

文章编号: 1672-8785(2016)10-0030-05

3.8 μm 激光对中波红外成像导引头的 定向干扰性能研究

王 冰 成 斌 赵 威 李武周 冀 翔

(中国洛阳电子装备试验中心光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 激光定向干扰是對抗红外成像导引头的最有效方式, 因此开展对红外成像导引头的激光定向干扰研究具有重大意义。影响中波激光定向干扰效能的因素有很多, 其中激光到靶功率密度是影响定向干扰效能的重要因素。从大气传输对中波激光的衰减、导引头光学系统对中波激光的光学增益、干扰激光光斑随干扰距离的变化等因素出发, 研究了中波激光的大气传输透过率与大气能见度及传输距离的关系, 分析了大气湍流强度对激光传输总发散角的影响。得到了 3.8 μm 激光对红外成像导引头的定向干扰模型, 绘出了激光到靶功率密度、大气能见度、大气湍流强度以及干扰距离之间的关系曲线, 并通过外场实测对该模型进行了验证。结果表明, 误差在一个数量级之内, 主要来自于远场激光光斑和传输路径上大气透过率的计算误差。该研究对于激光定向干扰装备的论证和研制具有一定的参考价值。

关键词: 中波激光; 定向干扰; 红外成像导引头; 大气能见度; 湍流强度

中图分类号: TN976 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.10.006

Research on Directional Jamming to IR Imaging Seeker by 3.8 μm Laser

WANG Bing, CHENG Bin, ZHAO Wei, LI Wu-zhou, JI Xiang

(Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test & Evaluation Technology,
Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

Abstract: Laser directional jamming is the most effective way to countermeasure infrared imaging seekers. Therefore, the research on laser directional jamming to infrared imaging seekers is of significance. There are many factors affecting the jamming effectiveness of mid-wave infrared laser directional jamming. Among those factors, the power density of laser falling on a target is the important affection factor. In view of the attenuation function of atmospheric transmission for mid-wave infrared laser, the optical gain of seeker's optical system to the mid-wave infrared laser and the variation of jamming laser spot size with distance, the relationships of atmospheric transmission of mid-wave infrared laser with atmospheric visibility and transmission distance are studied. The affection of atmospheric turbulence on the total divergence angle of laser transmission is analyzed. The directional jamming model of 3.8 μm laser for infrared imaging seekers is obtained. The relationship curves among the power density of laser falling on a target, the atmospheric visibility, the atmospheric turbulence intensity and the jamming distance are drawn. The model is verified in outdoor. The result shows that it has an error greater than one order of

收稿日期: 2016-07-12

作者简介: 王冰 (1981-), 男, 河南洛阳人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为光电对抗测试与评估技术。

E-mail: wangbingly@163.com

magnitude which mainly results from the calculation error of far field laser spot and atmospheric transmittance. This research is of a certain referential value to the development of jamming equipment.

Key words: mid-infrared laser; directional jamming; infrared imaging seeker; atmospheric visibility; turbulence intensity

0 引言

基于 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 中波红外凝视成像技术, 第四代红外空空导弹利用能量、形状、轨迹和光谱等特征来区分目标与干扰, 其空间分辨力和光谱分辨力较之前的红外点源制导导弹有了很大提高。早期的红外干扰机采用非相干光源对产生的红外信号进行调制, 然后利用定向装置将光束聚焦并将其照射红外导引头。光源一般采用氙灯、钨灯等。这些以非相干光为干扰源的红外干扰技术通过干扰信号调制, 对红外点源制导的导引头具有一定的干扰效果。但由于能量密度低, 该技术对成像型红外导引头的干扰效果一般。激光定向干扰技术是一种利用激光器代替传统的非相干光源, 通过将较高能量密度的红外激光照射到红外成像导引头上, 扰乱其制导信息, 或者致眩、致盲光电传感器, 使其无法正常工作甚至完全失去探测跟踪能力的技术^[1-2]。

近年来, 国内有关激光定向干扰技术的研究已有不少报道^[3-6], 而中波激光对红外制导武器的定向干扰效能又是其研究重点之一。影响中波激光定向干扰效能的因素有很多, 其中激光到靶功率密度是影响定向干扰效能的重要因素。本文通过对中波激光的大气传输特性、导引头光学系统的增益特性以及干扰激光光斑随干扰距离的变化等方面进行研究, 建立了 $3.8 \mu\text{m}$ 激光对红外成像导引头的定向干扰模型。然后通过计算仿真研究了大气能见度对 $3.8 \mu\text{m}$ 激光大气透过率的影响以及大气湍流强度对 $3.8 \mu\text{m}$ 激光总发散角的影响, 得到了激光到靶功率密度、大气能见度、大气湍流强度以及干扰距离之间的关系曲线, 并分析了仿真计算的误差及原因。

1 中波激光定向干扰模型分析

对红外成像导引头的干扰效果主要取决于导引头探测器所接收到的激光功率密度。不同量

级的激光到靶功率密度会使探测器受到不同程度的损伤和破坏, 从而达到不同的干扰效果。当干扰激光的功率密度不小于导引头探测器的饱和阈值时, 探测器会产生比较明显的光生载流子溢出现象。此时, 干扰激光会在导引头图像上形成较大的饱和光斑, 使导引头无法对目标进行有效的识别和提取。当干扰激光的功率密度不小于探测器的损伤阈值时, 红外图像上会出现暗点, 探测器会受到永久性且不可恢复的损坏^[7]。中波激光从发射、传输到被导引头探测器所接收, 整个过程中干扰激光的功率密度会发生一定的变化, 包括大气传输过程中干扰激光的衰减、导引头光学系统对干扰激光的光学增益、大气传输对干扰激光发散角的扩展等。这些因素都会直接影响激光到靶功率密度。

若中波激光对中波导引头进行干扰时的距离为 L , 大气传输透过率为 τ_1 , 中波激光发射时的功率为 P_0 , 中波激光出瞳处的激光直径为 d_0 , 中波激光到达导引头的总束散角为 θ , 光学系统的增益系数为 G , 那么中波激光经过大气衰减后通过导引头的光学系统到达导引头探测器表面的激光功率密度为

$$\eta = \frac{0.838 P_0 \tau_1 G}{\pi \left(\frac{d_0 + L\theta}{2} \right)^2} \quad (1)$$

1.1 大气传输透过率的估算

由于大气传输的复杂性, 通过理论分析尽管可以得到一些结论^[8], 但本文认为对比计算实例结果会更加直观, 并且更便于定量分析。对于大气透过率的精确计算比较困难, 目前用于计算传输路径上大气透过率的软件有 MODTRAN、LOWTRAN 等大气红外辐射传输软件, 但其计算过程复杂, 计算量大。在实际工作中, 为了计算方便, 在透过率的精度要求不高时, 通常采用经

验公式进行计算。式 (2) 为法国学者 Nabouls 所给出的不同能见度下大气透过率的经验公式:

$$\tau_1 = \exp \left[-\frac{3.912}{V} \cdot \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q} \cdot L \right] \quad (2)$$

式中, V 为能见度; λ 为波长; L 为传输距离; q 为修正系数, 由大气能见度决定:

$$q = \begin{cases} 1.6, & V > 20 \text{ km} \\ 1.3, & 6 \text{ km} \leq V \leq 20 \text{ km} \\ 0.58V^{1/3}, & V < 6 \text{ km} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 导引头的光学增益系数估算

经大气衰减后的中波激光通过导引头光学系统的透射和反射, 最终被汇聚到导引头焦平面的探测器上。此时, 激光的功率密度得到了一定的放大。若导引头整流罩的透过率为 τ_2 , 导引头光学系统的通光效率为 τ_3 , 通光口径为 D , 探测器的像元尺寸为 D' , 则导引头的光学增益系数为

$$G = \tau_2 \tau_3 \left(\frac{D}{D'} \right)^2 \quad (4)$$

1.3 中波激光传输的总发散角估算

中波激光经过大气传输到达导引头时, 其总发散角会受激光自身的光束发散角 θ_1 、激光器平台的抖动误差 θ_2 以及大气湍流所引起的光束扩展 θ_3 三方面的影响:

$$\theta = \sqrt{\theta_1^2 + \theta_2^2 + \theta_3^2} \quad (5)$$

式中, θ_1 为激光器自身的固有特性; θ_2 与激光器所在的平台有关; θ_3 为受传输路径大气湍流的影响, 通常用式 (6) 表示^[9]:

$$\theta_3 = b\lambda/r_0 \quad (6)$$

式中, b 为系数, $b=1.22$; λ 为激光波长; r_0 为大气湍流的相干长度, 其计算公式为

$$r_0 = \left[0.423k^2 \int_0^L C_n^2 dl \right]^{-3/5} \quad (7)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$; L 为路径长度; C_n^2 为大气湍流的结构常数, 通常用来描述光学湍流的起伏强

度, 与大气温度和风速密切相关, 其取值范围为 $10^{-18} \sim 10^{-10} \text{ m}^{-2/3}$ 。激光在湍流大气中的传播是一个十分复杂的随机非线性过程, 但总体说来, 大气湍流所引起的光束扩展与大气湍流强度之间存在密切关系。随着 C_n^2 的不断增大, 湍流强度逐渐增加。为了计算方便, 将湍流强度划分为弱湍流、中等强度湍流和强湍流。在通常情况下, 当 C_n^2 小于 $10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 即为弱湍流; 当 C_n^2 小于 $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 即为中等强度湍流; 当 C_n^2 大于 $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 即为强湍流^[10]。根据式 (7) 对一定湍流强度下的大气湍流相干长度进行计算, 从而得到大气湍流所引起的光束扩展 θ_3 。

1.4 中波激光定向干扰模型

中波激光经过大气传输后, 通过导引头的整流罩和光学系统最终汇聚在导引头的探测器上。综合以上分析, 可以得到中波激光定向干扰模型, 即导引头探测器所接收到的干扰激光的功率密度为

$$\eta = 3.352P_0 \tau_2 \tau_3 \left(\frac{D}{D'} \right)^2 \exp \left[-\frac{3.912}{V} \cdot \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q} \cdot L \right] \div \pi \left\{ \sqrt{\theta_1^2 + \theta_2^2 + b^2 \lambda^2 \left[\frac{1.728\pi^2}{\lambda^2} \int_0^L C_n^2(h) dl \right]^{6/5}} L + d_0 \right\}^2 \quad (8)$$

对红外成像导引头的干扰效果主要取决于 η 。当 η 大于导引头探测器的饱和阈值时, 干扰激光就能对导引头产生干扰效果, 其相应的 L 值即为能够实施有效干扰的干扰距离。

2 实验及仿真分析

2.1 实验及仿真参数

2.1.1 干扰激光参数

输出波长为 $3.8 \mu\text{m}$, 出光功率为 $0.1 \sim 1 \text{ W}$, 出光口的激光束直径为 20 mm , 光束束散角为 0.5 mrad , 激光器的抖动误差为 $50 \mu\text{rad}$ 。

2.1.2 导引头参数

采用 128×128 元锑化铟 (InSb) 探测器焦平面, 其工作波长为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$, 像元尺寸为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 。

2.1.3 光学系统参数

整流罩的透过率为 0.95, 光学系统的通光效率为 0.6, 入瞳面积为 20 cm^2 。

2.2 结果与分析

实验中, 能见度为 5 km, 干扰距离为 1.8 km, 湍流强度为弱湍流, 干扰激光的出光功率分别设置为 0.20 W、0.36 W 和 0.50 W, 测得的到靶激光功率密度分别为 7.6 W/cm^2 、 13.8 W/cm^2 和 24.9 W/cm^2 。与式 (8) 的计算数值相比, 总体说来, 实测的激光功率密度在变化趋势上与本文提出的计算模型一致。其误差在一个数量级以内, 主要来自两个方面: 一是大气湍流和衍射等对远场激光光斑计算造成的误差; 二是大气透过率的计算误差, 主要取决于大气能见度等输入参数的准确度以及经验公式自身的误差。图 1 为不同干扰激光功率密度下 InSb 探测器的干扰图像。当激光到靶功率密度为 7.6 W/cm^2 和 13.8 W/cm^2 时, 导引头还能保持对目标的跟踪; 当激光到靶功率密度为 24.9 W/cm^2 时, 干扰光斑在 InSb 探测器上形成强烈的串扰, 使得导引头丢失目标。

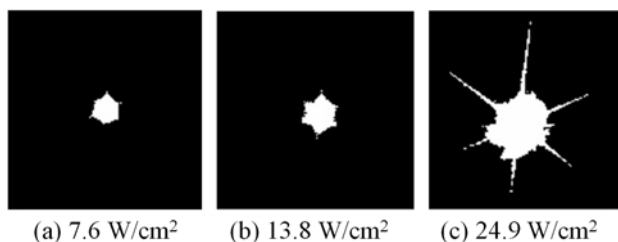


图 1 不同激光到靶功率密度下的干扰光斑

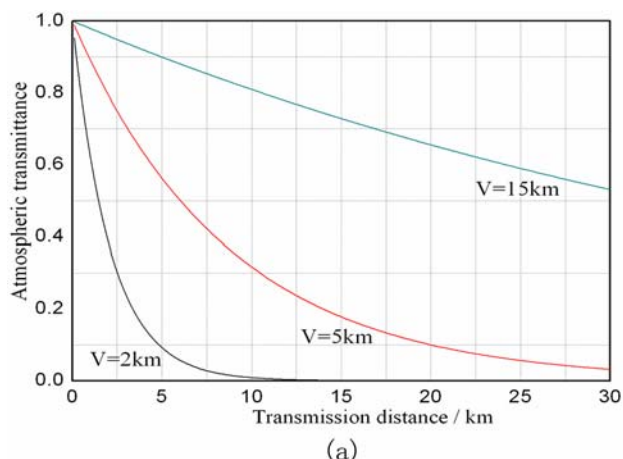
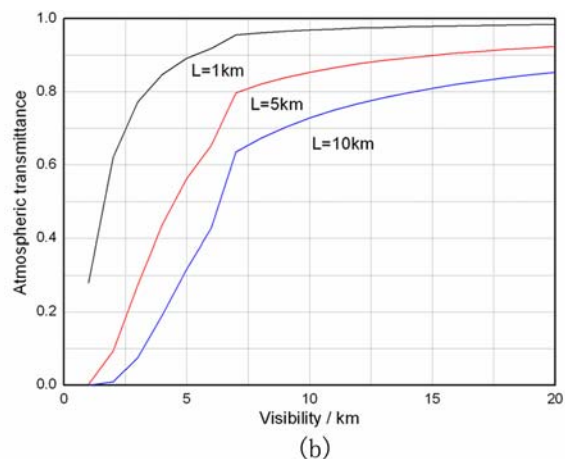


图 2 $3.8 \mu\text{m}$ 激光的大气透过率与传输距离及大气能见度的关系曲线

利用 Nabouls 给出的大气透过率计算模型, 绘出了能见度、透过率以及传输距离之间的关系曲线 (见图 2)。可以看出, 随着传输距离的不断增大, 大气透过率逐渐减小; 而且能见度越高, 大气透过率随传输距离的变化越不明显; 能见度越低, 大气透过率受传输距离的影响越大; 当能见度大于 15 km 时, 大气透过率与传输距离之间基本呈线性递减关系; 当能见度小于 5 km 时, 大气透过率与传输距离之间基本呈指数递减关系。考虑到受红外导弹的告警、跟踪距离的影响, 我们对其实施中波激光定向干扰的距离一般为 5 ~ 6 km。在此距离范围内, 中波激光定向干扰对大气能见度的要求其实并不高。只有当能见度极低 (小于 2 km)、大气透过率约为 0.1 时, 才会大大制约对导引头的定向干扰效果。

图 3 所示为能见度为 10 km、干扰距离为 5 km 时, 干扰激光的总发散角随大气湍流强度变化的影响曲线。可以看出, 随着湍流强度的不断增加, 中波激光经过大气传输到达导引头的总发散角不断增大。当湍流强度小于 10^{-13} 时, 总发散角的变化比较平缓; 当湍流强度大于 10^{-13} 时, 总发散角迅速增大。

图 4 所示为湍流强度不同、能见度为 10 km 时, 中波激光对距离 3 km 和 5 km 处的红外成像导引头的定向干扰仿真数据。总体说来, 干扰激光功率密度随着湍流强度的增大而变小。当湍



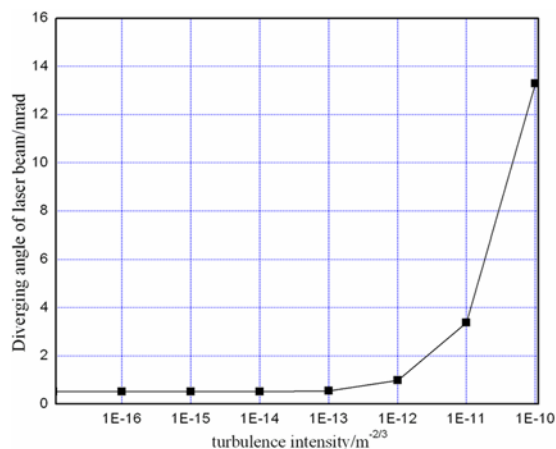


图 3 干扰激光的总发散角与大气湍流强度的关系曲线

流强度小于 10^{-14} 时, 湍流基本上对激光功率密度没有影响。当强度达到 10^{-13} 时, 导引头所接收到的激光功率密度会随着强度的增加而迅速降低。这是因为由湍流造成干扰激光的总发散角增大, 使干扰激光质量下降、光斑变大, 进而导致导引头所接收到的干扰激光功率密度下降。当湍流强度超过 10^{-10} 时, 中波激光定向干扰几乎失去作用。

图 5 所示为在弱湍流以及能见度为 2 km、5 km 和 15 km 的条件下, $3.8 \mu\text{m}$ 激光到达不同干扰距离处的红外成像导引头时的干扰激光功率密度仿真结果。参考本文 $3.8 \mu\text{m}$ 激光对 InSb 探测器的干扰实验结果, 从图 5 中可以看出, 当能见度为 15 km 时, 功率为 1.0 W、束散角为 0.5 mrad 的中波激光对导引头的干扰距离约为 2.9 km; 当能见度为 5 km 时, 干扰距离约为 2.6 km; 当能见度为 2 km 时, 干扰距离为 1.9 km。导引头所接收到的激光功率密度会随干扰距离的增大而下降, 而且大气能见度越低, 下降的趋势越明显。可以看出, 当干扰距离较小时, 大气能见度对中波激光的定向干扰距离影响有限。此时增加干扰距离的有效途径是提高干扰激光的功率, 或者减小干扰激光的光束发散角, 提高远场光束质量。

3 结束语

从大气传输对中波激光的衰减、导引头光学系统对中波激光的光学增益、干扰激光光斑

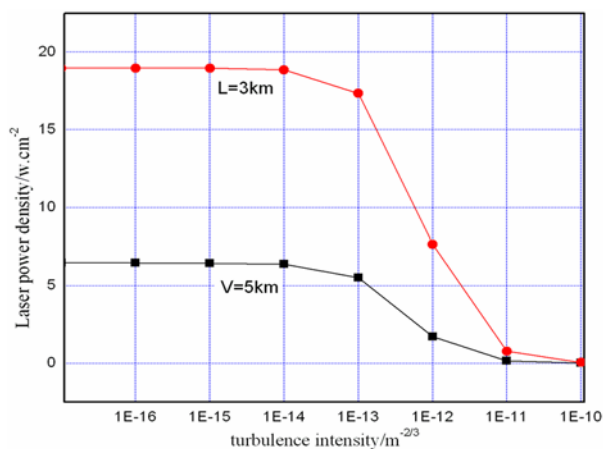
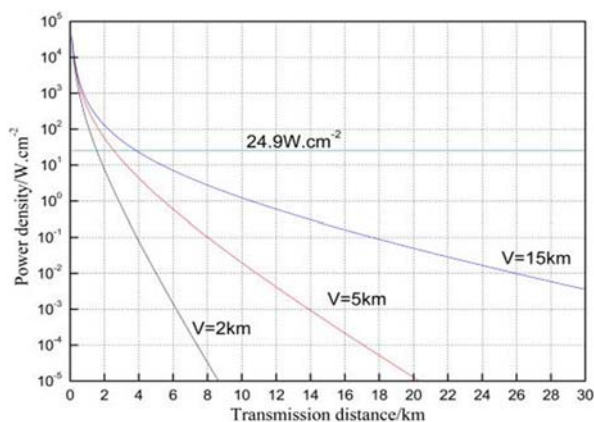


图 4 激光到靶功率密度与大气湍流强度的关系曲线

图 5 不同干扰距离处的 $3.8 \mu\text{m}$ 激光到靶功率密度

随干扰距离的变化等因素出发, 研究了中波激光的大气传输透过率与大气能见度及传输距离的关系, 分析了大气湍流强度对激光传输总发散角的影响。得到了 $3.8 \mu\text{m}$ 激光对红外成像导引头的定向干扰模型, 给出了激光到靶功率密度、大气能见度、大气湍流强度以及干扰距离之间的关系曲线, 并对中波激光对红外成像导引头的干扰效果进行了评估。本文获得的仿真数据及结论对于红外定向干扰装备的论证和研制具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 徐大为. 定向红外干扰技术的发展分析 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S2): 695-698.
- [2] 范晋祥, 李亮, 李文军. 定向红外对抗系统与技术的发展 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 789-794.

(下转第 47 页)