

文章编号: 0253-2239(2006)09-1293-4

光强非均匀分布对波前曲率传感器的影响

习锋杰 姜宗福 许晓军

(国防科技大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: 为了将波前曲率传感器用于涉及激光波前的领域, 理论分析了非均匀光强入射条件下的曲率传感器测量信号。用菲涅耳衍射公式, 数值计算了相位分布为前 10 阶泽尼克多项式, 光强为高斯分布和正态随机分布闪烁的曲率传感器信号, 并和相同相位分布, 光强均匀情况下的传感器信号比较。分析表明光强非均匀分布给波前曲率传感器测量信号带来了一定的误差。光强高斯分布对散焦相差的曲率信号影响较大, 信号百分比误差达到 25%, 对其他相差的曲率信号影响很小; 对于有正态随机分布闪烁的光强分布, 信号百分比误差与正态随机分布的均方差成线性关系。在一定条件下, 波前曲率传感器也能够用于光强非均匀分布的领域。

关键词: 自适应光学; 激光波前控制; 波前曲率传感器; 泽尼克多项式相差

中图分类号: TN911.74; O439 文献标识码: A

Influence of Nonuniform Intensity on Wavefront Curvature Sensor

Xi Fengjie Jiang Zongfu Xu Xiaojun

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, 410073)

Abstract: In order to utilize the wavefront curvature sensor in the field of laser wavefront theoretical analysis for the signal of wavefront curvature sensor under the illumination of nonuniform intensity is made. By means of Fresnel diffraction, signal of wavefront curvature sensor is computed under the conditions that the first 10 Zernike polynomials phase profile, and Gaussian distribution or normal random distribution intensity profile, and then compared with the signal with the same phase profile but uniform intensity profile. Analysis indicates that nonuniform intensity introduces some error into wavefront curvature sensor signal. Intensity of Gaussian distribution impacts significantly the sensing signal of the defocus phase, in which the error percentage achieves 25%, but for other phase profile, the effect is ignorable. Illuminated by the normal random scintillation, there is a linear relation between the error percent and the root mean square of the normal random distribution. Under some given conditions, the wavefront curvature sensor also can be utilized in the field of illumination of nonuniform intensity.

Key words: adaptive optics; laser wavefront control; wavefront curvature sensor; Zernike polynomial phase difference

1 引 言

自适应光学系统在天文观测、激光大气传输、激光通信、高能激光等领域得到了广泛的应用。波前传感器是自适应光学系统的关键部件。Roddier 在光强均匀近似下提出了波前曲率传感技术, 它通过测量离焦面上的光强分布求得波前的曲率和相位分布, 以波前曲率测量代替了传统哈特曼的波前斜率测量^[1,2]。

波前曲率传感器以前采取分束镜或振动薄膜镜

的方法^[2,3]来实现, 但存在各种缺陷。Blanchard 等^[4,5]用二次扭曲光栅实现了波前曲率测量。2004 年英国的 Arden 光子公司制造出商用光栅型波前曲率传感器 AWS-50^[6]。波前曲率传感器已经应用于光学度量、天文自适应光学系统、眼外科(医学)等领域。这些应用中的波前都满足光强均匀近似。当波前曲率传感器用于激光等领域时, 光强均匀近似不再满足。曲率传感器的测量信号有光强不均匀引起的误差, 该误差必然引起波前恢复和控制误差。

作者简介: 习锋杰(1979~), 男, 陕西合阳人, 博士研究生, 主要从事高能激光技术研究。E-mail: xifengjie@163.com

导师简介: 姜宗福(1963~), 男, 湖南岳阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事高能气动和化学激光器技术、气动光学方面的研究。E-mail: xifengjie@163.com

收稿日期: 2005-07-01; 收到修改稿日期: 2005-11-10

本文理论分析了光强不均匀时的测量信号,并数值模拟了光强高斯分布和有正态噪声时的曲率传感器信号误差。

2 光强非均匀时信号误差理论分析

1983年 Teague 用标量衍射理论和傍轴近似条件得到光强传递方程^[7]:

$$-\frac{\partial}{\partial z} I_z(\mathbf{r}) = \nabla [I_z(\mathbf{r}) \nabla W_z(\mathbf{r})] = I_z(\mathbf{r}) \nabla^2 W(\mathbf{r}) + \nabla I_z(\mathbf{r}) \nabla W_z(\mathbf{r}), \quad (1)$$

式中 $I_z(\mathbf{r})$ 是光强分布, $W_z(\mathbf{r})$ 是波前函数。1988年 Roddier 在光强均匀近似下,提出了测量两离焦面光强的归一化差 S :

$$S = (I_2 - I_1)/(I_2 + I_1), \quad (2)$$

求得波前曲率和相位分布的波前曲率传感技术:

$$S = \Delta z \left[P(\mathbf{r}) \nabla^2 W(\mathbf{r}) - \frac{\partial}{\partial n} W(\mathbf{r}) \delta_c \right], \quad (3)$$

1990年 Roddier^[8]在光强均匀近似下证明了波前曲率传感技术也可以由光强传递方程得到。

波前曲率传感器的波前恢复^[9]和变形镜控制算法,都是在(3)式的基础上发展起来的。当波前曲率传感器用于激光等领域时,光强均匀近似不再满足,测量信号与(3)式之间有光强分布不均匀引起的误差。不采用光强均匀假设时,由(1)式得到曲率传感器测量信号的表达式:

$$S = (I_2 - I_1)/(I_2 + I_1) =$$

$$\Delta z \left[\nabla \ln I(\mathbf{r}) \nabla W(\mathbf{r}) + \nabla^2 W(\mathbf{r}) - \frac{\partial}{\partial n} W(\mathbf{r}) \delta_c \right], \quad (4)$$

比较(4)式和(3)式,对同样的波前畸变,与光强分布均匀相比,光强分布不均匀时,测量信号 S 还包含光瞳内光强对数的梯度与波前梯度的点乘项。该点乘项正是由于光强分布不均匀引起的。

曲率传感器已经成熟应用的领域,无论是天文望远镜自适应光学系统中的信标光,还是用于光学度量的主动探测光,由于大气湍流或光学表面畸变的影响,光强分布虽然有起伏,但并没有量级上的变化,(4)式中的点乘项可以忽略。

当曲率传感器用于激光领域时,光强的量级发生了变化,(4)式中的点乘项不可忽略,需要分析光强高斯分布对曲率传感器测量信号的影响。

3 光强非均匀时信号误差数值模拟

3.1 高斯光束对波前曲率传感器测量信号的影响

光强高斯分布且有低阶泽尼克多项式^[2]相差

入射波前的光强和相位分布为

$$I(\mathbf{r}) = I_0 \exp(-2r^2/w_z^2), \quad (5)$$

$$W(\mathbf{r}) = \exp(i2\pi Z_q), \quad (6)$$

式中 w_z 是高斯光束光斑半径, Z_q 为各阶泽尼克多项式。自适应光学主要针对低阶波前畸变,故模拟了前10阶泽尼克多项式。2~10阶泽尼克多项式如下:

$$Z_2 = 2r \cos \theta,$$

$$Z_3 = 2r \sin \theta,$$

$$Z_4 = \sqrt{3}(2r^2 - 1),$$

$$Z_5 = \sqrt{6}r^2 \sin 2\theta,$$

$$Z_6 = \sqrt{6}r^2 \cos 2\theta,$$

$$Z_7 = \sqrt{8}(3r^3 - 2r) \sin \theta,$$

$$Z_8 = \sqrt{8}(3r^3 - 2r) \cos \theta,$$

$$Z_9 = \sqrt{8}r^3 \sin 3\theta,$$

$$Z_{10} = \sqrt{8}r^3 \cos 3\theta.$$

将(5)式代入(4)式有

$$S(\mathbf{r}) =$$

$$\Delta z \left[-\frac{4\mathbf{r}}{w_z^2(z)} \cdot \nabla W(\mathbf{r}) + \nabla^2 W(\mathbf{r}) - \frac{\partial}{\partial n} W(\mathbf{r}) \delta_c \right], \quad (7)$$

从式中可以看出高斯光束光斑半径越大点乘项的影响越小。在所列的前10阶泽尼克多项式,只有第4阶在 \mathbf{r} 方向上的梯度与角度无关,始终取正比于 \mathbf{r} 的值;其他阶在 \mathbf{r} 方向上的梯度是角度的三角函数关系。因而第4阶的点乘项影响最大,这在下面的数值计算中可以看出。

本文用菲涅耳衍射公式模拟两个对称离焦面上的光强,计算曲率传感器测量信号 $S = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1}$, 并与光强均匀情况下具有同样相差的测量信号进行比较,确定因光强高斯分布带来的测量信号差异。考虑到使用光电探测器探测离焦面上的光强时,对光强信号的离散和平均;也考虑到将曲率传感器测量信号用于控制变形镜时,需要将测量信号按照一定的划分方式进行分区平均,经线性运算传递给分立的致动器,进而控制变形镜面形。因而对自适应光学应用来说,研究分区平均曲率信号更有意义。一种均匀分区的致动器分布图如图1所示。

经计算发现,沿着半径向外,同一层上致动器上的分区平均曲率信号的误差是相同的,且第2、3、5、6、9、10阶泽尼克多项式相差的主要信号误差分布在最外层,内层的信号本身较小,实际中使用光电探测器探测时差异不大;第4、7、8阶泽尼克多项式相

差的信号误差各层都有。

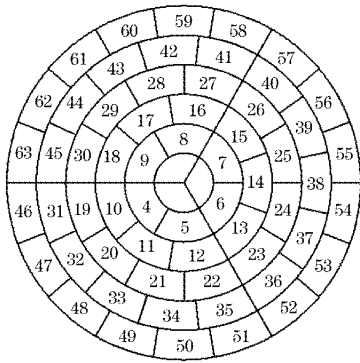


图 1 致动器分布图

Fig. 1 Distribution diagram of the actuators

对光强高斯分布和均匀分布情况下的测量信号进行比较。数值实验条件为：入射光瞳直径为 35 mm，光瞳边缘处的光强分别为中心光强的 90%、80%、70%、65%、60%、50%、40%、30%，对应

于高斯光束光斑半径由大变小。两个对称的离焦面与焦平面的距离为 6.5 mm，激光波长为 1.053 μm。比较的误差见图 2，图 2(a)中显示的误差为不同高斯分布条件下，第 2、3、5、6、9、10 阶泽尼克多项式相差的最外层曲率信号百分比误差。从图 2(a)中可以看出，随着光瞳边缘处光强百分比的降低，即高斯光束光斑半径的减小，曲率信号误差在增大。这是由于高斯光束光斑半径越小，对于同一光瞳来说，通光部分的光强分布就越不均匀。当光瞳边缘的光强占中心光强的 60% 时，信号百分比误差小于 5%。当光瞳边缘的光强降到占中心光强的 30% 时，信号百分比误差仍小于 10%。可以看到光强高斯分布对第 2、3、5、6、9、10 阶泽尼克多项式相差的曲率信号影响不大。其中

$$\text{信号百分比误差} = \frac{\text{信号误差的绝对值平均}}{\text{信号的绝对值平均}}$$

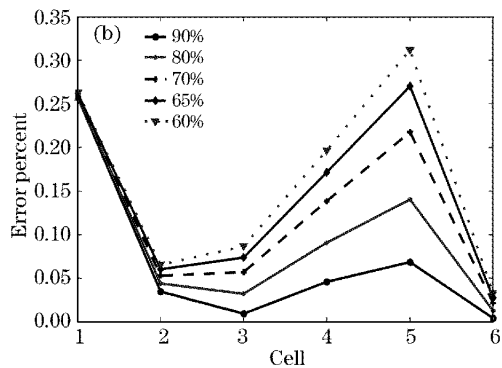
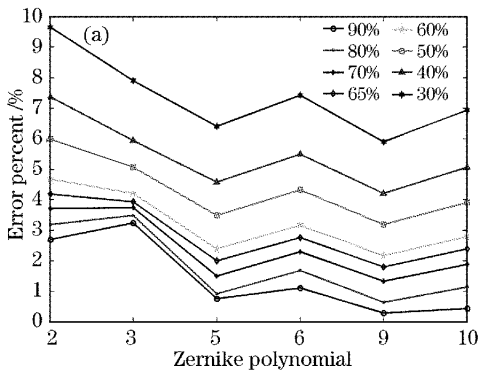


图 2 (a)第 2、3、5、6、9、10 阶泽尼克相差的最外层曲率信号百分比误差，(b)第 4 阶泽尼克相差的曲率信号百分比误差
Fig. 2 (a) Error percentage of the curvature signal on the outest cell of the second, third, fifth, sixth, ninth, tenth Zernike polynomial phase difference, (b) error percent of the curvature signal of the 4th Zernike polynomial phase difference

数值实验结果表明，4 阶泽尼克多项式(散焦)的曲率信号百分比误差最具有代表性，且误差最大。这是因为对于相位为散焦、光强为高斯分布时，(4)式中的光强对数的梯度与波前斜率的点乘项在径向具有极大值，给曲率信号带来很大的误差。图 2(b)为第 4 阶泽尼克多项式相差的各层曲率信号百分比误差在不同高斯光束情况下的分布图。可以从图中看出最内层的信号误差达到 25% 并基本不变化。从第 2 层向第 5 层百分比误差越来越大，这是因为点乘项正比于矢径 r ；第 6 层的误差反而较小，这是因为第 6 层主要反映的是曲率传感器探测到的边界条件，即相位的法向斜率。具有类似的规律，4 阶泽尼克多项式曲率信号百分比误差随着光瞳边缘处光强百分比的降低而增大。可以看到当光瞳边缘处光强百分比大于 70% 时，曲率误差小于 20%。

7 阶、8 阶泽尼克多项式的百分比误差比 4 阶的要小，比其他阶的要大。当光瞳边缘处光强百分比大于 70% 时，曲率信号百分比误差小于 10%。

3.2 振幅正态分布闪烁对波前曲率传感器测量信号的影响

平行光管产生的平行光的振幅分布可以看作均匀振幅加上正态随机分布的闪烁，研究正态随机分布闪烁的影响对光学度量等应用有意义。数值实验的条件为，均匀振幅为 100，正态随机分布闪烁用光瞳面上呈正态分布

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (8)$$

的随机数来模拟。该正态分布的数学期望 μ 为 0，均方差 σ 分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1。如图 3 所示，为有正态随机闪烁振幅分

布情况下,波前畸变为各阶泽尼克多项式的入射波前的曲率传感器信号百分比误差。

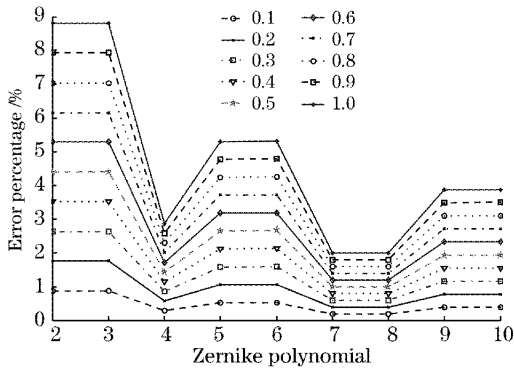


图 3 振幅有闪烁时的曲率信号百分比误差

Fig. 3 Error percentage of the curvature signal with scintillant amplitude

从图 3 中可以看出信号百分比误差与振幅正态分布的均方差成线性关系。振幅正态分布的噪声对 2、3、5、6、9、10 阶的泽尼克多项式相位分布的入射波前的影响较大;振幅正态分布的噪声对 4、7、8 阶的泽尼克多项式相位分布的入射波前的影响较小。

4 结 论

本文理论分析得知光强分布不均匀引起的曲率传感器信号的误差与光瞳内光强对数的梯度与波前斜率的点乘项有关。对于一般情形的光强分布不均匀,误差可以忽略。对于指数分布的高斯光束,数值计算了前 10 阶泽尼克多项式相差的曲率传感器信号在光强均匀分布与高斯分布两种情况的差异。计算表明光强高斯分布对第 2、3、5、6、9、10 阶泽尼克

多项式相差曲率信号影响很小。对第 7、8 阶泽尼克多项式相差曲率信号影响的百分比误差也不大。只有对第 4 阶泽尼克多项式相差(散焦)的曲率信号影响较大,达到 25%。对于有正态随机分布的闪烁光强分布,信号百分比误差与振幅正态随机分布的均方差成线性关系。本文分析得出结论,在一定的条件下,波前曲率传感器能用于涉及激光波前的测量与控制领域。

参 考 文 献

- 1 Francois Roddier. Curvature sensing and compensation; a new concept in adaptive optics[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(7): 1223~1225
- 2 Zhou Renzhong *et al.*. *Adaptive Optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996
周仁忠 等. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996
- 3 Deng Luogen, Chen Xin, Lu Changhong. Theoretical investigation and scheme analysis of the curvature wave-front sensor for adaptive optics[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(4): 487~489 (in Chinese)
邓罗根, 陈 新, 鲁长宏. 自适应光学曲率波前传感器的衍射理论及其方案分析[J]. 光学技术, 2003, **29**(4): 487~489
- 4 Paul Blanchard, Alon Greenaway. Simultaneous multiplane imaging with a distorted diffraction grating[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(32): 6692~6699
- 5 Paul M. Blanchard, David J. Fisher, Simon C. Woods *et al.*. Phase-diversity wave-front sensing with a distorted diffraction grating[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(35): 6649~6655
- 6 David A. Robinson. Wavefront Curvature Sensor Technology and Application to Optical Metrology. www.ardenphotonics.com
- 7 Michael Reed Teague. Deterministic phase retrieval; a Green's function solution[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**(11): 1434~1441
- 8 Francois Roddier. Wavefront sensing and the irradiance transport equation[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **38**(32): 1402~1403
- 9 Simon C. Woods, Alon H. Greenaway. Wave-front sensing by use of a Green's function solution to the intensity transport equation[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(3): 508~512