

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2020.02.003

利用光场传感器重建波前相位的仿真研究

刘 瑶^{1,2}, 乔春红¹, 冯晓星¹, 张京会¹, 王海涛¹, 范承玉¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室 安徽 合肥 230031;

2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 利用软件仿真对光场传感器重建波前相位的能力进行了研究。研究采用 FFT 算法模拟波的传播和衍射效应, 利用 Zernike 多项式模拟像差, 根据相应的光场映射及逆光场映射理论, 进行波前重建。研究了前 22 项单阶像差的波前相位重建情况, 选取其中初级像差和二级像差的重建结果做了比较分析, 并针对复合像差的波前重建做了多组仿真实验, 比较了低阶复合像差和高阶复合像差的重建误差。结果表明: 无论是单阶像差还是复合像差, 光场传感器都能够重建波前相位, 并且对低阶像差的相位重建效果好于高阶像差。

关键词: 光场传感器; Zernike 多项式; 像差; 相位重建

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2020)02-0101-09

Simulation of Wavefront Phase Reconstruction by Plenoptic Sensor

LIU Yao^{1,2}, QIAO Chunhong¹, FENG Xiaoxing¹, ZHANG Jinghui¹,
WANG Haitao¹, FAN Chengyu¹

(1 Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The ability of plenoptic sensor to reconstruct wavefront phase was studied by means of software simulation, where FFT algorithm was used to simulate the wave propagation and diffraction effects, Zernike polynomial was used to simulate the aberration, and the wavefront phase was reconstructed according to the theory of plenoptic mapping and inverse plenoptic mapping. The wavefront phase reconstruction of the first 22 single-order aberrations was studied, and the reconstruction results of the primary aberration and the secondary aberration were compared and analyzed. In addition, multiple sets of simulation experiments were

基金项目: Supported by Science and Technology Commission Project(科技委项目, 17-H863-ZT001-004-07), National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, 61605223, 41576185)

作者简介: 刘 瑶 (1994 -), 女, 研究生, 安徽宿州人, 主要从事激光大气传输方面的研究工作。

E-mail: yywq@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 范承玉 (1965 -), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光大气传输与校正等方面的研究工作。

E-mail: cyfan@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2019-03-26; **修改日期:** 2019-04-17

conducted for the wavefront reconstruction of the complex aberrations, and the reconstruction errors of the lower-order complex aberrations and higher-order complex aberrations are also compared. The results show that the plenoptic sensor can reconstruct the wavefront phase regardless of the single-order aberration or the complex aberrations, and the phase reconstruction effect for the lower-order aberration is better than that of the higher-order aberration.

Key words: plenoptic sensor; Zernike polynomial; aberration; phase reconstruction

1 引言

激光在大气中传输时会受到大气湍流的影响, 导致波形发生畸变, 为了提高光学系统成像质量, 需要使用自适应光学 (Adaptive optics, AO) 系统对畸变波前进行测量和校正。传统的闭环 AO 系统通过一个波前探测器测量波前畸变, 再利用变形镜进行补偿。目前最广泛应用的波前传感器是夏克 - 哈特曼传感器, 但是夏克 - 哈特曼传感器适用于弱湍流的情况, 当遇到较强的湍流时, 其将不能对波前进行有效的测量^[1-2]。

最早由 Clare 和 Lane 发现, 可以把微透镜阵列 (Micro-lens array, MLA) 放置在望远镜入瞳焦面处对入射光成像, 再通过对 MLA 成像的计算分析, 就能够恢复入瞳处的波前畸变, 这也是光场相机波前传感器^[3]的首次提出。Rodríguez-Ramos 等人结合光场相机的相关研究^[4], 将分焦面波前传感器用于波前测量和物体距离探测, 并将此新型的波前传感器命名为 CAFADIS 相机^[5]。Jonathan Ko 等人发现改造的光场相机可以作为光场传感器重建入射波前, 并将光场传感器的性能特点与夏克 - 哈特曼传感器做了比较和分析^[6], 结果表明光场传感器更适用于强湍流的探测, 其相位梯度采样数量更具有动态性。中国科技大学的周志良按照光场成像的原理搭建了光场相机结构, 进行了相关实验, 并将其应用于多光谱成像过程中, 弥补了国内相关工作的空白^[7]。张锐、吕洋等人在忽略微透镜之间干涉的情况下, 对此进行了简单的仿真模拟^[8], 但并没有对其测量精度进行深入分析。

光场传感器能够对受强湍流影响的激光束的波前相位进行直接测量, 为研究在大气中传播的激光束波形提供了方便, 有很大的发展和应用前景。本文重点研究光场传感器重建波前相位的性能, 深入比较分析了由 Zernike 多项式模拟的低阶像差和高阶像差的重建情况和 RMS 误差。

2 光场传感器的结构及原理

光场传感器的 3D 结构如图 1 所示, 其是由物镜、MLA 和图像传感器构成, 这种设计可以看作是微型的开普勒望远镜阵列共用一个物镜, 也使得光场传感器能够提供大量的波前梯度数据。图 1 中物镜的焦距和直径分别为 f_1 和 d_1 , MLA 的焦距为 f_2 , 透镜单元的宽度为 d_2 。

物镜的前焦平面作为光场传感器的入射光瞳, 首先物镜会将入瞳焦平面处的入射光束采样到相应的 MLA 单元中, 再由放置在 MLA 后焦平面处的图像传感器进行二次采样, 形成光场图像。物镜的数值

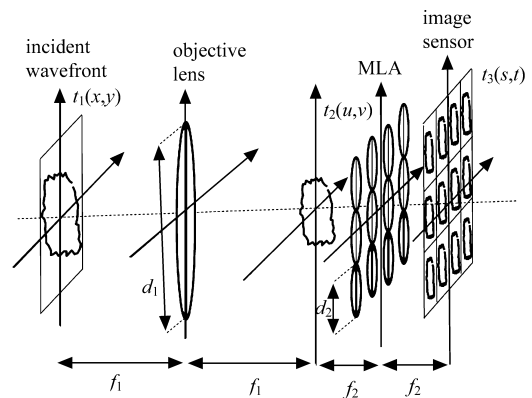


图 1 光场传感器 3D 结构图

Fig.1 3D structure of the plenoptic sensor

孔径要和 MLA 单元的相匹配, 才能使每个 MLA 单元的图像不和相邻单元的图像发生重叠, 所以物镜的

数值孔径 (NA) 要等于或小于一个 MLA 透镜单元的数值孔径, 数值孔径的要求可以表示为^[9]

$$\frac{f_1}{d_1} \geq \frac{f_2}{d_2}. \quad (1)$$

从傅里叶光学的角度分析光场传感器的工作过程可以表述为: 入射波前 $t_1(x, y)$ 在物镜的前焦平面处进行一次傅里叶变换, 转换后的波前 $t_2(u, v)$ 位于物镜的后焦平面处, 接着 MLA 再对 $t_2(u, v)$ 进行一次采样和逆傅里叶变换, 变换后的结果为 $t_3(s, t)$ 在 MLA 的后焦平面上, 同时图像传感器被放置 MLA 的后焦平面处接收 $t_3(s, t)$ 的变换结果^[10]。

3 像差与 Zernike 多项式

光学系统都会存在缺陷的, 在实际的成像系统中, 理想像点和实际像点之间的偏差一般用像差来描述。各种成像缺陷可以直观地分为一系列的像差如倾斜、像散、彗差、球差等。经过仿真和实验研究发现, 用 Zernike 多项式表示相位波前是一种相对较好的方法。在单位圆内正交的 Zernike 多项式表达式为^[11]

$$\varphi(x, y) = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i Z_i(x, y), \quad (2)$$

式中 Z_i 为第 i 项多项式, α_i 为第 i 项 Zernike 多项式的系数。为了方便, 将两个阶次的 n 、 m 转换为一个阶次的 i , 可以用下面的 Zernike 多项式表示为^[12]

$$Z_i(\rho, \theta) = \sqrt{n+1} \begin{cases} R_n^m(\rho) \sqrt{2} \cos(m\theta) & (i \text{ 为偶数}, m \neq 0) \\ R_n^m(\rho) \sqrt{2} \sin(m\theta) & (i \text{ 为奇数}, m \neq 0) \\ R_n^0(\rho) & (m = 0) \end{cases}, \quad (3)$$

$$R_n^m(\rho) \begin{cases} \sum_{s=0}^{(n-m)/2} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! \left[\frac{(n+m)}{2} - s \right]! \left[\frac{(n-m)}{2} - s \right]!} \rho^{n-2s} & (n-m \text{ 为偶数}) \\ 0 & (n-m \text{ 为奇数}) \end{cases}. \quad (4)$$

式中 (ρ, θ) 表示圆域内的极坐标, 每个 $Z_i(\rho, \theta)$ 的序号 i 是按行增长的, 偶数的 i 对应 $\cos(m\theta)$ 的模式, 而奇数的 i 则对应 $\sin(m\theta)$ 的模式。通常 Zernike 多项式中的每一项都对应于不同阶次的像差, 第 1 项对应平均波前, 第 2~11 项表示的是倾斜、离焦、像散和彗差等初级像差, 第 12 项以后都是二级、三级等高阶像差^[13]。需要在光传输的数值计算中模拟产生各种像差时, 可以用 Zernike 多项式的各项或者任意项的任意组合来表示。

4 光场传感器的波前相位重建方法

4.1 光场映射

入射光束在物镜的前焦平面可以表示为一系列波分量的叠加, 利用光场映射方法能够恢复入射光中波的组成, 再利用它们作为重建光场复振幅的基本部件^[14]。每个波分量可以表示为

$$U_0(x_1, y_1; k) = A_0(x_1, y_1; k) \exp\{j[\alpha_1(k)x_1 + \beta_1(k)y_1] + j\varphi_0(k)\}, \quad (5)$$

式中: U_0 表示一个平面波分量沿指定极化方向的复场振幅, A_0 代表其大小, 对应的波分量由整数 k 指示。 (x_1, y_1) 表示的是入射平面的几何坐标, 其几何中心与光轴一致。 $\alpha_1(k)$ 和 $\beta_1(k)$ 表示角频率, 代表第

k 个波分量分别沿 x_1 和 y_1 的波前梯度。 $\varphi_0(k)$ 表示平面波的参考相位常数分量。入射激光束的复场振幅 $U(x_1, y_1)$ 表示为

$$U(x_1, y_1) = \sum_{k=1}^N U_0(x_1, y_1; k), \quad (6)$$

式中 N 被设置的足够大以覆盖入射光束所有的平面波分量。在成像过程中, 物镜后焦平面处的场是入射光束在物镜前焦平面处的 2D 傅里叶变换。变换场满足下面的关系为

$$U_f(u, v) = \frac{1}{j\lambda f_1} F\{U(x_1, y_1)\} \Big|_{(f_x, f_y) = \frac{1}{\lambda f_1}(u, v)}, \quad (7)$$

式中 (u, v) 是复场振幅 U_f 在物镜后焦平面转换得到的几何坐标, 波长为 λ , 空间的傅里叶变换由符号函数 $F\{\cdot\}$ 表示。光束在进一步的传播过程中, MLA 对其进行第二次傅里叶变换, 变换后的波分量由图像传感器在 MLA 的后焦平面处接收的公式为

$$U_i(x_2, y_2; m, n, k) = \frac{f_1}{f_2} A_0 \left(-\frac{f_1}{f_2} x_2, -\frac{f_1}{f_2} y_2 \right) \exp \left\{ j \frac{f_1}{f_2} [\alpha_1(k) x_2 + \beta_1(k) y_2] + j \varphi_i(k) \right\}, \quad (8)$$

在等式 (8) 中, U_i 表示的是第 k 个波分量在 MLA 后焦平面处转换后的复场振幅。 (x_2, y_2) 表示几何坐标, (m, n) 对应 MLA 的小透镜单元, 第 k 个波分量的常数相位由 $\varphi_i(k)$ 来表示。

在光场图像形成过程中, 每个变换的波分量都被采样, 可以表示为

$$I_i(x_2, y_2; m, n, k) = \gamma \|U_i(x_2, y_2; m, n, k)\|^2 = \gamma \left(\frac{f_1}{f_2} \right) A_0 \left(\frac{f_1}{f_2} x_2, \frac{f_1}{f_2} y_2 \right)^2, \quad (9)$$

在等式 (9) 中, 常数系数 γ 表示像素值和幅度值平方之间的线性比。整体的光场图像可以表示为波分量强度模式的总和为

$$I_i(s, t) = \sum_{k=1}^N I_i(x_2, y_2; m, n, k) \Big|_{s=x_2+md_2, t=y_2+nd_2}, \quad (10)$$

在等式 (10) 中, (s, t) 表示的是沿着图像平面把所有图像单元联系到一起全局几何坐标。

4.2 逆光场映射

根据逆光场映射的方法就可以利用光场图像重建波前相位, 主要分为两个步骤:

第一步: 图像分割

因为入射激光束的每个波分量被映射到相应的图像单元格, 所以需要把整个的光场图像分成一组图像单元用局部的坐标来表示。这个过程可以表示为

$$h_1 : I_i(s, t) \Big|_{s \rightarrow x_2+md_2, t \rightarrow y_2+nd_2, |x_2| \leq \frac{d_2}{2}, |y_2| \leq \frac{d_2}{2}} \rightarrow \sum_m \sum_n I_i(x_2, y_2; m, n, k), \quad (11)$$

式 (11) 表示的图像分割是按单元格进行的, 并且在每个单元格中所有的强度图案被组合并视作一个波分量。

第二步: 相位重建

可以使用波分量的图像图案的位置 (由单元格索引表示) 来表明相位梯度 (由波分量的空间频率表示), 根据下列等式, 相位梯度图可以被恢复为

$$h_2^x : \sum_m \sum_n I_i(x_2, y_2; m, n, k) \rightarrow \frac{\sum_m \sum_n \frac{m d_2}{f_1} I_i^{\text{norm}}(-\frac{f_2}{f_1} x_1, -\frac{2}{f_1} y_1; m, n, k)}{\sum_m \sum_n I_i^{\text{norm}}(-\frac{f_2}{f_1} x_1, -\frac{f_2}{f_1} y_1; m, n, k)}, \quad (12)$$

$$h_2^y : \sum_m \sum_n I_i(x_2, y_2; m, n, k) \rightarrow \frac{\sum_m \sum_n \frac{n d_2}{f_1} I_i^{\text{norm}}(-\frac{f_2}{f_1} x_1, -\frac{2}{f_1} y_1; m, n, k)}{\sum_m \sum_n I_i^{\text{norm}}(-\frac{f_2}{f_1} x_1, -\frac{f_2}{f_1} y_1; m, n, k)}, \quad (13)$$

$$I_i^{\text{norm}}(-\frac{f_2}{f_1} x_1, -\frac{f_2}{f_1} y_1; m, n, k) = \frac{I_i(-\frac{f_2}{f_1} x_1, -\frac{f_2}{f_1} y_1; m, n, k)}{\max\{I_i(-\frac{f_2}{f_1} x_1, -\frac{f_2}{f_1} y_1; m, n, k)\}}. \quad (14)$$

式 (14) 中, 函数 $I_i^{\text{norm}}(\cdot)$ 表示单元图像强度模式的归一化, 用几何坐标 $(-\frac{f_2}{f_1} x_1, -\frac{f_2}{f_1} y_1)$ 来表示单元图像中对应的像素点 (x_2, y_2) 。沿 X 轴和 Y 轴的相位梯度图可以分别利用公式 (12) 和 (13) 计算。

5 光场传感器的仿真结果及分析

要了解光场传感器重建波前相位的能力, 必须对多种情况的像差重建效果进行分析。运用 Matlab 软件进行仿真模拟过程中, 入射激光束的波长设为 632 nm, 光束的半高全宽值 (Full width half maximum, FWHM) 设为 22 mm, $f_1=8700$ mm, $f_2=48.4$ mm, $d_1=30$ mm, $d_2=0.5$ mm。光场传感器的像素尺寸设置为 0.007 mm, MLA 阵列大小为 15×15 , 相位失真的峰峰值为 6π 。

为了能够更好地对重建结果进行分析和比较, 引入了相位重建误差和均方根 (Root mean square, RMS) 误差为

$$P_{\text{error}} = \frac{P - P_0}{2\pi}(\lambda), \quad (15)$$

$$R_{\text{ms}} = \sqrt{\text{var}\{P_{\text{error}}\}}. \quad (16)$$

式 (15) 中 P_{error} 表示所求得的相位重建误差, P 代表的是重建的相位结果, P_0 表示的是理想的入射激光束的相位分布。用 2π 对相位重建误差归一化使得计算的结果以 λ 为单位。式 (16) 中 $\text{var}\{\cdot\}$ 表示的是求数学方差, R_{ms} 是根据相位重建误差 P_{error} 计算出来的 RMS 误差, 接下来的研究中用 RMS 误差大小来反映重建效果。

5.1 单阶像差的重建情况

仿真重建了 2-22 项单阶像差的波前相位, 相位的失真大小控制在 $\pm 3\pi$ 范围内, Zernike 多项式第一项对应的是常数项, 从第二项倾斜开始 2-22 项像差的 RMS 误差分别为: 0.011 λ , 0.011 λ , 0.26 λ , 0.08 λ , 0.06 λ , 0.312 λ , 0.312 λ , 0.085 λ , 0.086 λ , 0.53 λ , 0.51 λ , 0.18 λ , 0.14 λ , 0.12 λ , 0.38 λ , 0.38 λ , 0.46 λ , 0.47 λ , 0.18 λ , 0.67 λ 。通过对 2-22 项 Zernike 多项式相位重建的 RMS 误差分析可以发现, 单阶像差的 RMS 误差在 0.01 $\lambda \sim 0.67\lambda$ (0.18%~11.17%) 之间, 可以说明单阶像差的波前都能够得到有效的重建, 另外发现 2-11 项的 RMS 误差普遍小于 12-22 项的, Zernike 多项式 2-11 项对应的是初级像差, 而 12-22 项对应的是二级像差, 由此推断光场传感器对初级像差的重建效果好于二级像差。

从单阶像差中选取了 Z_8 彗差和 Z_{16} 二级彗差的波前相位进行具体的分析, 通过图像来观察和比较其重建结果。图 2 中第一行和第二行分别表示的是第 8 项和第 16 项 Zernike 模式的重建结果, 图 2(a) 和图 2(d) 表示入射激光束的相位调制, 图 2(b) 和图 2(e) 表示重建的相位剖面, 图 2(c) 和图 2(f) 表示的是相位

重建误差。从图 2(a) 和图 2(b)、图 2(d) 和图 2(e) 的比较可以看出重建的相位剖面基本上和入射激光束的相位剖面一致, 这也能反映出 Z_8 和 Z_{16} 的波前相位得到了有效的重建, 并且根据图 2(c) 和图 2(f) 的重建误差可以计算出 Z_8 的 RMS 误差为 0.31λ (5.2%), Z_{16} 的 RMS 误差为 0.38λ (6.3%), 由 RMS 误差大小可以看出 Z_{16} 的重建效果不如 Z_8 。

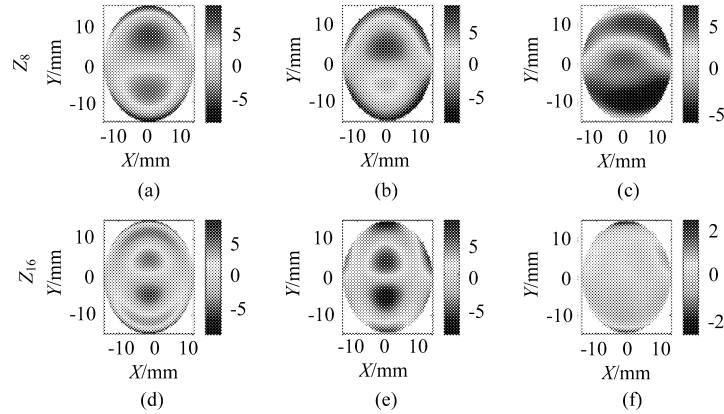


图 2 单阶像差的重建结果。(a)、(d) 入射激光束相位调制; (b)、(e) 重建的相位; (c)、(f) 相位重建误差

Fig.2 Reconstruction results of single aberration. (a), (d) Phase modulation of incident laser beam; (b), (e) Reconstructed phase; (c), (f) Phase reconstruction error

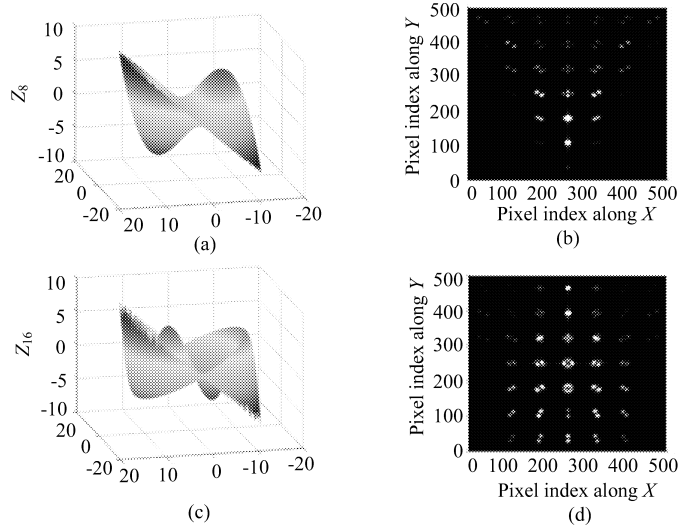


图 3 波前相位及光场图像的对比。(a)、(c) 入射波前的 3D 图像; (b)、(d) 光场图像

Fig.3 Comparison of wavefront phase and plenoptic image. (a), (c) 3D image of the incident wavefront; (b), (d) plenoptic images

为了深入研究产生这种情况的原因, 把 Z_8 和 Z_{16} 的输入波前及光场图像进行对比和分析, 结果如图 3 所示: 图 3(a) 和图 3(c) 分别表示 Z_8 和 Z_{16} 入射波前的 3D 图像, 图 3(b) 和图 3(d) 分别表示传感器采集到的 Z_8 和 Z_{16} 的光场图片。对比图 3(a) 和图 3(c) 可以看出, 二级彗差的输入波前在初级彗差基础上又增加了小的振荡, 相位的空间振荡起伏情况变得更复杂。图 3(b) 中光场图像子孔径内的亮度明暗是逐渐变化的, 相邻子孔径间亮度差异变化不是太大, 明暗分布相对均匀。而图 3(d) 表示的二级彗差的光场图像亮度变化不均匀, 相邻子孔径内的亮度差异也较大, 影响光场传感器的重建效果, 这些情况都是造成二级

彗差的 RMS 误差更大的原因。同时, 前面的推断也得到了验证。

5.2 复合像差的重建情况

上一节的分析得出光场传感器对初级像差的重建效果好于二级像差, 本节研究复合像差的重建情况。为了与单阶像差得出的结果相比较, 将初级像差项 Z_5 、 Z_6 、 Z_7 、 Z_8 、 Z_9 、 Z_{10} 和 Z_{11} 组合成低阶复合像差作为入射波前的相位调制, 再把与之一一对应的 Z_{13} 、 Z_{12} 、 Z_{17} 、 Z_{16} 、 Z_{19} 、 Z_{18} 和 Z_{22} 七项组合为高阶复合像差。随机产生一组 ± 1 范围内的七个数据, 将此组数据分别作为低阶和高阶复合像差的权重系数, 利用光场映射方法分别对其进行重建, 图 4 表示的就是两组复合像差重建结果的对比图。

图 4 中第一行和第二行分别表示的是低阶和高阶复合像差的重建结果, 子图表示的含义与图 2 相同。由图 4(c) 计算出低阶复合像差的 RMS 误差为 0.176λ (2.9%), 图 4(f) 算出的高阶复合像差的 RMS 误差为 0.348λ (5.8%)。由 RMS 误差大小反映出低阶和高阶复合像差都能够得到有效的重建, 且高阶复合像差的 RMS 误差更大, 并且从图 4(a) 和图 4(b)、图 4(d) 和图 4(e) 可以反映出低阶复合像差的重建效果更好, 与单阶像差的重建情况相吻合。另外, 仔细观察图 4(c) 和图 4(f) 还可以发现, 中间区域的重建效果远好

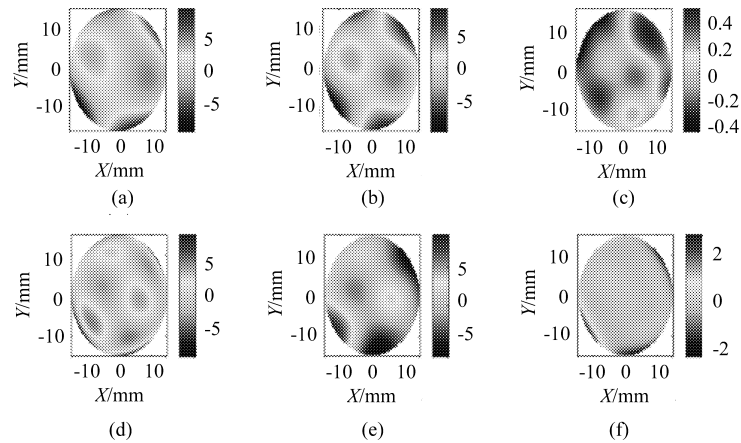


图 4 复合像差的重建结果。(a)、(d) 入射激光束相位调制; (b)、(e) 重建的相位; (c)、(f) 相位重建误差

Fig.4 Reconstruction results of complex aberrations. (a),(d) Phase modulation of incident laser beam; (b),(e) reconstructed phase; (c),(f) phase reconstruction error

于边缘区域, 最大的相位重建误差都出现在边缘区域, 由图 4(f) 看出绝大部分的重建误差都保持在 $\pm 0.5\lambda$ (8.3%) 以内, 但是少数边缘区域的重建误差达到了 2λ (33.3%) 以上, 造成这种现象是因为光场传感器重建过程中, 重建算法会将中心点的相位失真的梯度积分到边缘位置, 所以会造成边缘的重建误差变大。

为了消除随机性对复合像差波前相位重建的影响, 随机产生了十组 ± 1 范围内的数据, 分别作为低阶和高阶复合像差的权重系数, 通过十组仿真对比使得结果更具有一般性, RMS 误差对比结果显示在图 5 中。图 5 横坐标对应的是仿真实验的次数, 纵坐标表示的是仿真重建结果的 RMS 误差, 单位为 λ 。图 5 下面的折线表示的是十次仿真中低阶复合像差

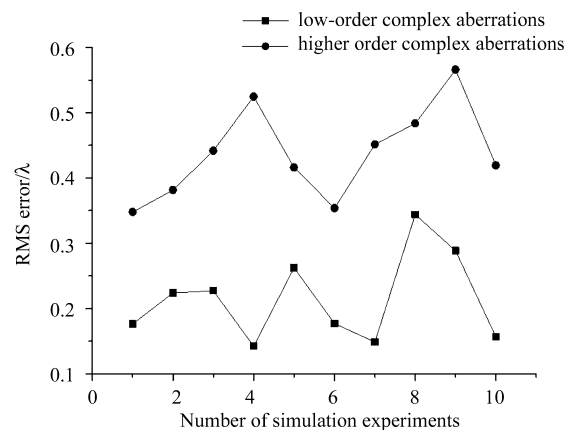


图 5 复合像差的 RMS 误差

Fig.5 RMS error of complex aberrations

的 RMS 误差, 上面的折线代表的是相对应的高阶像差相位重建的 RMS 误差, 比较十组复合像差的 RMS 误差结果后可以看出, 低阶复合像差波前相位重建的 RMS 误差小于高阶复合像差的, 前面的结论得到了验证。

6 结 论

对光场传感器重建相位波前的情况进行了仿真研究, 计算出了前 22 项 Zernike 多项式的重建误差, 对初级像差和二级像差的重建结果进行了比较和分析, 文章还研究了低阶复合像差和高阶复合像差的重建情况, 通过多组的仿真模拟对其重建的 RMS 误差做了比较。结果表明: 二级像差的重建效果不如初级像差, 低阶复合像差的 RMS 误差更小, 证实了光场传感器对低阶像差的波前相位重建效果更好。

参考文献:

- [1] Wu Chensheng, Davis C C, Van Eijk A M J, *et al.* Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans II-Modified plenoptic camera for phase and amplitude wavefront sensing [J]. *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers-The International Society for Optical Engineering*, 2013, 8874: 88740I.
- [2] Li Xinyang, Jiang Wenhan, Wang Chunhong, *et al.* Modal reconstruction error of the hartmann sensor on measuring the atmosphere disturbed wavefront [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(2): 150-153 (in Chinese).
李新阳, 姜文汉, 王春红, 等. 湍流大气中哈特曼传感器的模式波前复原误差 [J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(2): 150-153.
- [3] Clare R M, Lane R G. Wave-front sensing from subdivision of the focal plane with a lenslet array [J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2005, **22**(1): 117.
- [4] Ng R, Levoy M, Brédif M, *et al.* Light field photography with a hand-held plenoptic camera [J]. *Computer Science Technical Report*, 2005, **2**(11):1-11.
- [5] Rodríguez-Ramos J M, Castellá B F, Nava F P, *et al.* Wavefront and distance measurement using the CAFADIS camera [C]//*Astronomical Telescopes and Instrumentation: Synergies Between Ground and Space*. 2008, 7015: 70155Q.
- [6] Ko J, Davis C C. Comparison of the plenoptic sensor and the ShackHartmann sensor [J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(13): 3689-3698.
- [7] Zhou Zhiliang. *Research on light field imaging technology* [D]. Hefei: Doctorial Dissertation of University of Science and Technology of China, 2012 (in Chinese).
周志良. 光场成像技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学博士论文, 2012.
- [8] Zhang Rui, Yang Jinsheng, Tian Yu, *et al.* Wavefront phase recovery from the plenoptic camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, **40**(2): 32-39 (in Chinese).
张 锐, 杨金生, 田 雨, 等. 焦面哈特曼传感器波前相位复原 [J]. *光电工程*, 2013, **40**(2): 32-39.
- [9] Wu Chensheng, Ko J, Davis C C., *et al.* Using a plenoptic sensor to reconstruct vortex phase structures [J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(14): 3169-3172.
- [10] Ko J, Wu Chensheng, Davis C C. Implementation of a rapid correction algorithm for adaptive optics using a plenoptic sensor[C]// *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers-Optical Engineering + Applications*. 2016, 9979: 99790O.

- [11] Zhang Qiang, Jiang Wenhan. Reconstruction of turbulent optical wavefront realized by zernike polynomial [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, **25**(6):32-35 (in Chinese).
张 强, 姜文汉. 利用 Zernike 多项式对湍流波前进行波前重构 [J]. *光电工程*, 1998, **25**(6): 32-35.
- [12] Shan Baozhong, Wang Shuyan. Zernike polynomial fitting method and its application [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(3): 14-17 (in Chinese).
单宝忠, 王淑岩. Zernike 多项式拟合方法及应用 [J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(3): 14-17.
- [13] Rao Ruizhong. *Modern atmospheric optics* [M]. Beijing: Science Press, 2012 (in Chinese).
饶瑞中. *现代大气光学* [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [14] Wu Chensheng, Ko J, Christopher C, et al. Plenoptic mapping for imaging and retrieval of the complex field amplitude of a laser beam [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(26): 29852-29871.

“纳米颗粒物在线测量技术”专辑征稿

认识大气颗粒污染物的理化性质及其产生和变化机制是探究大气污染成因的基本前提与基础, 对于落实国家大气污染防治行动计划具有深远的意义。

针对国家在相关领域的重大需求, 同时为了反映国内在纳米颗粒物化学组分与粒径分布在线测量领域的最新进展与发展趋势, 《大气与环境光学学报》拟于 2020 年第 5 期策划出版“纳米颗粒物在线测量技术”专辑, 现面向全国征集相关领域的原创研究论文或具有引领性的综述, 欢迎赐稿!

特邀专栏主编:

葛茂发, 研究员, 博士生导师, 中科院北化所分子动态与稳态结构实验室主任, 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室、国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室等多个重点实验室学术委员会委员。长期从事大气化学动力学、气溶胶物理化学、复合污染形成机理、纳米材料与污染物控制技术等领域的研究。承担了国家杰出青年科学基金、重大仪器研制项目和科技部重点研发专项等科研项目, 曾获国家自然科学基金二等奖, 中国分析测试学会科学技术奖二等奖。

谢品华, 研究员, 博士生导师。主要从事环境污染光学探测新方法和光学遥测技术及其应用研究, 包括大气痕量成分探测的差分吸收光谱、激光光谱技术, 基于地基、机载、卫星平台的大气成分探测技术, 应用于区域大气污染立体分布及传输、大气自由基及关键前体物的观测研究等。承担和参加了国家重点研发计划、国家 863、国家基金委、中科院及省部攻关多个科研项目。在国内外刊物上发表文章 80 多篇, 20 余项发明专利。获国家科技进步二等奖, 国家环境保护科学技术奖一等奖, 中国专利优秀奖。入选国家百千万人才工程。

征稿范围:

1. 气粒转化关键前体物的精确测量 2. 高氧化度有机分子在线测量 3. 气粒转化中间关键物种的测量 4. 纳米颗粒物的粒径测量 5. 纳米颗粒物热动力学测量 6. 纳米颗粒物化学成分在线测量 7. 其它相关领域

截稿日期: 2020 年 7 月 30 日

投稿方式:

登录网址 <http://gk.hfcas.ac.cn>, 点击“作者投稿查稿系统”进入, 按要求填写相关信息并上传稿件(稿件题目中标注“纳米颗粒物在线测量技术”专题投稿)。投稿模板及其他材料请见期刊首页“相关下载”。

联系方式:

Tel: 0551-65591563; Email: gk@aiofm.ac.cn