

文章编号: 1001-3806(2014)02-0266-04

## 1.06 $\mu\text{m}$ 激光的大气传输仿真研究

陈煌飞<sup>1</sup>, 陈勇<sup>2\*</sup>, 李怡勇<sup>2</sup>, 王志<sup>1</sup>

(1. 中国人民解放军装备学院 研究生管理大队, 北京 101416; 2. 中国人民解放军装备学院 航天指挥系, 北京 101416)

**摘要:** 为了研究激光的大气传输特性, 基于激光大气传输的一般模型, 建立了激光传播到某一距离的功率衰减公式。采用定性定量的方法, 利用 MATLAB 软件对模型进行仿真计算, 分析了 1.06 $\mu\text{m}$  激光大气传输的大气透过率以及到靶功率。结果表明, 该模型对激光干扰空间探测器、清除微小碎片等提供了可靠的理论依据。这对于深入研究激光的大气衰减特性有一定参考价值。

**关键词:** 激光技术; 激光传输; 大气衰减; 仿真; 空间碎片

**中图分类号:** TN012 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.02.025

### Simulation of atmospheric transmission characteristics of laser at 1.06 $\mu\text{m}$

CHEN Huangfei<sup>1</sup>, CHEN Yong<sup>2</sup>, LI Yiyong<sup>2</sup>, WANG Zhi<sup>1</sup>

(1. Company of Postgraduate Management, The Academy of Equipment of Chinese People's Liberation Army, Beijing 101416, China; 2. Department of Space Command, The Academy of Equipment of Chinese People's Liberation Army, Beijing 101416, China)

**Abstract:** To study the atmospheric transmission characteristics of laser, the laser power attenuation formula was established at a certain distance based on the general model of laser atmosphere transmission. The laser atmospheric transmittance at 1.06 $\mu\text{m}$  and the power onto the target were calculated with MATLAB software. Results show that the model provides the reliable theory basis for laser influencing space probe and remove of tiny pieces, and certain reference for further study about laser atmospheric attenuation characteristics.

**Key words:** laser technique; laser transmission; atmospheric attenuation; simulation; space debris

## 引言

1960年, 美国的 MAIMAN 首先在实验室用红宝石获得了激光输出, 从此人们就开始了激光技术及激光器件的研究<sup>[1]</sup>。近些年不论激光技术还是激光器件都有了突飞猛进的发展。这些进展应用到了工业、医疗、信息科学、生物技术和军事上。当前利用激光清除空间碎片已经成为一项重要的手段, 很多国家都在进行研究。美国的 Sandia 实验室、ORION 计划、德国的 DLR 物理研究所等都提出了相应的激光清除空间碎片方案或技术。但是激光在传输时会受到很多因素的影响, 特别是当激光穿过大气传播时要受到大气分子和气溶胶粒子的吸收和散射造成的衰减效应、大气湍流引起的湍流效应和强

光加热空气造成的热晕效应。因此在前期研究工作中, 需要对激光束的大气传输进行建模仿真, 本文中以 1.06 $\mu\text{m}$  激光为例, 总结了激光大气传输的一般模型并进行了仿真, 最后讨论了激光衰减的应用。

## 1 激光的大气传输模型

### 1.1 激光大气衰减

大气的传输特性<sup>[2]</sup>取决于传输所通过路径上的大气组成、浓度分布、性质和大气压强、温度、湿度等, 以及气溶胶(固态和液态的悬浮物)的特性。气溶胶和大气分子的吸收和散射引起激光能量的衰减, 作用距离降低; 大气湍流引起激光束的偏转、抖动、闪烁等效应, 使激光的空间相干性下降, 影响激光的作用效果和精度<sup>[3]</sup>。

根据布格尔吸收定律<sup>[4]</sup>, 频率为  $\nu$  的激光辐射大气透过率  $T(\nu)$  为:

$$T(\nu) = \frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} = \exp\left[-\int_0^L k(\nu) dL\right] \quad (1)$$

作者简介: 陈煌飞(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为武器系统总体设计与仿真。

\* 通讯联系人。E-mail: chenrong1990@163.com

收稿日期: 2013-04-12; 收到修改稿日期: 2013-05-14

式中,  $I(\nu)$  为传输  $L$  距离上的光强;  $I_0(\nu)$  为初始光强。对于均匀介质有:

$$T(\nu) = e^{-k(\nu)L} \quad (2)$$

式中, 指数项称为光学厚度  $\tau = k(\nu)L$ , 其中  $k(\nu)$  是衰减系数, 由大气分子吸收系数  $\sigma_{m,a}$ 、大气分子散射系数  $\sigma_{m,s}$  和气溶胶吸收系数  $\sigma_{ae,a}$ 、气溶胶散射系数  $\sigma_{ae,s}$  组成, 有:

$$k(\nu) = \sigma_{m,a} + \sigma_{m,s} + \sigma_{ae,a} + \sigma_{ae,s} \quad (3)$$

可以总结为  $k(\nu) = \tau_a + \tau_s$ , 其中  $\tau_a$  为吸收透射系数,  $\tau_s$  为散射透射系数。对于吸收来说, 波长小于  $0.3\mu\text{m}$  的紫外光被大气中的氧和臭氧分子强烈吸收, 而大于  $15\mu\text{m}$  的红外光几乎被大气中的水汽和二氧化碳全部吸收。大气对可见光、 $1\mu\text{m}$  附近、 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ ,  $8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$  红外光吸收很少, 具有很高的透过率。这些波段称为“大气窗口”,  $1.06\mu\text{m}$  的激光就属于此窗口<sup>[4]</sup>, 因此在大气吸收这一方面可以近似为全透。而对于散射透射系数来说, 分子散射可用瑞利散射理论来处理, 对自然入射光, 大气中的分子散射系数<sup>[5]</sup>  $\sigma_{m,s}$  可表示为:

$$\sigma_{m,s} = C_m \cdot N \quad (4)$$

式中,  $C_m = \frac{8\pi^2(n^2 - 1)^2}{3\lambda^4 N^2} \left( \frac{6 + 3\rho}{6 - 7\rho} \right)$ ,  $C_m$  称为瑞利散射截面,  $N$  为每单位体积中的分子数,  $\rho$  是退偏振因子, 一般取值为  $0.035$ ,  $n$  是折射率,  $\lambda$  为激光波长。由于大气中气溶胶粒子分布的不确定性, 实际应用时常常采用根据惠更斯原理和几何光学来计算, 但计算公式比较复杂, 参考文献[6]中总结了气溶胶

在某个高度上的衰减公式:  $T_{ae} = \exp\left[-\int_0^H \beta(\lambda, h) dh\right]$ , 其中,  $T_{ae}$  表示气溶胶在某高度衰减系数,  $\beta(\lambda, h)$  表示任意波长  $\lambda$  在任意高度  $h$  上的衰减系数。可以得出气溶胶衰减近似随高度成指数衰减。在实际应用中, 工程上常用 Mie 散射经验公式。大气中的

Mie 散射系数为:  $\sigma = \frac{3.91}{V} \left( \frac{0.55}{\lambda} \right)^q$ , 其中:

$$\begin{cases} q = 0.58V^{\frac{1}{3}}, (V \leq 6\text{km}) \\ q = 1.3, (6\text{km} < V < 50\text{km}) \\ q = 1.6, (V \geq 50\text{km}) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $V$  为能见度。

所以得<sup>[4]</sup>:  $T = \exp(\sigma L) \quad (6)$

则激光传输了  $L$  距离后大气散射透过率  $T(\nu)$  为:

$$T(\nu) = \exp\left[\frac{3.91}{V} \left( \frac{0.55}{\lambda} \right)^q L\right] \quad (7)$$

## 1.2 远场光斑尺寸

由于在大气中传播中还会受到大气湍流的影响, 使激光束到达角起伏、激光束扩散、抖动等。因此在激光束经过一段距离  $L$  的传输之后, 光束直径将发生变化, 激光光束变直径  $D$  变为<sup>[7]</sup>:

$$D = L\theta \quad (8)$$

式中,  $\theta$  为光束发散角(rad), 包括光束衍射发散角  $\theta_y$ 、大气湍流引起的扩散角  $\theta_l$  和激光光源抖动  $\theta_d$  的影响<sup>[8]</sup>。

$$\theta = (\theta_y^2 + \theta_l^2 + \theta_d^2)^{1/2} \quad (9)$$

式中,  $\theta_y = 1.22(\lambda/D_0)Q$ ,  $Q$  为光束质量因子, 取值一般为  $1.5 \sim 3$ ,  $D_0$  为激光器发射口径。

激光光源的抖动与其具体激光发射跟瞄设备的结构有关, 这里假设  $\theta_d = \theta_y/2$ 。取大气湍流效应所引起的光束扩展为  $\theta_l$ <sup>[9]</sup>,  $\theta_l = k\lambda/r_0$ ,  $r_0$  为大气湍流相干长度<sup>[10]</sup>, 且  $r_0 = \{0.423(2\pi/\lambda)^2 \sec\Omega \int dh \times C_n^2(h)\}^{-3/5}$ , 其中  $\Omega$  为观察方向天顶角,  $C_n^2(h)$  为高度  $h$  的湍流折射结构常数。一般有 Hufnagel 模型:

$$C_n^2(h) = 2.72 \times 10^{-16} [3v^{-2}(h/10)^{10} \times \exp(-h) + \exp(-h/1.5)] \quad (10)$$

Hufnagel-Valley 模型:

$$C_n^2(h) = 5.94 \times 10^{-53} (v/27) h^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + A \exp(-h/100) \quad (11)$$

式中,  $v$  代表风速, 取为  $21\text{m/s}$ ,  $A = 1.7 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/5}$ 。

Hufnagel-Valley 改进模型:

$$C_n^2(h) = 8.16 \times 10^{-54} h^{10} \exp(-h/1000) + 3.02 \times 10^{-17} \exp(-h/1500) + 1.90 \times 10^{-15} \exp(-h/100) \quad (12)$$

利用参考文献[3]中所给模型可最终求得  $\theta$  的值。则在  $L$  处, 光斑尺寸  $S$  为:

$$S = \pi D^2/4 = \left( \frac{\pi L^2}{4} \right) \cdot (\theta_y^2 + \theta_l^2 + \theta_d^2) \quad (13)$$

## 1.3 功率衰减

波长为  $\lambda$  的激光器, 输出功率为  $P_0$ , 激光发散角为  $\theta$ , 大气的透过率为  $T(\nu)$ ; 在  $L$  处功率为  $P_1$ , 相对应的功率密度为  $\rho_1$ , 那么  $P_1 = P_0 T(\nu)$ ,  $\rho_1 = \psi P_1 / (\pi D^2)$ ,  $\psi$  为分布在艾利斑第一暗环内部的光能百分比, 一般取常数  $0.838$ 。所以可得到靶功率密度<sup>[7]</sup>为:

$$\rho_1 = 0.838 P_0 T(\lambda) / [\pi(L\theta)^2] \quad (14)$$

## 1.4 传输后效能分析

激光经过大气传输后到达空间, 并将最终作用

于空间的某一物体。并对物体或目标产生一定光学效应。不同的物体或目标毁伤的阈值有所差别。表 1 中列出的是一些在空间中常见的物体及其毁伤阈值的的关系,如微小碎片、各种星载探测器。

Table 1 The space target damage threshold

name of the object	thermal damage threshold value
multi-spectral CCD array device	temporary damage threshold 1.43W/cm <sup>2</sup>
mixed InSb infrared/Si-CCD	temporary damage threshold 1.73W/cm <sup>2</sup>
photodiode	temporary damage threshold 1.73W/cm <sup>2</sup>
space is tiny pieces	evaporation vaporization threshold 0.1MW/cm <sup>2</sup> ~ 1MW/cm <sup>2</sup>
arrays of avalanche photodiode	temporary damage threshold 1.73W/cm <sup>2</sup>

## 2 应用计算仿真

假设在中纬度夏季,天顶角  $\Omega = 25^\circ$ ,地面的空气温度为  $25^\circ\text{C}$ ,相对湿度为 85%,输出功率  $P_0 = 5\text{kW}$ ,激光发射器口径  $D_0 = 1\text{m}$ ,光束质量因子  $\beta = 2.5$ 。

图 1 为根据上面式子所仿真出的  $1.06\mu\text{m}$  激光传输至 80km 高空时,大气透过率与能见度的关系。从图中可以看出,对于激光束来说,在大气中传输时受到的衰减是多方面因素共同决定的,而且都是随

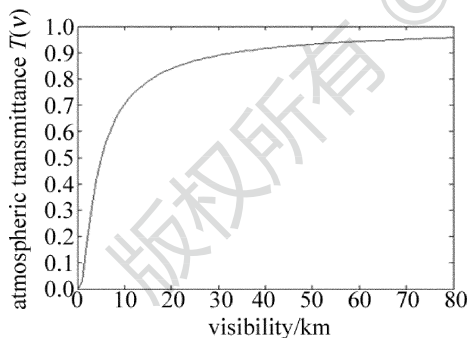


Fig. 1 Relation between atmospheric transmittance and visibility

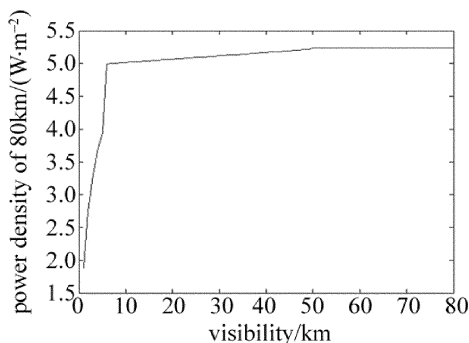


Fig. 2 Relation between power density and visibility

着能见度的增加,透过率不断增加。能见度对于激光的大气透过率有着重要的影响。

假设激光束传输距离  $L = 80\text{km}$ 。图 2 为通过仿真得到能见度与功率密度的关系。从图中可以看出:随着能见度的升高,在 80km 处,激光的最终功率密度逐渐变大。从仿真结果可以看出,当能见度很低时,激光的功率密度几乎为 0,而随着能见度的增加,功率密度不断增大。可见能见度对于激光的传输有着严重的影响。

图 3 分别是能见度为 3km,30km,60km 时随高度的增加功率密度变化的曲线。从图 3 可以看出在不同的能见度下功率密度的变化,能见度高低与功率密度减少的速度不一样,能见度越高,其衰减速度越慢,最后的功率密度就越大。且随着高度的增加,功率密度的衰减开始很快,但速率逐渐减低。

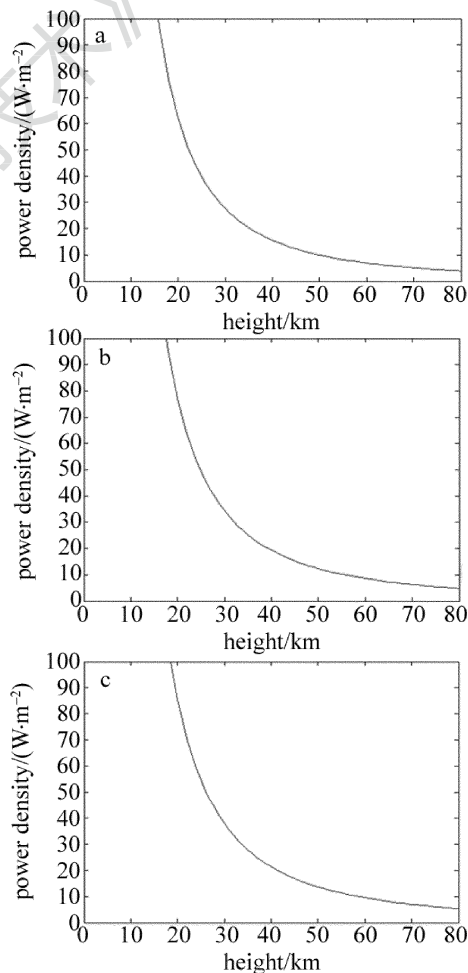


Fig. 3 The increase in power density with height from 0km to 80km at different visibility

a—the power density variation with height at 3km visibility b—the power density variation with height at 30km visibility c—the power density variation with height at 60km visibility

假设用该激光照射在离地面  $H = 400\text{km}$  的某空间物体,得到在不同能见度下激光到靶功率密度的变化,见图4。

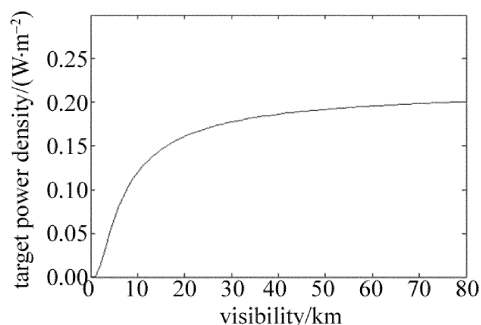


Fig. 4 The target power density curves at different visibilities

从上述的各个仿真图中可以看出在激光经过大气传输后功率受到了很大的影响。空间中的那些目标,对于星载探测器,还需要对其进行跟踪、捕获、瞄准,激光到达其表面的时候还要经过探测器前段的光学系统然后才聚焦到光敏面上,这一过程还会对激光的功率密度进行损耗,但从参考文献[7]中可以得出,在仿真所给的假设条件下,还是能对这些探测器造成至少致盲的效果。对于微小碎片则还需要加大激光器的功率,或者改变激光器的发射口大小以提高到靶功率密度,达到清除碎片的效果。

### 3 小 结

大气对激光的衰减是极其复杂的,本文中只是对一般的模型进行了研究。从仿真结果可知,1.06μm的激光在大气中的衰减不仅与能见度有关,还与激光的波长有关,在能见度低的时候比较大;在能见度较高时,波长大的透过率比波长小的透过率大。因此要合理选择激光器的建设位置,应选在大气相对稀薄、湍流较弱、横向风速较低的高山寒冷地区,这样可以有效地减少激光的大气衰减,确保有足够的到靶功率。因此当天气条件较好时,可以运用1.06μm的激光进行高空的传输,配合所配备的跟踪、瞄准、捕获系统可以用于清除空间碎片,或武器系统的制导应用。

在武器工业中为了减小激光在大气传输中受到的湍流和热晕等效应的影响,在发射系统中可以加入变形镜,根据波前畸变的测量结果,利用自适应光学技术对光学系统的有关发射镜进行控制,使光束在传输后得到相应的补偿。自适应光学对湍流的影响补偿效果可以达到80%以上,对热晕效应也有一定的补偿效果。

激光在大气中的传输受到各种各样复杂因素的影响,这些影响是一个合集,共同对激光传输中的衰减起到了影响。导致了激光传输中的线性以及非线性的效应。在实际工程应用中还应考虑更多的因素,本文中只是对一般模型进行分析,在以后的工作中会不断完善这一复杂的模型。

### 参 考 文 献

- [1] SUN H Y, ZHANG Y H, HAN Y. Military laser technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012:1 (in Chinese).
- [2] GAO G Q, XIANG J, LI Y X, et al. Efficiency research of laser jamming photoelectric detector in early-warning satellite of infrared system based on the sky[J]. Laser and Infrared, 2010, 40(2): 174-177 (in Chinese).
- [3] ZHANG Y X, CHI Z Y. Light waves in the atmosphere transmission and imaging[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997: 5-17, 63-82 (in Chinese).
- [4] SUN X Q, LÜ Y G. Laser principle and technology[M]. Beijing: The Chinese People's Liberation Army Press, 2000: 120-150 (in Chinese).
- [5] LI H Y, HU Y N, LIU X D. Energy estimation method for laser disturbing photoelectrical detectors in remote distance[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(6): 1038-1043 (in Chinese).
- [6] CHEN X H, WEI H L, LI X B, et al. Calculating model for aerosol extinction from visible to far infrared wavelength[J]. High Laser and Particle Beams, 2009, 21(2): 183-186 (in Chinese).
- [7] WANG Sh Y, FU Y Y, GUO J. Evaluation of high energy laser effecting on remote distance photoelectron sensor system[J]. Optical Technology, 2002, 28(1): 28-30 (in Chinese).
- [8] LI H Y, HU Y N, LIU X D. Energy estimation method for laser disturbing photoelectrical detectors in remote distance[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(6): 1038-1043 (in Chinese).
- [9] SUN Z L. With infrared photoelectric system manual[M]. Tianjin: The 8358 Institute of China Aerospace Industry Corporation, 1998: 291 (in Chinese).
- [10] SUN Y, WAN M. High energy laser system[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004: 127-150 (in Chinese).