

## 激光辐照低慢小运动目标功率密度分析

韩晓飞, 蒙文, 李云霞, 李达

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

**摘要** 针对激光毁伤低慢小目标问题,建立了 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光斜程照射低慢小目标的模型。通过对该模型的仿真计算,得到了不同大气能见度条件下,激光透过率与目标天顶角和目标高度的关系曲线,及不同初始天顶角条件下,归一化功率密度与时间的关系曲线。分析了大气能见度,照射天顶角及目标飞行高度对目标表面归一化功率密度的影响,确定了激光防御低慢小运动目标过程中,激光照射的最佳条件,当照射初始天顶角 $\theta = \arctan vT/2h$ 时,可以使得在照射时间内,照射到目标表面的能量最大。

**关键词** 低慢小目标;激光毁伤;功率密度;斜程传输;天顶角

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.05.016

**中图分类号** TN249 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)05-0067-05

### An Analysis of Power Density of the Low Slow Small Target Irradiated by Laser Beam

HAN Xiao-fei, MENG Wen, LI Yun-xia, LI Da

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** To solve the damage problem of low slow small target caused by laser irradiation, a model of low slow small target (LLST) irradiated by a  $1.06\ \mu\text{m}$  slant path transmission laser is established. Through simulation calculation using the model, the paper presents the transmission rate vs. the zenith angle and the altitude in various atmospheric visibilities and the normalized power density vs. time in different zenith angle. The factors of the normalized power density are analyzed, such as the atmospheric visibility, the zenith angle and the altitude. Furthermore, the best condition that the zenith angle can be determined in the process of the laser defense low slow small moving target, the surface energy is the largest in the irradiation time.

**Key words:** LLST; laser damage; power density; slant path transmission; zenith angle

低空慢速小目标简称“低慢小”目标,是指具有低空、超低空飞行,飞行速度较慢,不易被雷达发现”等全部或部分特征的小型航空器和空飘物。近年来低慢小目标被广泛使用,其对重大活动、重点区域的威胁也日益突出,低慢小目标的防御问题成为世界各国共同面临的难题<sup>[1]</sup>。随着激光技术的发展,激光武器技术日趋成熟,激光防御低慢小目标作为一

种新的防御手段,正在逐步被世界各国研究和发展的。

激光防御低慢小目标主要通过光速输送强辐射能,对目标进行干扰或者破坏,从而实现对低慢小目标的防御。目标毁伤程度取决于照射到目标上的能量的大小及目标材料对能量的吸收效率,由于激光在传输过程中,大气效应会对光强分布产生影响<sup>[2]</sup>,目标本身的一些特性(如飞行速度,目标高度等)也

收稿日期:2013-05-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61108068)

作者简介:韩晓飞(1988—),男,山东平度人,硕士生,主要从事激光空间信息技术研究。

E-mail:hanxiaofei\_hxf@163.com

会影响照射到目标表面的能量分布,因此,研究激光照射到目标表面的光功率密度,对分析激光对低慢小目标毁伤效果的研究有着重要意义。

本文通过研究大气传输过程对光束的衰减以及目标特性对光强分布的影响,分析了低慢小目标特性对照射到目标表面的光功率密度的影响,为激光对低慢小目标的毁伤研究提供了一定的理论依据。

### 1 理论分析

激光照射到目标上的光功率密度主要受激光照射到目标表面的光功率和光斑大小的影响。

#### 1.1 光束照射天顶角对光斑半径的影响

激光在照射目标过程中,目标表面的光斑半径会随着目标飞行高度增大而变大,且与激光照射目标的方向角有关,同时,大气湍流效应和热晕效应也会引起的光强分布的变化<sup>[3]</sup>。在光强不是很大,传输距离较近的条件下,光斑半径几乎不受大气湍流效应和热晕效应的影响,由于低慢小目标飞行高度较低,一般在10~1 000 m的低空和超低空,目标飞行高度、大气湍流效应及热晕效应对光斑半径的变化影响较小,这里暂不考虑,只分析激光照射目标方向对光斑半径的影响<sup>[4]</sup>。图1中,当激光辐照方向与目标表面不是垂直时,照射到S面上的激光光斑半径r和照射到与光传播方向垂直的平面S'上的激光光斑半径r'有如下关系式<sup>[5]</sup>:

$$r = r' \cos \theta \tag{1}$$

式中θ为天顶角,即激光与照射目标的夹角。

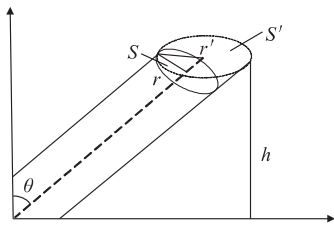


图1 激光照射目标表面示意图

Fig.1 The model of laser irradiate target

#### 1.2 大气传输对光功率的衰减

激光在大气传输过程中,会受到大气的吸收和散射衰减,使激光能量消耗较大。受大气分子吸收、大气分子散射、大气气溶胶吸收和气溶胶散射等因素的影响<sup>[6]</sup>,大气总的衰减系数为:

$$\alpha(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_a(\lambda) \tag{2}$$

式中:α<sub>m</sub>为大气分子衰减系数;β<sub>m</sub>为大气分子散射衰减系数;α<sub>a</sub>为气溶胶衰减系数;β<sub>a</sub>为气溶胶散射衰减系数。

低慢小目标的飞行高度位于低层大气层。在低

层大气中,由于大气分子对1.06 μm波长激光的吸收作用非常小,大气分子和气溶胶分子散射越弱,α<sub>m</sub>,β<sub>m</sub>,α<sub>a</sub>一般可以忽略不计<sup>[7]</sup>。对于气溶胶引起的散射衰减,在大气均匀条件下,可写为工程上的经验公式<sup>[8]</sup>:

$$\beta(\lambda) = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q} \tag{3}$$

式中:V为能见度;λ为波长;q是与波长和能见度相关的常数,对于1.06 μm波长的激光,q的取值为:

$$q = \begin{cases} 1.6, & V > 50 \text{ km} \\ 1.3, & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0.58V^{1/3}, & V < 6 \text{ km} \end{cases}$$

则激光在大气中传输的透过率τ与衰减系数α、水平传输距离L之间的关系为:

$$\tau(\lambda) = \exp \left[ -\frac{3.91L}{V} \left( \frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q} \right] \tag{4}$$

在激光防御低慢小目标过程中,仅仅考虑激光的水平传输是不够的,还需要考虑光束对空传输。由于不同高度的压强、温度、大气分子结构都各不相同<sup>[9]</sup>,所以大气传输衰减系数和折射率也各有差异。不同高度H和不同能见度V条件下,1.06 μm激光从地面起算的垂直传输大气透过率τ可以表示为<sup>[10]</sup>:

$$\tau = \exp \left[ -\frac{K}{V \cos \theta} [1 - \exp(-0.835H)] \right] \tag{5}$$

式中K为区域常数。地区不同,取值不同,乡村取2.828,城市取3.132,海洋取4.543,沙漠取2.496。

综合考虑激光的斜程传输问题,根据式(4)、式(5)得到1.06 μm激光斜程传输时的透过率τ:

$$\tau = \exp \left\{ \begin{aligned} & -\frac{K}{V \cos \theta} [1 - \exp(-0.835R \cos \theta)] - \\ & \frac{3.91R \sin \theta}{V} \left( \frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q} \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

#### 1.3 运动目标表面的光功率密度

当目标以速度v,高度h飞行时,激光照射天顶角与时间关系式可以表示为:

$$h \tan \theta - h \tan \theta_0 = vt$$

即:

$$\theta = \arctan \left( \frac{h \tan \theta_0 - vt}{h} \right) \tag{7}$$

式中θ表示激光照射目标时的初始天顶角。

结合式(6),发射功率为P的光束照射到目标表面上的功率密度可以表示为:

$$I = \frac{P \cos^2 \theta}{\pi r^2} \exp \left\{ \begin{aligned} & -\frac{K}{V \cos \theta} [1 - \exp(-0.835h)] - \\ & \frac{3.91 h \tan \theta}{V} \left( \frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q} \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

### 3 仿真与分析

#### 3.1 影响透过率条件分析

选用波长  $\lambda=1.06 \mu\text{m}$  的激光作为光源。在城市区域,不同能见度条件下,激光在大气中传输 1 km 时,激光透过率与天顶角  $\theta$  之间的关系见图 2。

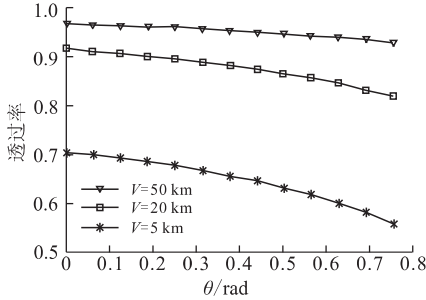


图 2 透过率与天顶角  $\theta$  之间的关系

Fig. 2 The transmission rate vs the zenith angle

从图 2 中可以看出,激光透过率受大气能见度和天顶角的影响。当能见度  $V>6 \text{ km}$  时,激光传输主要受气体分子的影响,大气对激光的散射和吸收较小,激光透过率基本在 90% 以上,且激光透过率受天顶角的影响也较小;当能见度  $V<6 \text{ km}$  时,大气中含有大量尘埃、烟、小液滴等悬浮粒子,这些粒子对激光的散射和吸收都较大,导致激光的透过率迅速下降,天顶角对透射率的影响也变的更加明显。

在天顶角为  $0^\circ$  的条件下,不同能见度下,激光透过率与目标飞行高度(即传输距离)的关系进行仿真,图 3 反映了目标高度对传输透过率的影响。从图中可以看出,在能见度较高条件下,激光透过率受目标飞行高度的影响较小;在能见度较低条件下,激光透射率随目标飞行高度的增加而降低,且能见度越低,激光透射率下降的速度越快。

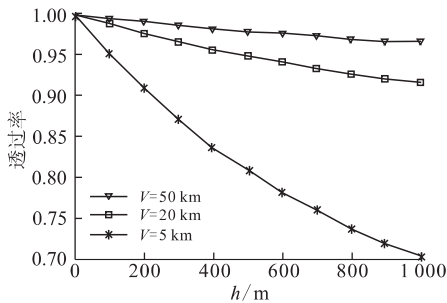


图 3 透过率与目标飞行高度  $h$  之间的关系

Fig. 3 The transmission rate vs the altitude

#### 3.2 运动目标对光功率变化的影响

图 4 表示在能见度  $V=20 \text{ km}$  条件下,激光照射目标时,目标表面的归一化光功率密度与目标高度和天顶角  $\theta$  之间的关系。

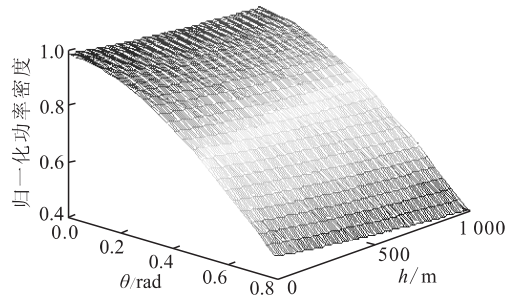


图 4 归一化光功率与目标高度和天顶角  $\theta$  之间的关系

Fig. 4 The normalized power density vs. the altitude and the zenith angle  $\theta$

从图 4 中可以看出,在能见度较好条件下,在小于 1 km 的高度范围内,光功率密度主要受天顶角  $\theta$  影响,然而在激光毁伤低慢小目标过程中,由于低慢小目标的运动性,光束与目标的夹角不断发生变化,为进一步分析激光防御低慢小目标过程中,照射到目标表面的光功率的变化,根据式(7)、式(8),对初始天顶角不同条件下,归一化功率与时间的关系进行仿真。图 5 表示飞行高度  $h=500 \text{ m}$ ,飞行速度  $v=50 \text{ m/s}$  的低慢小目标,在能见度  $V=20 \text{ km}$  的区域,不同初始天顶角条件下,目标表面归一化功率与时间的关系曲线。

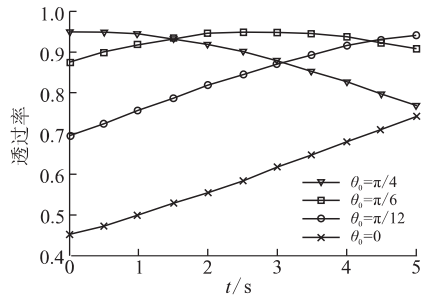


图 5 归一化功率与时间的变化曲线

Fig. 5 The normalized power density vs time in different zenith angle

从图 5 中可以看出,大气能见度和目标飞行速度和飞行高度一定条件下,相同照射时间内,由于照射初始天顶角不同,目标表面的归一化功率密度的变化也不同。在照射时间为  $T$  时,照射初始天顶角  $\theta = \arctan \frac{vT}{2h}$  时,目标表面的归一化功率最大,此时,目标表面的能量更高,激光对目标的毁伤效果更明显。

### 4 结语

激光对目标的毁伤作用是激光防御低慢小目标的关键技术之一。本文通过建立  $1.06 \mu\text{m}$  激光斜

程照射低慢小目标的模型,对激光辐照低慢小目标的光功率密度进行数值分析,得到大气能见度和照射天顶角是影响光功率密度的重要因素,对于运动中的低慢小目标,选择合适的初始照射天顶角  $\theta = \arctan vT/2h$ ,可以使得在照射时间内,照射到目标表面的能量最大。再根据目标材料对能量的吸收效率,确定目标吸收的能量,为分析激光与低慢小目标相互作用的温度场分析奠定基础。

#### 参考文献(References):

- [1] 张建伟,郭会明.低空慢速小目标拦截系统研究[J].计算机工程与设计,2012,33(7):2874-2878.  
ZHANG Jianwei, GUO Huiming. Net cast interception system research aimed at low small slow target [J]. Computer engineering and design, 2012, 33(7): 2874-2878. (in Chinese)
- [2] 李松山,王岳,钟声远.实用型激光拦截系统中大气影响的应用分析[J].激光与红外,2012,42(4):422-425.  
LI Songshan, WANG Yue, ZHONG Shengyuan. Applied analysis of atmosphere impacts in practical laser interception system [J]. Laser & infrared, 2012, 42(4):422-425. (in Chinese)
- [3] Daukantas P. Ground-based telescopes for the 21th century[J].Opt photon news, 2006, 18(9):28-34.
- [4] 杨洋,赵远,乔立杰等.1.06  $\mu\text{m}$  激光的大气传输特性[J].红外与激光工程,1999,28(1):15-19.  
YANG Yang, ZHAO Yuan, QIAO Lijie, et al. Atmospheric transmission property of 1.06  $\mu\text{m}$  laser[J]. Infrared and laser engineering, 1999, 28(1): 15-19. (in Chinese)
- [5] 徐国亮.舰载强激光武器系统精度指标分析[J].火力与指挥控制,2009,34(4):134-137.  
XU Guoliang, The precision analysis of ship borne high-energy laser weapon system[J]. Fire control & command control, 2009, 34(4):134-137. (in Chinese)
- [6] ITU. Development of a weather-model for free space optical propagation [R]. ITU Document 3J/78-E. 2004.
- [7] 刘伟超,齐琳琳,何宏让,等.1.06  $\mu\text{m}$  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.  
LIU Weichao, QI Linlin, HE hongrang, et al. Numerical study on atmospheric transmission of 1.06  $\mu\text{m}$  laser[J]. Laser & infrared, 2011, 41(5):520-524. (in Chinese)
- [8] 贾建周,宋德安,贾仁耀,等.激光大气传输衰减的估算方法[J].电子信息对抗技术,2010,25(4):73-76.  
JIA Jianzhou, SONG Dean, JIA Renyao, et al. Attenuation estimation of laser atmospheric transmission [J]. The technology of electronic information confrontation, 2010, 25(4):73-76. (in Chinese)
- [9] ROBERT Meneghini, TOSHIO Iguchi. Ground-to-space optical power transfer[J]. SPIE, 1999, 2120: 108-117.
- [10] 宋正方.1.06  $\mu\text{m}$  激光的斜程大气衰减[J].激光技术,1997,21(6):343-345.  
SONG Zhengfang. Atmospheric attenuation of 1.06  $\mu\text{m}$  laser propagating in a slant path[J]. Laser technology, 1997, 21(6):343-345. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)