

激光主动干扰系统作用距离的估算方法

李海燕

(海军航空工程学院控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘要:为了准确计算激光主动干扰系统的有效作用距离,综合考虑干扰过程中影响系统性能的各种因素,建立了作用距离估算模型,总结了作用距离估算的一般方法。以 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光辐照远场某型光电探测器为例,分析了激光在大气中的传输效应,讨论了远场探测器表面光斑尺寸的计算方法及大气湍流的影响,数值模拟了作用距离与激光发射功率和大气环境之间的关系。结果表明,该方法可简易估计激光干扰系统的作用距离,为外场测试提供参照范围,为测试评估激光主动干扰系统作用距离提供了有益参考。

关键词:光学测量;作用距离;激光干扰;估算

中图分类号:TN972 **文献标识码:**A

Operating range estimation for laser active jamming system

LI Hai-yan

(Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to calculate the effective operating range of a laser jammer, many factors which can influence the system performance must be considered. The operating range calculating model are built up and the current method for estimating operating range is summarized. Taking $1.06\ \mu\text{m}$ laser photoelectrical detector for instance, this paper analyzes laser propagation in atmosphere, discusses the estimating method for sparkle radius and atmosphere turbulence effects. The relationship between operating range and laser power and visible range is simulated. The results proved that this method can estimate the operating range of laser jamming system easily. It can be used to estimate the distance scope for field test, and also can be used to evaluate the performance of a laser jamming system under test.

Key words: optical measurement; operating range; laser disturbance; estimation

1 引言

激光辐照远场光电探测器(如光电制导导弹的导引头、探测卫星等)时,会使其瞬间遭到严重的破坏或使探测系统处于失灵状态^[1],达到拦截和防御的目的,故利用激光进行压制式干扰是一种对抗光电精确制导武器的极为有效的方法^[2]。

激光主动干扰系统要完成对卫星、导弹或敌方光电探测设备的跟踪、瞄准,最终对目标的光电探测器实施有效干扰^[3]。在实际应用当中,激光能否实现这种功能取决于诸如激光器本身的特性、目标特性、环境条件、跟瞄系统精度、系统作用距离等一系列因素,其中作用距离是激光干扰系统非常重要的

性能指标^[4]。很多学者对激光主动成像系统、激光测距系统、激光搜索跟踪系统和激光侦察系统的作用距离做了多方面的研究^[5-9],但对于激光主动干扰系统作用距离的研究鲜有报道。

研究分析满足激光主动干扰系统使用要求的作用距离,必须针对特定的干扰目标、考虑大气环境的影响,分析光电系统的光学增益,比较探测器表面处

基金项目:国家“863”课题基金项目(No. 2006AA703218D);海军航空工程学院青年基金项目(No. HYQN200805, HYQN201008)资助。

作者简介:李海燕(1979-),女,讲师,硕士,主要从事光电对抗技术,高能激光技术及应用的研究。E-mail: haiyanli0609@sohu.com

收稿日期:2010-11-17; **修订日期:**2010-12-28

接收的激光能量密度与探测器激光损伤阈值的关系,进而确定是否实现了有效干扰。本文在综合分析了各种影响因素的基础上,对激光主动干扰系统的作用距离估算的方法进行了深入研究,以1.06 μm 激光干扰远场某型光电探测器为例,估算出不同大气情况、不同激光发射能量所对应的干扰系统作用距离。

2 激光干扰系统作用距离

对于不同的探测系统,其作用距离的定义不尽相同。即使是对同一种系统,针对不同的作用目标,作用距离计算模型也有差别^[3,5-9]。本文讨论的激光干扰系统作用距离是指:以目标光电探测器的激光损伤阈值为衡量标准,使得到达光电探测器表面的激光能量密度大于探测器的损伤阈值的最远距离,按下式进行分析:

$$p_r = \frac{P_0 \tau_1 \tau_2 \tau_3 \tau_4 \cos \vartheta}{\pi (R\theta + D_0/2 + \rho)^2} \left(\frac{D}{\Phi} \right) \quad (1)$$

式中, p_r 为光电探测器表面接收到的激光能量密度; P_0 为激光发射峰值功率; τ_1 为激光发射光学系统的透过率; τ_2 为波长为 λ 的激光大气透过率; τ_3 为目标光学系统透过率; τ_4 为目标光学系统的光学效率; ϑ 为探测器表面法线与激光轴的夹角; D 为目标光学系统光学镜头直径; Φ 为探测器光敏元直径; R 为激光发射天线至目标探测器的距离; θ 为光束发散角; D_0 为激光发射望远镜口径; ρ 为由湍流引起的光束漂移与扩展半径。

由式(1)得:

$$R = \frac{\left(\frac{D}{\Phi} \right) \sqrt{\frac{P_0 \tau_1 \tau_2 \tau_3 \tau_4 \cos \vartheta}{\pi p_r}} - \frac{D_0}{2} - \rho}{\theta} \quad (2)$$

当 p_r 等于探测器的激光损伤阈值 p_e 时,对应的传输距离 R 即为激光干扰系统的作用距离 R_m 。由式(2)可知, R_m 受到激光器自身特性、跟瞄系统特性、大气传输特性、目标特性等多方面因素的影响,从而分析激光主动干扰系统的作用距离要综合考虑各方面的影响因素,下文将逐一进行分析。

2.1 激光器自身特性

(1)功率:激光输出功率的大小直接影响着系统的作用距离,要根据使用要求选择激光器的种类和工作方式,如固体激光器易于获得大能量输出,适于进行调 Q 以获得大功率脉冲输出;气体激光器易于获得衍射极限的高斯光束,方向性和单色性好。连续式激光可长时间持续辐照探测器,但功率较低,而脉冲激光具有作用时间短但峰值功率高的特

点^[10]。

(2)波长:波长不同的激光大气透过率不同,经过大气衰减的能量也不同,而且不同波长激光器对同一光电探测器的损伤阈值也是不同的。在激光器波长的选择上,应在考虑到光电探测器光谱响应范围的基础上,尽量选择波长位于大气窗口内的激光。

(3)光束质量:激光光束质量影响着远场光斑的大小,进而影响到达探测器表面的功率密度。光学元件不稳定造成的光束轴漂移或抖动,光束强度分布、湍流都会对光束质量产生影响^[3]。

(4)光学效率:为提高激光发射系统的光学效率,进而提高作用距离,应尽量减少激光定向发射系统的级数和片数^[3]。

2.2 跟瞄系统特性

跟瞄精度是跟瞄系统的重要性能参数。一般而言,激光发射功率一定时,跟踪瞄准精度越高,作用距离越远,目前激光跟踪望远镜瞄准控制系统的光束定向器静态瞄准精度优于 20 μrad。由于光电探测器距离较远,视场一般都较小,所以在激光对抗目标时,应使光斑保持在同一个瞄准点上,不受目标运动的影响。增加激光在光电探测上的驻留时间,更有效地实施干扰。

2.3 大气传输

(1)激光大气透过率:激光的传输特性与多种因素有关,其中包括温度、气压、水汽含量、能见度、气溶胶类型、路径长度及仰角、高度等。大气对激光传输的影响因素主要包括大气分子和气溶胶的吸收与散射、大气湍流等。前者引起激光能量的衰减,作用距离下降;后者引起激光束的偏转、抖动,强度起伏(闪烁)等效应,影响激光的作用效果和精度^[11]。

(2)远场光斑:光斑的大小取决于激光器束散角、激光发射望远镜和大气光学效应。理论上讲,即使不考虑大气扩展的影响,远场光斑大小会受到与衍射有关的发射孔径、焦距、波长、光束质量的制约。

2.4 目标特性

(1)损伤阈值:目前光电精确制导武器所采用的光电探测器主要为 HgCdTe(光导型、光伏型)红外探测器或硅 CCD 可见光探测器。激光对光电探测器的破坏效应可以分为软破坏和硬破坏两种形式。软破坏是指光电材料或器件的功能性退化或暂时失效,而硬破坏则使被破坏器件无信号输出或者出现结构的破坏^[12]。不同光电探测器的激光损伤阈值差异较大,即使是同一种光电探测器在不同波长激光的辐照下,损伤阈值也各不相同。

(2) 光学系统: 光电探测器前方的光学系统形式、结构、光学增益、光学参数等。

(3) 运动特性: 光电制导武器目标的种类, 运动特性参数、几何参数和数量。

3 计算实例

以 $1.06 \mu\text{m}$ 连续激光辐照某红外成像导引头的光学系统, 造成光电探测器的软损伤为例来分析激光干扰系统作用距离。激光发射望远镜口径 50 cm , 透过率 80% 。目标光学系统的主要性能参数如下: 工作波段 $1 \sim 3 \mu\text{m}$, 光学镜头直径 0.1 m , 探测器光敏元直径 2 mm , 饱和阈值为 10 W/cm^2 , 光学系统透过率 60% , 光学效率 0.44 , 瞄准跟踪系统的精度为 $20 \mu\text{rad}$ 。

3.1 $1.06 \mu\text{m}$ 激光在大气中的传输

当激光通过大气介质时, 一部分光辐射能量将被大气吸收, 转变为热能等其他形式的能量; 另一部分光辐射能则因被大气散射而向各个方向辐射出去, 大气吸收和散射的总效果使光强在大气介质中传输时受到衰减。假定在大气均匀的条件下, 大气透过率遵从比尔定律^[11]:

$$\begin{aligned} \tau(\lambda) &= \exp[-\alpha(\lambda) \cdot R] \exp[-\gamma(\lambda) \cdot R] \\ &= \tau_{\alpha}(\lambda) \tau_{\gamma}(\lambda) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\tau(\lambda)$ 是波长为 λ 的激光辐射传输距离 R 处的大气透射比, 取 km^{-1} 为单位; $\sigma(\lambda, l)$ 为大气消光系数, 在晴空大气条件下, 它等于大气的吸收系数 $\alpha(\lambda)$ 与大气散射系数 $\gamma(\lambda)$ 之和; $\tau_{\alpha}(\lambda)$ 是大气吸收所产生的透射比; $\tau_{\gamma}(\lambda)$ 是大气散射所产生的透射比。

大气分子中吸收红外辐射的主要有水蒸气、 CO_2 、 O_3 吸收造成的能量衰减与激光束的波长密切相关。气溶胶是悬浮在大气中直径为 $0.001 \sim 100 \mu\text{m}$ 的液体或固体微粒体系, 其分布随高度、纬度和季节变化而变化, 且一般情况下随着距离地面高度的增加而减少。在对流层内, 气溶胶散射是 $1.06 \mu\text{m}$ 激光在大气中传输发生衰减的主要原因。

$1.06 \mu\text{m}$ 激光气溶胶的散射估计, 通常使用下面的依据能见度的经验公式来计算气溶胶的衰减系数 $\gamma(\lambda)$:

$$\gamma(\lambda) = \frac{3.912}{V} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^q \quad (4)$$

式中, V 为能见度; λ 为波长; q 为经验常数, 其取值与能见度的关系如下^[13]:

$$q = \begin{cases} 1.6 & (V > 80 \text{ km 时}) \\ 1.3 & (\text{中等能见度}) \\ 0.16V + 0.34 & (1 \text{ km} < V < 6 \text{ km}) \\ V - 0.5 & (0.5 \text{ km} < V < 1 \text{ km}) \\ 0 & (V < 0.5 \text{ km}) \end{cases}$$

$1.06 \mu\text{m}$ 激光大气透过率与能见度及传输距离的关系如图 1 所示。通过编程计算, 分别得到不同情况下激光的大气透过率。由结果分析得出: 对于 $1.06 \mu\text{m}$ 激光而言, 能见度一定时, 随高度的变化, 大气透过率的变化不明显; 高度一定时, 随能见度的变大, 大气透过率明显提高; 当能见度不变时, 随着传输距离的增大, 大气透过率显著下降。

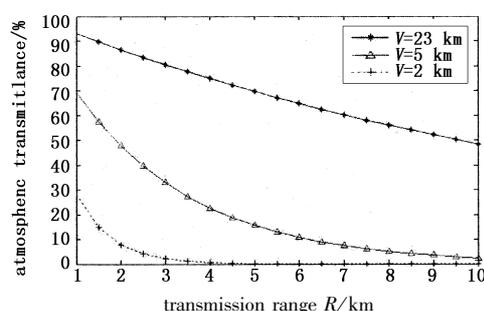


图 1 $1.06 \mu\text{m}$ 激光的大气透过率与能见度及传输距离的关系

Fig. 1 relationship between $1.06 \mu\text{m}$ laser atmosphere transmittance and visibility and transmission range

3.2 探测器表面光斑尺寸

距离激光发射点 R 处, 由于衍射引起的垂直于探测器整流罩表面的光束扩散半径, 有:

$$d' = R\theta \quad (5)$$

式中, θ 为光束发散角, 包括光束衍射发散角 θ_y 、大气抖动引起的扩展角 θ_i 和激光光源抖动 θ_d 的影响, 有:

$$\theta = [\theta_y^2 + \theta_i^2 + \theta_d^2]^{1/2} \quad (6)$$

$$\theta_y = 1.22 \frac{\lambda}{D_0} \beta \quad (7)$$

式中, λ 为入射激光波长; D_0 为激光发射望远镜口径; β 为光束质量因子。光束质量因子一般取 $1.5 \sim 3$, 此处取 $\beta = 2$ 。激光光源的抖动与其具体激光发射跟瞄设备有关, 此处假设 $\theta_d = \theta_y/2$, 大气抖动引起的扩展角 θ_i 取为 $1 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 。

大气湍流产生大气折射率的随机变化, 对于激光远距离传输的影响很大, 其中光束的偏移与扩展将引起远场光斑半径的变化。

相对于光束尺寸很大的湍流, 造成了倾斜并因此使光束偏转, 导致光束漂移。相对于光束较小的湍流造成了光束扩展。光束长时间曝光将引起扩展光束漂移的叠加。漂移对研究光束对准和光束追迹很重要, 而短时间扩展则对脉冲传播问题和高能激

光系统非常重要。长期光束扩展由 $\langle \rho_L^2 \rangle$ 表示,短期扩展由 $\langle \rho_S^2 \rangle$ 表示,而重心的漂移由 $\langle \rho_C^2 \rangle$ 表示。

长期束宽由下式定义^[11]:

$$\langle \rho_L^2 \rangle = 4R^2 / (kD_0)^2 + (D_0/2)^2 (1 - R/f)^2 + 4R^2 / (k\rho_0)^2 \quad (8)$$

式中, R 为激光束传播距离; k 为波数; D_0 为激光束发射器直径; f 为孔径上的波前曲率半径; ρ_0 为横向相干长度, 有:

$$\rho_0 = [1.46k^2 \int_0^R C_n^2(\eta) d\eta]^{-3/5} \quad (9)$$

短期扩展 $\langle \rho_S^2 \rangle$ 和重心的漂移 $\langle \rho_C^2 \rangle$ 公式为^[11]:

$$\langle \rho_S^2 \rangle = 4R^2 / (kD_0)^2 + (D_0/2)^2 (1 - R/f)^2 + 4R^2 / (k\rho_0)^2 [1 - 0.62(\rho_0/D_0)^{1/3}]^{6/5} \quad (10)$$

$$\langle \rho_C^2 \rangle = 2.97R^2 / (k^2 \rho^{5/3} D_0^{1/3}) \quad (11)$$

3.3 激光干扰系统作用距离数值计算

图2所示为激光干扰系统作用距离估算流程图。将激光发射系统和目标特性参数代入后,根据式(3)和式(4)计算大气透过率 τ_2 ,按照式(5)~式(7)计算远场光斑大小,并根据式(8)~式(11)计算大气湍流的影响,将结果加入到光束扩散半径中,最后由公式(2)估算出不同激光能量对应的激光干扰系统作用距离如图3所示。图3中三条曲线分别对应大气能见度为2 km, 5 km, 23 km。从图中可以看出,随着激光能量的增加,系统作用距离增大;随着能见度的减小,系统作用距离减小。表1列出详细的计算数据。图4为考虑了大气湍流的影响后系统的作用距离,与图3相比可以看出,湍流大大减小了系统的作用距离,尤其是当激光能量较低时,系统作用距离降低50%以上。

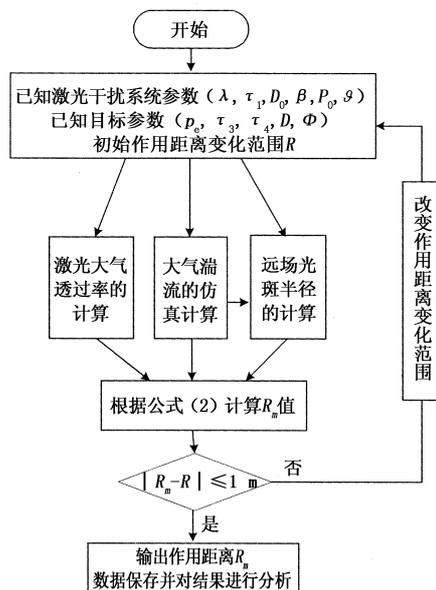


图2 作用距离估算流程图

Fig. 2 operating range estimate flow chart

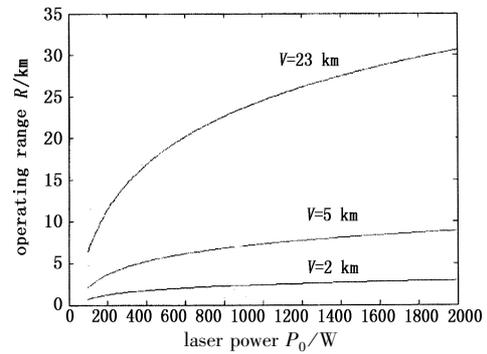


图3 系统作用距离与激光发射能量及能见度的关系

Fig. 3 relationship between operating range and laser energy and visibility

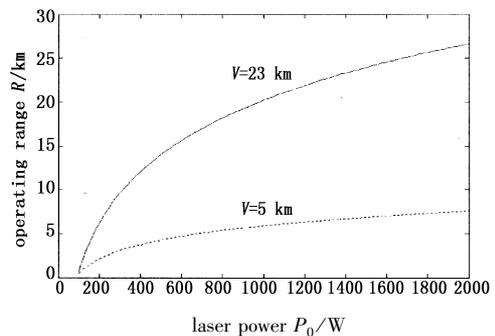


图4 考虑湍流影响后的系统作用距离

Fig. 4 system operating range influenced by turbulence

表1 激光干扰系统作用距离估算结果

Tab. 1 estimate results for operating range of laser disturbing system

| P_0/W \ V/km | 23 | 5 | 2 |
|------------------|-------|-------|------|
| 100 | 6.45 | 2.16 | 0.73 |
| 300 | 14.59 | 4.60 | 1.54 |
| 500 | 18.68 | 5.75 | 1.92 |
| 1000 | 24.52 | 7.32 | 2.43 |
| 2000 | 30.64 | 8.90 | 2.94 |
| 3000 | 34.35 | 9.84 | 3.25 |
| 5000 | 39.13 | 11.02 | 3.63 |
| 10000 | 45.82 | 12.63 | 4.13 |

从计算结果可以看出,在大气能见度较好时,增加激光能量可有效提高激光干扰系统的作用距离;但当大气条件较差时,增加激光能量对作用距离的提高作用不大,这主要是因为当能见度较小时,激光传输的大气透过率比较低,此时不适合使用激光武器对抗光电制导武器。从另一方面讲,文中估算的激光干扰系统作用距离是在一定的大气条件下,针对特定目标光电探测器,固定激光能量后所估算得出的最远距离。实际应用中,要在激光干扰系统作

用距离范围内根据多方信息,合理选择干扰时机。干扰距离不宜过远,距离过远能量衰减较大,受到湍流的影响较重;但也不宜过近,距离太近容易错失干扰的最佳时机。

4 结论

本文讨论了激光干扰系统的作用距离影响因素,给出了其估算方法。为增加作用距离 R ,显然只能从系统自身诸因素考虑,如加大激光发射功率,减小发射光学系统的损失、提高激光发射光学系统透过率,减小激光发射望远镜孔径,压缩束散角等措施。但其中有些因素又受到相应条件的限制,如激光发射功率受体积和质量的制约,激光束散角必须与跟踪精度(或瞄准精度)匹配等等,所以在设计激光干扰系统时,要分析、协调、折衷并合理选择系统的设计参数,以实现最佳干扰效能。

参考文献:

- [1] Zhong Hairong, Liu Tianhua, Lu Qisheng, et al. Review on the laser-induced damage mechanism study of photoelectric detectors[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(4): 426-427. (in Chinese)
钟海荣, 刘天华, 陆启生, 等. 激光对光电探测器的破坏机理研究综述[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(4): 426-427.
- [2] Niu Yanxiong, Zhang Peng, Yao Jianquan, et al. Investigation of laser disturbance and damage to satellite-borne photoelectric detecting system[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(7): 793-796. (in Chinese)
牛燕雄, 张鹏, 姚建铨, 等. 强激光对星载光电探测系统的干扰与破坏研究[J]. 光子学报, 2004, 33(7): 793-796.
- [3] Bian Jing, Ning Tianfu, Xu Hong. Design practice of high power laser weapon and analysis of action effect[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(6): 528-530. (in Chinese)
卞婧, 宁天夫, 许宏. 强激光武器的设计考虑和作战效果分析[J]. 激光与红外, 2008, 38(6): 528-530.
- [4] Li Haiyan, Zhu Min, Lu Hongyi. Off-axis lase disturbing CCD imaging guidance weapons[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(1): 67-68. (in Chinese)
李海燕, 朱敏, 卢洪义. 视场外激光对 CCD 成像制导武器的干扰研究[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 67-68.
- [5] Wu Lin, Zhou Zhongliang, Zhou Bing, et al. Research on the operating range of imaging type laser detecting system[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(12): 1192-1195. (in Chinese)
武琳, 周中亮, 周冰, 等. 成像型激光探测系统作用距离研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(12): 1192-1195.
- [6] Yang Yi, Lu Zukang, Hu Leili, et al. Numerical simulation of ranging performance for an airborne laser range finder[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(1): 75-78. (in Chinese)
羊毅, 陆祖康, 胡磊力, 等. 机载激光测距机测距性能的数值仿真[J]. 光学学报, 2001, 21(1): 75-78.
- [7] Pang Chunying, Zhang Tao. Operation range of laser active imaging system computation and simulation[J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(2): 70-74. (in Chinese)
庞春颖, 张涛. 激光主动成像系统探测距离的计算与仿真[J]. 电光与控制, 2008, 15(2): 70-74.
- [8] Xing Qianglin, Huang Huiming, Xiong Rensheng, et al. Detect-ability analyzing of IR FPA tracking system[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(7): 893-897. (in Chinese)
邢强林, 黄惠明, 熊仁生, 等. 红外成像探测系统作用距离分析方法研究[J]. 光子学报, 2004, 33(7): 893-897.
- [9] Wang Bingxue, Zhang Qiheng, Chen Changbin, et al. A mathematical model for operating range of a staring IR search and track system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(7): 8-12. (in Chinese)
王兵学, 张启衡, 陈昌彬, 等. 凝视型红外搜索跟踪系统的作用距离模型[J]. 光电工程, 2004, 31(7): 8-12.
- [10] Su Yi, Wan Min. High energy laser system[M]. Beijing: National Defence and Industry Press, 2004: 42-50. (in Chinese)
苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 42-50.
- [11] Sun Zailong. Infrared and photoelectrical manual-radiation in atmosphere[M]. Tian Jin: 8358 Institute in Spaceflight Technology Company, 1999: 235-265. (in Chinese)
孙再龙. 红外与光电系统手册——辐射的大气传输[M]. 天津: 航天工业总公司八三五八所, 1999: 235-265.
- [12] Zhong Hairong, Liu Tianhua, Lu Qisheng, et al. Analyse of threshold of laser damage in photoelectric detectors[J]. Laser Journal, 2001, 22(4): 1-4. (in Chinese)
钟海荣, 刘天华, 陆启生, 等. 光电探测器的激光破坏(损伤)阈值分析[J]. 激光杂志, 2001, 22(4): 1-4.
- [13] Maher A I Nabouls. Fog attenuation prediction for optical and infrared waves [J]. Opt. Eng., 2004, 43(2): 319-329.