

文章编号: 1001-3806(2014)04-0542-04

## 大能量中空光束大气传输的仿真与实验比对研究

赵琦<sup>1</sup>, 樊红英<sup>1</sup>, 李轶国<sup>1</sup>, 蒋泽伟<sup>1</sup>, 胡绍云<sup>1</sup>, 赖庚辛<sup>1</sup>, 黄燕琳<sup>1</sup>, 耿旭<sup>2</sup>

(1. 西南技术物理研究所, 成都 610041; 2. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

**摘要:** 为了研究高能脉冲激光大气传输特性, 采用桶中功率和光斑半径作为远场光束质量评价标准, 与 800J 钕玻璃激光器的实验结果进行了比较, 仿真计算和实验中分别考虑了不同能见度、出射光能量和湍流强度下远场光斑半径的变化趋势; 对数值模拟与实验结果分别进行了分析和比对, 并对两者之间的误差做了详细分析。结果表明, 数值模拟可用于预测实验结果, 且对高能脉冲激光在大气中的应用和高能激光器的研制有指导意义。

**关键词:** 大气光学; 高能激光; 数值模拟; 相位屏

**中图分类号:** TN241 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.04.021

### Simulation and experimental study about hollow high energy laser propagating through atmosphere

ZHAO Qi<sup>1</sup>, FAN Hongyin<sup>1</sup>, LI Yiguo<sup>1</sup>, JIANG Zewei<sup>1</sup>, HU Shaoyun<sup>1</sup>,  
LAI Gengxin<sup>1</sup>, HUANG Yanlin<sup>1</sup>, GENG Xu<sup>2</sup>

(1. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China; 2. Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** To study the characteristics of high energy pulse laser propagating through turbulent atmosphere, the propagation of high energy laser in atmosphere was numerically simulated, and the far-field beam quantity in terms of the power in the bucket was compared with the experiment performed by using an Nd:glass laser at output of 800J. The error between the numerical simulation and experiment was analyzed in detail. The numerical simulation and experiments were studied under different conditions of visibility, output energy, and turbulence. It is shown that the numerical simulation can be used to predict the experimental results by a suitable choice of structure parameters of the phase screen. The results show the significance to guide the application and development of high energy pulse lasers.

**Key words:** atmospheric optics; high energy laser; numerical simulation; phase screen

## 引 言

高能激光束在大气传输是一个非常复杂的过程, 大气湍流和热晕会严重影响光束质量<sup>[1]</sup>。由于实验的局限性, 很早就有人提出用数值计算方法研究激光在大气中的传输<sup>[2]</sup>。对激光在大气湍流传进行数值模拟已有了较深入的研究<sup>[3-7]</sup>。本文中用桶中功率来评价远场光束质量, 采用 800J 非稳虚

共焦腔钕玻璃脉冲激光器进行了实验。使用自编 4 维激光传输程序, 针对大气对高能钕玻璃激光的影响做了计算模拟。对比实验和数值模拟, 分析了相位屏参量的选取对数值模拟结果的影响和实验改进的方向。所得结果对高能激光器的应用有实际意义。

## 1 计算模型

近轴近似下, 光束传输方程为:

$$2ik \frac{\partial A}{\partial z} = \nabla_{\perp}^2 A + k^2 \left( \frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right) A \quad (1)$$

式中,  $k$  为波数,  $A$  为慢变场振幅,  $z$  为传输距离,  $n_0$  为未扰动时的折射率,  $n$  为折射率。

等压近似下的流体力学方程为:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + v \cdot \nabla \rho_1 = - \frac{(\gamma - 1) \mu a I}{c_s^2} \quad (2)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61205016)

作者简介: 赵琦(1985-), 男, 工程师, 光学硕士, 主要研究高能激光在湍流大气中传输的理论和数值模拟计算及激光测量、应用研究。

E-mail: zhaohq2156@163.com

收稿日期: 2013-09-04; 收到修改稿日期: 2013-10-12

式中,  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ ,  $c_p$  和  $c_v$  分别为比定压热容和比定容热容,  $t$  是时间变量,  $\mu$  是介质中的磁导率,  $v$  是流体速度,  $c_s$  是实际声速,  $a$  是光束直径,  $I$  是光强,  $\rho_1$  是流体密度。采用差分法进行处理<sup>[8]</sup>可以得到:

$$\rho_1(x, y, z, t + \Delta t) = \rho_1(x - v\Delta t, y, z, t) - \left(\frac{\beta}{c_p}\right)\alpha[2I(x, y, z, t) - I(x, y, z, t - \Delta t) + I(x - v\Delta t, y, z, t)] \quad (3)$$

式中,  $\beta$  是膨胀系数。光强为:

$$I(z) = I_0 \exp[-\sigma(\lambda)z] \quad (4)$$

式中,  $I_0$  是入射光束光强,  $\sigma(\lambda)$  是衰减系数。

采用相屏法对大气湍流影响进行数值模拟<sup>[9]</sup>, 设:

$$\tilde{A} = \exp\left[-\frac{i}{4N_F}\nabla\eta\nabla_{\perp}^2\right]\exp\left(-iN_l\int_{z_n}^{z_{n+1}}\rho d\eta\right)\times \exp\left[-\frac{i}{4N_F}(\nabla\eta\nabla_{\perp}^2)\tilde{A}^n\right] \quad (5)$$

式中,  $\tilde{A}$  为对(1)式、(2)式无量纲化处理后得到的光场分布,  $\eta = x/z$ ,  $z_{n+1} = z_n + \Delta z$ ,  $\Delta z$  是传输距离步长,  $N_F = ka^2/z_f$  为非涅耳数,  $z_f$  为聚焦光学系统焦距,  $N_l = kz_f(n_0 - 1)\{[\sigma(\lambda)(\gamma - 1) \times aP]/[\rho_0 C_s^3 \pi a^2]\}$  为扭曲参量,  $P$  为发射功率。激光大气束传输可分 3 步计算, 第 1 步为传输  $\Delta z/2$  的自由空间衍射; 第 2 步, 当光束传到一个相位屏时, 将相应的相位扰动叠加在波前上; 第 3 步仍为传输  $\Delta z/2$  的自由空间衍射。

采用位相相关函数和折射率扰动谱密度来反演相位屏, 利用傅里叶逆变换离散后得到需要构造的离散相位屏<sup>[3]</sup>, 总体设计思路见图 1。

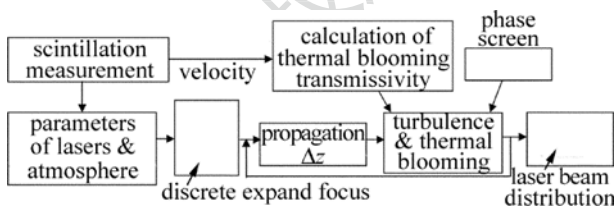


Fig. 1 General design scheme

## 2 实验

实验中采用 800J 非稳虚共焦腔钕玻璃脉冲激光器。激光器输出波长  $\lambda = 1.055\mu\text{m}$ , 脉宽为 3ms, 出口口径  $d = 360\text{mm}$ 。激光束先通过扩束比为 8 的扩束器, 然后被焦距  $f = 2700\text{m}$  的透镜聚焦, 再经衰减片后打到距激光器出口 2750m 的靶面上, 实验原

理图如图 2 所示。

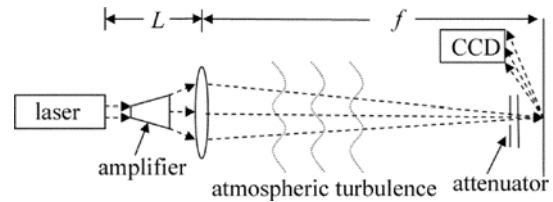


Fig. 2 Schematic illustration of experimental set-up

实验在海拔 3000m 的高原进行, 大气能见度采用多个 FS11 前向散射能见度仪和一个透射式能见度仪测量得到, 如图 3 所示。

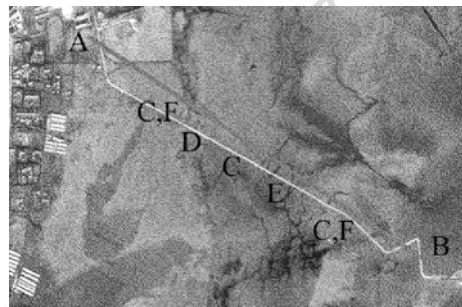


Fig. 3 Setup of experiment, A—transceiver; B—receiver; C—FS11; D—the device for turbulence measurement; E—transmissometer; F—anemometer

大气折射结构率常数通过一个基于光闪烁法的光强起伏测量装置获得。通过美国 Young 公司的超声风速仪测量空间 3 维矢量风速和温度的时间序列, 再根据“冻结湍流”假说通过平均风速将时间变量转化成空间变量, 从而根据超声风速仪所测的数据直接算出湍流尺度湍流内尺度  $l_0$  和外尺度  $L_0$ <sup>[10]</sup>, 其中  $l_0 = 0.9\text{cm}$ 。平均横向风速  $v_0$  采用 2 个测风仪取平均后获得。

成像于 CCD 靶面的激光光斑图像经高速的数据采集, 传输到计算机进行处理, 实现了光斑图像光强分布的实时采集, 如图 4 所示。采得光斑图像后进行合理的还原, 利用下式求出桶中功率 (power in bucket, PIB)<sup>[11]</sup>:

$$P_b = \frac{\int_{-b}^b I(x, L) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} I(x, L) dx} \quad (6)$$

式中,  $b$  是光斑长度。桶中功率是评价强激光在远场光束质量的重要标准, 通过它可比较数值模拟与实验结果的一致性, 并可进一步检验参量选择的合理性。实验结果见图 5, 图中虚线为实验中所得桶中功率值, 实线表示算术平均值, 横坐标的  $R$  是光斑直径。

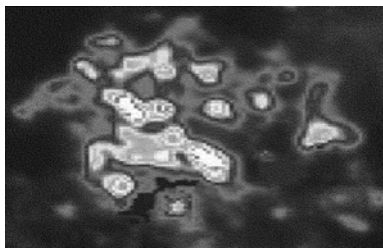


Fig. 4 Intensity distribution

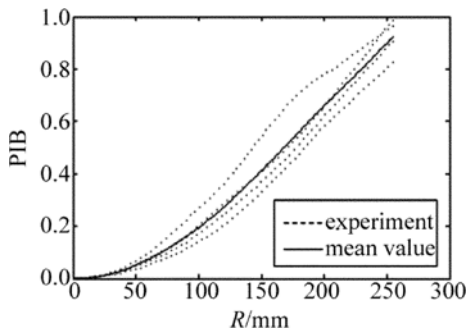


Fig. 5 Power in the bucket measured in the experiment

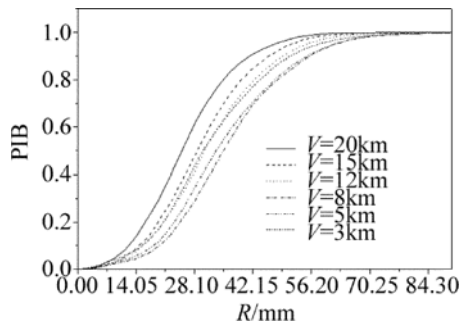


Fig. 6 Visibility vs. laser power in the bucket

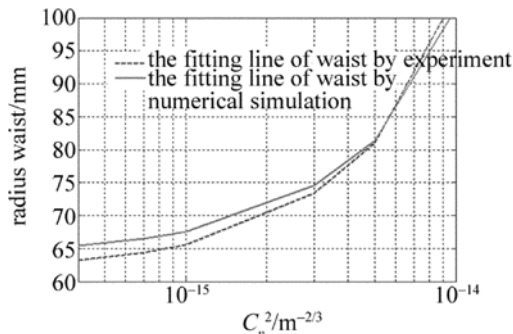


Fig. 7 Waist vs. different  $C_n^2$

### 3 实验结果与数值模拟的比较

在数值模拟中,设在近场非虚共焦稳腔钕玻璃脉冲激光器输出为一被均匀球面波照亮的圆环,可构造空心平顶高斯光束模型描述:

$$E(x, y, z = 0) = \exp\left[-\frac{(N+1)(x^2+y^2)}{w_0^2}\right] \times \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[\frac{(N+1)(x^2+y^2)}{w_0^2}\right]^n - \exp\left[-\frac{(N+1)(x^2+y^2)}{\varepsilon^{1/2} \cdot w_0^2}\right] \times \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[\frac{(N+1)(x^2+y^2)}{\varepsilon^{1/2} \cdot w_0^2}\right]^n \quad (7)$$

式中,  $\varepsilon$  为遮拦比,取  $\varepsilon = 1/2$ ,  $w_0$  是光束束腰半径,  $N$  为空心平顶高斯光束阶数,取  $N = 10$ 。相位屏的构造对网格宽度  $\Delta x$  以及薄层厚度  $\Delta z$  这几个参量的选取都需要满足抽样定理的要求,并且要满足光传递函数的边界条件<sup>[12-13]</sup>。计算使用为毫秒脉冲激光,重复频率为 5Hz,在(3)式中的  $\Delta t$  取值为 1ms,在仿真计算时在脉冲间隔过程中将光强值  $I(x, y, z, t)$  取为 0。

图 6 为数值仿真结果,实验结果与仿真结果的误差在 15% 以内。由图可知,随着大气能见度  $V$  的降低,大气衰减系数增大,光斑直径增大,光束扩展增大,桶中功率逐渐下降,光束聚焦性减弱,光束质量变差。

激光束通过湍流大气后,其它光束质量参量随

着折射率结构常数  $C_n^2$  增加的变化如图 7 所示。当湍流较弱时,光束半径增加缓慢,但是随着湍流的增强,当湍流增加到不小于  $5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$  时,光束环围功率半径随着湍流的增强而增大。说明在湍流增大到一定程度以后,影响激光束传输的各种大气参量中,湍流起主要作用。图中数值模拟结果与实验结果比较接近,充分说明了数值模拟仿真软件的正确性和指导性,两者主要误差来源包括湍流的不均匀性和仿真中湍流大小尺度的赋值。

从图 8 中可以看到,随着激光输出功率的增加,光斑尺寸逐渐增大,由于横向风造成的月牙形分布逐渐消失,最终在输出功率非常高时光束彻底破碎。数值模拟与真实光束的桶中功率有相似的变化趋势,因而可用以预测实验结果。但数值模拟比实验测得结果有更好的远场光束质量,这是因为在数值

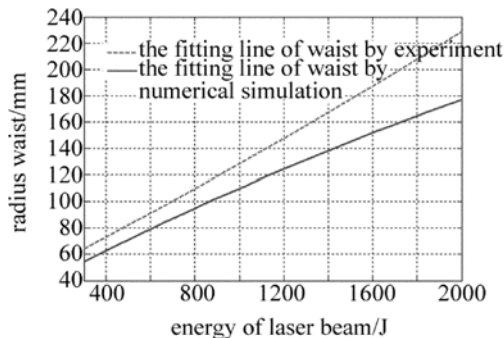


Fig. 8 Comparison of the numerically calculated and experimentally measured radius at different laser energy



模拟模型中并没有计算内光路对光束质量带来的影响,内光路的热效应和像差都会使远场光强分布出现畸变,使光束质量变差<sup>[14]</sup>。但作者的实验结果表明,这种误差是在允许的范围之内。

相同的测量条件下,局部湍流强度的微小变化,温度的小量起伏等原因,都会导致测量值产生不可预测的变化。对于这样的变化,可以认为是偶然误差进行分析。而数值模拟所得到的值的真实性可以通过与实验结果的算术平均值的标准偏差估计值公式判断。

图 9 中  $S$  是标准偏差估计值<sup>[11]</sup>:

$$S = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n v_i^2 / (n - 1)}}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

式中,  $n$  是实验测量次数,  $v_i$  是残余误差:

$$v_i = x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

式中,  $x_i$  是单次测量值。

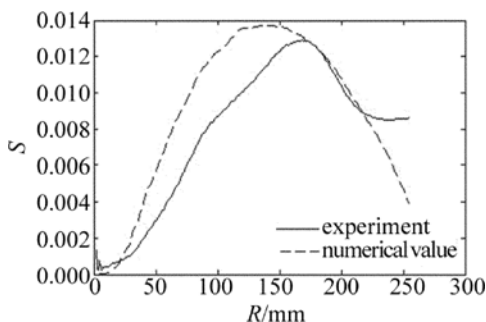


Fig. 9 The estimated standard error of the arithmetical mean of the PIB

从图 9 可发现,数值模拟的桶中功率值与实验得到的平均值的标准偏差值接近于实验的标准偏差值,这说明数值模拟与实验测量值之间的误差基本等同于实验测量值之间的偶然误差,表明数值模拟能表现高能激光在远场桶中功率的变化趋势<sup>[15]</sup>。

#### 4 结 论

高能激光大气传输的数值模拟要考虑到大气衰减、大气湍流和热晕的作用,在实际的模拟过程中需要对相位屏的构造、位置、大小等参量进行合理的选取。对数值模拟得到的桶中功率通过与实验对比可以判断相位屏构造的正确性和程序的合理性,并且

分析数值模拟偏差的物理原因。通过数值模拟可以对高能激光的实验有预测和指导作用。

#### 参 考 文 献

- [1] ZHAO Q, ZHONG M, LÜ B D. Experimental study of laser beam wander in atmosphere [J]. Laser Technology, 2010, 34 (4) : 532-534 (in Chinese).
- [2] FLECK J A. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere [J]. Applied Physics Letters, 1976, 10(2) : 129-160.
- [3] LIN Ch, SHEN X J, YANG Sh X. Simulation analysis of random phase mask with spatial light modulator [J]. Laser Technology, 2013, 37(3) : 365-370 (in Chinese).
- [4] WANG L M, ZHANG Y J, LI H B, et al. Effect of turbulence on laser absorption signal and its improvement method [J]. Laser Technology, 2012, 36(5) : 670-673 (in Chinese).
- [5] HUANG Y B, WANG Y J. Choosing computing parameters in the numerical simulation of laser propagation effects [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(1) : 23-27 (in Chinese).
- [6] WU J, YANG Ch P, LIU J B. Optics propagation in the atmosphere [M]. Beijing: Beijing University of Posts & Telecommunications Press, 2005: 72-77 (in Chinese).
- [7] WANG Y J, WU Y. Folding FFT modification for laser propagation in the turbulent atmosphere [J]. High Power laser and Particle beams, 1992, 4(4) : 581-587 (in Chinese).
- [8] WAN M, SU Y. Numerical computation and experiment of laser thermal blooming and compensation [J]. Infrared and Laser Engineering, 1996, 25(1) : 51-59 (in Chinese).
- [9] TAO X Y, JI X L. Numerical simulation of the thermal effect in a beam control system [J]. Laser Technology, 2003, 27(6) : 514-516 (in Chinese).
- [10] MEI H P, WU X Q, RAO R Zh. Measurement of inner and outer scale of atmospheric optical turbulence in different areas [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(3) : 362-366 (in Chinese).
- [11] FAN Zh G. Measuring and testing technique of photo electricity [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 101-120 (in Chinese).
- [12] RAO R Zh. Light propagation in the turbulent atmosphere [M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 2005: 98-127 (in Chinese).
- [13] LI J Ch. The laser diffraction and thermal effect [M]. Beijing: Science Press, 2008: 237-242 (in Chinese).
- [14] FENG X, HUANG Y B. Numerical mode for high energy laser indoor transmission [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(9) : 1124-1126 (in Chinese).
- [15] LI X Q, ZHAO Q, JI X L. Confirmation of the quadratic approximation of Rytov phase structure function and the approximation of complex Gaussian-function expansion of hard-edge apertures [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12) : 1201002 (in Chinese).