

聚焦光束热晕效应相位补偿定标规律研究

张鹏飞 范承玉 乔春红 马慧敏 张京会 王海涛 王英俭

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 非线性热晕效应对高能激光大气传输有重要的影响, 一个可以用来预测和评价高能激光在不同传输条件下自适应光学系统补偿效果的定标规律对实际的工程应用有重要的意义。利用激光大气传输四维仿真程序, 通过仿真不同空间带宽的自适应光学系统, 在均匀路径下, 对不同发射口径、不同传输距离聚焦光束稳态热晕的相位补偿进行了数值计算。结果表明, 自适应光学系统空间带宽对聚焦光束热晕效应的相位补偿影响差别不大, 使用广义畸变参数 N 可以较好地定标其相位补偿效果。

关键词 自适应光学; 热晕效应; 相位补偿; 定标规律

中图分类号 TN012 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0213002

Analysis of Scaling Laws for Phase Compensation of Focused Beam under Thermal Blooming Conditions

Zhang Pengfei Fan Chengyu Qiao Chunhong Ma Huimin Zhang Jinghui
Wang Haitao Wang Yingjian

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract Thermal blooming has great influence on high power laser propagation in the atmosphere. It is very important to find a scaling law to evaluate the performance of adaptive optics compensation for the high power laser propagation in the atmosphere. Adaptive optics system with different spatial bandwidths has been simulated and phase compensation for focused beam under thermal blooming with different transmitter apertures and propagation lengths has been numerically calculated by four-dimensional propagation codes. The results show that the spatial resolution of adaptive optics system has little influence on the target beam quality. The target beam quality can be scaled by the thermal distortion parameter N .

Key words adaptive optics; thermal blooming; phase compensation; scaling law

OCIS codes 010.1080; 010.1285

1 引言

高能激光在大气中传输受一系列的线性和非线性效应的影响, 尤其是非线性热晕效应, 使光束质量严重退化, 影响高能激光传输效率。理论和实验表明^[1], 对于大气湍流效应引起的光束抖动、漂移与扩展, 使用自适应光学系统的实时补偿, 可以明显改善光束质量, 然而对于非线性热晕效应的相位补偿而

言, 由于热晕引起的相位畸变中含有大量的散焦成分, 对其进行相位补偿会进一步聚焦发射光束, 从而导致更为严重的热畸变, 这种正反馈机制严重限制了自适应光学系统对热晕效应的补偿能力^[2]。

目前关于热晕效应相位补偿的研究已经有许多规律性的认识^[2~7], 但是由于热晕相位补偿的复杂机制以及自适应光学系统的复杂性, 尚无简单的解

收稿日期: 2011-09-01; 收到修改稿日期: 2011-10-25

基金项目: 中国科学院合肥物质科学研究院知识创新工程青年人才基金(Y03Rc21121)资助课题。

作者简介: 张鹏飞(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事激光大气传输与自适应光学校正方面的研究。

E-mail: zhp0530@163.com

导师简介: 王英俭(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光大气传输与自适应光学校正等方面的研究。

E-mail: wyj@aiofm.ac.cn

析结果可供使用。为此,国内外众多研究人员都致力于寻求定量计算和评价热晕相位补偿对激光工程应用影响的定标关系^[2]。本课题组使用柔形镜对准直光束水平路径下的传输进行了数值模拟^[7],得出使用定标参数可以较好地描述准直光束相位补偿定标规律。但是,聚焦光束与准直光束有不同的传输特性,其描述热晕效应强弱的参量不同,而且热晕相位补偿机制也有明显差异,准直光束的热晕相位补偿对自适应光学系统的空间带宽有很强的依赖性^[8]。因此,准直光束的定标参数已不适用于聚焦光束,需要进一步研究。

本文利用激光大气传输四维仿真程序,在均匀路径下,对不同传输条件及不同自适应系统空间带宽条件下聚焦光束稳态热晕的相位补偿进行了数值模拟。

2 数值模型

自适应光学系统主要包括波前斜率探测、波前复原和波前控制三个部分^[9]。为了排除 Shack-Hartmann 探测误差对热晕校正效果的影响,本文仿真了理想波前探测器,网格点 (i, j) 位置处沿 x, y 方向的斜率可表示为

$$\begin{cases} T_x = \arg[U^*(i, j)U(i+1, j)] \\ T_y = \arg[U^*(i, j)U(i, j+1)] \end{cases}, \quad (1)$$

式中 U 为光场复振幅, $*$ 为复共轭算符, \arg 为辐角运算符, T_x, T_y 为沿 x, y 方向斜率。

波前复原可用矩阵简单表示为^[9]

$$\phi = B^{-1}T, \quad (2)$$

式中 ϕ 为波前矩阵, T 由 Shack-Hartmann 得到的斜率矩阵, B 为波前重建矩阵, B^{-1} 为波前重建矩阵的广义逆, 广义逆的计算可以通过最小二乘法完成。

对于连续表面分立驱动变形镜系统, 波前重建广义逆矩阵可以表示为^[7]

$$B^{-1} = R_n(R_n)_{x,y}^{-1}, \quad (3)$$

式中 R_n 为响应函数矩阵, $(R_n)_{x,y}$ 为响应函数沿 x, y 方向的微分, $(R_n)_{x,y}^{-1}$ 为 $(R_n)_{x,y}$ 的广义逆矩阵。变形镜的模拟使用的高斯型响应函数为

$$R_n(x, y) = \exp\left\{\ln p \frac{[x - x_c(n)]^2 + [y - y_c(n)]^2}{r_d^2}\right\}, \quad (4)$$

式中 $x_c(n), y_c(n)$ 表示第 n 个驱动器的位置坐标, r_d 为驱动器的平均间距, p 为交联值。

3 仿真结果及分析

利用激光大气传输的四维模拟程序, 进行数值

模拟, 主要计算参数设置如下: 主激光为聚焦平台光束, 波长 $1.315 \mu\text{m}$, 发射口径 0.6 m 和 1.2 m , 信标为合作信标, 波长同主激光, 不考虑发射光学系统像差; 传输路径为水平均匀大气, 风速 2.0 m/s , 吸收系数 0.033 km^{-1} , 传输距离 5 km 和 10 km ; 激光传输求解近轴标量波动方程^[1], 采用相位屏方式模拟, 横向网格数为 256×256 , 网格间距为 0.01 m , 相位屏数为 50 。另外, 仿真中不考虑由于自适应光学系统的有限时域带宽造成的时间延迟。

波前复原使用直接斜率法, 分别模拟了 $19, 37, 61, 127$ 单元的变形镜, 排布方式为三角形排布, 交联值为 0.15 。

对于聚焦光束传输而言, 通常引入广义热畸变参数 N 定标参量来描述热晕效应的强弱, 可表示为^[10,11]

$$N = N_c f(N_E) q(N_F), \quad (5)$$

式中 $N_E = \alpha_i L$, L 为传输距离。大气消光和聚焦因子 $f(N_E), q(N_F)$ 分别为

$$f(N_E) = (2/N_E^2)[N_E - 1 + \exp(-N_E)], \quad (6)$$

$$q(N_F) = \left\{ 2N_F^2 / (N_F - 1) \left[1 - \left(\frac{\ln N_F}{N_F - 1} \right) \right] \right\}. \quad (7)$$

本文使用的广义热畸变参数 N 没有考虑光束扫描的影响。

在数值计算中, 激光大气传输相位补偿的效率通常用光斑扩展倍数、峰值斯特雷尔比来评价。光斑扩展倍数 β 定义为焦平面上长曝光光强分布环质心 63.2% 环围能量半径与真空传输条件下 63.2% 环围能量半径之比。峰值斯特雷尔比 S_p 定义为焦平面位置处, 长曝光光斑峰值强度与真空传输条件下艾里斑峰值强度之比。

图 1、2 分别给出了不同传输条件, 不同空间带宽的自适应光学系统补偿下, 峰值斯特雷尔比 S_p 和 63.2% 环围能量扩展倍数 β 随广义热畸变参数 N 的变化关系。图中曲线是使用非线性最小二乘拟合得到的。 S_p 的拟合表达式为

$$S_p = 1 / (1 + 0.104N^{1.49}), \quad (8)$$

β 随 N 的拟合关系为

$$\beta = 1 + 0.34N - 0.45N^{0.23}. \quad (9)$$

从图 1、2 可以看出, 不同空间带宽对热晕效应的补偿影响差别不大。这是因为, 当聚焦光束水平传输时, 光斑半径从发射位置到目标位置逐渐减小, 热畸变主要产生于近焦点位置, 由于光斑半径较小, 整束热晕起主要作用, 与空间带宽密切相关的小尺度热晕^[3,4]并没有完全发展, 造成空间带宽对热晕

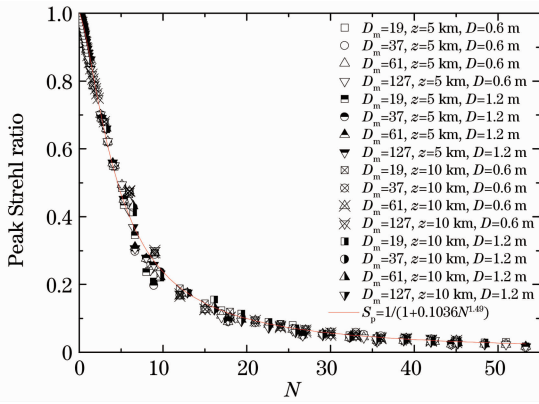


图1 峰值斯特雷尔比 S_p 随广义热畸变参数 N 变化关系 (D_m 表示变形镜单元数, z 为传输距离, D 为发射口径)
 Fig. 1 Peak Strehl ratio S_p versus thermal distortion parameter N (D_m , z and D represent the number of deformable mirror actuators, propagation distance and aperture diameter, respectively)

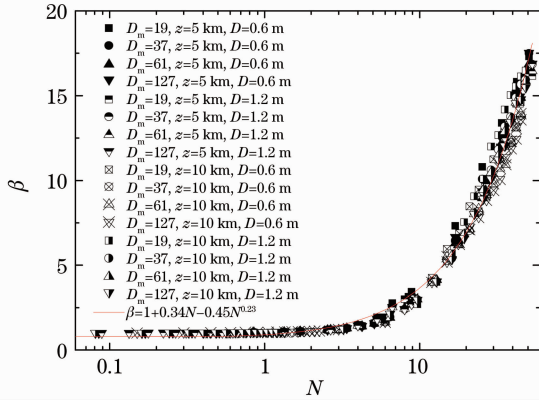


图2 光斑扩展倍数 β 随广义热畸变参数 N 变化关系
 Fig. 2 Energy beam spreading radius β versus thermal distortion parameter N

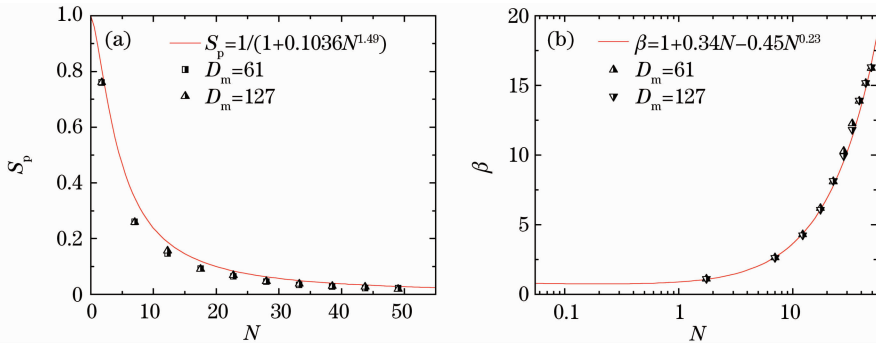


图3 光束质量随广义热畸变参数 N 变化关系
 Fig. 3 Target beam quality versus thermal distortion parameter N

5 结 论

在水平传输场景下,对不同传输条件及不同自适应系统空间带宽条件下聚焦光束稳态热晕的相位

效应相位补偿的影响不大。另外,从非等晕的角度来看,由于热晕效应相位补偿与自身光强的正反馈作用,使得焦点向发射孔径位置移动^[12],造成信标光与发射光束之间的失配,成为热晕效应相位补偿的主要限制因素,因此空间带宽对热晕效应的相位补偿的影响不太明显。

4 定标规律有效性分析

定标规律是在特定的吸收与风速条件下得到的,为了验证定标规律在不同吸收与风速下的有效性,改变吸收和风速进一步开展数值模拟。图3给出了传输距离 10 km,吸收 0.013 km^{-1} ,风速 4 m/s 时,不同自适应光学系统补偿下目标位置处光束质量随广义热畸变参数的变化关系,从图中可以看出,定标规律可以很好地描述均匀路径上不同大气参数条件和不同自适应光学系统补偿下目标位置处光束质量。

另外,发射光束类型也是对非线性热晕效应有重要影响的因素之一,当无自适应光学系统实时补偿时,高斯光束与平台光束有截然不同的传输效果,但是当自适应光学系统闭环时,高斯光束的传输效果问题也是工程应用中重要的研究内容,因此对聚焦高斯光束在水平均匀路径上的传输效果进行了数值模拟。图4给出了聚焦高斯光束目标位置处光束质量随 N 的变化关系,其计算参数为发射孔径 1 m,传输距离 5 km,吸收 0.033 km^{-1} ,风速 2 m/s。从图中可以看出,对高斯光束热晕而言,其相位补偿也是不依赖于自适应光学系统空间带宽的,定标规律可以较好地应用于高斯光束。

补偿进行了数值模拟。结果表明,对于均匀路径的高能激光传输,不同空间带宽对热晕效应的相位补偿的影响差别不大,其补偿效果与广义热畸变参数

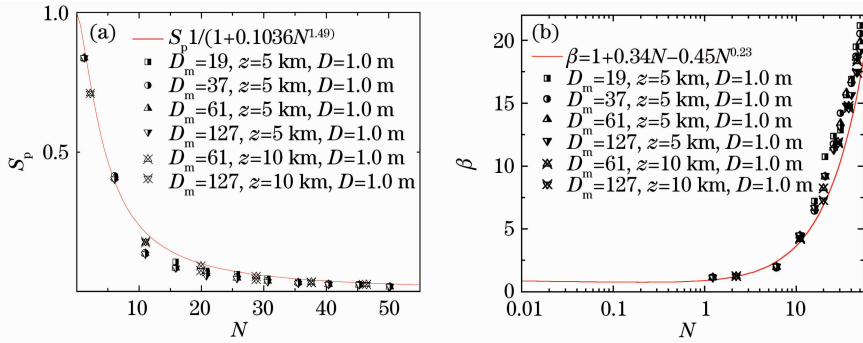


图 4 聚焦高斯光束的光束质量随广义热畸变参数 N 变化关系

Fig. 4 Target beam quality versus thermal distortion parameter N for focused Gaussian beam

N 之间满足简单的拟合关系。峰值斯特雷尔比 S_p 随广义热畸变参数 N 的拟合关系为 $S_p = 1/(1 + 0.1036N^{1.49})$ 。光斑扩展倍数 β 随 N 的拟合关系为 $\beta = 1 + 0.34N - 0.45N^{0.23}$ 。本文仅考虑了空间带宽对热晕补偿的影响,自适应光学系统时间带宽对其的影响还需要进一步分析。

参 考 文 献

- 1 Wang Yingjian. Some Study on the Laser Propagation in the Atmosphere and Its Phase Compensation [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1996. 1~10
王英俭. 激光大气传输及其相位补偿的若干问题探讨[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 1996. 1~10
- 2 Qiao Chunhong, Fan Chengyu, Huang Yinbo *et al.*. Scaling laws of high energy laser propagation through atmosphere[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 433~437
乔春红, 范承玉, 黄印博 等. 高能激光大气传输的定标规律[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 433~437
- 3 T. J. Karr. Atmospheric Effects on Laser Propagation [R]. NASA. STI/Recon Technical Report N, 89: 21237, 1989
- 4 Jan Herrmann. Properties of phase conjugate adaptive optical systems[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(3): 290~295

- 5 T. J. Karr. Thermal blooming compensation instabilities[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1989, **6**(7): 1038~1048
- 6 Jonathan F. Schonfeld. Linearized theory of thermal blooming phase compensation instability with realistic adaptive optics geometry[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, **9**(10): 1803~1812
- 7 Huang Yinbo, Wang Yingjian, Rao Ruizhong *et al.*. Numerical calculation of the scaling parameter for adaptive optics compensation for thermal blooming effects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12): 1461~1464
黄印博, 王英俭, 饶瑞中等. 热晕效应相位补偿定标参量的数值分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(12): 1461~1464
- 8 Wang Yingjian, Wu Yi, Gong Zhiben. Adaptive optics phase compensation for nonlinear thermal blooming[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(10): 1418~1422
王英俭, 吴毅, 龚知本. 非线性热晕效应自适应光学位相补偿[J]. *光学学报*, 1995, **15**(10): 1418~1422
- 9 Robert K. Tyson. Principles of Adaptive Optics[M]. Boston: Academic Press, 1991. 236~255
- 10 D. C. Smith. High-power laser propagation; thermal blooming [J]. *Proc. IEEE*, 1977, **65**(12): 1679~1715
- 11 F. G. Gebhardt. High power laser propagation [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(6): 1479~1493
- 12 Vladimir P. Lukin. Influence of wavefront dislocations on phase conjugation instability with thermal blooming compensation[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 1997, **6**(1): 103~107

栏目编辑: 谢 婧