

文章编号: 1001-3806(2010)03-0381-04

## 激光在烟雾中传输特性的数值模拟分析

李晓锋<sup>1</sup>, 周昕<sup>1\*</sup>, 卢熙<sup>1</sup>, 伍波<sup>2</sup>, 杨泽后<sup>2</sup>, 陈涌<sup>2</sup>, 周鼎富<sup>2</sup>, 侯天晋<sup>2</sup>

(1. 四川大学电子信息学院, 成都 610064; 2. 西南技术物理研究所, 成都 610041)

**摘要:** 为了解决激光驾束制导中发动机烟雾对制导激光场信号的衰减问题, 采用 van de Hulst 近似计算方法, 模拟研究了烟雾对 1.06 $\mu\text{m}$ , 1.55 $\mu\text{m}$ , 10.6 $\mu\text{m}$  波长的激光在不同复折射率参量下的吸收、散射、衰减效应。结果表明, 复折射率不变时, 烟雾对长波长激光的吸收衰减较小; 烟雾对激光的衰减峰值随着折射率虚部的增大而变小; 峰值的位置随着激光波长的增加向粒子半径增大的方向移动。该研究结果对激光驾束制导武器的研制具有较大的参考价值。

**关键词:** 激光技术; 激光驾束制导; 激光衰减; 数值模拟; 制导距离

**中图分类号:** TJ765.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.027

## Numerical simulation and analysis of laser transmitting characteristic in smog

LI Xiao-feng<sup>1</sup>, ZHOU Xin<sup>1</sup>, LU Xi<sup>1</sup>, WU Bo<sup>2</sup>, YANG Ze-hou<sup>2</sup>, CHEN Yong<sup>2</sup>, ZHOU Ding-fu<sup>2</sup>, HOU Tian-jin<sup>2</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to study the smog extinction to the laser signal in laser beam ride guidance, the transmitting characteristics, such as absorption, scattering and attenuation, in smog of laser at the wavelength of 1.06 $\mu\text{m}$ , 1.55 $\mu\text{m}$  and 10.6 $\mu\text{m}$  were simulated with the method of van de Hulst. It is found that the absorption attenuation becomes smaller for laser at longer wavelength when the complex refractive index is a constant. The peak attenuation becomes smaller with the increase of the virtual refractive index. With the increase of laser wavelength, the position of peak attenuation moves toward the direction along which the radius of smoke or smog increases. The results are important reference for studying laser beam guidance.

**Key words:** laser technique; laser beam ride guidance; laser attenuation; numerical simulation; guidance distance

### 引言

随着技术的进步, 激光在军事上得到了越来越广泛的应用。激光制导武器作为一种价格低、精度高、操作简便、费效比较高的武器也从激光问世以来得到了长足发展<sup>[1-3]</sup>。在激光驾束制导武器的发射过程中, 需要产生激光信息场照射在动能弹的尾部对导弹的飞行方位进行控制, 直到命中目标。在此过程中, 发动机推进剂燃烧产生的烟雾对激光有较大的衰减<sup>[4-6]</sup>, 限制了激光制导武器的作用距离。同时, 大气对激光的吸收和散射也对激光有一定的衰减。所以, 烟雾和大气对激光的衰减效应就备受人们关注。HUTT<sup>[7]</sup>等人计算了大气对 10.6 $\mu\text{m}$  和 1.54 $\mu\text{m}$  激光的衰减效应, 并与实验结果进行了比较。SORENSEN<sup>[8]</sup>等人利用 Mie 理论计算了不同波长和折射率参量下的 Mie 散射图像。SUDIARTA<sup>[9]</sup>等人利用 Mie 散射理论计算了吸收介质

中较大的粒子对激光的散射效率, 计算表明, 在球形粒子参量阶数在  $10^4$  量级时, 散射效率因子与平面波垂直入射时的结果比较接近。WANG<sup>[6,10]</sup>等人用 Mie 理论计算了红磷对 10.6 $\mu\text{m}$  激光的吸收和衰减效应, 结果表明, 红磷烟雾粒子主要分布在 10 $\mu\text{m}$  以下的区间内, 红磷对 10.6 $\mu\text{m}$  激光的衰减效应以吸收为主。FENG<sup>[11]</sup>用朗伯定律和扩散方程计算了 0.808 $\mu\text{m}$ , 0.64 $\mu\text{m}$ , 1.5 $\mu\text{m}$ , 10.6 $\mu\text{m}$  激光的衰减效应, 结果表明, 10.6 $\mu\text{m}$  的激光对红磷烟雾的穿透性能比较好。国内外大多数研究都是从发烟剂对激光进行干扰的角度, 利用 Mie 理论进行严格的计算烟雾和大气对激光的衰减。计算大气对激光的衰减的方法有多种<sup>[12]</sup>。Mie 散射理论能严格地计算大气对激光的衰减, 但是方法较为复杂<sup>[13-14]</sup>。在多数情况下可以采用 van de Hulst 近似计算方法来研究粒子对激光的衰减<sup>[15-16]</sup>。

作者以 van de Hulst 近似计算方法模拟研究了不同参量下烟雾对长激光的吸收和衰减效应, 计算了吸收、衰减和散射因子。计算了不同参量下激光光功率随距离的衰减情况, 对驾束制导武器的研制具有较大参考价值。

作者简介: 李晓锋 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事研究与光通信方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: zhoxn985@sohu.com

收稿日期: 2009-05-21; 收到修改稿日期: 2009-09-12

## 1 理论模型

激光在传播过程中与烟雾粒子和大气粒子相互作用,能量不断损耗。设激光出口平均功率为 $P_\lambda(0)$ ,经过变焦放大系统之后,光斑直径变为 $D$ ,接收机探测器直径为 $d$ ,激光在烟雾中的透射率为 $T_1$ ,激光在烟雾中的穿透距离为 $l$ ,在大气中的透射率为 $T_2$ ,传输距离为 $R$ 。根据朗伯定律<sup>[9]</sup>,探测器接收到的光功率为:

$$P_\lambda(R) = P_\lambda(0) T_1 T_2 (d/D)^2 \quad (1)$$

激光在烟雾中的透过率为:

$$T_1 = \exp[-CK(x, m)l] \quad (2)$$

式中, $C$ 为烟雾粒子的浓度,单位为 $g/m^3$ , $K(x, m) = \gamma_{\text{abs}}(x, m) + \gamma_{\text{sca}}(x, m)$ , $K(x, m)$ 为烟雾的质量消光系数,单位为 $m^2/g$ , $\gamma_{\text{abs}}(x, m)$ 为烟雾的吸收系数, $\gamma_{\text{sca}}(x, m)$ 为烟雾的散射系数。烟雾的吸收系数 $\gamma_{\text{abs}}(x, m)$ 和散射系数 $\gamma_{\text{sca}}(x, m)$ 的计算公式如下:

$$\begin{cases} \gamma_{\text{abs}}(x, m) = \pi \int_0^\infty Q_{\text{abs}}(x, m) n(r) r^2 dr \\ \gamma_{\text{sca}}(x, m) = \pi \int_0^\infty Q_{\text{sca}}(x, m) n(r) r^2 dr \end{cases} \quad (3)$$

$x = 2\pi r/\lambda$ , $r$ 为粒子半径, $\lambda$ 为激光波长,复折射率 $m = n_r - in_i$ ,实部 $n_r$ 表征激光被烟雾散射部分,虚

部 $n_i$ 表征被烟雾吸收部分<sup>[12]</sup>,式中, $n(r)$ 为烟雾粒子的分布; $Q_{\text{abs}}(x, m)$ 表示烟雾粒子的吸收因子; $Q_{\text{sca}}(x, m)$ 表示烟雾粒子的散射因子; $Q_{\text{abs}}(x, m)$ , $Q_{\text{sca}}(x, m)$ 与烟雾的衰减因子 $Q_{\text{ext}}(x, m)$ 有如下关系<sup>[15]</sup>:

$$Q_{\text{ext}}(x, m) = Q_{\text{abs}}(x, m) + Q_{\text{sca}}(x, m) \quad (4)$$

$Q_{\text{ext}}(x, m)$ 和 $Q_{\text{abs}}(x, m)$ 可由 van de Hulst 近似得到:

$$\begin{cases} Q_{\text{abs}} = 1 + \frac{\exp(-4xn_i)}{2xn_i} + \frac{\exp(-4xn_i) - 1}{8x^2 n_i^2} \\ Q_{\text{ext}} = 2 - 4\exp(-\rho \tan\beta) \frac{\cos\beta}{\rho} \sin(\rho - \beta) - \\ 4\exp(-\rho \tan\beta) \left(\frac{\cos\beta}{\rho}\right)^2 \cos(\rho - 2\beta) + \\ 4\left(\frac{\cos\beta}{\rho}\right)^2 \cos 2\beta \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\rho = 2x(n_r - 1)$ , $\tan\beta = \frac{n_i}{n_r - 1}$ 。

激光在大气中的透过率公式为:

$$T_2 = \exp(-\sigma R) \quad (6)$$

式中, $\sigma$ 为大气的衰减系数。在中等能见度的情况下,大气衰减系数 $\sigma$ 的经验公式为<sup>[14]</sup>: $\sigma = (3.192/R_m) \times (\lambda/0.55)^{-1.3}$ 。其中, $R_m$ 为大气能见度。

两种动能弹发动机推进剂的参量如表 1 所示。

Table 1 Value of the propellant parameter

propellant	mass extinction coefficient $K_{1.06}/(m^2 \cdot g^{-1})$	mass extinction coefficient $K_{10.6}/(m^2 \cdot g^{-1})$	concentration of the smog $C/(g \cdot m^{-3})$
A	0.0211	0.0094	2.75
B	0.0161	0.0063	2.75

## 2 仿真计算

烟雾对激光的吸收部分由复折射率的虚部表征,吸收因子曲线与实部无关<sup>[12]</sup>。图 1a 是折射率虚部不

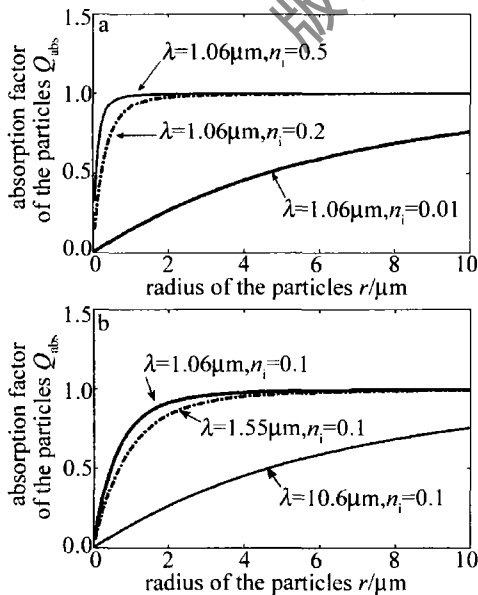


Fig. 1 The variation of absorption factor with the radius of smog particles

同情况下,烟雾对 $1.06\mu\text{m}$ 激光的吸收因子曲线;图 1b 是折射率虚部不变时,烟雾对 $1.06\mu\text{m}$ , $1.55\mu\text{m}$ , $10.6\mu\text{m}$ 激光的吸收因子变化情况。

由图 1a 可以看出,烟雾对激光的吸收随折射率虚部 $n_i$ 的增大而变大,虚部 $n_i$ 较小时,吸收因子变化较为平缓。在虚部较大时,吸收因子随着烟雾粒子半径的增大而迅速变大,且吸收因子在烟雾粒子半径小于 $2\mu\text{m}$ 的区间内迅速趋近于 1。由图 1b 可以看出,折射率虚部不变的情况下,随着激光波长增大,烟雾对激光的吸收曲线平缓。在粒子半径与激光波长相比较差别不大的时候吸收较为强烈,吸收因子很快趋近于常数 1。

烟雾对激光的衰减因子不仅与折射率实部有关,还与虚部相关。图 2a 为 $1.06\mu\text{m}$ 激光在虚部不变,实部变化时的衰减因子曲线;图 2b 为 $1.06\mu\text{m}$ 激光在实部不变,虚部改变时的衰减因子曲线;图 2c 为折射率不变,激光波长分别为 $1.06\mu\text{m}$ , $1.55\mu\text{m}$ , $10.6\mu\text{m}$ 时的衰减因子曲线。

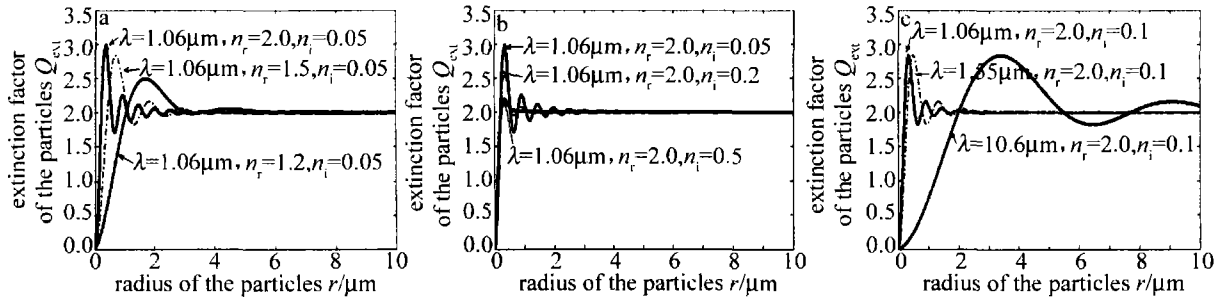


Fig. 2 The variation of the extinction factor with the radius of smog particles

由图 2 可以看出,衰减因子曲线出现振荡现象。衰减因子  $Q_{ext}$  的值随着粒子半径的增大逐渐趋近于常数 2。根据 Mie 理论,该振荡称为干涉结构。干涉结构主要是由于散射光和入射光干涉的结果。极大值对应于加强的干涉,极小值对应于减弱的干涉。由图 2a 可以看出,激光波长不变,折射率虚部不变的情况下,随着实部的增大,衰减因子峰值呈现出增大的趋势,并且该峰值出现在粒子半径较小的范围内。衰减因子的震荡则随着实部的增大而趋缓,震荡周期变长,幅度变小。由图 2b 可以看出,在激光波长不变,复折射率实

部不变的情况下,随着虚部的增大,衰减因子峰值逐渐变小,峰值位置不随虚部的变化而改变,衰减因子曲线震荡周期变长,其值逐渐趋近于常数 2。图 2c 可以看出,折射率不发生变化的情况下,随着激光波长的变大,衰减因子曲线震荡周期变长,峰值位置随着激光波长的增大向后移动,但峰值大小不发生变化。

烟雾粒子对激光的散射因子可以由 (4) 式得到。图 3 中研究了在各个参量发生变化的情况下,烟雾对激光的散射因子变化情况。

图 3a 是激光波长为  $1.06\mu\text{m}$ 、折射率虚部不变时

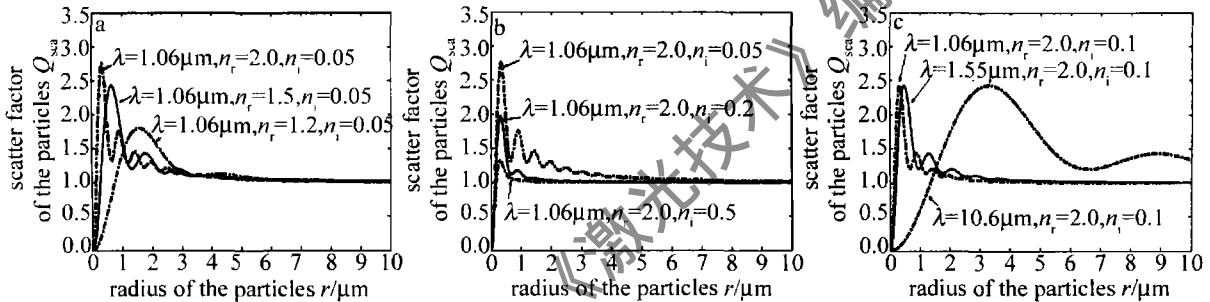


Fig. 3 The variation of scatter factor with the radius of smog particles

实部发生的改变。由图中可以看出,随着折射率实部的变小,散射因子峰值逐渐变小,并且峰值出现在粒子半径较大的区间。图 3b 为激光波长  $1.06\mu\text{m}$ 、折射率虚部发生变化时的散射因子曲线。随着折射率虚部的增大,曲线震荡次数减少,衰减因子峰值变小,位置不发生变化。图 3c 为折射率不变,激光波长发生改变时的散射因子曲线。由图中可以看出,折射率不发生变化的情况下,烟雾粒子对各种波长的激光散射因子峰值大小不发生变化,峰值出现的位置随着波长的增加而出现在粒子半径比较大的区间,散射因子曲线震荡周期随着激光波长的变大而增加。散射因子曲线震荡次数减少,峰值变小的原因是:折射率虚部增大时,粒子对激光的吸收增强,散射变弱,导致干涉结构变弱。

$1.06\mu\text{m}$  和  $10.6\mu\text{m}$  的激光质量消光系数分别为:  $K_{1.06} = 0.0161\text{m}^2/\text{g}$ ,  $K_{10.6} = 0.0063\text{m}^2/\text{g}$ 。动能弹在据发射点  $100\text{m}$  左右进入激光信息场,烟道长为  $100\text{m}$ ,作用距离  $R = 5\text{km}$ ,激光出口功率为  $5\text{W}$ 。在动能弹进入激光场后,  $1.06\mu\text{m}$  和  $10.6\mu\text{m}$  激光的衰减情况如图 4 所示。

在激光架束制导系统中,发动机推进剂产生的烟雾对激光衰减比较严重。在能见度为  $12\text{km}$  时,  $1.06\mu\text{m}$  激光的大气衰减系数为  $\sigma_{1.06} = 0.1389\text{km}^{-1}$ ;  $10.6\mu\text{m}$  激光的大气衰减系数为  $\sigma_{10.6} = 0.006959\text{km}^{-1}$ 。推进剂烟雾浓度为  $C = 2.75\text{g}/\text{m}^3$ ; 推进剂 B 对波长为

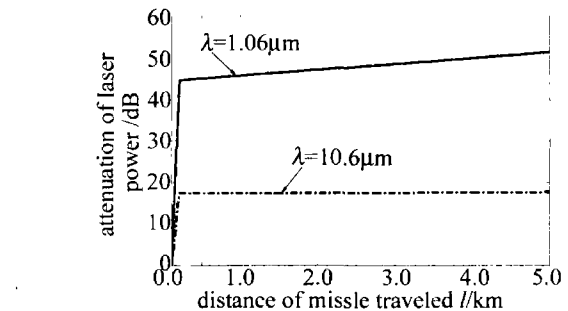


Fig. 4 The attenuation of laser power with the variation of distance

从图 4 中可以看出:在动能弹进入激光场后,随着发动机尾烟烟道变长,激光信号迅速衰减。原因是由于发动机尾烟的迅速增加,导致了激光的较大衰减。动能弹在飞行时,发动机尾烟也会消散。弹尾烟瞬时

烟道稳定在100m左右时,尾烟对激光的衰减为定值,激光的衰减变化主要来自于大气衰减。能见度较好的情况下,大气对激光的衰减随距离的变化不大,所以激光的衰减比较缓和。另外,经过对比1.06 $\mu\text{m}$ 和10.6 $\mu\text{m}$ 激光的衰减情况可以看出,该改进型的发动机推进剂对10.6 $\mu\text{m}$ 的激光衰减较小,因此,采用10.6 $\mu\text{m}$ 的激光更容易达到较大的制导距离。

### 3 结论

(1) 烟雾对激光的吸收随着复折射率虚部  $n_i$  的增大而变大;复折射率虚部不变时,随着激光波长增大,烟雾粒子对激光的吸收因子变小。

(2) 激光波长、烟雾复折射率虚部不变时,随着折射率实部的增大,烟雾对激光的衰减因子峰值呈现出增大的趋势;在复折射率实部不变的情况下,随着折射率虚部的增大,烟雾对激光的衰减因子峰值逐渐变小;复折射率不变时,随着激光波长变大,衰减因子峰值位置随着激光波长的增大向离子半径增大的方向移动,峰值大小不发生变化。

(3) 激光波长、复折射率虚部不变时,随着复折射率实部的变大,烟雾对激光的散射因子峰值逐渐变大;复折射率虚部增大时,衰减因子峰值变小;复折射率不变,烟雾粒子对各种波长的激光散射因子峰值不变,峰值出现的位置随着波长的增加出现在粒子半径较大的区间。

(4) 在进行工程设计时,要考虑到烟雾对激光制导信号造成的衰减,在设计允许的范围内,尽量减少烟道的长度,提高激光器的功率,以达到较大的制导距离。

#### 参 考 文 献

[1] JIANG Y S, LI X L, CHENG H T. Studies of basic component part and guided process for a certain modal of surmounted laser beam guided instrument[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(3): 354-356 (in Chinese).

- [2] LI S M, HUANG K Y, XU R F. A measuring system for the spatial laser wave field of a laser beam missile guidance system[J]. *Acta Armamentarii*, 2001, 22(4): 508-511 (in Chinese).
- [3] LI Y X, LIU J H, ZHAO Sh H, *et al.* The information field simulation technique of laser beam riding guidance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(4): 395-397 (in Chinese).
- [4] CHEN L, LI T, LI Q. Influence of smoke curtain on laser guidance weapon[J]. *Tactical Missile Technology*, 2004(4): 66-67 (in Chinese).
- [5] LIU G R, HUANG Sh X, HU F, *et al.* IR extinction effect of red phosphorous smoke screen[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2005, 22(7): 709-714 (in Chinese).
- [6] WANG X Y, PAN G P. Study and text of extinction coefficient of red phosphorous smoke to 10.6 $\mu\text{m}$  laser emission [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(6): 636-640 (in Chinese).
- [7] HUTT D L, THERIAUL J, LAROCHELLE V, *et al.* Effect of atmospheric extinction on laser rangefinder performance at 1.54 and 10.6 microns [C]//16th International Laser Radar Conference. Houston: NASA Langley Research Center, 1992: 581-584.
- [8] SORENSEN C M, FISCHBACH D J. Patterns in Mie scattering[J]. *Opt Commun*, 2000, 173(1/6): 145-153.
- [9] SUDIARTA I W, CHYLEK P. Mie scattering efficiency of a large spherical particle embedded in an absorbing medium[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2001, 70(4/6): 709-714.
- [10] WANG X Y, PAN G P. Extinction performance of superfine graphite smoke to 10.6 $\mu\text{m}$  laser emission [J]. *Proc SPIE*, 2006, 6150: 61502R.
- [11] FENG J Q, GAO Ch Q, LIU Y D, *et al.* Analysis of the characteristic of laser transmitting in smog [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(6): 883-885 (in Chinese).
- [12] SHI G Y. Atmospheric radiation [M]. Beijing: Science Press, 2007: 46-164 (in Chinese).
- [13] XIAO Y L, ZHAO X J, ZHOU X, *et al.* Investigation of 1064nm laser scattering characteristic in atmosphere by means of improved Mie algorithm [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(2): 217-230 (in Chinese).
- [14] WU J, YANG Ch P. The theory of optic transmit in the atmosphere [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005: 8-57 (in Chinese).
- [15] van de HULST H C. Light scattering by small particles [M]. New York: Dover Publications Inc, 1981: 1-199.
- [16] YANG H L, NIU Y X, SHEN X J, *et al.* Simulation of effect of smoke screen interference on laser [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5): 513-516 (in Chinese).