanism, the impact on transmittance and range is calculated with respect to IR channel and ladar channel, respectively. The anti-jamming strategies and available problems of IR seekers are analyzed, then the composite anti-jamming strategy with target range information is proposed.

Key words atmospheric optics; seeker; anti-jamming; target motion estimation; smoke-screen jamming

OCIS codes 010.3310; 010.5620; 100.4145; 110.2960

1 引言

目前红外(IR)成像制导武器已经成为一种具有高效费比、高命中率和强抗干扰能力的战场杀手。然而随着未来战场干扰手段的多样化和战场环境的日益复杂化,单一制导模式的红外成像导引头完全被动探测的优势将会慢慢失去,与其他制导方式的复合成为必然的发展趋势。激光与红外成像复合制导方式是一种主动探测与被动探测相结合的方式,不但可以充分发挥红外成像导引作用距离远、视场大、灵敏度及分辨率高的优势,还可以结合激光的距离信息,增强导引头的抗干扰能力以及对红外隐身或弱小目标的探测能力^[1-2]。

烟幕干扰是目前光电对抗装备的重要干扰手段之一,红外和激光等电磁波在通过烟幕形成的干扰屏障时被散射、吸收,使得导引头上接收到的能量大大衰减,从而达到遮蔽目标的作用^[3-4]。美国一位专家指出,美国的目标捕获系统大概有90%以上都会受现有发烟器材的影响。俄国专家认为,在进攻部队与防御之间使用烟雾,会将防御武器的威胁降低80%,防御阵地使用迷盲烟雾能将进攻武器的威胁率降低90%^[5]。

目前相关文献大多分析烟幕对单一的红外或者激光制导模式的干扰机理,而对导引头尤其是复合导引

收稿日期: 2015-11-12; 收到修改稿日期: 2016-01-04; 网络出版日期: 2016-05-11

作者简介: 许敬(1984-),女,博士,工程师,主要从事探测与制导方面的研究。E-mail: ruole@163.com

头的对抗策略较少提及^[6-8]。针对于此,本文在烟幕对激光/红外制导机理的理论分析和计算的基础上,提出了基于运动估计的复合抗干扰策略。

2 烟幕对激光/红外制导的干扰机理

激光制导武器系统依赖于一定波长、一定功率的激光辐射在导弹和目标之间的大气环境中进行传输才能发挥作用。例如主动激光制导导弹依靠自身携带的激光器照射目标,激光通过大气传输后到达目标,经目标反射后再次经过大气传输返回至导引头由探测器接收,这种制导方式使得激光不可避免地在大气中经历一个往返的衰减过程^[9]。红外成像制导主要是被动地探测目标和背景的红外辐射差异,经由大气传播后被导引头接收。激光和红外辐射作为电磁波,在大气中传播时必然会发生反射、折射以及吸收散射的现象。

烟幕通常称作气溶胶,是由空气中悬浮的大量细小颗粒组成,可通过改变光信号的传输介质特性,隔断目标与导弹之间的光路,实现对光电制导的干扰。

烟幕的干扰特性主要表现在三个方面^[6,10]:

1) 衰减辐射能量。烟幕的颗粒可改变电磁波的传播方向和辐射偏振度;可吸收、散射特定波段(或波长)的辐射,再以其他波长或传播方向向外发射电磁波。在红外辐射和激光通过时,烟幕对其散射、吸收而衰减其辐射能量,使得导引头上光电探测器接收到的能量大大衰减,甚至低于探测器的灵敏度,降低了导引头对目标的探测性能。如美军研制的新型气溶胶烟幕,使用时以粉末形式燃烧,形成密集悬浮微粒烟云,据称具有全遮蔽能力,遮蔽表面积达 $1200 \text{ m}^2/\text{kg}$,能达到防御激光制导导弹,并可将红外导引头的效能降低 $66\% \sim 90\%$;

2) 掩盖辐射差异。对于红外成像通道,烟幕利用自身发射出的更强红外辐射,将目标及其背景的红外辐射差异掩盖或削弱,使导引头只能探测到一片模糊的影象;

3) 形成虚假目标。对于激光制导通道,烟幕可产生反光点,可使激光脉冲在时序上混乱,形成虚假目标,无法正确探测目标的真实距离,不但降低激光制导的性能,而且当激光制导兼具引信功能时,会在烟幕前输出起爆信号,不能精确击中目标。

3 烟幕干扰下导引头探测性能的分析

3.1 对透射率的影响分析

定量分析烟幕对辐射的衰减能力可使用 Lambert-Beer 定律,因而透射率的表达式可写为

$$\tau_{\text{smoke}} = \frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha_e CL), \quad (1)$$

式中 τ_{smoke} 为烟幕透射率,无量纲; I 为透射光强度,单位为 W/cm^2 ; I_0 为入射光强度,单位为 W/cm^2 ; α_e 为烟幕对激光的质量消光系数,单位为 m^2/g ; C 为烟幕的质量浓度,单位为 g/m^3 ; L 为光波在烟幕中通过的距离,单位为 m 。

虽然透射率可以表示电磁波穿过烟幕后的衰减程度,但是由于其与烟幕的质量浓度和光程相关,在使用该参数时容易产生不确定性。通常采用消光系数来表征烟幕对电磁辐射的衰减能力^[11]。从(1)式可以计算出消光系数的表达式为

$$\alpha_e = \frac{1}{CL} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right), \quad (2)$$

消光系数是烟幕介质的性能参数,表述了介质在单位质量浓度和单位光程条件下传输辐射的能力。 α_e 可以等于大于 $1 \text{ m}^2/\text{g}$,显然 α_e 值越大吸收越严重,而且 α_e 与辐射的波长 λ 有关。

质量浓度是单位体积内烟幕微粒的质量,通常采用滤膜计重法或者 β 射线测尘仪测定。其中滤膜计重法是将已知体积的烟幕通过滤膜过滤器,利用滤膜的增重和烟幕流量来计算质量浓度,计算公式为^[12]

$$C = \frac{\Delta G}{qt}, \quad (3)$$

式中 ΔG 为滤膜的增重,单位为 mg ; q 为采样流量,单位为 m^3/s ; t 为采样时间。

由于目前测量烟幕的质量浓度有较大的困难,借助文献[13]给出几种传统战场烟剂的消光系数 α_e ,如表 1 所示。

表 1 烟剂对不同波长光辐射的消光系数

Table 1 Extinction coefficients of optical radiation for smoke agent for different wavelengths

Smoke type	Visible light	1.06 μm laser	1.54 μm laser	10.6 μm laser	3~5 μm IR	8~12 μm IR
Oil mist	3.20	3.64	0.96	0.047	0.36	0.10
Red phosphorus	3.36	1.93	0.34	0.47	0.29	0.27
Acid mist	3.85	2.19	0.31	0.15	0.17	0.23
Six chloromethane	2.36	-	0.35	0.79	0.20	0.53

根据表 1 提供的数据,以红磷烟幕为例,假设 L 取 0.5 m,分别对 1.06 μm 激光和 3~5 μm 红外进行计算,得到其透射率与烟幕浓度之间的关系,如图 1 所示。根据激光雷达制导原理,制导激光需往返两次穿过烟幕,因此激光透射率为双程透射率。

当 $C=1000 \text{ g/m}^3$ 时,1.06 μm 激光的双程透射率为 0.145,3~5 μm 红外的透射率为 0.865。穿过同样质量浓度的烟幕时,激光的透射率远远低于红外辐射。

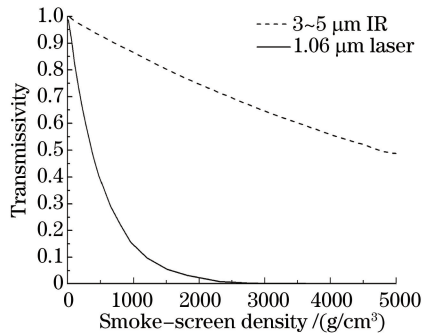


图 1 透射率与烟幕密度的关系曲线图

Fig. 1 Curve of transmissivity versus smoke-screen density

3.2 烟幕干扰下作用距离变化

作用距离是导引头探测能力的直接表现,下面对有无烟幕干扰时的红外、激光最大作用距离进行对比分析,说明干扰对导引头探测能力的影响。

红外导引头作用距离计算公式为

$$R = (J\tau_a)^{1/2} \left(\frac{\pi}{2} D_0 \cdot NA \cdot \eta_r \right)^{1/2} (D^*)^{1/2} \left[\frac{1}{(\omega \cdot \Delta f)^{1/2} (V_s/V_n)} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

式中 J 为目标辐射强度,在 3~5 μm 范围内的辐射强度预估为 40 W/sr; τ_a 为大气的透射率,在 5 m 高度,弹目距离为 20 km 时取 0.2; D_0 为有效接收口径,取为 50 mm; NA 为光学系统数值孔径,取为 1; η_r 为光学系统接收效率,取为 0.6; D^* 为平均探测率,取为 $1.5 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$; ω 为瞬时视场,取为 $8.18 \times 10^{-4} \text{ rad}$; Δf 为系统带宽,取 200 Hz; V_s/V_n 为系统信噪比,取 9。

可以看出,红外导引头的作用距离的平方与大气透射率成正比。在有烟幕遮挡时,需要对包含烟幕的大气透射率进行修正,即 $\tau_a' = \tau_a \times \tau_{\text{jammimg}}$ 。

主动激光导引头作用距离计算公式为^[14]

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{tx}} \cdot \eta_{\text{tx}} \cdot \eta_{\text{rx}} \cdot \tau_a^2 \cdot \sigma \cdot D^2}{\pi \cdot \varphi^2 \cdot f_{\text{SNR}} \cdot f_{\text{NEP}} \cdot \sqrt{B}}}, \quad (5)$$

式中 B 为电路带宽;能见度大于 10 km 时,大气透射率 $\tau_a = \exp(-\kappa \cdot R)$,其中激光大气消光系数 $\kappa = 0.105 \text{ km}^{-1}$;导引头内部有效接收口径 $D = 50 \text{ mm}$,激光器输出功率 $P_{\text{tx}} = 12 \text{ kW}$,发射光学效率 $\eta_{\text{tx}} = 0.7$,发射光束宽度 $\varphi = 0.8 \text{ mrad}$,接收光学效率 $\eta_{\text{rx}} = 0.7$,探测器噪声等效功率 f_{NEP} 达 $0.12 \text{ pW/Hz}^{1/2}$ 量级,电路带宽取 50 MHz; σ 为目标处的激光雷达横截面积(LCS),目标尺寸 A_{tgt} 为 1 m^2 ,目标为点目标时,

$\sigma = 4A_{\text{tgt}} \cdot \rho$ 。目标为扩展目标时, $\sigma = \pi(\varphi R)^2 \rho$, 其中 ρ 为目标反射率, 近似取 0.2, R 为弹目距离。

按照前面所述的参数取值, 可以得到复合导引头红外和激光通道的作用距离与烟幕透射率之间的关系曲线, 如图 2 所示。面对烟幕干扰, 并且当烟幕浓度达到一定程度时, 红外和激光制导通道都处于完全失效的状态, 并且激光的探测性能下降得比红外通道厉害。

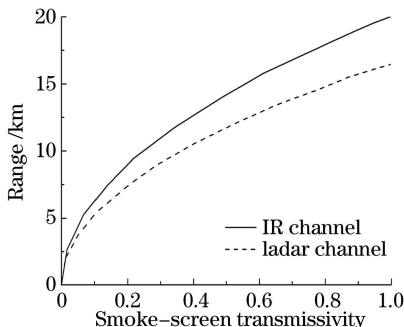


图 2 红外/激光通道作用距离与烟幕透射率的关系曲线

Fig. 2 Curve of the IR/ladar channel range versus smoke-screen transmissivity

4 复合导引头的抗干扰策略

红外成像导引头具有作用距离远、分辨率高、视场角大、制导精度高等优点, 其缺点是只能获取目标的二维红外图像信息, 缺失目标的距离信息。因此, 在目标被干扰遮挡时, 能够精确地采用预推策略进行目标的抗干扰。而激光成像可以同时获取目标的距离像和强度像, 但其具有视场角小、作用距离较近的缺点, 只能工作于弹道末端。红外成像与激光成像制导相结合作为双模复合制导的一种重要方式, 它同时结合了不同频段和不同制导体制方式进行复合, 充分利用了两种传感器的功能互补性, 具有抗干扰和命中精度高的优点, 实现目标探测性能的提升。复合导引头工作过程: 远距离时, 启动被动红外成像通道, 搜索目标, 发现目标继而跟踪目标。即使出现干扰, 由于弹目视线角速度较小, 导引头有充分的时间利用图像处理算法完成干扰的判定和识别。在末端, 开启激光通道, 获取目标距离信息, 综合利用红外图像信息和激光目标距离信息, 完成对干扰和目标的识别, 实现目标的精确跟踪, 提高导引头的抗干扰能力。

4.1 红外导引头抗烟幕干扰策略

干扰烟幕的浓度是一个动态变化过程, 从红外成像导引头角度分析, 在目标释放烟幕后, 在烟幕干扰的作用下, 导引头对目标所成的图像从清晰到模糊, 并且由于发烟剂燃烧产生的极高热效应, 此时烟幕的红外辐射往往比目标与背景强得多, 这时导引头所成图像上的目标被烟幕生成的虚假目标部分甚至完全覆盖, 从而达到对目标的遮蔽作用。随着时间的推移, 烟幕浓度和温度逐渐降低, 红外图像又逐渐变得清晰。在红外目标被烟幕遮挡的过程中, 若不采取一定的措施, 当导引头能够重新获取到场景图像时, 目标可能已经处在边缘甚至逃离视场, 导引头再重新跟上或搜索目标会变得比较困难。

针对完全烟幕遮挡问题, 当前导弹普遍采用的方法有两种: 1) 保持视线角速度; 2) 目标轨迹预推, 其流程如图 3 所示。轨迹预推方法通常存在两个问题, 首先, 红外成像导引头对目标运动状态分析预测时可利用的目标参数通常为遮挡前获取的目标图像的时间序列帧, 这种纯目标方位信息的运动估计的缺点主要表现在估计存在偏差, 可能会造成解算过程发散; 其次纯方位估计方法对导弹自身运动状态的误差敏感, 当该误差小幅波动时, 会对整个运动状态分析造成重大影响, 甚至使其结果发散。即使在可用参数里面加入导弹自身的传感器如惯性传感器、磁码盘、陀螺及加速度计的信息以及初始装订的导弹信息, 仍旧不能准确地刻画出目标的真实运动状态。究其原因, 大多数弹道特性决定了制导过程中视线转角、转率和法向过载等可观测量逐渐收敛, 导致其信噪比越来越低, 所以在没有较准确的距离信息的条件下, 描述目标的真实运动较为困难。在引入较准确的弹目距离信息后, 既可以大大提高系统的可观测量, 其信噪比又不受视线角速度收敛带来的影响, 保证了运动状态分析的准确性, 从而实现抗干扰的目的。

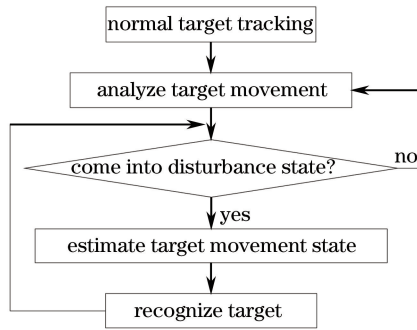


图3 红外成像导引头抗干扰方法

Fig. 3 Anti-jamming method for infrared imaging seeker

4.2 复合导引头抗烟幕干扰策略

通过理论分析可以证明,红外成像导引头单帧的测量数据无法得到目标的运动状态,通常是结合多帧的测量数据,通过滤波方法实现目标的跟踪。而对于复合导引头,由于其激光导引部分可以给出目标实时的精确距离,即使在遮挡阶段可能会丢失目标,但仍旧可以根据遮挡前的距离数据,结合遮挡前的红外信息,使得位置层面的目标运动状态单步可测,再将目标与弹体自身的捷联信息进行联合滤波处理,便可以较精确地得到目标的位置信息,进而结合武控系统射前装订的信息,即可准确描述出整个目标的运动状态,其算法流程如图4所示。

其中 \mathbf{X}_{T0} 为目标初始状态矢量, (x_{T0}, y_{T0}, z_{T0}) 为目标初始时刻在参考坐标系下的位置, $(\dot{x}_{T0}, \dot{y}_{T0}, \dot{z}_{T0})$ 为目标初始时刻在参考坐标系下的速度; $\mathbf{q} = (\beta, \dot{\beta}, \varepsilon, \dot{\varepsilon})$ 为目标视线矢量, 其中 β 和 $\dot{\beta}$ 为偏航方向上的视线角度和视线角速度, ε 和 $\dot{\varepsilon}$ 为俯仰方向上的视线角度和视线角速度; $\Delta\mathbf{q}$ 为误差角; $\mathbf{X}_{O_i} = (x_{O_i}, y_{O_i}, z_{O_i}, \dot{x}_{O_i}, \dot{y}_{O_i}, \dot{z}_{O_i})$ 为 i 时刻导引头运动状态矢量, 分别表征导引头的位置和速度; $\mathbf{X}_{T_i} = (x_{T_i}, y_{T_i}, z_{T_i}, \dot{x}_{T_i}, \dot{y}_{T_i}, \dot{z}_{T_i})$ 为 i 时刻目标的运动状态矢量, 分别表征目标的位置和速度; $\mathbf{X}_i = (x_i, y_i, z_i, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i)$ 为 i 时刻导引头和目标相对运动状态矢量, 分别表征相对位置和速度。

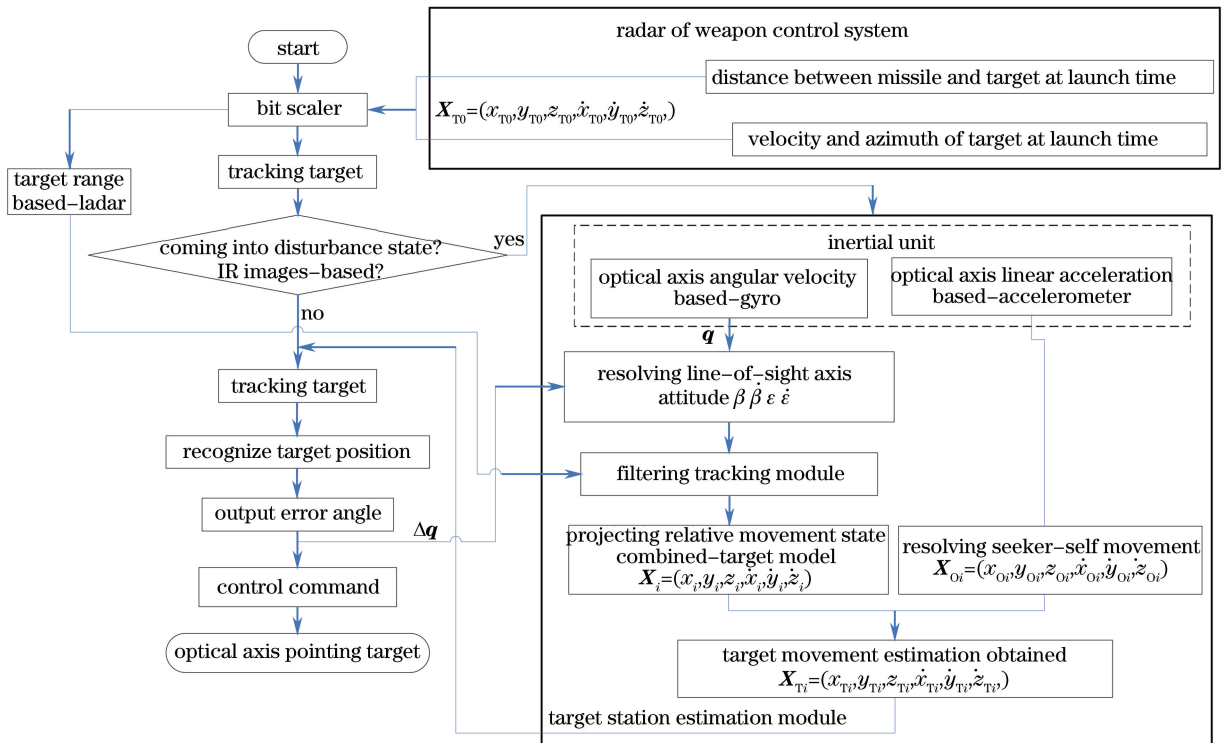


图4 激光红外复合导引头抗烟幕干扰策略

Fig. 4 Anti-smoke-screen jamming strategy of ladar and IR seeker

4.3 抗干扰策略仿真

假设目标在干扰前,导引头红外通道对目标始终保持在截获状态,且激光通道能够给出准确的弹目距离,在 2.98~3.15 s 投放干扰,干扰态时长为 0.17 s,分别针对视线角速度保持和激光红外复合抗干扰方法进行仿真,结果如图 5 所示。

从图中可以明显看出,传统的抗干扰方法视线角速度在整个干扰状态中保持不变,无法更新视线角速度值,离开干扰时,探测器需要快速调整,视线角速度变化剧烈,导致系统需要较长的调整时间。若干扰投放时弹目距离较近,则可能导致较大的脱靶量。而激光红外复合抗干扰通过结合干扰前的红外图像和准确的弹目距离信息,对目标的运动状态进行估计,可以给出目标较为准确的视线转率,整个过程平滑、真实地反映了弹目的实际视线角速度,从而保证了对目标的准确跟踪。

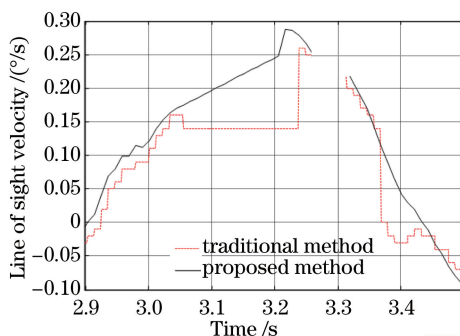


图 5 视线角速度输出

Fig. 5 Output of line of sight velocity

5 结 论

从烟幕干扰对激光、红外制导的干扰机理出发,分别分析了烟幕对激光和红外制导的透射率以及作用距离的影响,总结了目前红外成像导引头对抗烟幕干扰的策略,在此基础上,结合激光获取的目标距离信息,提出了复合导引头的抗烟幕干扰策略,并进行了仿真分析。在后续工作中,应深入开展激光与红外图像信息配准及融合处理的研究,并将抗干扰策略转化成实用化的硬件算法。

参 考 文 献

- Wang Rui. Compound guided system with active laser imaging and passive infrared imaging[J]. Chinese Optics, 2013, 6(4): 536-543.
王 锐. 激光红外主被动复合导引系统[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 536-543.
- Zhang Bingna, Zhang Liang, Huang Genghua, *et al.*. Research on dual-mode hybrid detection technology using laser to point directed by infrared camera[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0917001.
张冰娜, 张 亮, 黄庚华, 等. 一种红外引导激光指向双模复合探测技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0917001.
- Li Hui, Li Yan, Liu Bingfeng, *et al.*. Status development and key technique analysis of laser jamming technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(8): 081407.
李 慧, 李 岩, 刘冰锋, 等. 激光干扰技术现状与发展及关键技术分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 081407.
- Leng Feng, Wang Jiayin. Application and the developing trends of the technology in electro-optics countermeasure[J]. Electro-Optic Technology Application, 2004, 19(2): 28-31.
冷 锋, 王甲寅. 烟幕技术在光电对抗中的应用及发展趋势[J]. 光电技术应用, 2004, 19(2): 28-31.
- Cui Yunguo, Lu Chunhua, Xu Zhongzi. The threaten and countermeasure of laser[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(5): 315-318.
崔运国, 陆春华, 许仲梓. 激光威胁与对策[J]. 激光与红外, 2005, 35(5): 315-318.
- Liu Zelong, Guo Jianguang, Miao Yunkun, *et al.*. Compare the interference performance of several burnable organic smoke screens to IR[J]. Infrared Technology, 2006, 28(2): 116-119.

- 刘泽龙, 郭建广, 缪云坤, 等. 几种燃烧型有机类干扰烟幕的红外干扰性能比较[J]. 红外技术, 2006, 28(2): 116-119.
- 7 Wang Yingli. Theory and experimental study on the smoke total obscuring power[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 21-23.
王英立. 烟幕全遮蔽能力的理论与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 21-23.
- 8 Zhang Min. The modeling simulation of smoke Screen and Its Effect Analysis[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011: 7-11.
张 敏. 烟幕建模仿真及其对探测器的影响分析[D]. 长春: 长春理工大学, 2011: 7-11.
- 9 Liu Weichao, Qi Linlin, He Hongrang, *et al.*. Numerical study on atmospheric transmission of 1.06 μm laser[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(5): 520-524.
刘伟超, 齐琳琳, 何宏让, 等. 1.06 μm 激光大气透过特性的数值计算研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(5): 520-524.
- 10 Ren Lina, Liu Haifeng, Chen Liang. Study of the energy attenuation of smoke screen to infrared laser[J]. Infrared Technology, 2007, 29(11): 638-640.
任丽娜, 刘海峰, 陈 亮. 烟幕对红外激光传输的能量衰减研究[J]. 红外技术, 2007, 29(11): 638-640.
- 11 Liu Xiangcui, Cheng Xiang, Zhang Liang, *et al.*. Quantitative evaluation of obscuring effect of smoke to infrared thermal imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 37-42.
刘香翠, 程 翔, 张 良, 等. 烟幕对红外热像仪遮蔽效果的定量表征[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 37-42.
- 12 Shen Yueguo, Lü Xuliang, Wang Zhanfeng, *et al.*. Theoretical and experimental study on relative extinction coefficient of smoke particles to laser beams with different wavelengths[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 11(2): 158-161.
申岳国, 吕绪良, 王占锋, 等. 烟幕颗粒对不同激光束的相对消光系数理论和实验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2010, 11(2): 158-161.
- 13 Zhang Jinsheng, Gao Zhijie, Li Zhengwei, *et al.*. Effect of smoke screen transmissivity on laser homing guidance[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2006, 14(3): 209-214.
张金生, 高智杰, 李征委, 等. 烟幕透过特性对激光寻的武器制导的影响[J]. 含能材料, 2006, 14(3): 209-214.
- 14 Zhao Shaoqing, Zhang Chu. Simulation on atmospheric transmission characteristic of laser and its impact on laser ranging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 110101.
赵少卿, 张 雏. 激光大气传输特性仿真及对激光测距的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 110101.