

激光远场效能模拟计算及评估研究

高文静¹, 罗振莹², 白云塔¹, 李金亮¹

(1. 91404 部队, 河北 秦皇岛 066000; 2. 63655 部队, 新疆 乌鲁木齐 841700)

摘要:在数值仿真的基础上, 结合激光大气传输模型、典型探测器阈值数据和典型光学系统设计, 对某典型光电探测系统的激光远场效能进行了模拟计算和评估, 并对影响效能评估的因素进行了分析, 以期能为系统试验优化设计提供参考依据。研究表明: 不同的气象条件、激光模拟器参数和光学系统增益直接影响到激光远场毁伤效果的评判。

关键词:激光; 远场效能; 数值模拟; 评估

中图分类号: TN249

文献标识码: A

Simulation calculation and evaluation of laser far-forth efficiency

GAO Wen-jing¹, LUO Zhen-ying², BAI Yun-ta¹, LI Jin-liang¹

(1. 91404 Army Unit, Qinhuangdao 066000, China; 2. 63655 Army Unit, Urumqi 841700, China)

Abstract: With numerical simulation, we give out the laser far-field pattern and operation efficiency's calculation and evaluation for a certain photo-electric detection system. The calculation process is based on the laser atmosphere transmission model, typical detectors' damaging threshold and system optic parameters. Factors that influence the efficiency are also analyzed and discussed. The result shows that different weather condition, laser simulator's parameters and receiving optics directly affect damage effect.

Key words: laser; far-forth efficiency; digital simulation; evaluation

1 引言

激光经过远距离大气传输后, 其远场特性直接影响到激光的远场作战效能。在进行激光干扰试验时, 我们首先需对激光远场传输后的能量密度/功率密度进行估算, 一方面可为设计激光对抗武器时所需采用的激光器提供参照依据, 另一方面也可以预知干扰效果。本文在考虑激光大气传输衰减的基础上, 结合数字仿真给出激光经远距离传输后的毁伤效果模拟计算及评估, 以期能为系统试验设计提供参考依据。

2 激光大气传输衰减

激光干扰远程光电目标时, 必须经过远程大气传输, 因此远程激光能量或功率必然会受到大气衰减影响。在计算激光大气传输衰减时, 在此只考虑水平传输的情况。

激光束在大气中的衰减主要是由大气中的分

子、水蒸气及气溶胶粒子的散射与吸收造成的。激光在大气中传输, 其衰减系数主要与激光波长有关, 因此, 根据比尔-朗伯定律有:

$$\tau(\lambda) = e^{-\sigma_{\lambda} \cdot R} \quad (1)$$

其中, R 为激光传输距离; $\sigma(\lambda)$ 为波长 λ 的激光大消光系数。

式(1)只对单色光和由均匀大气组成的水平路径才严格成立。

为简化计算, 给出均匀大气水平传输的经验公式, 且该经验公式与在 $\lambda = 0.35 \sim 1.54 \mu\text{m}$ 测定的数值极为一致^[1]:

$$\tau(\lambda) = \exp\left(-\frac{3.912}{R_v} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^m \cdot L\right) \quad (2)$$

作者简介: 高文静(1978-), 女, 工学硕士, 工程师, 研究方向为光电对抗。E-mail: wenjinggao203@126.com

收稿日期: 2010-07-06; **修订日期:** 2010-09-03

其中, m 为波长修正因子经验常数, 满足 Kruse 关系式:

$$\begin{cases} m = 1.6 & R_v > 50 \text{ km} \\ m = 1.3 & 6 \text{ km} \leq R_v \leq 50 \text{ km} \\ m = 0.16 R_v + 0.34 & 1 \text{ km} < R_v < 6 \text{ km} \\ m = R_v - 0.5 & 0.5 \text{ km} < R_v < 1 \text{ km} \\ 0 & R_v < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (3)$$

式中, R_v 为能见度 (km); λ 为激光波长 (μm); L 为传输距离 (km)。

$$\text{则有: } \sigma_\lambda = \frac{3.912}{R_v} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^m \quad (4)$$

图 1 给出了 $1.06 \mu\text{m}$ 激光大气传输消光系数随能见度的变化曲线。

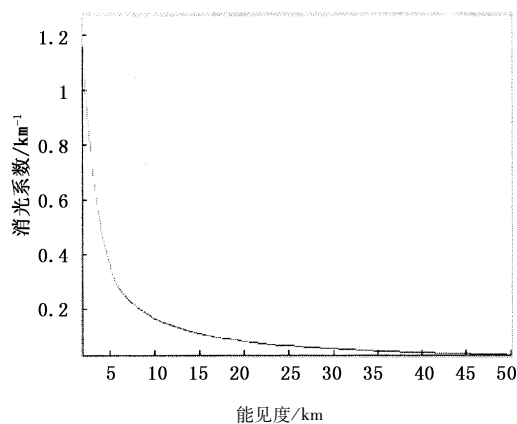


图 1 $1.06 \mu\text{m}$ 激光水平传输的大气衰减 (不同能见度 2~50 km 下的衰减系数)

由图 1 可见, 大气衰减系数 σ_λ 随能见度增加而减小。

大气条件有时是以能见度给出的, 能见度与消

光系数之间近似满足如下经验公式^[2]:

$$R_v = \frac{3.192}{\sigma_v} \quad (5)$$

其中, σ_v 为大气平均消光系数, 通常借助于对人眼视觉敏感的 $0.55 \mu\text{m}$ 激光给出。

研究表明: 中纬度海平面, $1.06 \mu\text{m}$ 激光大气传输过程中分子吸收很弱, 近似为 0, 分子散射虽然存在但效果很弱, 相对于气溶胶散射其影响可以忽略, 其溶胶吸收相对于气溶胶散射相差近一个数量级。因此, $1.06 \mu\text{m}$ 激光在大气中的传输主要需考虑气溶胶的散射 (霾、雾等)。在晴天条件下, $1.06 \mu\text{m}$ 激光传输特性较好, 而在雾、雪天气下的传输特性衰减较为严重。

针对冬季中纬度海洋性气溶胶 (能见度 23 km), 模拟计算了 $1.06 \mu\text{m}$ 激光水平传输透过率随距离的变化, 得到如图 2 所示关系曲线, 表 1 给出 $1.06 \mu\text{m}$ 激光大气透过率随距离的变化。

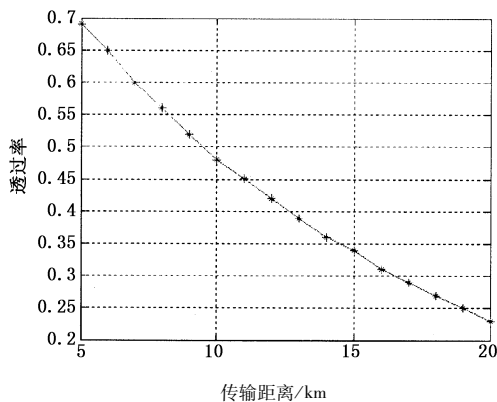


图 2 透过率随传输距离的变化关系 (冬季中纬度海洋环境 (能见度 23 km))

表 1 激光大气透过率随距离的变化 (冬季中纬度海洋环境、能见度 23 km)

距离/km	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
透过率/%	69	65	60	56	52	48	45	42	39	36	34	31	29	27	25	23

3 激光传输远场功率密度/能量密度估算^[3-4]

当辐照激光为脉冲激光时, 探测器的阈值单位一般采用能量密度单位。为了实现脉冲激光对探测器的干扰, 则光敏面处的激光能量密度 E' 需满足:

$$E'_1 < E' < E'_2 \quad (6)$$

式中, E'_1, E'_2 分别为探测器的饱和阈值和损坏阈值 (J/cm^2)。

为了简化讨论, 假定激光在大气中传播满足几何光学传播规律, 大气是均匀和各向同性的, 且激光正对光学接收系统入射, 则光敏面处激光能量密度

应为:

$$E' = \frac{4KE_0 T_{\text{atm}} T_{\text{det}} \beta}{\pi \theta^2 L^2} \quad (7)$$

式中, E_0 为激光光源的发射能量 (J); T_{atm} 光源到目标的大气透过率; T_{det} 为探测器前端光学系统的透过率; β 为探测器前端光学系统增益; θ 为激光束远场发散角 (rad); K 为激光光束轮廓参数; L 为光源到目标的距离 (m)。

对于某一固定的光学观瞄系统或光电跟踪系统, 探测器前端的光学系统增益假定是已知的, 因此其增益及光学透过率是一定的, 可看作常数, 因此, 我们最为关心的是激光到达探测器光学系统前端的

远场能量密度/功率密度分布情况。

对于 1.06 μm 激光,在大气介质比较均匀、无云,中等能见度气象条件下,对水平大气传输,一般通过如下经验公式计算光斑远场平均能量密度 E'_0 :

$$E'_0 = \frac{4E_0A}{\pi(\theta \cdot L)^2} \exp\left[-3.912 \cdot \frac{L}{R_v} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^m\right] \quad (8)$$

其中, E_0 为激光器输出能量; A 为常数,大小与激光输出模式有关,输出为基模高斯光束时, $A=0.6$,激光输出模式阶数越高,该值越接近于 1; L 为激光传输距离; θ 为激光发散角; R_v 为大气能见度。

式(8)中指数项代表大气透过率,该经验公式具有一定的应用条件:即只针对 1.06 μm 激光,且大气介质比较均匀、无云以及中等能见度气象条件下才适用;对于其他波段激光需根据大气传输效应及激光发射参数来确定远场功率密度。对 1.06 μm 激光,根据式(7)可得到探测系统前端激光光斑的能量密度。

4 激光对某典型光电系统致盲效能估算

仅考虑激光在通过大气传输时能量衰减作用,粗略估算激光出射能量和致盲距离之间的关系。

总能量为 E_t ,发射角为 θ_t 的激光束在远场距离 L 处探测器光敏面上形成的能量密度为:

$$E = \frac{E_t \tau}{\pi(\theta_t L/2)^2 \times 10^4} G \quad (9)$$

式中, G 为接收光学增益; τ 为距离 L 上的大气透过率; 10^4 因子是考虑了 L 以 km 为单位, θ_t 以 mrad 为单位,而能量密度 E 以 J/cm^2 为单位的缘故。

$$G = \eta \left(\frac{A_r}{A_d} \right) = \eta \left(\frac{D}{d} \right)^2 \quad (10)$$

式中, D 为接收孔径; d 为光学像弥散园直径; η 为光学透过率。

当 $E \geq E_0$ 时满足探测器激光致盲要求,则要求激光阵列总能量输出 E_t 应满足:

$$E_t \geq \frac{10^4 \pi \theta_t^2 L^2 E_0 \tau}{4\eta (D/d)^2} \quad (11)$$

透过率按表 1 进行计算, $E_{01} = 1.8 \sim 3.4 \text{ J}/\text{cm}^2$; $E_{02} = 1.5 \text{ J}/\text{cm}^2$; $E_{03} = 1 \text{ J}/\text{cm}^2$ (E_{01}, E_{02}, E_{03} 的值分别代表 * PIN, * APD 和 * CCD 的激光致盲毁伤阈值^[5-7])。

将某观瞄系统参数代入公式(9)、公式(10),可得单台和 5 台激光器的远场效能模拟计算结果如表 2、表 3 所示。

表 2 单台激光器的距离、光敏面功率密度与毁伤效果关系

L/km	5	6	7	8	9	10
$E/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	1.39	0.84	0.54	0.362	0.25	0.18
PIN	*	*	*	*	*	*
APD	*	*	*	*	*	*
CCD	★	*	*	*	*	*

表 3 5 台激光器的距离、光敏面功率密度与毁伤效果关系

L/km	5	6	7	8	9	10
$E/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	6.95	4.2	2.7	1.8	1.25	0.9
PIN	★	★	★	★	*	*
APD	★	★	★	★	*	*
CCD	★	★	★	★	★	*

★号代表探测器被毁伤; *号代表探测器未被毁伤。

将某典型光电探测系统参数代入公式(9)、公式(10),其他参数设置与前相同,可得单台和 5 台激光器的远场效能模拟计算结果如表 4、表 5 所示。

表 4 单台激光器的距离、光敏面功率密度与毁伤效果间的关系

L/km	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20
$E/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	1.76	1.14	0.78	0.56	0.406	0.312	0.2367	0.186	0.096	0.037
PIN	★	*	*	*	*	*	*	*	*	*
APD	★	*	*	*	*	*	*	*	*	*
CCD	★	★	*	*	*	*	*	*	*	*

表 5 5 台激光器的距离、光敏面功率密度与毁伤效果间的关系

L/km	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20
$E/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	8.8	5.7	3.9	2.8	2.03	1.56	1.18	0.93	0.48	0.185
PIN	★	★	★	★	★	*	*	*	*	*
APD	★	★	★	★	★	★	*	*	*	*
CCD	★	★	★	★	★	★	★	*	*	*

★号代表探测器被毁伤; *号代表探测器未被毁伤。

对比表2、表3、表4和表5数据,可以看出:不同的激光模拟器发射参数、不同的光学系统增益直接影响到激光远场毁伤效果的评判。同样,采用不同的探测器件,其远场毁伤效果亦不同。因此,在进行实际测量试验时,只能针对某典型探测器和探测前端光学系统增益一定的前提下给出毁伤效果评估。数值模拟计算在一定程度上为系统优化设计节约了大量的人力、物力、财力,其是系统设计必不可少的一环。

5 小 结

本文在数值仿真的基础上,结合激光大气传输模型、典型探测器阈值数据和典型光学系统设计,对某典型光电探测系统的激光远场效能进行了模拟计算和效能评估,以期能为系统优化设计提供参考依据。

参考文献:

- [1] Yang Yang, Zhao Yuan, Qiao Li-jie, et al. 1.06 μm Laser atmosphere transmittance character[J]. Infrared and Laser Engineering, 1999, 28(1): 15 - 19. (in Chinese)
杨洋, 赵远, 乔立杰, 等. 1.06 μm 激光的大气传输特性[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(1): 15 - 19.
- [2] Yang Rui-ke, Ma Chun-lin, et al. Study of the attenuation characteristics of laser propagation in the atmosphere[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(Supplement): 415 - 418. (in Chinese)
杨瑞科, 马春林, 等. 激光在大气中传输衰减特性研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(增刊): 415 - 418.
- [3] Wu Song-tao, Zhao Gang. Study for evaluation method of high-power laser countering optical observation-aim device [J]. Electro-Optic Technology Application, 2005, 20(6): 18 - 19, 67. (in Chinese)
武松涛, 赵刚. 强激光对光学观瞄设备干扰效果评估方法探讨[J]. 光电技术应用, 2005, 20(6): 18 - 19, 67.
- [4] Chen Fei-ming, Yi Xin-jian. The evaluation criterion and math simulation on jamming effect of the laser blinding [J]. Journal of Wuhan University of Science and Engineering, 2006, 19(10): 1 - 4. (in Chinese)
陈飞明, 易新建. 激光致盲干扰效果的评估准则与数学仿真[J]. 武汉科技学院学报, 2006, 19(10): 1 - 4.
- [5] Zhong Hairong, Lu Qisheng, et al. Review on the laser-induced damage mechanism of CCD detector[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1998, 11: 537 - 542. (in Chinese)
钟海荣, 陆启生, 等. 激光辐照 CCD 的破坏机理分析[J]. 强激光与粒子束, 1998, 11: 537 - 542.
- [6] S E Watkins, et al. Electrical performance of laser damaged silicon photodiodes [J]. Appl. Opt, 1990, 29: 827. (in Chinese)
S E Watkins, et al. 激光损伤硅光电二极管的电学性能[J]. 应用光学, 1990, 29: 827.
- [7] Xue Jianguo, Zhao Wei. Reseach on laser damage of avalanche photoelectric diode [J]. Applied Laser, 2000, 20(3): 6. (in Chinese)
薛建国, 赵威. 强激光对雪崩光电探测器破坏的研究[J]. 应用激光, 2000, 20(3): 6.