

基于相关波前探测算法校正热晕的数值模拟

闫伟, 陈志华, 杜太焦, 关奇

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 建立了采用相关波前探测算法(Correlation wave-front sensing algorithm, COR) 的自适应光学(Adaptive Optics, AO)系统的数值模型, 对准直光束大气传输自适应光学校正进行了数值模拟, 分析了不同热晕强度条件下光子噪声和读出噪声对系统校正效果的影响, 并与质心(Center of Gravity, COG)算法和阈值质心(Threshold Center of Gravity, TCOG)算法进行了对比。数值模拟结果表明, COR 算法对噪声和热晕强度的变化具有更好的鲁棒性, 可以提高夏克-哈特曼波前探测器(Shack-Hartmann Wave-front Sensor, SH-WFS)在低信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)条件下的波前探测精度, 同时还可以较好地抑制噪声诱发的相位补偿不稳定性(Phase Compensation Instability, PCI), 改善低信噪比条件下大气热晕校正的稳定性。

关键词: 自适应光学; 相关波前探测算法; 噪声; 热晕效应; 相位补偿不稳定性

中图分类号: TN012; O43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1032001

Numerical simulation of thermal blooming correction based on correlation wave-front sensing algorithm

Yan Wei, Chen Zhihua, Du Taijiao, Guan Qi

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The numerical model of correlation wave-front sensing algorithm (COR) based adaptive optics (AO) system was established. Collimated uplink propagation beam corrected by AO was numerically simulated. The influence of photon noise and read-out noise on AO correction efficiency under different thermal blooming strength was analyzed, and compared with the results based on center of gravity(COG) algorithm and threshold center of gravity (TCOG) algorithm. The results show that the COR which is more robust to variety of the noise strength and thermal blooming strength, can improve the wave-front sensing precision of the Shack-Hartmann wave-front sensor (SH-WFS) under low signal-to-noise ratio (SNR) circumstance and restrain the phase compensation instability (PCI) induced by noise either, which will improve the AO correction efficiency and stability under low SNR circumstances.

Key words: adaptive optics; correlation wave-front sensing algorithm; noise; thermal blooming effect; phase compensation instability

收稿日期: 2016-02-11; 修订日期: 2016-03-12

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLL1301)

作者简介: 闫伟(1981-), 男, 副研究员, 博士生, 主要从事高能激光大气传输及光束控制方面的研究。Email: kewin_y1119@163.com

0 引言

高能激光在大气中传输时,热晕效应会导致发射光束扭曲变形,甚至破碎,极大地降低了到靶光束质量以及到靶功率密度^[1-3]。自适应光学(AO)技术可以补偿热晕效应引起的位相畸变,提高远场光束质量^[4-5]。AO系统通常由波前探测器、波前校正器和控制器等三部分组成^[6]。夏克-哈特曼波前探测器(SH-WFS)以其结构简单、探测精度高等特点成为目前使用最广泛的波前探测器,其通过计算每个子孔径焦平面上光斑重心的偏移量来确定入射光波的波前斜率。传统的SH-WFS通常采用质心(COG)算法来计算光斑重心,该方法的优点是计算速度快,缺点是对噪声比较敏感。一旦信标光回波光子数较少,COG算法极易受到光子噪声、CCD读出噪声等随机噪声的影响,从而降低SH-WFS的波前探测精度^[7]。此外,噪声还会诱发相位补偿不稳定性(PCI)^[8],严重制约AO系统校正大气热晕的效果。如何抑制噪声对热晕校正的影响一直是研究人员十分关心的问题。通常的做法是对COG算法进行减阈值处理,即设定光强阈值,对低于该阈值的光强进行置零,这就是所谓的阈值质心(TCOG)算法^[9]。TCOG算法可以在一定程度上改善低信噪比(SNR)条件下SH-WFS的波前探测精度,由于要选取阈值,使用不甚方便。

近年来,研究人员又提出了相关波前探测(COR)算法^[10]。该算法因对噪声不敏感、无需选取阈值,且具有较高的稳定性而受到人们的重视。但是,目前公开发表的研究成果大多集中于分析相关SH-WFS在随机噪声以及大气湍流影响下的波前测量误差^[10-11],并未对基于相关SH-WFS的AO系统闭环校正进行严格的数值模拟,更未有相关SH-WFS应用于大气热晕校正的研究成果。

文中建立了基于点源信标相关SH-WFS的AO系统的数值模型,对该AO系统校正大气热晕进行了数值模拟,分析了不同热晕强度下光子噪声和读出噪声对热晕校正效果的影响,并与采用COG算法和TCOG算法的校正结果进行了比较。

1 相关SH-WFS的数值模型

图1给出了SH-WFS的工作原理示意图。其首

先根据子孔径分布对入射光波进行分割,分别聚焦成像,通过计算每个子孔径焦平面上光斑重心的偏移量来确定入射光波的波前斜率。

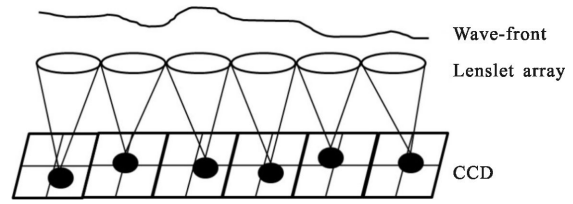


图1 SH-WFS工作原理示意图

Fig.1 Working principle diagram of SH-WFS

SH-WFS第j个子孔径焦平面上的光强分布为:

$$I_j[u, v] = \frac{1}{\lambda^2 f^2} \left| \sum_{m=1}^k \sum_{n=1}^l w(x_m, y_n) U(x_m, y_n) \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_m u + y_n v)\right) \right|^2 \Delta x \Delta y \quad (1)$$

式中: I_j 表示第j个子孔径焦平面上的光强分布; f 表示子孔径的焦距; $w(x, y)$ 表示子孔径的光瞳函数; $U(x, y)$ 为信标光的光场函数; k, l 为子孔径x方向和y方向上网格的数目; $\Delta x, \Delta y$ 分别为x方向和y方向上网格的宽度。

1.1 光子噪声和读出噪声的数值模拟方法

影响SH-WFS探测精度的随机噪声主要包括光子噪声和读出噪声。光子噪声是由于光子到达时间随机涨落引起的,可以通过泊松随机数模拟。CCD读出噪声通常是由暗电流涨落、电荷存储和转移的涨落引起的,可以通过高斯白噪声进行模拟。在产生随机数之前首先需要对公式(1)进行归一化处理,然后把信标光强转化为光子数。

$$I_j^{\text{normal}}[m, n] = \frac{I_j[m, n]}{\sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^q I_j[m, n]} \quad (2)$$

$$K_j[m, n] = N_{\text{ph}} I_j^{\text{normal}}[m, n] \quad (3)$$

式中: I_j^{normal} 表示第j个子孔径的归一化光强分布; N_{ph} 表示SH-WFS每个子孔径接收的平均光子数; p, q 表示每个子孔径对应的CCD成像单元x方向和y方向上像素的数目。

包括了光子噪声和读出噪声的第j个子孔径焦平面上的聚焦光斑可以表示为:

$$\tilde{K}_j[m, n] = K_j^{\text{ph}}[m, n] + \delta_l[m, n] \quad (4)$$

式中: $K_j^{\text{ph}}[m, n]$ 为方差为 $K_j[m, n]$ 的泊松随机数; δ_l

为均值为零、方差为 n_r^2 的高斯随机数,其中 n_r 表示 CCD 的读出噪声数,单位为电子数 e^- 。

在光子噪声和读出噪声的影响下,第 j 个子孔径对应的 CCD 成像单元的 SNR 可以表示为:

$$SNR = \frac{N_{ph}}{(N_{ph} + p \times q \times n_r^2)^{1/2}} \quad (5)$$

1.2 COR 算法

COR 算法通过计算子孔径焦平面上的光斑相对于某一参考光斑的偏移量来确定波前斜率。首先计算第 j 个子孔径焦平面上光斑与参考光斑的卷积:

$$R_j(x, y) = \tilde{K}_j * F_w = \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^q I_j[m, n] F_w[n-y, m-x] \quad (6)$$

式中: R_j 表示 \tilde{K}_j 与 F_w 的相关函数; F_w 表示参考光斑,其可以是解析函数,也可以是某一子孔径焦平面上的光斑。文中采用理想高斯光斑作为参考光斑,其可以表示为:

$$F_w[m, n] = \frac{N_{ph}}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{m^2+n^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

式中: $\sigma = \frac{FWHM}{2\sqrt{2\ln 2}}$, FWHM 表示高斯光束的半高全宽。

其次,确定卷积光斑 R_j 峰值的位置。需要指出的是,由于 CCD 像素的离散采样, R_j 是一个离散矩阵,只能得到给定像素精度的位置,为了获取亚像素精度的光斑峰值的位置,通常在 x 和 y 方向分别对 R_j 进行插值。参考文献[10]采用了抛物线插值的方法,具体表达式如下:

$$x_{cj} = m_{max} - \frac{0.5(R_j[m_{max}+1, n_{max}] - R_j[m_{max}-1, n_{max}])}{R_j[m_{max}+1, n_{max}] + R_j[m_{max}-1, n_{max}] - 2R_j[m_{max}, n_{max}]} \quad (8)$$

$$y_{cj} = n_{max} - \frac{0.5(R_j[m_{max}, n_{max}+1] - R_j[m_{max}, n_{max}-1])}{R_j[m_{max}, n_{max}+1] + R_j[m_{max}, n_{max}-1] - 2R_j[m_{max}, n_{max}]} \quad (9)$$

式中: $R_j[m_{max}, n_{max}]$ 表示卷积光斑 R_j 的峰值; x_{cj} 、 y_{cj} 分别表示亚像素精度的峰值位置。

确定了卷积光斑峰值的位置后即可确定光斑的偏移量并计算波前斜率:

$$G_{jx} = \frac{x_{cj} - x_0}{f}$$

$$G_{jy} = \frac{y_{cj} - y_0}{f} \quad (10)$$

式中: G_{jx} 、 G_{jy} 分别表示第 j 个子孔径测量的 x 方向和 y 方向的波前斜率; x_0 和 y_0 表示参考光斑 F_w 峰值的位置。

2 数值模拟参数

数值模拟中 AO 系统由 SH-WFS、倾斜镜(Tip-tilt Mirror, TTM)、连续镜面变形镜(Deformable Mirror, DM)以及波前控制器(Controller)组成。其中, SH-WFS 的子孔径与变形镜驱动器之间的空间映射关系如图 2 所示。图中所示的虚线大圆圈为 AO 系统的口径; 方形区域为 SH-WFS 的子孔径, x 、 y 方向上的子孔径数均为 8 个, 共有 52 个有效子孔径, 每个子孔径对应焦平面上的 CCD 像素为 32 pixel × 32 pixel; 黑色小圆圆表示 DM 的驱动器, 共有 69 个有效驱动器, 相邻驱动器间的耦合系数为 0.3, 驱动器的影响函数(Influence function)为高斯型。控制器采用比例加积分的闭环控制算法。

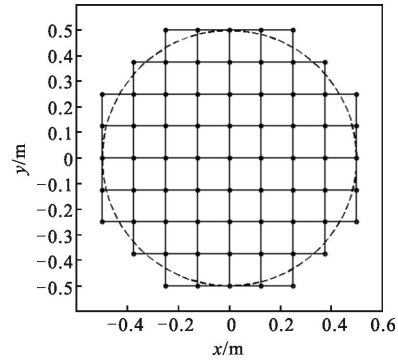


图 2 SH-WFS 子孔径与变形镜驱动器的布局

Fig.2 Layout of SH-WFS sub-apertures and DM actuators

主激光为波长 1.3 μm 的截断高斯光束, 出口光束质量为 1, 发射口径为 1 m, 垂直上行传输。采用热畸变参数 N_D 描述传输路径上的热晕强度。信标光为点光源, 波长与主激光相同。

主激光传输路径上的风速为 5 m/s, 风向垂直于光束传输方向, 一个风渡越时间(Wind clearing time) $t_c = 200$ ms。

采用 Strehl 比(记为 S_R)衡量自适应光学系统的校正效果, 其定义为激光远场峰值功率密度与真空传输时峰值功率密度之比。

3 数值模拟结果

图 3 对比了 $N_D = 50$, $N_{ph} = 500$, 分别采用 COG 算法和 COR 算法时光子噪声和读出噪声对热晕校正效果的影响, 其中图 3(a)对应 $n_r = 1$, SNR = 13 的计算

结果,图 3(b)对应 $n_r=2, SNR=7$ 的计算结果。从图中可以看出 COG 算法对噪声强度的变化比较敏感,随着 SNR 的降低, S_R 随之下降;而 COR 算法则比较稳定,在 SNR 较小时,系统依然保持了较好的校正效果。

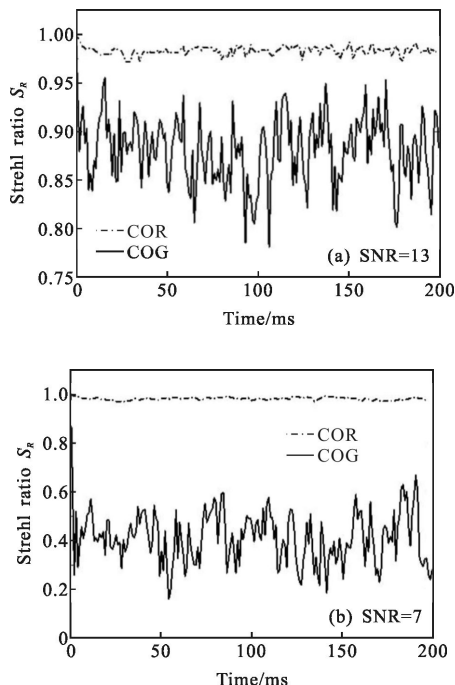


图 3 $N_D=50$, 分别采用 COG 算法和 COR 算法时,在光子噪声和读出噪声影响下, S_R 随时间的变化

Fig.3 Influence of photon noise and read-out noise on the S_R versus time with $N_D=50$, when COG algorithm and COR algorithm are used respectively

图 4 给出了 $N_D=100, SNR=13$, 分别采用 COG 算法和 COR 算法时,随机噪声对热晕校正效果的影响。

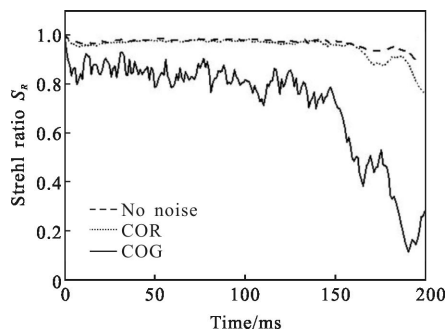


图 4 $N_D=100, SNR=13$, 分别采用 COG 算法和 COR 算法时,在光子噪声和读出噪声影响下, S_R 随时间的变化

Fig.4 Influence of photon noise and read-out noise on the S_R versus time with $N_D=100, SNR=13$, when COG algorithm and COR algorithm are used respectively

响。图中可以看出,随着热晕强度的增加,COG 算法对应的热晕校正效果发生了明显的变化, S_R 从 $t=150$ ms 时刻开始呈现不断下降的趋势,而 COR 算法对应的 S_R 以及没有噪声条件下的 S_R 则未呈现上述趋势,表明有可能发生了 PCI。这是因为当热晕较弱时,采用 COG 算法时 S_R 并未呈现不断下降的趋势,即使 SNR 较小,闭环校正也是稳定的。热晕强度增大导致闭环校正出现不稳定,很可能是 PCI 造成的,这一点可以通过图 5 给出验证。

图 5 给出了 $N_D=100, SNR=13$, 采用 COG 算法时, t_c 时刻信标光到达 AO 系统入口处的光强分布。从图中可以看出,COG 算法对应的信标光强产生了大量类似蜂窝状的空间小尺度分布,林肯实验室的研究表明该空间分布形式是 PCI 发生的重要标志^[12]。结合图 4 和图 5 可以得出结论:采用 COG 算法时,噪声诱发了 PCI, COR 算法则可以较好地抑制其发生。

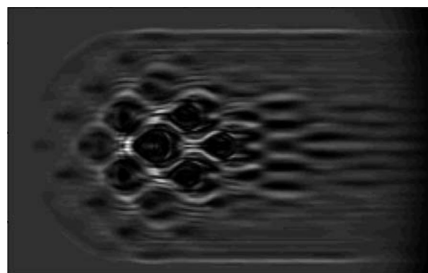


图 5 $N_D=100, SNR=13, t=200$ ms, 采用 COG 算法时,到达 AO 系统入口处的信标光强分布

Fig.5 Irradiance distribution of beacon entering AO system at $t=200$ ms with $N_D=100, SNR=13$, when COG algorithm is used

图 6 给出了 $N_D=100, N_{ph}=500$ 分别采用 TCOG 算法和 COR 算法时,光子噪声和读出噪声对热晕校正效果的影响,其中图 6(a)对应 $n_r=1, SNR=13$ 的计算结果,图 6(b)对应 $n_r=3, SNR=5$ 的计算结果。光强阈值的选取采用了参考文献[9]中所给出的方法,即阈值 $I_T = \max(0.1 \times I_{max}, 3n_r)$, 其中 I_{max} 表示每个子孔径聚焦光斑的光强峰值,单位为光子数。对比图 4 和图 6 可以发现,TCOG 算法虽然在一定程度上抑制了噪声的影响,改善了热晕的校正效果,但是随着 SNR 继续降低,仍然发生了 PCI,而 COR 算法则依然比较稳定,表明 TCOG 算法对噪声强度变化的鲁棒性同样差于 COR 算法。

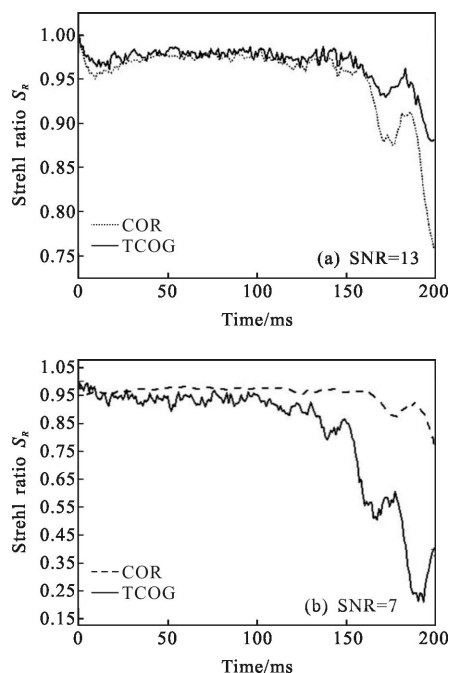


图 6 $N_b=100$, 分别采用 TCOG 算法和 COR 算法时, 在光子噪声和读出噪声影响下, S_r 随时间的变化

Fig.6 Influence of photon noise and read-out noise on the S_r versus time with $N_b=100$ when TCOG algorithm and COR algorithm are used respectively

4 结 论

建立了基于相关 SH-WFS 的 AO 系统的数值模型, 对该型 AO 系统校正大气热晕进行了数值模拟, 分析了不同热晕强度、不同 SNR 条件下, 光子噪声和读出噪声对热晕校正效果的影响, 并与 COG 算法和 TCOG 算法进行了对比。数值模拟结果表明: COR 算法对随机噪声强度的变化具有较好的鲁棒性, 即使在 SNR 较低的条件仍然具有较好的波前探测精度; 在热晕较强的条件下可以较好地抑制噪声诱发的 PCI, 改善了热晕校正的稳定性; 并且无需选取阈值, 易于使用。文中在数值模拟中暂未考虑大气湍流的影响, 其影响有待进一步的工作。

参考文献:

[1] Gebhardt F G. Twenty-five years of thermal blooming: an overview[C]//SPIE, 1990, 1221: 2-25.
 [2] Feng Xiaoxing, Zhang Pengfei, Qiao Chunhong, et al. Numerical analysis of thermal blooming effect and phase compensation of adaptive optics about high energy solid

pulse laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (5): 1408-1413. (in Chinese)
 冯小星, 张鹏飞, 乔春红, 等. 高能固体脉冲激光热晕效应相位补偿的数值模拟 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1408-1413.
 [3] Chang Jinyong, Qiang Xiwen, Hu Yuehong, et al. Numerical simulation of jittering effect on laser beams propagation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S): 46-49. (in Chinese)
 常金勇, 强希文, 胡月宏, 等. 激光传输光束抖动效应的数值模拟[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(S): 46-49.
 [4] Yan Wei, Chen Zhihua, Du Taijiao, et al. Numerical simulation of modal method based adaptive optics correction thermal blooming [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34 (9): 0901001. (in Chinese)
 闫伟, 陈志华, 杜太焦, 等. 热晕效应模式法自适应光学校正的数值模拟[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0901001.
 [5] Yan Wei, Chen Zhihua, Du Taijiao, et al. Numerical simulation of correction thermal blooming based on deformable mirror eigen mode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1101001. (in Chinese)
 闫伟, 陈志华, 杜太焦, 等. 基于变形镜本征模式法校正大气热晕的数值模拟[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1101001.
 [6] Tyson R K. Principles of Adaptive Optics [M]. 2nd ed. New York: Academic Press, 1997: 257-273.
 [7] Li Youkuan, Zhang Jianzhu, Zhang Feizhou. Simulation of SNR effect on the detecting precision of Hartmann-Shack sensor [C]//SPIE, 2014, 9242: 92421V.
 [8] Karr T J. Thermal blooming compensation instabilities [J]. *J Opt Soc Am A*, 1989, 6(7): 1038-1048.
 [9] Thomas S. Comparison of centroid computation algorithms in a Shack-Hartmann sensor [J]. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 371(1): 323-336.
 [10] Poyneer L A. Scene-based Shack-Hartmann wave-front sensing: analysis and simulation [J]. *Appl Opt*, 2003, 42 (29): 5807-5815.
 [11] Chen Linhui, Rao Changhui. Error analysis of correlating Shack-Hartmann wave-front sensor for point source [J]. *Acta Phys Sin*, 2011, 60(9): 090701. (in Chinese)
 陈林辉, 饶长辉. 点源相关哈特曼-夏克波前传感器光斑偏移测量误差分析[J]. 物理学报, 2011, 60(9): 090701,
 [12] Schonfeld J F. Theory of compensated laser propagation through strong thermal blooming[J]. *The Lincoln Laboratory of Journal*, 1992, 5(1): 131-150.