

环形光斑的波前传感器与波前校正器优化布局

张 强 许 冰 姜文汉

(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

摘 要 针对自适应光学系统常遇到的环形光斑, 仿真研究了波前传感器子孔径的六种环形布局, 得出了环形布局的指导原则, 并将环形布局与传统的方形布局进行了比较, 认为环形布局更适合于环形光斑.

关键词 自适应光学, 波前传感器, 波前校正器, 波前复原.

在自适应光学系统中, 波前传感器子孔径与波前校正器驱动器相对位置匹配布局的好坏, 会直接影响系统的波前校正能力及波前校正的稳定性, 文献[1]对此作了较为深入的仿真研究. 文献[1]中的波前传感器的子孔径为正方形, 但对于自适应光学系统常遇到的环形光斑, 波前传感器的正方形子孔径与环形光斑无法很好地匹配, 因此, 本文仿真研究了能与环形光斑更好地匹配的环形布局, 即波前探测器子孔径与变形反射镜驱动器均沿圆周方向排布.

1 布局仿真

仿真自适应光学系统由哈曼特-沙克(Hartmann-Shack)波前传感器和分立驱动器连续表面变形反射镜组成, 并采用直接斜率法波前复原算法^[2]. 直接斜率法是直接由波前传感器测量得到的斜率向量 S , 以及波前传感器子孔径与变形反射镜驱动器相对位置匹配布局决定的复原矩阵 D , 求解变形反射镜驱动器控制电压 V :

$$S = DV \quad (1)$$

由于矩阵 D 不为方阵, 可以通过求 D 的广义逆 D^+ 来获得最小二乘最小范数解:

$$V = D^+ S \quad (2)$$

奇异值分解是求解这类广义逆的良好数值方法.

本文选用了两种模拟像差作为校正对象: 1) Zernike 像差除去平移的前 20 项作为校正对象; 2) 按照大气湍流的统计特性, 取除去平移的前 14 项 Zernike 多项式, 利用 Karhunen-Loeve 函数的 Zernike 展开构造随机波前作为校正对象^[3]. 对校正对象求偏导得到斜率函数, 在测量子孔径有效探测范围内对斜率函数积分平均, 就得到斜率向量 S .

用数值的方法构造 D 矩阵, 必须知道变形反射镜每个驱动器的影响函数. 影响函数是指在单个驱动器上施加单位驱动电压后引起变形反射镜面形变化的分布函数, 可以将其看作高斯函数,

$$f(r) = \exp[-(|r|/\omega)^a] \quad (3)$$

a 为高斯指数, ω 为影响函数的特征宽度, r 为变形反射镜上各点相对于驱动器中心的距离.

确定了变形反射镜驱动器的影响函数后, 对于直接斜率法可求影响函数对 x 和 y 的偏导数, 然后在各子孔径有效测量范围内求偏导数的积分平均, 得到 D 矩阵的一列, 对各驱动器影响函数重复上述过程, 即可得到 D 矩阵. 最后, 为了尽可能减小对变形反射镜驱动器的动态范围的要求, 在 D 矩阵上加一行 1, 斜率向量 S 加一个 0, 由(1)式可以知道, 其作用是使得变形反射镜驱动器电压的平均值为 0. 斜率向量 S 乘上 D 矩阵的广义逆就得到变形反射镜的控制电压, 而变形反射镜每个驱动器影响函数用控制电压加权叠加即得到校正波前. 本文采用波前校正残差的定义来评价波前校正能力: 将入射波前划分成 100×100 网格, 首先计算入射波前在各网格点上相位值的均方根误差 Y_{rms} , 然后求出校正波前与入射波前在对应网格点上相位值之差, 即相位残差, 再计算出各网格点上相位残差的均方根误差 C_{rms} , 最后以相位残差的均方根误差与入射波前相位的均方根误差的比值 C_{rms}/Y_{rms} 作为波前校正能力的评价标准. 波前校正的稳定性, 仍采用文献[2]所用的 D 矩阵条件数来评价.

2 布局比较

针对遮拦比为 1.2 的环形光斑, 对六种环形布局(见图 1)进行了仿真实验, 以确定最优化的环形布局. 表 1 列出了这六种环形布局的波前探测器子孔径数和变形反射镜驱动器数, 以资比较. 这六种环形布局的波前校正稳定性, 即 D 矩阵的条件如表 2 所示: 各种布局对除去平移的前 20 项 Zernike 像差的校正能力如图 2 所示(图中横坐标为 Zernike 像差项数, 纵坐标为残余波前的相位均方根误差与入射波前的相位均方根误差的比值 C_{rms}/Y_{rms}); 对大气湍流随机波前的校正能力如表 3 所示.

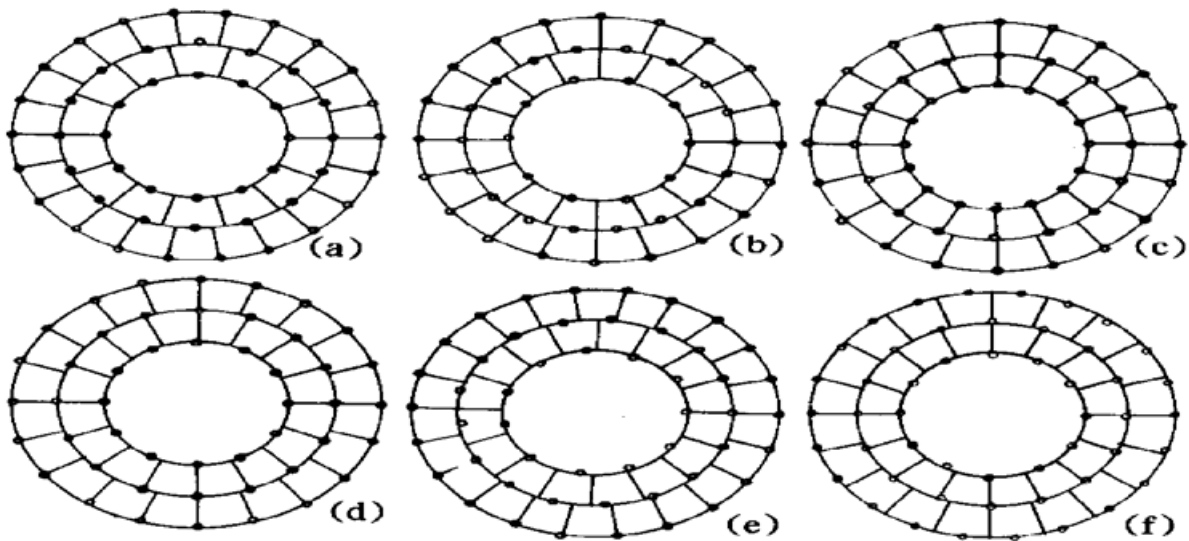


Fig. 1 Annular configuration. (a) Annular configuration 1, (b) Annular configuration 2, (c) Annular configuration 3, (d) Annular configuration 4, (e) Annular configuration 5, (f) Annular configuration 6

Table 1. Number of the wave-front sensor subaperture and number of the deformable mirror actuator for annular configuration

annular configuration	number of subaperture	number of actuator
1	14+ 22= 36	12+ 16+ 22= 50
2	16+ 20= 36	10+ 18+ 20= 48
3	16+ 20= 36	16+ 16+ 20= 52
4	16+ 20= 36	12+ 16+ 20= 48
5	16+ 22= 38	11+ 17+ 22= 50
6	16+ 20= 36	12+ 16+ 22= 50

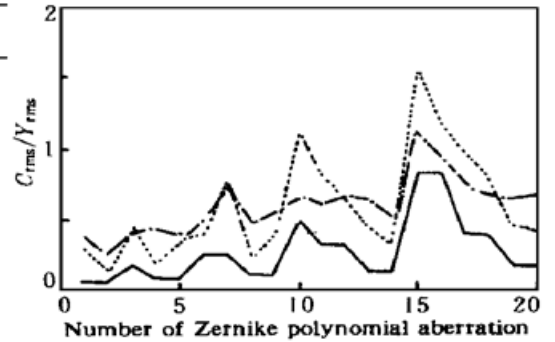


Fig. 2 Residual errors of first 20 Zernike polynomial correction for six annular configurations

Table 2. Stability of wave-front correction for annular configuration

annular configuration	1	2	3	4	5	6
condition number	5.754	4.419	4.154	12.900	4.081	4.087

Table 3. Residual-errors of atmosphere turbulence correction for six annular configurations

	C_{rms}/Y_{rms} of simulation random wave-front					
	1	2	3	4	5	6
annular configuration 1	0.0713	0.0990	0.1082	0.1320	0.0637	0.0942
annular configuration 2	0.0750	0.1046	0.1122	0.1361	0.0691	0.0985
annular configuration 3	0.0745	0.1043	0.1097	0.1356	0.0666	0.0985
annular configuration 4	0.0747	0.1044	0.1104	0.1357	0.0671	0.0989
annular configuration 5	0.0717	0.0988	0.1070	0.1321	0.0637	0.0942
annular configuration 6	0.0717	0.1002	0.1096	0.1330	0.0647	0.0949
square configuration	0.0667	0.0688	0.1262	0.1101	0.1116	0.0757

对六种环形布局的仿真实验结果表明: 布局 2 和布局 3 的波前校正能力明显较差, 布局 1、布局 5 和布局 6 的波前校正能力较好, 而且基本一致; 但是布局 1 的条件数稍大. 从波前校正能力及其稳定性来看, 布局 5 和布局 6 为最佳, 这两种布局都基本满足“探测器子孔径大小基本一致, 波前校正器驱动器间距基本一致”的原则; 由于布局 6 的探测器子孔径与变形反射镜驱动器在圆周方向排布的对称性比布局 5 好, 加工和使用较为方便, 因此在六种环形布局中最终选定环形布局 6, 该布局共有 36 个波前探测器子孔径和 50 个波前校正器驱动器.

最后将环形布局 6 与图 3 的方形布局进行比较, 该方形布局采用文献[1]的最优布局, 只是将中心遮拦比由 1.5 增大至 1.2, 取消中心部分波前传感器子孔径和变形反射镜驱动器. 环形布局与方形的条件数分别为 4.087 和 6.170; 对除去平移的前 20 项 Zernike 像差校正能力的比较见图 4. 图中横坐标为 Zernike 像差项数, 纵坐标为残余波前的相位均方根误差与入射波前的相位均方根误差的比值 C_{rms}/Y_{rms} , 图中实线代表方形布局的波前校正能力, 虚线代表环形布局六的波前校正能力. 对大气湍流随机波前的校正能力见表 3. 由此可以知道, 环形布局六与方形布局具有大致相当的波前校正能力, 环形布局六的波前校正稳定性优于方形布局, 其变形反射镜驱动器数目略少于方形布局, 并且环形布局更适合于环形光斑. 这个结论虽然是针对中心遮拦比为 1.2 的环形光斑得出的, 由于仿真过程中只是简单地将中心遮拦部分去掉, 因此也应该适合于其它环形光斑.

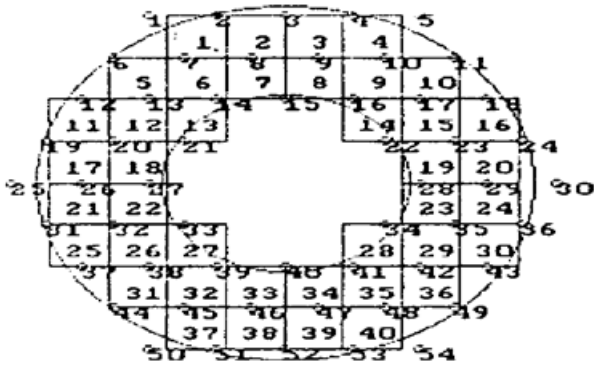


Fig. 3 Square configuration

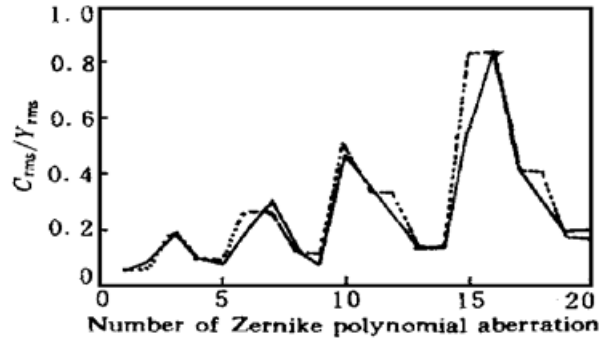


Fig. 4 Comparison of wave-front correct ability for square configuration and annular configuration. —: square configuration, - -: annular configuration

结 论 通过对环形光斑的波前传感器与波前校正器布局仿真实验, 得出以下结论:

- 1) 对于环形光斑, 环形布局与方形布局具有大致相当的波前校正能力, 环形布局的波前校正稳定性优于方形布局, 并且环形布局能够与环形光斑很好地匹配。
- 2) 环形布局满足“探测器子孔径大小基本一致、波前校正器驱动器间距基本一致”的原则时, 波前校正能力及其稳定性均较好。

参 考 文 献

- [1] Zhaohui Hu, Wenhan Jiang. Optimum matching of wavefront sensor and wavefront corrector. *Proc. SPIE*, 1995, **2534**: 318~ 326
- [2] Wenhan Jiang, Huagui Li. Hartmann-shack wavefront sensing and wacefront control algorithm. *Proc. SPIE*, 1990, **1271**: 82~ 93
- [3] 胡朝晖, 姜文汉. 受大气湍流影响的光学波前模拟. *光电工程*, 1995, **22**(2): 50~ 56

Optimum Matching of Wave-Front Sensor and Wave-Front Corrector for Annular Beam

Zhang Qiang Xu Bing Jiang Wenhan

(Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

(Received 17 February 1998; revised 8 April 1998)

Abstract Because the adaptive optical system is often used to correct wave-front of annular beam, six annular configurations of the wave-front sensor sub-aperture and the deformable mirror actuator have been simulated, and the principle of annular configuration is presented. The annular configuration are compared with the squared configuration. It shows that the annular configuration is more suitable for the annular beam.

Key words adaptive optics, wave-front sensor, wave-front corrector, wave-front reconstruction.