

## 中波红外激光器远距离干扰红外探测器的外场实验研究

陈兆兵,曹立华,王 兵,庄昕宇,陈 宁,郭如海

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,  
吉林 长春 130033)

**摘 要:** 针对当前中波红外光电干扰研究中无等比例远距离实验验证的问题,以峰值功率为 10 W 波长为 5.4  $\mu\text{m}$  的中波红外激光器对某型中波红外相机进行了距离为 15 km 的光电干扰实验。实验中选择不同条件进行了多组实验,得到了各条件下的激光干扰图像。通过对图像的分析发现发散角为 15 mrad 的中波激光器在 15 km 的距离上对焦距为 384 mm 的中波红外相机系统在能见度为 0.452 的中等气象条件下进行干扰时,当输出功率为 5.6 W 时可使相机无法成像,无法提取目标,此时的功率密度为 0.064  $\text{mW}/\text{m}^2$ 。实验验证了以当前国内的成熟技术完全可以实现对导弹导引头在 15 km 以上的中波红外激光干扰。实验数据可以为后续的精确定大气透过率模型及中波红外光电对抗损伤评估模型研究中参数的反演与确定提供支持。

**关键词:** 远距离激光干扰; 中波红外; 光电对抗; 外场实验

**中图分类号:** TN24    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)07-1700-06

## Outfield experiment research of mid-wave infrared detecting system by long distance mid-infrared laser

Chen Zhaobing, Cao Lihua, Wang Bing, Zhuang Xinyu, Chen Ning, Guo Ruhai

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** An optic-electronic disturbance experiment was done since there is no same proportion long distance experiment validation in the mid-infrared optic-electronic disturbance research currently. The laser power was 10 W, the wavelength was 5.4  $\mu\text{m}$ , the camera of mid-infrared wavelength with the disturbance distance of 15 km was disturbed by the mid-infrared laser in this experiment. Many group experiments were done under some different conditions. A lot of laser disturbance image under the conditions were gained. The laser power density could be calculated using the data. The camera would not distill aim when the laser power being 5.6 W from these images, in this condition the radiation angle of the laser was 15 mrad, the distance between the laser and camera was 15 km, the focus of the mid-infrared camera was 384 mm, the visibility was 0.452 and the power density was 0.064  $\text{mW}/\text{m}^2$ . This experiment can validate the 15 km long distance mid-infrared laser disturbance to missile camera system being coming true using now domestic mature technology. These experiment data can sustain the adding research about

收稿日期:2012-11-11; 修订日期:2012-12-15

基金项目:国防军工项目

作者简介:陈兆兵(1980-),男,助理研究员,主要从事光电探测与光电对抗技术方面的研究。Email:chenzhaobing2010@163.com

the parameter in reversing deducing and confirm in exactitude atmosphere permeation rate mode and mid-infrared optic-electronic confrontation evaluation mode.

Key words: long distance laser disturbing; mid-infrared; optic-electronic countermeasures; outfield experiment

## 0 引言

随着精确制导武器的普及, 如何对该类武器的核心部件——光电导引头实施有效的光电干扰已经成为光电对抗领域中的重要研究内容。要对该类装备的干扰效果进行准确评价需要大量的理论研究和试验分析。目前关于光电对抗武器干扰效果的研究主要集中于理论分析和内场仿真。这种偏重于理论计算方面的研究对于实际的光电对抗装备研制有一定的参考价值, 但没有经过实际的试验验证并不能准确评价干扰效果, 这对于高价值的光电对抗装备的研制是非常不利的。同时地面、车载、舰载或机载干扰装置对敌方光电探测器的激光干扰受到大气传输、大气湍流、瞄准精度、光束抖动与光束发散角大小的影响较大<sup>[1]</sup>。如何对这些影响进行有效评价是该类激光对抗武器研制过程中的关键内容。传统的理论计算与内场数字或半实物仿真能够在一定程度上建立干扰效果模型, 但这种模型中的部分参数需要经过实际的远距离激光外场干扰实验的修正才能准确体现某环境条件下各种因素对于光电探测系统的干扰影响效果。

光电干扰的实质是通过光束的作用破坏光电系统的正常工作, 在整个过程中需要经过目标的获取、跟踪、干扰、破坏及评估等几个环节。其对系统的精度、抗干扰能力要求较高。激光在大气中传输受到多方面的干扰影响, 具体包括引起激光束能量衰减的大气中的分子与气溶胶吸收与散射、引起激光光束偏转、抖动及闪烁的大气湍流、探测器自身的光学增益与抗干扰参数、激光器自身的光束波段与光束质量、一定干扰效果下的激光束能量估算等<sup>[2]</sup>。因此要准确评估光电对抗的干扰效果, 一种方法是建立针对上述各影响因素的准确模型, 另一种方法是通过实际的等比例模型进行实验验证。而第一种方法中的实验模型建立也需要准确的等比例实验进行参数反演与拟合, 因此可以认为在光电对抗研究中等比

例模型实验研究是必不可少的。

光电干扰的基本原理是通过激光与物质相互作用的形式使某些对于激光敏感的设备失去工作效能。激光与物质相互作用的微观原理目前并不完全清楚, 在激光应用领域尤其是军用激光应用领域国外均开展了大量的研究<sup>[3-5]</sup>。这些研究可以在我国该类装备的研究过程中进行借鉴, 但由于国内外的环境不同其研究结果也不能完全采用, 而是与自己的实验结论进行结合使用。由于实际的激光与物质相互作用实验尤其是远距离干扰破坏实验需要动用大量的人力物力, 因此国内在该领域的研究主要集中于理论分析和实验室内的实物或半实物仿真实验<sup>[6-9]</sup>。这些研究性仿真实验能够得到一定的数据, 但与实际的光电干扰还有较大的区别, 如在实际的干扰中激光器系统与被干扰导弹导引头或敌方光电吊舱等装置之间有几公里甚至十几公里的距离。这种实验室内仿真的方式无法模拟远距离大气的影 响, 因此此类仿真仅具有一定的理论意义。当前的大部分大气透过率模型都是按美国的环境状况确立的, 如果直接拿来用在我国的光电对抗装备研制中必然会在一定的偏差。在一定功率下是否能对光电探测器造成干扰或损伤的最好判断方法是进行等比例远距离试验, 通过对试验结果的分析得到该距离条件下的干扰损伤水平, 另外可以根据实际的干扰损伤结果反推光电干扰损伤模型, 经过试验验证的模型将比直接拿来的国外的模型或从仿真实验中得到的模型要准确的多, 应用这种模型便可以进行相关的光电对抗研究。然而这种实验需要较多的资源和较高的投入, 所以在一般的光电对抗研究中很难进行操作。当前的研究中也有一些采用远场条件的光电对抗干扰实验, 但在中波红外光电干扰损伤研究中尚无距离达到 15 km 的远场实验。

文中基于此背景针对某型中波红外探测系统进行了距离为 15 km 的地面干扰实验。在实验中以某中波红外激光器为激光源, 通过调节激光器的电流

改变激光器的输出功率。同时为了保护红外探测器不被永久损坏,在实验过程中在探测器镜头前方设置衰减片。为了准确评价干扰效果对衰减片的数量进行合适的增减。另外实验在两天中进行,从而验证在不同的大气条件下的干扰效果。大气透过率通过利用气象局提供的数据代入 MODTRAN 模型进行计算的方式进行估算。从实验效果可以看出:在能见度为 0.452 的中等气象条件下且在兼顾一定的激光束发散角的情况下,中波红外的出光功率达到 5.6 W 及以上时,可实现对中波红外探测器的有效干扰。

### 1 实验原理、装置及步骤

该实验之所以选择 15 km 作为干扰距离是因为传统的防御型光电干扰主要针对飞机、无人机、导弹进行实施,其上所载的精确制导武器的光电探测部分多在 15 km 左右开始作用,尤其是具有较高威胁的导弹,由于其体积较小,采用红外告警等被动探测手段大多仅能够在 20 km 左右发现此类小型目标,同时当导弹距离较近时再采用光电干扰就会失去最佳时机<sup>[10-11]</sup>。因此在十几千米远处对这些光电探测系统进行干扰是一个较为可行的距离。文中的研究背景便是针对导弹中的中波导引头进行光电干扰,因此选择此距离进行等比例实验研究。实验采用远距离直接干扰的方式进行,将中波激光器与中波红外探测器分别架设在距离为 15 km 的通视位置上,调节激光器与探测器光路方向,使两者大体正对,然后以不同的发散角不同的功率发射干扰激光束,而探测器这边则采用不同的焦距不同的衰减片进行激光探测。激光发射与接收系统距离地面的高度在 30 m 左右。在整个过程中记录探测器探测到原始图像,对图像进行分析得到该距离上的干扰效果。实验原理如图 1 所示。在该实验中通过半反半透平面镜对激

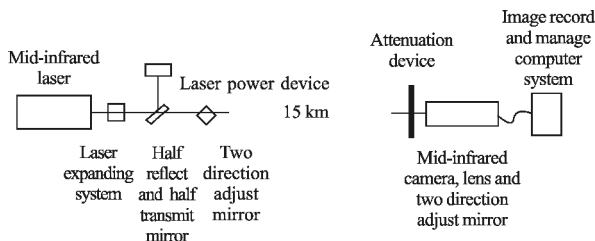


图 1 远距离干扰中波红外探测器实验光路示意图

Fig.1 Experiment light sketch of mid-infrared detection device on long distance disturbance

激光器输出激光的能量进行实时监测,从而提高实验中输出激光功率的监测准确性。

下面对实验的具体装置参数及实验步骤进行说明。

(1) 激光器参数:波长 5.4 μm,连续输出,峰值功率 10 W,不稳定性 ≤5%,出光口径 20 mm,出光发散角 15 mrad;

(2) 相机镜头参数:镜头长焦距为 384 mm,短焦距为 153 mm,口径为 220 mm,单片衰减片衰减率为 70%,相机增益为 0;

(3) 中波红外相机参数:像元数为 320×256;等效噪声温差:额定积分时间下单点校正后 ≤25 mK (环境温度 25 ℃),非均匀性 ≤5‰,平均功耗 ≤30 W;

(4) 其他装置:激光功率计量程 10W,精度 0.01W。

图 2 为中波红外相机及镜头工控机系统,图 3 为激光器及扩束光路系统。图 2 中镜头与相机架设在固定位置处,手动调整镜头的方位与俯仰角度,通过实时观察相机中激光器所在建筑物的像的位置确定是否与激光发射端粗略对准。图 3 中中波激光器稳定安置在操作平台上,为方便调整光路在激光器光束出口端架设反射镜,通过调节反射镜的方位与俯仰角度实现光束位置的调整。图 3 中为采用激光扩束系统的安装图。



图 2 中波红外相机及光学镜头

Fig.2 Mid-infrared camera and optics lens



图 3 激光器及光路控制系统

Fig.3 Laser and light control system

为简化实验过程,在实验中采用模型计算的方式得到当时的大气透过率值,而模型中所需的当地的温度、湿度等参数由本地的气象局提供。

激光器端分别进行不扩束的 15 mrad 激光发射和扩束后的 4.5 mrad 激光发射。激光器端与探测器端直线对准后保持位置不变。激光功率从 0.1 W 逐渐增加到 6 W。在实验过程中采用实时监测的方式对激光器输出功率进行监测。在这个过程中中波红外探测器的镜头分别进行短长焦转换,并记录干扰图像。在干扰之初将十片滤光片重叠在一起置于相机镜头前方,根据干扰图像的效果进行逐步减少。最后根据激光输出功率值及散射角、大气透过率计算出 15 km 远处目标上的功率密度,再根据滤光片的层数计算出实际的功率密度,然后与相机的干扰图像一一对应。最终通过分析得到中小功率中波红外波段远场激光干扰效果。

## 2 实验结果及分析

为了对比干扰效果,将两天的试验值进行比较,设定同样的输出功率、积分时间及衰减片数量。在扩束中因为没有合适的中波扩束实验光学系统采用的是适用于长波的扩束镜,其透过率较低而其自身的吸收温升则比较强烈,因此在两天的实验中仅在低功率条件下进行了长焦距干扰实验。文中主要探讨的是扩束前的大小焦距条件下的干扰实验。扩束前采用的是 15 mrad 发散角,而扩束后采用是 2.5 mrad 发散角。距离激光器 15 km 后其光束面积分别如公式(1)和公式(2)所示。

$$S_1 = \pi r_1^2 = \pi (L \tan(\alpha_1))^2 = 3.14 (15\ 000 \times \tan(7.5\ \text{mrad}))^2 = 39\ 332.8\ \text{m}^2 \quad (1)$$

$$S_2 = \pi r_2^2 = \pi (L \tan(\alpha_2))^2 = 3.14 (15\ 000 \times \tan(1.25\ \text{mrad}))^2 = 1\ 092.5\ \text{m}^2 \quad (2)$$

式中: $r$ 为光束光斑的半径; $L$ 为光斑与激光器的直线距离; $\alpha$ 为激光器的半发散角。

扩束前的激光束发散角为扩束后激光束发散角的 6 倍,此处将第一天中的大气条件定义为大气条件 1,第二天的大气条件定义为大气条件 2。其中,图 4 为扩束前大气条件 1 小焦距条件下的干扰图像;图 5 为扩束前大气条件 1 大焦距条件下的干扰图像;图 6 为扩束前大气条件 2 小焦距条件下的干扰图像;图 7 为扩束前大气条件 2 大焦距条件下的干扰图像。当激光器的输出功率与经过扩束后的出射功率值比值为 5,因此扩束镜的效率 (20%) 较低,在实验中仅进行了长焦距两种大气透过率条件

下的激光干扰实验,干扰图像中图 8 为扩束后大气透过率 1 长焦距条件下的干扰图像,图 9 为扩束后大气透过率 2 长焦距条件下的干扰图像。



图 4 扩束前大气条件 1 小焦距干扰图像

Fig.4 Disturbance image before expanding with atmosphere 1 and short focus



图 5 为扩束前大气条件 1 大焦距干扰图像

Fig.5 Disturbance image before expanding with atmosphere 1 and long focus



图 6 为扩束前大气条件 2 小焦距干扰图像

Fig.6 Disturbance image before expanding with atmosphere 2 and short focus



图 7 为扩束前大气条件 2 大焦距干扰图像

Fig.7 Disturbance image before expanding with atmosphere 2 and long focus



图 8 扩束后大气条件 1 长焦距干扰图像

Fig.8 Disturbance image after expanding with atmosphere 1 and long focus



图 9 扩束后大气条件 2 长焦距条件下的干扰图像

Fig.9 Disturbance image after expanding with atmosphere 2 and long focus

实验中短焦距为 153 mm,长焦距为 258 mm。扩束前采集图像时的出射激光束功率为 5.6 W,中波红外相机处镜头前的滤光片层数为 3 层,相机的积分时间为 4 ms。扩束后出射激光束功率为 0.1 W,中波红外相机镜头前的滤光片层数为 5 层,相机的积分时间为 4 ms。要计算两天实验中大气透过率需要利用当地气象局提供的局部地区能见度、温度、湿度、压强及气溶胶消光高度分布廓线等参数,利用大气辐射传输软件 MODTRAN 计算目标与中波红外相机之间的大气透过率。由于受到上述测量准确度及模型准确度的影响,计算结果的不确定度在 15%~20%之间。利用上述软件得到大气条件 1、2 的透过率分别为 0.452 和 0.421。入射到中波相机镜头处的功率密度  $I$  可用公式(3)计算。

$$I = \frac{P\tau}{S} \quad (3)$$

式中: $P$  为激光器最后一块调整镜的出射激光总功率,为中波激光透过率; $S$  为 15 km 后激光光束的光斑面积。代入公式(1)、(2)及上述值可以得到各种情况下的功率密度值,如表 1 所示,由于扩束后的输入功率远小于扩束前的输入功率,因此扩束后的功率

密度小于扩束前的功率密度。

表 1 各条件下的功率密度值

Conditions	Atmosphere 1		Atmosphere 2	
	Before expanding	After expanding	Before expanding	After expanding
Power density /mW·m <sup>-2</sup>	0.064	0.042	0.060	0.038
Power after the strain light piece /mW·m <sup>-2</sup>	0.022	0.007 1	0.020	0.006 4

从计算的功率密度看,扩束前大气条件 1 下的功率密度值最高,而扩束后大气条件 2 下的功率密度值最低。从采集的实际图像上看扩束前的激光光斑能够将放置激光源的宽度为 120 m 左右的高楼整体覆盖,而扩束后由于出射功率较低且镜头前的滤光片层数较多,其激光束即使在长焦情况下其干扰光斑也无法覆盖整个大楼,由于实验中扩束镜头的透过率过低无法实现进一步加大功率的试验,因此文中将对扩束前的光电干扰效果进行重点讨论。

从大气透过率的计算结果上看两天的大气透过率值相差不大,但从实际的实验干扰图像上(图 4 与图 6 比较,图 5 与图 7 比较)看,大气条件 1 下的干扰效果要明显好于大气条件 2 下的效果。可以认为在 0.022 mW/m<sup>2</sup> 的功率密度附近为该中波红外相机的敏感值区域,当功率密度在该区域中稍微大些时其干扰效果会较好,而当在该区域中稍微小些时其干扰效果则会明显下降,因此要实现在该中等大气能见度下对此中波红外相机及光学镜头条件下的有效干扰需要的功率密度值为 0.020 mW/m<sup>2</sup> 以上。另外从图 4 与图 5 的比较以及图 6 与图 7 的比较中可以发现,图 5 和图 7 的干扰效果要明显好于图 4 与图 6,可以认为中波红外相机的镜头为长焦时对其干扰效果要好。这与理论上是一致的,当焦距变大时其视场变小,同样的激光光束造成的影响会更大。从图 5 的干扰图像可以看出该干扰条件下整个相机靶面均不能成清晰的像,也就无法有效提取目标点,可以认为这种干扰对于中波红外相机是有效的。这是在大气条件 1 长焦距激光器输出功率为 5.6 W 条件下的干扰效果。从大气条件 1 的计算值可以看出这

种大气条件为中等透过率条件,因此在实际的光电干扰中对气象条件的要求并不苛刻。长焦距条件在实际中几乎是普遍采用的,因为无论是导弹的红外导引头还是飞机吊舱的红外探测器,为提高探测距离大多尽可能地增大焦距、减小视场,因此实际中的敌方导引头光学系统的视场比试验中相机的视场要小得多,所以可以认为这种功率完全可以在 15 km 远处对中波红外导引头的有效干扰。而输出功率为 5.6 W 的中波红外相机也不难研制,当前国内在工程上应用较为成熟的中波红外连续激光器的输出平均功率完全能达到 10 W 以上,因此可以认为 15 km 远处对中波红外探测器进行光电干扰是完全可以实现并且在激光器功率上还有较大储备。另外从上述干扰图像上可以看到有些图像底部两角处有白色的亮条,这是由于位于中波红外相机镜头前的滤光片固定不稳形成光晕造成的。在实验中发现激光束光斑的闪烁非常剧烈,光点较亮时与较弱时的效果差别非常大,文中的图像均采集自较亮时,如何评价较暗时的干扰效果需要在后续的研究中进行分析。另外发现中波红外相机的镜头是否完全与干扰激光束对正,即存在微小偏差时其干扰效果无明显影响,分析认为当镜头稍偏且属于视场内干扰的情况下,由于进入的激光能量与正对时差别不大,激光干扰效果差别也不大。当两者偏离角度较大时(视场外干扰情况)干扰效果便会大打折扣。因此要实现有效干扰需要激光束尽可能地正对导引头。

从整个实验的结果可以看出采用总功率为 10 W 的中波红外激光器完全能够在 15 km 距离上对中波红外相机造成有效干扰。由于采用 MODTRAN 大气透过率计算软件得到的大气透过率数值误差较大,因此入射至中波红外相机镜头处的功率密度值仅具有参考价值。文中实验完全验证了远距离中波红外干扰的可行性,为光电对抗工程项目中中波红外干扰系统的研制提供有效参考。在下一步的研究中可以在更多大气透过率条件下、不同功率水平、不同焦距、不同干扰距离条件下进行试验,利用试验结果反推修正当前的大气透过率模型以及中波红外干扰模型,为各种作战背景下的光电对抗装备的研制提供准确的理论计算模型,建立一套准确的适用于我国环境条件下的中波红外干扰光电对抗模型算法。

### 3 结 论

文中通过实际的 15 km 远处中波红外激光干扰实验验证了该距离条件下对于中波红外导引头或探测器的有效干扰可能性,并通过实际的干扰图像分析出了该条件下对此型号的中波红外相机实现有效干扰的激光功率密度临界值。通过分析认为当前国内研制的中波红外激光器输出功率完全有能力实现对 15 km 距离处中波红外目标的致眩干扰,为该波段下的光电对抗装备的研制提供了实际的参考,在工程应用中完全可以根据文中的实验结果与结论进行参数选择与确定。文中更为深远的意义在于利用这种实验手段进行更进一步的实验得到更多条件下的干扰数据,通过对数据的反演分析可以建立更适合我国环境的精度更高的大气透过率计算模型与干扰效果评估模型。

### 参考文献:

- [1] Wang Shiyong, Fu Youyu, Guo Jin. Evaluation of high energy laser effecting on remote distance photoelectron sensor system [J]. *Optical Technique*, 2002, 28 (1): 28-30. (in Chinese)  
王世勇, 付有余, 郭劲. 远场光电探测器系统受激光干扰与损伤效果估计[J]. *光学技术*, 2002, 28(1): 28-30.
- [2] Li Haiyan, Hu Yunan, Liu Xudong. Energy estimation method for laser disturbing photoelectrical detectors in remote distance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1038-1043. (in Chinese)  
李海燕, 胡云安, 刘旭东. 激光干扰远场光电探测器能量估算方法[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(6): 1038-1043.
- [3] Jiang Tian, Zheng Xin, Cheng Xiang'ai, et al. Effects of thermally generated carrier and temperature dependence mobility in InSb photoconductive detector under CW 10.6  $\mu\text{m}$  laser irradiation [J]. *Semicond Sci Technol*, 2012, 27: 015-020.
- [4] Jiang Tian, Cheng Xiang'ai, Zheng Xin, et al. The over-saturation phenomenon of a  $\text{Hg}_{0.46}\text{Cd}_{0.54}\text{Te}$  photovoltaic detector irradiated by a CW laser[J]. *Semicond Sci Technol*, 2011, 26: 115004.
- [5] Cai H, Cheng Z H, Zhu H H, et al. Fracture mechanisms of  $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$  induced by pulsed TEA-CO<sub>2</sub> laser [J]. *Applied Surface Science*, 2005, 252: 1685-1692.

(下转第 1753 页)

- Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [6] Li Lin. New Method of Modern Optical Design[M]. Beijing: Press of Beijing Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [7] Zhang Liang, Liu Hongxia. Optical system design of long wave infrared zoom lens [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1279-1281. (in Chinese)
- [8] Cai Wei, Zhang Ying, Zhang Xin, et al. New method for all movable zoom lens design [J]. Acta OPTica Sinica, 2012, 32(3): 0322008-1-0322008-5. (in Chinese)
- [9] Li Lin, Wang Yongtian, Zhang Liqin, et al. An approach on the calculation of Gaussian parameters of zoom lenses [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(4): 424-427. (in Chinese)
- [10] Zhang Liqin, Wang Yongtian, Li Lin. Method of determining gaussian parameters for zoom systems with multiple moving lens groups[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(5): 572-576. (in Chinese)
- [11] Wang Qi, Wu Qiang, Huang Huijie, et al. Gaussian optics of zoom lens with all lens elements movable[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(6): 830-834. (in Chinese)
- [12] Fang Yichin, Lin Hanching. Optical design and optimization of zoom optics with diffractive optical element [C]//SPIE, 2009, 7280F: 1-15.
- [13] Stato H, Yamaguchi S. Optical design of digital camera zoom lenses employing plastic lens elements[C]//SPIE, 2006, 61960D: 1-9.

.....

(上接第 1705 页)

- [6] Buford J A, Paone T Jr. Using hardware-in-the-loop simulation to provide low cost testing of TMD IR missile systems[C]//SPIE, 3368: 432-440
- [7] Li Haiyan, Hu Yun'an, Liu Xudong. Energy estimation method for laser disturbing photoelectrical detectors in remote distance [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(6): 1038-1043. (in Chinese)  
李海燕, 胡云安, 刘旭东. 激光干扰远场光电探测器能量估算方法[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1038-1043.
- [8] Chu Xuelian, Qiu Zhen'an, Zhang Yuansheng, et al. Experimental research of infrared detecting system disturbed by mid-wave infrared laser [J]. Infrared Technology, 2011, 33(8): 440-442, 449. (in Chinese)  
初学莲, 仇振安, 张元生, 等. 中红外激光对红外探测系统的干扰试验研究[J]. 红外技术, 2011, 33(8): 440-442, 449.
- [9] Zeng Xianwei, Fang Yangwang, Wang Hongqiang, et al. Technology of Radar/IR dual-mode seeker against infrared decoy jamming [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(6): 1054-1059. (in Chinese)  
曾宪伟, 方洋旺, 王洪强, 等. 雷达/红外双模导引头抗红外诱饵干扰[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 1054-1059.
- [10] Wang Siwen, Guo Lihong, Zhao Shuai, et al. Experiments of high-power CO<sub>2</sub> laser disturbance to far-field HgCdTe detectors [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 798-802. (in Chinese)  
王思雯, 郭立红, 赵帅, 等. 高功率 CO<sub>2</sub> 激光器对远场 HgCdTe 探测器的干扰实验[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 798-802.
- [11] Shen Tao, Song Jianshe. Study on the simulation of smoke screen counterworks laser guided weapon [J]. J System Simulation, 2008, 20(1): 210-214.