

基于光线像差的波前编码系统离轴像差敏感性分析

陈守谦¹ 范志刚¹ 王 帅¹ 许志高²

(¹ 哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)
² 哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 从几何光学角度出发,分别对含有像散和彗差的波前编码系统成像特性进行了分析,推导了含有像散和彗差波前编码系统的光线像差,计算了光线像差的上下边界。通过光线像差及点列图分析了波前编码系统对像散和彗差的敏感程度。结果表明,当系统同时含有离焦像差和像散时,光线像差较仅含离焦像差的波前编码系统有所放大,点列图弥散程度增加,进而使系统调制传递函数(MTF)有较大幅度的下降,影响中间图像的可复原能力,但其仍保持着较好的离焦不变特性。当系统同时含有离焦像差和彗差时,由于切向和径向的光线像差及点列图变化并不对称,彗差的存在对系统的离焦不变特性及图像的可复原性均产生影响,不仅使系统对中间图像的可复原能力降低,也使两方向的离焦不变特性有所不同。

关键词 波前编码;离焦误差;像散;彗差;光线像差

中图分类号 O435.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1211005

Analysis of Wave-front Coding System with Primary Astigmatism and Coma by Using Ray Aberration Approach

Chen Shouqian¹ Fan Zhigang¹ Wang Shuai¹ Xu Zhigao²

(¹ *Research Center for Space Optics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China*
² *Physical College, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China*)

Abstract In the view of geometrical optics, the imaging characteristics of the wavefront coding system suffering from primary astigmatism or primary coma are analyzed. The ray aberrations of wave-front coding system suffering from primary astigmatism or primary coma are derived. Analytical expressions for the upper and lower boundary of ray aberrations are obtained by using ray aberrations theory. In the wavefront coding system, the sensitivity to primary astigmatism or primary coma are analyzed by the way aberrations and spot diagram. When the wavefront coding systems suffer from out-of-focus and primary astigmatism, the similarity of out-of-focus modulation transfer function (MTF) has a low sensitivity to primary astigmatism while the recoverability of blurred encoding images has a high sensitivity to primary astigmatism. When the wavefront coding systems suffer from out-of-focus and primary coma, the ray aberrations have an asymmetrical distribution because the ray aberration for tangential is different from that for sagittal. Therefore, there is a different imaging characteristic between tangential and sagittal. Moreover, the similarity and recoverability of blurred encoding images have a high sensitivity to primary coma.

Key words wave-front coding; out-of-focus error; astigmatism; coma; ray aberration

OCIS codes 110.1220; 110.1758; 110.7348; 080.1010

1 引 言

波前编码成像系统通过在光瞳处添加非旋转对称相位掩模板来增大光学系统的景深,其成像过程由光学成像和图像复原两部分组成^[1]。由于其成像原理与一般光学系统成像过程不同,其成像特性分

析一直备受关注,成像特性分析主要集中在空域、空间频域和相空平面内^[2~7]。一般地,分析的主要目的是证明波前编码系统点扩展函数(PSF)或光学传递函数(OTF)对离焦像差的不变特性。实际上,波前编码系统对除离焦像差以外的离轴像差也具有一

收稿日期: 2011-06-15; 收到修改稿日期: 2011-08-07

作者简介: 陈守谦(1981—),男,博士研究生,主要从事傅里叶光学方面的研究。E-mail: csq_hit@163.com

导师简介: 范志刚(1966—),男,教授,主要从事精密光电测试技术方面的研究。E-mail: fzg@hit.edu.cn

定的抑制作用。文献[7]和[8]分别由空域及频域的性质出发,对波前编码系统的离轴像差敏感性进行了研究。而光线像差及点列图在光学系统成像特性的分析中也起着较为重要的作用。与空域中的 PSF 和频域中的 OTF 相比,光线像差及点列图在系统成像特性分析方面有着较为简单直观的优点。为了更加深入全面地了解波前编码系统对离轴像差的敏感性,本文从几何光学的角度出发,分别对波前编码系统初级像散和初级彗差敏感性进行了研究。分析结果有助于从多角度更为直观准确地掌握波前编码这一新颖的成像技术。

2 波前编码系统光线像差计算

以单色光入射为前提,由于彗差和像散在笛卡尔坐标系下两方向是不可分离的,研究一个二维波前编码系统。考虑一般幂函数的奇对称的相位掩模板,其相位函数 $\theta(x, y)$ 可表示为^[9]

$$\theta(x, y) = a_m (\text{sgn } x |x|^m + \text{sgn } y |y|^m), \quad (1)$$

式中 x, y 是光瞳处的空间坐标, a_m 是相位板参数, $\text{sgn}(\)$ 是符号函数, m 为相位板的次数。对于含有奇对称相位板 $\theta(x, y)$ 的波前编码系统,当光瞳处的像差分布函数为 $\phi(x, y)$ 时,系统的波前像差 $\Phi(x, y)$ 可表示为

$$\Phi(x, y) = a_m (\text{sgn } x |x|^m + \text{sgn } y |y|^m) + \phi(x, y), \quad (2)$$

考虑如图 1 所示的波前编码系统,其由相位掩模板和焦距为 f 的理想透镜组成。根据波像差与光线像差的关系,通过微分波像差可得到光学系统的光线像差^[10]。由(2)式可知,在笛卡儿坐标系中,含像差的波前编码系统像面横纵坐标方向上的光线像差分量 $\Delta x, \Delta y$ 分别为

$$\Delta x = (n-1)f \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} = (n-1)f \left[ma_m \text{sgn } x |x|^{m-1} + \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x} \right], \quad (3)$$

$$\Delta y = (n-1)f \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial y} = (n-1)f \left[ma_m \text{sgn } y |y|^{m-1} + \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial y} \right], \quad (4)$$

式中 n 为相位掩模板材料的折射率,像空间的折射率为 1。下面分两种情况来研究波前编码系统光线像差的变化特性:1)系统中同时含有离焦像差和像散时波前编码系统光线像差的变化;2)系统中同时含有离焦像差和彗差时波前编码系统光线像差的变化。

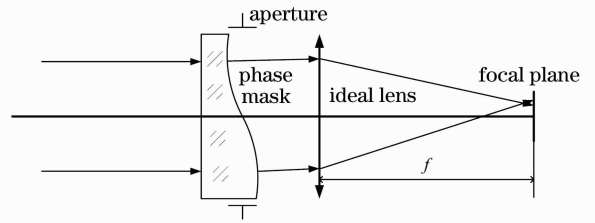


图 1 波前编码系统的原理图

Fig. 1 Schematic of wavefront coding system

3 像散敏感性分析

3.1 含像散系统的光线像差

考虑同时含有离焦像差和像散的波前编码系统,像差分布函数 $\phi(x, y)$ 可表示为

$$\phi(x, y) = W_{20}(x^2 + y^2) + W_{22}(x \cos \theta + y \sin \theta)^2, \quad (5)$$

式中 W_{20} 和 W_{22} 分别为波像差表示的离焦系数和像散系数, θ 为像散的方向。为了分析简单且不失一般性,以较为典型的三次相位掩模板 $\theta(x, y) = \alpha(x^3 + y^3)$ (其中 $\alpha = a_3$ 为三次相位模板参数) 作为分析对象。由(3)式和(4)式,含离焦及像散的三次相位板波前编码系统光线像差分量 Δx 及 Δy 分别为

$$\Delta x = (n-1)f(3\alpha x^2 + 2W_{20}x + 2W_{22}x \cos^2 \theta + W_{22}y \sin 2\theta), \quad (6)$$

$$\Delta y = (n-1)f(3\alpha y^2 + 2W_{20}y + 2W_{22}y \sin^2 \theta + W_{22}x \sin 2\theta). \quad (7)$$

观察(6)式和(7)式,可以看出横纵向的光线像差都为 x, y 的函数,即像散是横纵坐标两方向不可分离的像差,研究像散光线像差时,首先需确定某个坐标方向,再将其简化为一维系统进行分析。在开始讨论之前,首先研究不存在像散时,普通光学系统和波前编码系统光线像差随离焦误差的变化情况。图 2 为普通光学系统和波前编码系统的光线像差随离焦的变化情况。由于光线像差与系统相对孔径有关,选取相对孔径为 0.2 的系统作为研究对象,归一化孔径下,可将焦距 f 看作为 10 mm,方形光瞳边长为 2 mm ($x \in [-1, 1]; y \in [-1, 1]$) 的系统。此外,选取的相位板参数 $\alpha = 10\lambda$, 相位板材料折射率 n 为 1.5, 光波波长 λ 为 587.6 nm。严格意义上讲,根据三次相位掩模板表达式,相位板参数 α 的单位应为 λmm^{-3} , 而由于光瞳坐标单位为 mm, 为了分析方便,忽略光瞳坐标单位并指定相位板参数 α 的单位为波长 λ , 相应地,忽略光瞳坐标单位后,离焦系数、像散系数和彗差系数的单位也为波长 λ 。由图 2(a)可以看出,随着离焦误差的增大,衍射受限系统光线像差迅速变化。当

$W_{20}=0$ 时的光线像差可近似为 0(所有光线会聚到一点),而在离焦误差为 3λ 时,其光线像差增大到接近 0.04 mm。图 2(b)中,波前编码系统随离焦的光线像

差显然比衍射受限系统的光线像差要大,但其在随离焦误差变化较为平缓,这也正是波前编码系统离焦不变特性的原因。

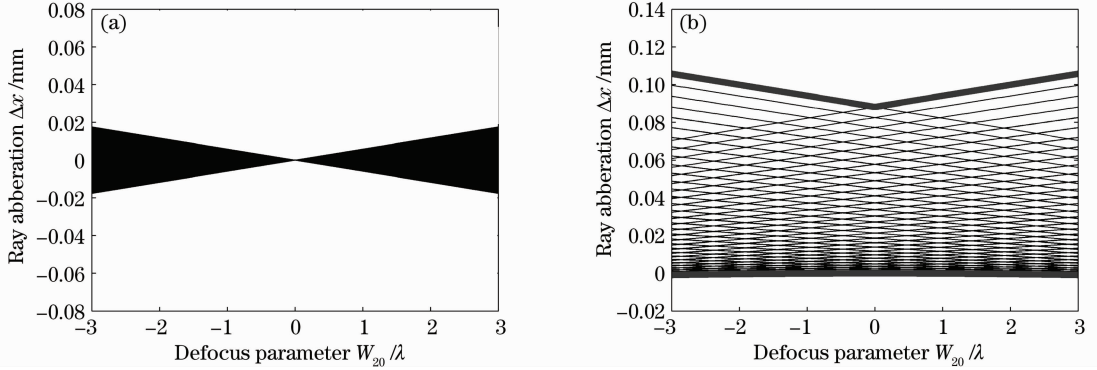


图 2 (a)普通系统与(b)波前编码系统光线像差随离焦误差变化情况

Fig. 2 Ray aberration of various out-of-focus of both (a) traditional system and (b) wavefront coding system with a cubic phase mask

3.2 含像散系统光线像差边界

下面分析当波前编码系统中含有一定像散时,光线像差随离焦误差的变化情况。通过图 2(b)可以看出,光线像差上边界和下边界直接影响其大小及变化趋势。可通过光线像差上下边界的变化情况来研究像散对波前编码系统的影响。光线像差边界可通过连续函数极值点求解方法得到(对于在区间

$[a, b]$ 内的连续函数 $f(x)$,其极值点可通过其导数 $f'(x_p) = 0$ 的点计算的函数值 $f(x_p)$ 和其边界值 $f(a)$ 和 $f(b)$ 求得)。通过(5)式可得到含离焦像差及像散的波前编码系统的光线像差边界,在这里直接给出 x 方向的上边界 Δx_{up} 和下边界 Δx_{down} 计算结果(其中 $x \in [-1, 1]$)(y 方向与其计算及分析方法相同):

$$\Delta x_{up} = \begin{cases} (n-1)f(3\alpha + 2W_{20} + 2W_{22}\cos^2\theta + W_{22}y\sin 2\theta), & W_{20} + W_{22}\cos^2\theta \geq 0 \\ (n-1)f(3\alpha - 2W_{20} - 2W_{22}\cos^2\theta + W_{22}y\sin 2\theta), & \text{other} \end{cases} \quad (8)$$

$$\Delta x_{down} = \begin{cases} (n-1)f(3\alpha + 2W_{20} + 2W_{22}\cos^2\theta + W_{22}y\sin 2\theta), & U < 0 \\ (n-1)f(3\alpha - 2W_{20} - 2W_{22}\cos^2\theta + W_{22}y\sin 2\theta), & V < 0 \\ (n-1)f(3\alpha x_p^2 + 2W_{20}x_p + 2W_{22}x_p\cos^2\theta + W_{22}y\sin 2\theta), & \text{other} \end{cases} \quad (9)$$

式中

$$\begin{aligned} U &= 3\alpha + 2W_{20} + 2W_{22}\cos^2\theta - 3\alpha x_p^2 - 2W_{20}x_p - 2W_{22}x_p\cos^2\theta, \\ V &= 3\alpha - 2W_{20} - 2W_{22}\cos^2\theta - 3\alpha x_p^2 - 2W_{20}x_p - 2W_{22}x_p\cos^2\theta, \end{aligned} \quad (10)$$

式中 x_p 为通过导数方程得到的极值点坐标: $x_p = (-W_{20} - W_{22}\cos^2\theta)/(3\alpha)$ 。对(8)式和(9)式进行两点说明:1) 两式为切向方向且 y 为常数时所计算的结果;2) 光线像差上边界由 $x = 1$ 和 $x = -1$ 孔径边缘光线确定,下边界由导数方程求解的极值点及边缘光线确定。

3.3 含像散系统的光线像差分析

由(8)式和(9)式可知,含像散系统的光线像差与像散系数 W_{22} 、像散方向 θ 和空间坐标都相关。首先来研究光线像差随像散系数 W_{22} 的变化,图 3 为当 $y = 0, \theta = 30^\circ$ 及像散系数 W_{22} 为 $-2\lambda, 0\lambda$ 和 2λ 时

光线像差随离焦的变化情况。由(8)式上边界可以发现,像散系数的变化只改变由 W_{20} 确定的直线方程的截距,并不改变上边界直线方程的斜率。光线像差的最小值位置为上边界两边缘光线的交点位置,交点位置满足方程 $W_{20} + W_{22}\cos^2\theta = 0$,即光线像差最小值位置与像散系数 W_{22} 相关,那么由像散系数的不同引起的上边界直线方程截距的变化仅使光线像差上边界沿着光轴左右移动,并不影响光线像差的大小。来考虑下边界随像散系数 W_{22} 的变化,(9)式中下边界的前两项是当离焦参数 W_{20} 很大时由边缘光线 $x = 1$ 和 $x = -1$ 计算得到的,这样的极限情

况可不予考虑,在这里不研究条件 $U < 0$ 和 $V < 0$ 确定的下边界,仅研究由极值点 x_p 确定的抛物线方程的下边界。光线像差下边界相对于上边界的最小值位置由抛物线的最大值位置确定。将极值点带入(9)式的第三个式子可得 $y = 0$ 时含像散的下边界为

$$\Delta x_{\text{down}} = (n-1)f\left(\frac{1}{3\alpha} - 2\right)(W_{20} + W_{22}\cos^2\theta)^2, \quad (11)$$

由(11)式可知,光线像差下边界的最小值位置同样满足方程 $W_{20} + W_{22}\cos^2\theta = 0$ 。综上所述,当 y 和 θ 一定时,波前编码系统的光线像差大小不随像散系数 W_{22} 变化,仅光线像差的最小值位置沿光轴移动,移动量满足方程 $W_{20} + W_{22}\cos^2\theta = 0$ 。

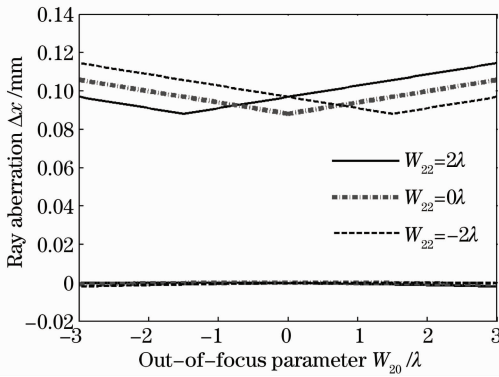


图3 $\theta = 30^\circ, y = 0$ 时,不同像散系数的切向光线像差随离焦参数的变化

Fig. 3 Tangential ray aberrations for various astigmatism coefficients versus out-of-focus parameter when $\theta = 30^\circ$ and $y = 0$

下面来研究当波前编码系统存在像散时,光线像差随 θ 的变化。由(8)式和(9)式可知,像散方向 θ 在光线上下边界中与像散系数 W_{22} 具有同等地位。通过图4可以发现光线像差随 θ 变化与随 W_{22} 变化趋势相同,即像散方向 θ 同样不改变光线像差的大小,此外,光线像差的最小值位置满足方程 $W_{20} + W_{22}\cos^2\theta = 0$,说明当像散系数 W_{22} 及方向 θ 变化时,总能在某一特定的离焦位置找到光线像差最小值位置。同理,纵坐标 y 方向上,当像散系数 W_{22} 及像散方向 θ 满足 $W_{20} + W_{22}\sin^2\theta = 0$ 时光线像差最小。可见,除 $\sin\theta = \cos\theta$ 时光线像差两方向分量可同时取得最小之外,当 θ 为其它值时两方向光线像差并不能同时取最小值。这种光线像差最小值的偏移会使系统的点列图发生形变,在下面的讨论中将对这一性质进行分析。

最后分析在不同纵坐标 y 位置光线像差的变化。当 $W_{22} = 2\lambda$ 且 $\theta = 30^\circ$ 时,光线像差随纵坐标 y 的变

化情况如图5所示。由图5可知,当 y 取不同值时,光线像差上下边界相对位置保持不变,但其整体沿着光线像差轴上下移动。移动量可通过(8)式和(9)式确定,为 $W_{22}y\sin 2\theta$ 。由(6)式和(7)式可知,当仅含离焦像差时($W_{22} = 0$),光线像差分量 Δx 和 Δy 相互独立,即光线像差分量 $\Delta x(\Delta y)$ 与纵坐标 $y(x)$ 无关。与仅含离焦像差的波前编码系统相比,由于像散的存在,尽管像散系数 W_{22} 及方向角 θ 不影响光线像差的大小,但由于像散横纵坐标两方向不可分离,使得光线像差分量 Δx 和 Δy 与横纵坐标都相关。

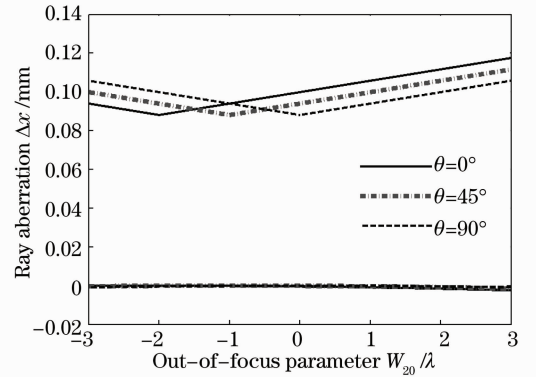


图4 $W_{22} = 2\lambda, y = 0$ 时,不同像散方向的切向光线像差随离焦参数的变化

Fig. 4 Tangential ray aberrations for various orientations of the astigmatism versus out-of-focus parameter when $W_{22} = 2\lambda$ and $y = 0$

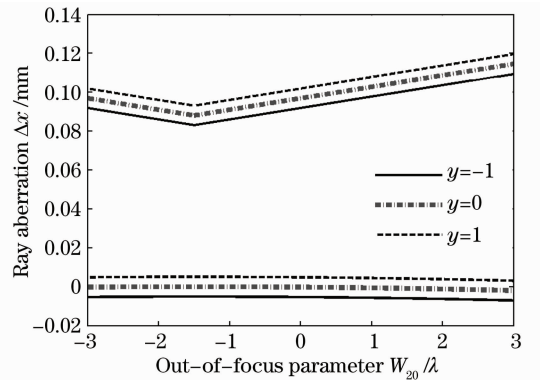


图5 $W_{22} = 2\lambda, \theta = 30^\circ$ 时,不同坐标 y 的光线像差随离焦系数的变化

Fig. 5 Ray aberrations for various pupil coordinates versus out-of-focus parameter when $W_{22} = 2\lambda$ and $\theta = 30^\circ$

3.4 含像散系统点列图特性分析

在波前编码系统中,由于光瞳处相位板的引入,系统属于大像差系统,点列图和PSF两者之间的差别并不是很大^[11],因此可直接使用点列图对系统成像质量进行评价。图6给出了包含不同离焦和像散

时波前编码系统的点列图,图中的 $\theta=30^\circ$ 。由图6可知,当波前编码系统存在像散时,点列图在纵横坐标方向上发生弥散及变形,纵横坐标的弥散量可由 x 和 y 方向光线像差随坐标的移动量 $W_{22}y\sin 2\theta$ 和 $W_{22}x\sin 2\theta$ 确定。此外,由于图6中像散方向不满

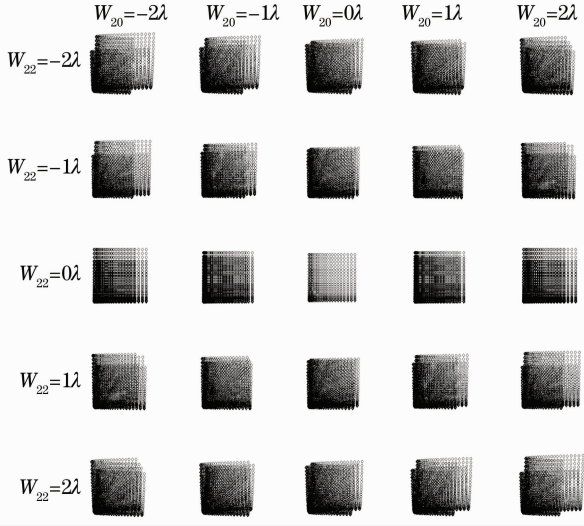


图6 $\theta=30^\circ$ 时,不同离焦参数和像散系数的波前编码系统点列图

Fig. 6 Spot diagrams of wavefront coding system with various out-of-focus parameter and astigmatism coefficient when the orientation of astigmatism $\theta=30^\circ$

足 $\sin \theta = \cos \theta$,两方向的光线像差并不对称分布,可由 $W_{20} = 0$ 且 $W_{22} = -2\lambda$ 时的点列图较为清楚地看到这种情况。实际上,可通过(8)式和(9)式光线像差上下边界的差值得到点列图的尺寸,进而量化其弥散程度及形变量,并可通过弥散程度来确定含像散时系统的最佳成像位置,这里不对其进行详细的分析。由点列图可以看出,点列图的弥散和变形会使系统的成像质量较不存在像散时有所下降,但当波前编码系统像散一定时,其仍保持着离焦不变特性。

可通过系统的调制传递函数(MTF)更为清晰地看到像散一定时波前编码系统的离焦不变特性。图7为当波前编码系统含有一定像散时,系统MTF随离焦像差的变化情况。为了便于比较,每幅子图中还给出了无像散正焦位置($W_{20} = 0$ 且 $W_{22} = 0$)时系统的MTF。由图7可以看出,尽管系统切向和径向的MTF几乎随离焦像差不发生变化,但其幅值较不含像散的波前编码系统有较大程度的下降。当像散方向在区间 $[0^\circ, 90^\circ]$ 区间内取较小或较大值时,由于 $\sin \theta$ 和 $\cos \theta$ 存在差别,切向和径向的光线像差不同,两方向的MTF存在差别。但由于MTF差别很小,可不予考虑。MTF幅值的下降会增加图像复原过程的难度,因此,当波前编码系统存在像散时不改变系统的离焦不变特性,但可使系统对中间图像的可恢复能力有所下降。

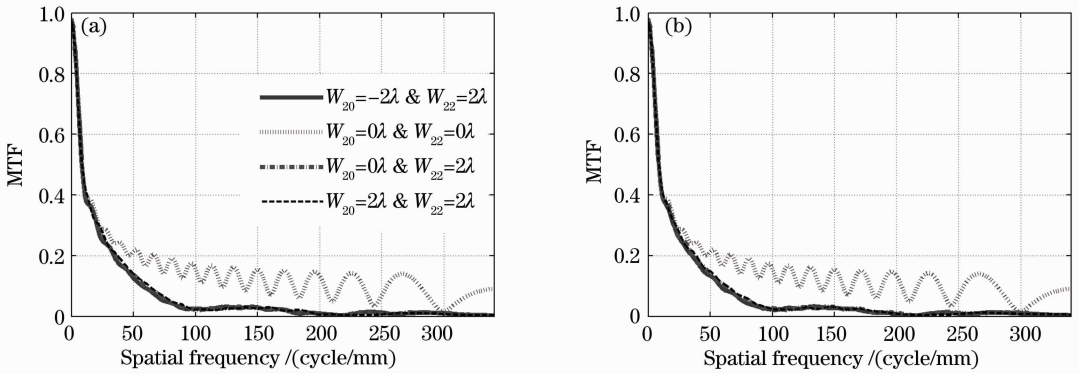


图7 $\theta=30^\circ$ 不同离焦误差及像散波前编码系统MTFs。(a)切向MTFs;(b)径向MTFs

Fig. 7 MTF of wavefront coding system with various out-of-focus error and astigmatism when the orientation of astigmatism $\theta=30^\circ$. (a) Tangential MTF; (b) sagittal MTF

4 彗差敏感性分析

当系统含有离焦和彗差时,波前像差 $\phi(x, y)$ 可表示为

$$\phi(x, y) = W_{20}(x^2 + y^2) + W_{31}(x^2 + y^2)x, \quad (12)$$

由(3)式和(4)式可得光线像差分量 Δx 及 Δy 分别为

$$\Delta x = (n-1)f(3\alpha x^2 + 2W_{20}x + 3W_{31}x^2 + W_{31}y^2), \quad (13)$$

$$\Delta y = (n-1)f(3\alpha y^2 + 2W_{20}y + 2W_{31}xy), \quad (14)$$

由(13)式和(14)式可以发现, x 及 y 方向的光线像差有所不同,两方向存在彗差时光线像差上下边界为

$$\Delta x_{\text{up}} = \begin{cases} (n-1)f(3\alpha + 2W_{20} + 3W_{31} + W_{31}y^2), & W_{20} \geq 0 \\ (n-1)f(3\alpha - 2W_{20} + 3W_{31} + W_{31}y^2), & \text{other} \end{cases}, \quad (15)$$

$$\Delta x_{\text{down}} = (n-1)f(3\alpha x_{\text{pl}}^2 + 2W_{20}x_{\text{pl}} + 3W_{31}x_{\text{pl}}^2 + W_{31}y^2), \quad (16)$$

$$\Delta y_{\text{up}} = \begin{cases} (n-1)f(3\alpha + 2W_{20} + 2W_{31}x), & W_{20} + W_{31}x \geq 0 \\ (n-1)f(3\alpha - 2W_{20} - 2W_{31}x), & \text{other} \end{cases}, \quad (17)$$

$$\Delta y_{\text{down}} = (n-1)f(3\alpha y_{\text{pl}}^2 + 2W_{20}y_{\text{pl}} + 2W_{31}xy_{\text{pl}}), \quad (18)$$

式中极值点 $x_{\text{pl}} = -W_{20}/(3\alpha + 3W_{31})$, $y_{\text{pl}} = -(W_{20} + W_{31}x)/(3\alpha)$ 。为了简便,(16)式和(18)式忽略了当离焦像差很大时由孔径边缘光线确定的下边界。

根据对像散的分析原理可知,含彗差的波前编码系统切向光线像差最小值位置为上边界两条孔径边缘光线的交点位置,最小值位置应满足条件 $W_{20} = 0$ 。可见该条件与彗差系数 W_{31} 及孔径坐标 y 无关,因此切向光线像差随彗差系数及孔径坐标沿光线像差方向整体地变大或减小,而光线像差最小

值位置不变,通过图 8(a)和图 9(a)能够发现这一特性。相对而言,由于径向光线像差最小值位置满足方程 $W_{20} + W_{31}x = 0$,意味着径向光线像差最小值位置与彗差系数 W_{31} 及空间坐标 x 相关。这样,径向方向上总可以在某一特定的离焦位置找到光线像差最小值位置,且与不含彗差的波前编码系统相比,其光线像差最小值相同,可由图 8(b)和图 9(b)较为直观地发现径向光线像差随彗差系数 W_{31} 及空间坐标 x 的变化特性。

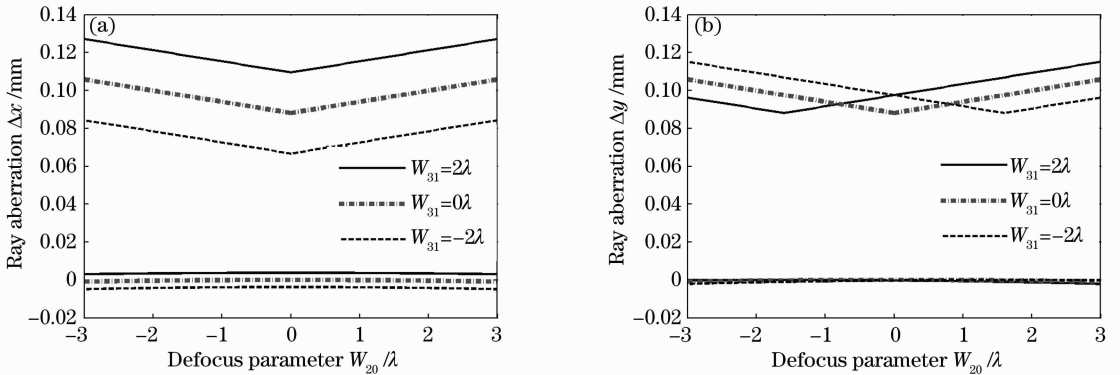


图 8 不同彗差系数时光线像差随离焦参数的变化。(a)切向 $y=0.8$; (b)径向 $x=0.8$

Fig. 8 Ray aberrations versus out-of-focus parameter for various coma coefficients. (a) Tangential $y=0.8$; (b) sagittal $x=0.8$

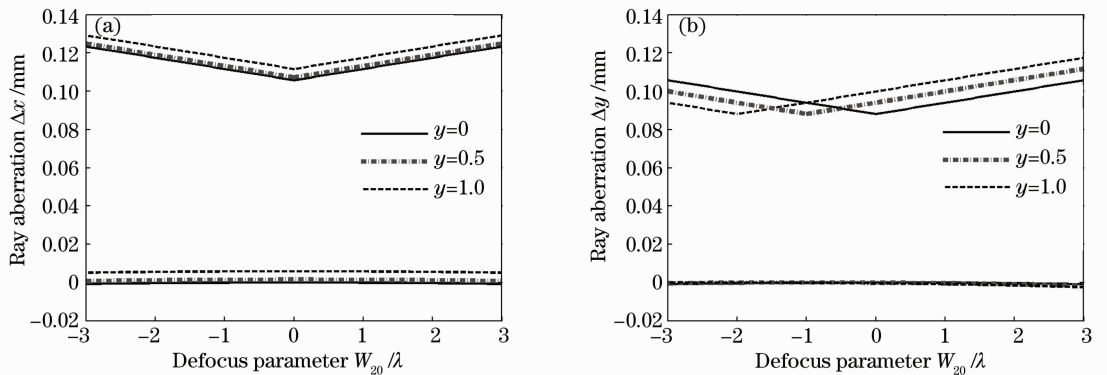


图 9 $W_{31} = 2\lambda$ 时,不同坐标位置光线像差随离焦参数的变化。(a)切向;(b)径向

Fig. 9 Ray aberrations for various pupil coordinates versus out-of-focus parameter when $W_{31} = 2\lambda$. (a) Tangential; (b) sagittal

如图 10 所示,通过含彗差波前编码系统的点列图来了解系统随彗差的变化特性。当波前编码系统

含有如 $W_{31}(x^2 + y^2)x$ 的彗差时,切向和径向光线像差并不对称,光线像差的大小与彗差系数 W_{31} 正负

有关。通过图 8(a) 和图 10 中 $W_{31} = 2\lambda$ 和 $W_{31} = -2\lambda$ 时光线像差的变化情况, 可确定含彗差系统的径向及切线方向光线像差的大小关系。总体来讲, 当波前编码系统所含彗差一定时, 其切向和径向光线像差均对离焦像差不敏感, 但其在两方向上的光线像差大小不同, 意味着两方向上对物体的传递能力不相同。

图 11 为 $W_{31} = 2$ 时不同离焦位置的波前编码系统切向和径向 MTF, 每幅子图中同样给出了无像差系统的 MTF。如图 11 所示, 切向及径向 MTF 较无像差的波前编码系统 MTF 有所下降, 切向的 MTF 下降幅度较大, 而径向下下降幅度较小, 意味着切向具有更大的光线像差, 这与图 10 中切向点列图弥散程度较大相对应。MTF 幅值的下降可使中间模糊图像难于恢复, 也对图像复原滤波器提出了更高的要求。另一方面, 切向各离焦位置的 MTF 比径向各离焦位置 MTF 具有更好的一致性, 说明了当系统含有彗差时, 切向和径向对物体信息的传递能力和离焦不变特性有所不同。因此, 当波前编码

系统存在彗差时, 其不仅改变系统对中间图像的可复原能力, 同时也对系统的离焦不变特性有所改变。

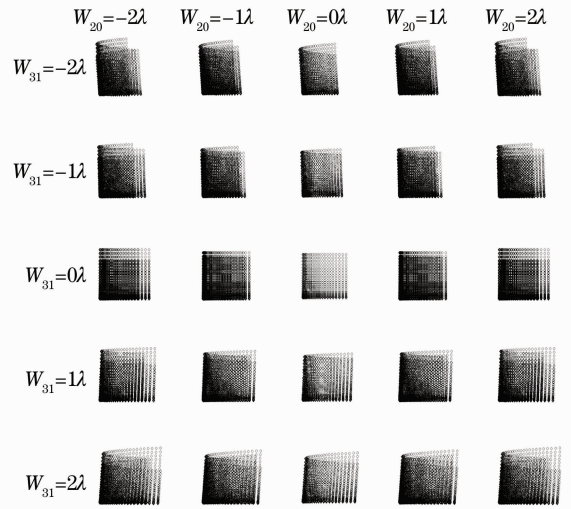


图 10 不同离焦误差和彗差系数的波前编码系统点列图
Fig. 10 Spot diagrams of wavefront coding system with various out-of-focus error and coma coefficient

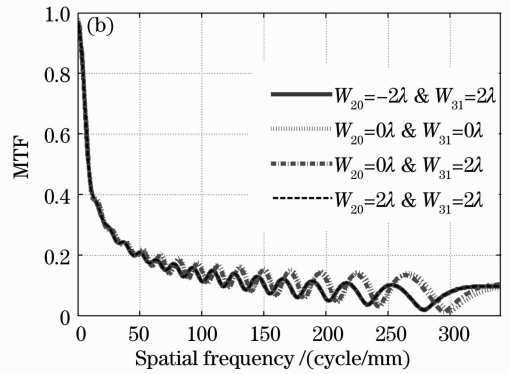
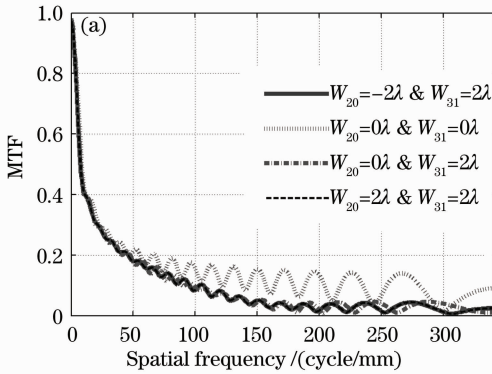


图 11 含不同彗差及离焦像差的 MTF。(a)切向 MTF; (b)径向 MTF

Fig. 11 MTF of wavefront coding system with various out-of-focus error and coma. (a) Tangential MTF; (b) sagittal MTF

5 结 论

从光线像差的角度分析了波前编码系统对像散和彗差的敏感性。当系统中存在像散时, 其光线像差与像散系数、像散方向和孔径坐标都相关, 不同的像散系数或像散方向会使光线像差的最小值位置沿光轴移动, 但不改变光线像差的大小; 不同的孔径坐标同样不改变光线像差的最小值, 但其整体沿光线像差轴上下移动。含像散系统光线像差的移动会使系统的点列图发生弥散和变形, 从而改变系统对中间图像的可复原能力, 但不同像散系数波前编码系统的离焦不变特性变化不大。当系统中存在彗差

时, 不同彗差系数的切向光线像差沿光线像差方向上下移动且光线像差大小发生变化, 而不同彗差系数的径向光线像差仅沿光轴方向左右移动。彗差系数一定时, 不同孔径坐标的切向光线像差大小不变, 沿光线像差轴上下移动, 而径向光线像差大小不变沿光轴左右移动。由于切向和径向的光线像差及点列图变化并不对称, 彗差的存在对系统的离焦不变特性及图像的可复原性均产生影响, 不仅使系统对中间图像的可复原能力降低, 也使两方向的离焦不变特性有所不同。

参 考 文 献

- 1 E. R. Dowski, Jr., W. T. Cathey. Extended depth of field through wave-front coding[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(11): 1859~1866
- 2 G. Muyo, A. R. Harvey. Decomposition of the optical transfer function; wavefront coding imaging systems[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(20): 2715~2717
- 3 M. Somayaji, M. P. Christensen. Enhancing form factor and light collection of multiplex imaging systems by using a cubic phase mask[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(13): 2911~2923
- 4 Q. Yang, L. Liu, J. Sun *et al.*. Analysis of optical systems with extended depth of field using the Wigner distribution function[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(34): 8586~8595
- 5 Yang Qingguo, Liu Liren, Sun Jianfeng. Property of wavefront coding imaging systems for extending the depth of field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1807~1812
阳庆国, 刘立人, 孙建锋等. 扩大景深的波前编码成像系统特性分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(12): 1807~1812
- 6 Chen Yanping, Zhang Wenzhi, Zhao Tingyu *et al.*. Imaging characteristics of wavefront coding systems within spatial domain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1425~1429
陈燕平, 张文字, 赵廷玉等. 波前编码系统成像特性的空间域分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1425~1429
- 7 W. Zhang, Z. Ye, T. Zhao *et al.*. Point spread function characteristics analysis of the wavefront coding system[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(4): 1543~1552
- 8 H. Lei, H. Feng, X. Tao *et al.*. Imaging characteristics of a wavefront coding system with off-axis aberrations[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(28): 7255~7263
- 9 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics (Vol. 1) [M]. Yang Jiasu Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 192~196
玻恩, 沃耳夫. 2005 光学原理(上卷)[M] 杨葭荪译. 北京: 电子工业出版社, 2005. 192~196
- 10 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics (Vol. 2) [M]. Yang Jiasu Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 429~447
玻恩, 沃耳夫. 2005 光学原理(下卷)[M] 杨葭荪译. 北京: 电子工业出版社, 2005. 429~447
- 11 Chen Yanping, Zhang Wenzhi, Zhao Tingyu *et al.*. Spot diagram analysis for wavefront coding imaging systems with an odd-symmetrical phase plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1621~1627
陈燕平, 张文字, 赵廷玉等. 奇对称型相位板波前编码成像系统的点列图分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1621~1627

栏目编辑: 韩 峰