

聚焦光束模拟湍流效应自适应光学补偿实验*

吴 毅 王英俭 龚知本 汪 超 候再红

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘 要 报道了聚焦光束传输模拟湍流效应校正的实验研究。描述了短曝光情况下, 补偿效率积分概率的意义。给出了本套自适应光学系统补偿效率与变形镜驱动器在光束发射直径上的平均间距和湍流相干长度的系综定标关系。

关键词 湍流效应, 自适应光学补偿。

1 引 言

自适应光学技术对光波传输湍流效应造成的相位畸变进行补偿是提高光束传输性能, 改善成象质量的主要手段, 已广泛应用于许多光学工程研究领域。其中在激光传输湍流效应补偿实验研究中具有代表性的是 MIT 林肯实验室的 69 单元大气补偿实验(ACE)和 241 单元短波长自适应技术(SWAT)^[1, 2]。理论研究表明, 自适应光学对激光束通过大气传输湍流效应的补偿是有效的。在系综平均情况下, 其位相补偿效率与湍流强度之间存在一定的定量关系。然而, 由于湍流效应具有复杂的时空变化随机特征, 从实验测量的意义上讲, 仅用平均效应来描述是不充分的。加之实际大气湍流效应的不可控和不具重复性的特征, 也给定量描述位相补偿效率与湍流强度之间的关系带来很多困难。为此本文利用湍流池, 在室内可控可重复的条件下, 进行了模拟及定标大气湍流效应补偿的实验研究。文中所给出的主要结果是短曝光情况下补偿效率积分概率的意义; 变形镜驱动器间距和湍流相干长度对补偿效率影响的系综定标关系。所用自适应光学系统是中科院光电所研制的 37 单元自适应光学系统。

2 实验系统及实验方法

2.1 实验光路及自适应光学系统

图 1 是聚焦光束模拟湍流效应补偿实验系统示意图。He-Ne 光束经平行光管 T₁ 被扩展为 100 mm 直径的准直平面波, 由自适应光学系统的变形镜 DM 和高速倾斜镜 TM 反射到倒置的扩束镜 T 上, 再将光束缩小到 $\phi 24$ mm 后, 通过湍流池中心部分传输, 经分光镜 S₁ 反射到达接收端, 由 CCD 像机和图像 A/D 转换采样光强分布, 送计算机计算光束质量因子斯特列尔(Strehl)比。信标光也采用 He-Ne 激光, 由透镜 L 会聚于主激光焦点处后, 与主激光同

* 本课题由国家高技术 863 激光技术领域资助。

光路反向传输通过湍流池, 扩束镜 T 截取其中心 $\phi 24$ mm 并扩束到 $\phi 100$ mm 的准直光束, 经倾斜镜、变形镜到分光镜 S 反射到哈特曼(Hartmann)波前传感器。探测到的波前斜率被送到高速波前处理机, 经计算处理得到控制信号, 由高压放大器放大驱动变形镜 DM 和高速倾斜镜 TM, 实现在主激光上加载湍流效应波前畸变的共轭波前。完成对主激光经湍流池传输后的波前补偿。自适应光学系统单元数为 37, 变形镜除 37 个主动驱动器外, 边缘还有 18 个辅助驱动器(不参与波前复原运算)。哈特曼波前传感器子透镜阵列数目也为 37, 其中 Reticon 像素为 128×128 点阵, 采样速率为 380 frames/s。高速波前处理机采用并行计算, 完成一次与哈特曼传感器采样帧频同步的波前复原和控制运算延时为 0.6 ms。波前复原算法采用直接斜率法。控制带宽 f_c 为 30 Hz。

2.2 湍流模拟池

湍流模拟池的体积为 $1.0 \times 0.5 \times 0.5$ m, 介质为去离子水, 底部通过油进行二次加热, 上表面由循环水冷却。自动控制系统控制两面温差, 湍流发展稳定后的温差起伏范围约 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。调节温差即可调整湍流强度。湍流池横断面中心部分均匀区域为 0.2×0.2 m²。湍流谱为 Von-Karman 谱(到达角起伏满足 $-5/3$ 指数谱)。湍流内、外尺度分别为 1.0 mm 和 90 mm, 因此 $\phi 24$ mm 直径聚焦光束位于湍流惯性区。

2.3 哈特曼波前传感器静态中心定标

哈特曼传感器的静态中心是波前斜率探测时的参考点, 任何偏离该中心的测量值, 即为波前畸变在子孔径上的平均斜率。本文采用相对定标法获得这一参考点: 以平面反射镜代替变形镜, 使信标光通过静态光学系统入射到哈特曼传感器, 求取各子孔径光斑中心。在波前探测中任何偏离这一中心的子光斑中心即是湍流波前畸变在子孔径上的平均斜率, 此时系统闭环校正的对象只是湍流波前。也就是说, 系统闭环校正的最佳状态是静态光学系统(有一定像差)的衍射极限。这一定标法有两个优点: 一是可以不受信标光与主激光静态波前差异的影响, 为求取补偿效率相对斯特列尔比提供了条件(下一节介绍), 二是当实际变形镜的校正量有限时, 可以将其完全用于湍流波前的校正。同时突出了有限单元变形镜和湍流相干长度对补偿效率的影响。

2.4 光束诊断

光束诊断即是获取光束质量因子斯特列尔比的测量。用帧频 25 Hz 的 CCD 像机记录焦点光斑, 128×128 量化像素点采样窗口的采样速率为 14 frames/s。在哈特曼零点相对定标方式下, 将变形镜自身面形进行静态校正时, 主激光束焦点上占总能量 84% (标准光衍射爱里斑能量与总能量比) 的光斑环围能量半径被定义为相对斯特列尔比能量积分半径, 此时的 CCD 量化像素半径为 3.5。在湍流动态波前校正时该半径域内的环围能量与总能量之比以 0.84 规一化后即实验测量相对斯特列尔比。

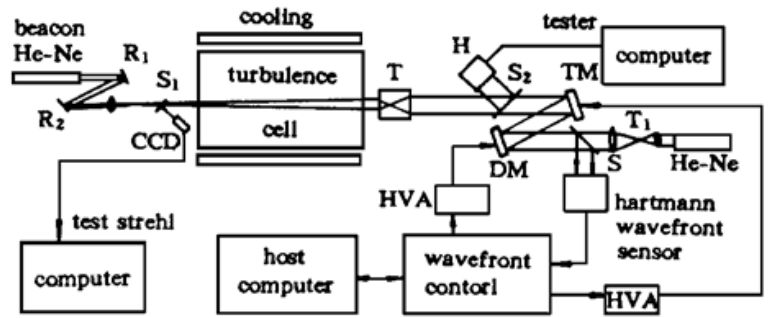


Fig. 1 Compensation experiment setup of focused beam in Turbulence cell

T: expander, S: splitter, R: reflector, TM: tilt mirror, DM: deformable mirror, H: arriavel-angles sampler, HVA: high voltage amplifier

2.5 湍流效应光束到达角起伏测量

湍流效应光束到达角起伏的测量是获得反映湍流强度量(湍流相干长度)的第一步。在信标光进入自适应光学系统前进行分光(图1中的 S_2),使其进入另一套Hartmann波前传感器,测量光束的到达角起伏,在一定的时间长度上统计其起伏方差来计算湍流的相干长度。具体测量方法是:光束到达角 $\alpha = r/f'$, $f' = Df/d_1$ 为等效焦距。式中 f 为Hartmann传感器微透镜焦距90 mm, d_1 是微透镜列阵直径5.6 mm, $D = 24$ mm。 $r = qN$ 为子光斑中心的偏移量,其中 q 为CCD像素点间距20 μm (DALSA/CCD像机), N 为偏移量像素点数。所以,到达角起伏方差可以用量化像素方差 σ_N^2 通过关系 $\sigma_\alpha^2 = (q/f')^2 \sigma_N^2$ 来测量。湍流横向相干长度的测量值可以表述为

$$r = 0.364^{0.6} D' \left(\frac{\lambda}{D'}\right)^{1.2} (\sigma_\alpha^2)^{-0.6}$$

其中 D' 为光束被子孔径分割的直径, $D' = 24 \text{ mm}/7$ 。光束质量斯特列尔比和湍流效应光束到达角起伏的采样,在聚焦光束湍流效应的补偿实验中是同步进行的(即同一湍流随机状态的开/闭环光学参数的同步采样),所以补偿效率斯特列尔比与湍流相干长度的统计关系条件是满足的。

3 实验结果讨论与校正误差分析

3.1 短曝光情况下补偿效率积分概率的意义

由于对补偿效率斯特列尔比和相干长度的实验测量总是在有限的时间间隔内进行的,尤

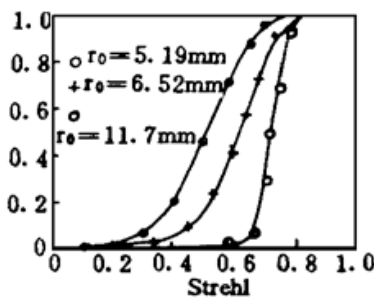


Fig. 2 Integral probability of Strehl ratio in three cases of turbulent strength

其是在短曝光条件下,测量不可能满足对随机过程采样的各态历经。测量所得到的斯特列尔比与相干长度必然是围绕其各态历经系综量,满足一定统计规律而起伏的随机量^[3]。图2给出了短曝光情况下补偿效率斯特列尔比的积分概率。三条曲线分别对应于不同宏观湍流强度即不同相干长度系综量(5.19, 6.52和11.7/mm), C_n^2 分别为 4.1×10^{-10} , 2.8×10^{-10} 和 $10^{-10}/\text{m}^{-2/3}$ 。从图中可以看到,1)

湍流强度弱时,补偿效率斯特列尔比的分布区域窄,也就是说对应的补偿效率较为稳定,当湍流强度强时,上述情况则相反。2) 当要求某一概率以上补偿效率斯特列尔比出现的值时,不同湍流强度给出的结果是不同的。例如,补偿效率斯特列尔比大于多少时,出现的概率为40%。三条曲线给出的结果分别为0.54, 0.63和0.72(相对斯特列尔比分别为0.64, 0.75和0.86)。反之,低于这些值的补偿效率出现的概率为60%。3) 在不同湍流强度情况下,大于某一补偿效率的斯特列尔比值以不同的概率形式出现。例如,要求补偿效率大于0.6(相对斯特列尔比大于0.71),三种湍流强度情况下,它们的概率分别为22%, 57%和98%。这是我们对自适应光学校正湍流效应效率与湍流相干长度定量关系的一个新的认识。

3.2 校正误差分析及补偿效率与相干长度的系综定标关系

图3给出了22秒长曝光聚焦光束湍流效应补偿前后的光强分布,即300多帧光斑图像的平均结果。实测相干长度的系综量为7.4 mm,对应 C_n^2 值为 $2.2 \times 10^{-10}/\text{m}^{-2/3}$ 。补偿前以3.5像素半径为积分环的相对斯特列尔比为0.11,补偿后相对斯特列尔比为0.82。峰值强度提高了3倍。与这些数据相关的校正误差分析是:1) 采用了较强的信标光束(He-Ne光10

mw), 可以忽略由于信噪比不足所引起的波前斜率探测误差对校正效率的影响^[4]。2) 光路布局是信标光与主激光严格同光路的, 因此不存在非等晕波前校正误差。3) 由于 $d/r_0 = D/(r_0 \sqrt{37}) = 24/(7.4 \sqrt{37}) = 0.533 < 1$, 变形镜非线性响应波前校正误差亦很小^[5]。其中 d 表示变形镜驱动器在光束发射直径上的平均间距。4) 由于模拟湍流池内的平均流速很小, v 约为 1 米/分, 根据有限带宽对校正误差的影响^[6], $\sigma_{T_{mp}}^2 = (0.4v/f_c r_0) = 0.03$, 可以忽略该项的影响。5) 忽略上述误差后, 影响补偿效率(即校正误差)的因素是振幅起伏(位相补偿的固有误差)和有限单元变形镜的波前复原误差, 考虑该两项误差的直接斜率波前复原数值模拟计算^[7], 给出补偿效率相对斯特列尔比为 0.85, 与实验值是基本一致的。

综上讨论, 该自适应光学系统在忽略探测误差、非等晕误差、控制误差和非线性响应误差时, 对湍流效应的补偿效率相对斯特列尔比与湍流相干长度、变形镜驱动器在发射光束直径上的平均间距的定标关系为 $S = \exp[-0.45(d/r_0)^{5/3}]$ 。



Fig. 3 Beam intensity distribution before and after compensation, pmax is relative peak value

参 考 文 献

- [1] D. V. Murphy, Atmospheric-turbulence compensation experiments using cooperative beacons. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1992, 5(1): 25~ 43
- [2] B. G. Zollars, Atmospheric-turbulence compensation experiments using synthetic beacons. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1992, 5(1): 67~ 91
- [3] 王英俭, 吴毅, 龚知本, 湍流相干长度和 Strehl 比的统计特征. *光学学报*, 1996, 16(8): 1109~ 1113
- [4] 吴毅, 王英俭, 王春鸿等, 信标光强度影响下的 Hartmann 波前探测. *强激光与粒子束*, 1995, 7(1): 117~ 120
- [5] 吴毅, 王英俭, 龚知本, 变形镜波前校正非线性响应剩余位相方差分析. *光学学报*, 1995, 15(8): 1028~ 1031
- [6] R. K. Tyson, *Principles of Adaptive Optics*. Academic Press, Inc., 1991: 79~ 80
- [7] 王英俭, 吴毅, 龚知本, 直接斜率复原算法波前误差分析. *强激光与粒子束*, 1996, 8(3): 440~ 442

Compensation Experiment of Focused Beam Turbulence Effect

Wu Yi Wang Yingjian Gong Zhiben Wang Chao Hou Zaihong

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

(Received 1 November 1995; revised 18 January 1996)

Abstract The compensation experiment of simulated turbulence effect of focused beam is reported. Integral probability of compensation efficiency Strehl ratio is given in the sense of short exposure. The ensemble calibration of the relation between the compensation efficiency of the adaptive optics system and the turbulence coherent length has been done.

Key words turbulence effect, compensation of adaptive optics.