

文章编号: 0253-2239(2007)09-1621-7

奇对称型相位板波前编码成像系统的点列图分析

陈燕平 张文字 赵廷玉 余飞鸿 叶子

(浙江大学光电信息工程系现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 基于几何光学理论利用光线追迹方法得到了适用于任意面型相位板的大视场平行光入射情况下的光线像差近似表达式,并在此基础之上分析了奇对称型相位板波前编码系统的点列图的大小、边界以及光线结构等特性,研究了大视场角平行光入射下的光线像差增强及点列图形变等现象,并且给出了相应的近似数学解析式来描述这些特性。通过对奇对称型相位板波前编码成像系统的点列图特性分析,有助于进一步的理解波前编码技术并且指导实际系统的设计。

关键词: 成像系统; 波前编码; 奇对称型相位板; 像差; 点列图; 近似解析式

中图分类号: O435.2; TN762 文献标识码: A

Spot Diagram Analysis for Wavefront Coding Imaging Systems with an Odd-Symmetrical Phase Plate

Chen Yanping Zhang Wenzhi Zhao Tingyu Yu Feihong Ye Zi

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: The ray tracing method in geometric optics is applied to acquire the asymptotic expressions of ray aberrations for phase plates of free form illuminated by collimated beams with large field of view, with which the spot diagram characteristics of the wavefront coding imaging system with anti-symmetric phase plates, including spot size, boundaries, and ray intersection structures, and ray aberrations enhancements and spot shape variations due to the large view-field angle are analyzed. The corresponding asymptotic expressions to describe the above characteristics are presented. With this spot diagram characteristics analysis, a deeper insight into the wavefront coding imaging systems is acquired and instructions for designing real systems are found.

Key words: imaging system; wavefront coding; odd-symmetric phase plate; aberration; spot diagram; asymptotic expression

1 引 言

波前编码(Wavefront Coding)技术不仅可以大幅度地增加光学系统的景深,同时还可以抑制各种离焦类型的像差,包括球差、色差、匹兹凡像面弯曲以及由安装误差和温度变化引起的离焦等^[1,2]。由于相位板对入射光线引入的偏折比较小,相位板的成像特性分析以及波前编码系统的优化等一般都是使用傅里叶光学的方法进行^[3~7],但是这种方法在求解数学表达式时会较为繁琐,并且到目前为止,还

没有发现有作者对波前编码系统的点列图分布的形状分布,强度分布以及大视场入射等光学系统参量的关系进行详细的分析。

成像系统的点列图,作为光学系统成像质量评价的一种常见手段,在一定程度上可以近似为光学系统的点扩展函数(PSF),并且计算相对较为简单。因此本文将从几何光学的角度,采用光线追迹的方法分析大视场平行光入射情况下奇对称型相位板引入的点列图的形状、强度、边界分布及其同光学系统

作者简介: 陈燕平(1955—),女,浙江诸暨人,博士研究生,主要从事光学成像技术方面的研究。

E-mail: chenyanping@hotmail.com

导师简介: 余飞鸿(1964—),男,浙江淳安人,教授,博士生导师,主要从事光学工程方面的研究。

E-mail: feihong@zju.edu.cn

收稿日期: 2006-12-13; 收到修改稿日期: 2007-03-16

参量的关系,这将有助于对波前编码成像系统的设计及其成像本质的进一步理解,为设计符合要求的波前编码系统提供理论上的指导。

2 光线像差的导出

入射到光学系统中孔径平面相位板上的光线,对于指定的视场,不一定是完全平行光,而是具有一定角度分布的锥形发散或会聚光束,但是这样的光束结构分析起来比较困难。为了解相位板在平行光入射下引入的像差情况,同时也为了简化起见,我们仅对光阑在前理想透镜在后,并且仅有平行光入射的光学系统进行分析。同时在波前编码系统中,相位板是放置在光阑面上的。这样的系统模型可以很好地用来表征分析波前编码系统的成像性能。

基于上述假设,为了分析大视场平行光入射情况下相位板引入的光线像差,如图 1 构建波前编码光学系统和坐标系,其中 y 轴指向纸内。将一块半径为 r 折射率为 n 的相位板放置在一个焦距为 f 的理想透镜前,并且将系统的光阑设在相位板朝向理想透镜的一面。相位板朝向理想透镜的面型为 $Z=f(X,Y)$,而另一面则为平面,其余介质均为空气。

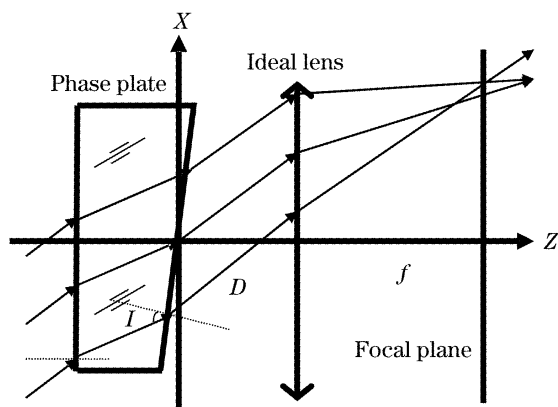


图 1 波前编码光学系统和坐标系

Fig. 1 Wavefront coding system and the coordinate system

令入射光线的方向余弦矢量为 $[\cos \alpha_0, \cos \beta_0, \cos \gamma_0]$ 。由于相位板的第一个面为平面,则通过空间光线追迹,可以得到入射光线在相位板第一个面发生偏折后的方向余弦矢量为 $[\cos \alpha_0/n, \cos \beta_0/n, (\cos \gamma_0 + P_0)/n]$,其中 P_0 等于 $(n^2 - 1 + \cos^2 \gamma_0)^{1/2} - \cos \gamma_0$ 。入射光线在相位板第二个面 (X, Y, Z) 位置上的法线方向余弦矢量为 $[-\partial F/\partial X, -\partial F/\partial Y, 1]/T$,其中 T 为归一化参量并且等于 $[(\partial F/\partial X)^2 + (\partial F/\partial Y)^2 + 1]^{1/2}$,则入射光线与法线夹角 I 的余弦值为

$$\cos I = \frac{\cos \alpha_0}{nT} \left(-\frac{\partial F}{\partial X} \right) + \frac{\cos \beta_0}{nT} \left(-\frac{\partial F}{\partial Y} \right) + \frac{n \cos \gamma_0 + P_0}{nT}, \quad (1)$$

光线在第二个面上折射后的方向余弦矢量为

$$[\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma] = \left[\cos \alpha_0 + \frac{P_1}{T} \left(-\frac{\partial F}{\partial X} \right), \cos \beta_0 + \frac{P_1}{T} \left(-\frac{\partial F}{\partial Y} \right), \cos \gamma_0 + P_0 + \frac{P_1}{T} \right], \quad (2)$$

其中 P_1 为

$$P_1 = \sqrt{1 - n^2 + n^2 \cos^2 I} - n \cos I, \quad (3)$$

对于通常的相位板,面型函数 $Z = f(X, Y)$ 在 $(0, 0, 0)$ 处具有零导数,即主光线通过相位板后不改变光线方向。通过相位板后的出射光线经过理想透镜后在焦面的交点位置为 $(f \cos \alpha / \cos \gamma, f \cos \beta / \cos \gamma, f)$,则相位板引入的光线像差为

$$\Delta X = f \left(\frac{\cos \alpha}{\cos \gamma} - \frac{\cos \alpha_0}{\cos \gamma_0} \right), \quad \Delta Y = f \left(\frac{\cos \beta}{\cos \gamma} - \frac{\cos \beta_0}{\cos \gamma_0} \right). \quad (4)$$

相位板因厚度变化而引入的相位改变量一般较小,即 $F(X, Y)$ 具有较小的导数,相位板对光线造成的偏折是十分微小的, $\cos I$ 可以近似为平行光入射平板时光线在第二个表面上的入射角,因而出射光线相对于入射光线的方向余弦改变量可以近似为

$$\begin{cases} \Delta \alpha = \cos \alpha - \cos \alpha_0 = \frac{P_1}{T} \left(-\frac{\partial F}{\partial X} \right) \approx (\sqrt{n^2 - 1 + \cos^2 \gamma_0} - \cos \gamma_0) \left(\frac{\partial F}{\partial X} \right), \\ \Delta \beta = \cos \beta - \cos \beta_0 = \frac{P_1}{T} \left(-\frac{\partial F}{\partial Y} \right) \approx (\sqrt{n^2 - 1 + \cos^2 \gamma_0} - \cos \gamma_0) \left(\frac{\partial F}{\partial Y} \right), \end{cases} \quad (5)$$

由于 $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = (\cos \alpha_0 + \Delta \alpha)^2 + (\cos \beta_0 + \Delta \beta)^2 + (\cos \gamma_0 + \Delta \gamma)^2 = 1$,略去高次项 $\Delta \alpha^2$ 、 $\Delta \beta^2$ 和 $\Delta \gamma^2$,则可以得到

$$\Delta \gamma \approx -(\cos \alpha_0 \Delta \alpha + \cos \beta_0 \Delta \beta) / \cos \gamma_0, \quad (6)$$

将(5)式和(6)式代入(4)并略去高次项,则可以得到光线像差的近似表达式

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta X &= f \left(\frac{\cos \alpha_0 + \Delta \alpha}{\cos \gamma_0 + \Delta \gamma} - \frac{\cos \alpha_0}{\cos \gamma_0} \right) \approx \\ & \frac{f(\sqrt{n^2 - 1 + \cos^2 \gamma_0} - \cos \gamma_0)}{\cos^3 \gamma_0} \left[\left(\frac{\partial F}{\partial X} \right) (\cos^2 \alpha_0 + \cos^2 \gamma_0) + \left(\frac{\partial F}{\partial Y} \right) \cos \alpha_0 \cos \beta_0 \right], \\ \Delta Y &= f \left(\frac{\cos \beta_0 + \Delta \beta}{\cos \gamma_0 + \Delta \gamma} - \frac{\cos \beta_0}{\cos \gamma_0} \right) \approx \\ & \frac{f(\sqrt{n^2 - 1 + \cos^2 \gamma_0} - \cos \gamma_0)}{\cos^3 \gamma_0} \left[\left(\frac{\partial F}{\partial Y} \right) (\cos^2 \beta_0 + \cos^2 \gamma_0) + \left(\frac{\partial F}{\partial X} \right) \cos \alpha_0 \cos \beta_0 \right]. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

奇对称型相位板^[5]面型的数学表达式为

$$Z = A[\text{sign } X |X|^m + \text{sign } Y |Y|^m], \quad m = 2, 3, 4, \dots, \quad (8)$$

其中 A 为相位板常数, $\text{sign}()$ 为符号函数. 将(8)式代入(7)式可以得到

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta X &\approx \frac{mfA(\sqrt{n^2 - 1 + \cos^2 \gamma_0} - \cos \gamma_0)}{\cos^3 \gamma_0} [|X|^{m-1}(\cos^2 \alpha_0 + \cos^2 \gamma_0) + |Y|^{m-1} \cos \alpha_0 \cos \beta_0], \\ \Delta Y &\approx \frac{mfA(\sqrt{n^2 - 1 + \cos^2 \gamma_0} - \cos \gamma_0)}{\cos^3 \gamma_0} [|Y|^{m-1}(\cos^2 \beta_0 + \cos^2 \gamma_0) + |X|^{m-1} \cos \alpha_0 \cos \beta_0], \end{aligned} \right. \quad (9)$$

对于轴上平行光, (9)式可以进一步改写为

$$\Delta X \approx mfA(n-1)|X|^{m-1}, \quad \Delta Y \approx mfA(n-1)|Y|^{m-1}, \quad (10)$$

可知, 对于轴上平行光引入的光线像差(10)式与从波像差求导^[8]得到的光线像差是一致的.

图 2、图 3 给出了 $m=4, n=1.50, r=1.25 \text{ mm}, f=10.00 \text{ mm}, A=0.0050 \text{ mm}^{-3}$ 情况下由(4)式计算得

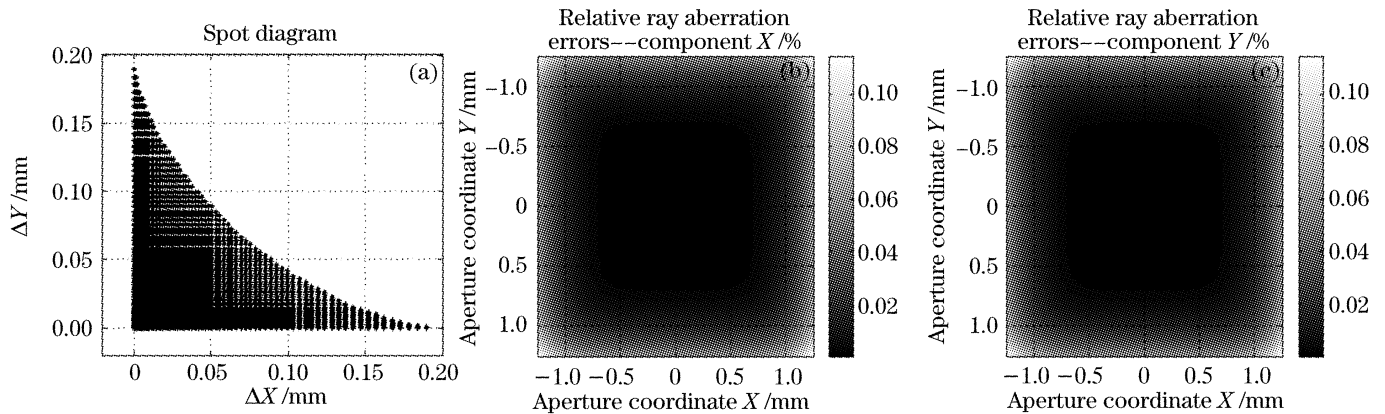


图 2 轴上平行光入射下的(a)点列图, (b) 光线像差 X 分量相对百分比误差, (c) 光线像差 Y 分量相对百分比误差
Fig. 2 (a) Spot diagram, (b) relative error for X component ray aberration, and (c) relative error for Y component ray aberration illuminated by the on-axis collimated beam

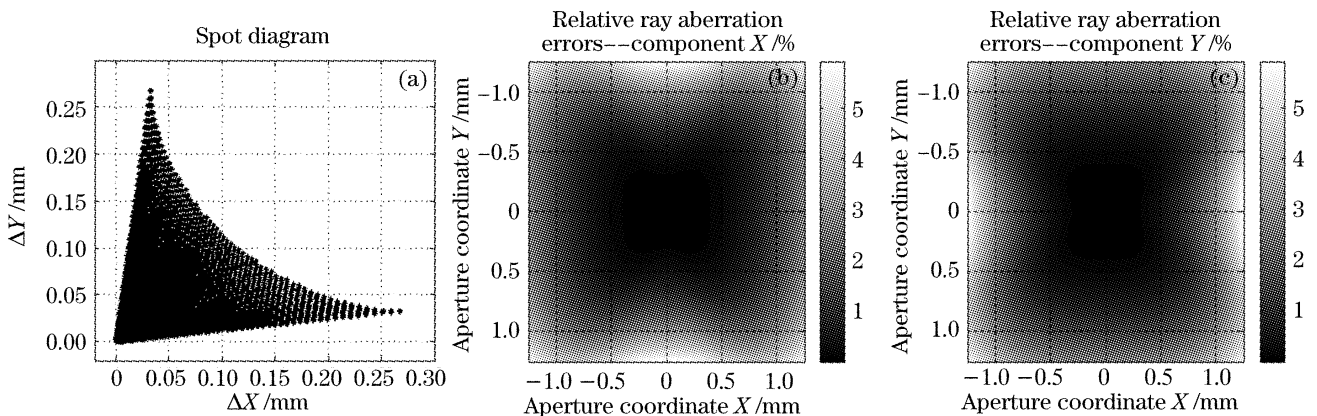


图 3 轴外平行光入射下的(a)点列图, (b) 光线像差 X 分量相对百分比误差, (c) 光线像差 Y 分量相对百分比误差
Fig. 3 (a) Spot diagram, (b) relative error for X component ray aberration, and (c) relative error for Y component ray aberration illuminated by the off axis collimated beam

到的点列图以及与由(9)式计算得到结果的误差的相对百分比。其中图 2 是轴上平行光入射,图 3 是轴外平行光入射,其入射光线子午与弧矢方向的视场角均为 20° ,即方向余弦矢量为 $[\cos \alpha_0, \cos \beta_0, \cos \gamma_0] = [0.3236, 0.3236, 0.8891]$ 。由图不难发现,对于轴上平行光入射,由(6)式计算得到的光线像差具有足够的精度,相对误差不超过 0.12%;而对于轴外平行光入射,相对误差较大,但也不超过 6.00%。这种误差的引入主要是出射光线方向余弦改变量的近似引入的。

3 点列图特性分析

在第 1 节的基础之上我们将进行奇对称型相位板点列图特性的分析,以下主要从点列图大小、边界、光线结构以及视场效应等四个方面来分析。考虑到通常情况下相位板一般用轴上平行光照射,对于点列图大小、边界以及光线结构,我们仅分析轴上平行光的情况,而在视场效应(即轴外平行光入射)中再着重分析视场对光线像差的影响。

3.1 点列图的大小

相对于传统成像系统,波前编码成像系统的点扩展函数是一个非常大的弥散斑,因而经过相位板调制而没有经过解码的波前编码系统成像是非常模糊的。由于点扩展函数在一定程度上可以通过点列图来近似,因此计算波前编码成像系统的点列图大小对于评估波前编码成像的模糊程度是非常有意义的。

不难发现(10)式是一个关于孔径坐标绝对值单调递增的函数,因此代入相位板的半径 r ,即可得到点列图的大小为

$$d = (n-1)mfAr^{m-1} = \frac{ma\lambda F^\#}{\pi}, \quad (11)$$

其中 $F^\#$ 为系统相对孔径的倒数 $f/2r$, λ 为工作波长, a 为相位板的归一化参量 $2\pi(n-1)Ar^m/\lambda$ 。由(11)式可知,波前编码系统的弥散斑大小不仅随着相位板归一化参量 a 的增大而线性增大,并且与相位板阶数 m ,系统的相对孔径以及工作波长 λ 有关。较高的相位板阶数,较长的工作波长以及小的相对孔径都会导致系统点列图的进一步增大,即成像的进一步模糊。

对应于图 2(a),可以使用快速傅里叶变换(FFT)的方法从傅里叶光学途径计算得到对应的点扩展函数(PSF),如图 4(a)所示。在图 4(b)中绘出了对应的子午方向上点扩展函数的一维分布及二条边界,其中左边界为纵坐标轴,而右边界则由(11)式确定。由图可知,虽然(11)式是通过几何光学的途径分析得到的,但是仍然能够很好地近似波前编码系统的点扩展函数大小。实际上对于三次型相位板,(11)式与从傅里叶光学途径计算得到的点扩展函数大小也是一致的^[9]。从(11)式及图 4(b)中可以注意到应用该相位板形成的波前编码点扩展函数尺寸在 0.20 mm 左右,远远大于校正良好的传统光学系统的点扩展函数尺寸。

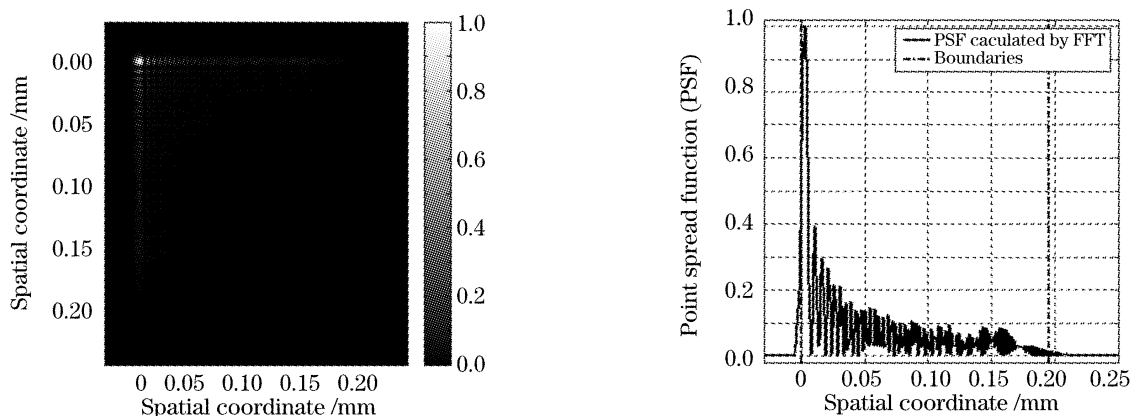


图 4 (a) 通过快速傅里叶变换计算得到二维点扩展函数, (b) 子午方向上的一维点扩展函数及其两条边界

Fig. 4 (a) Two-dimensional point spread function calculated by fast Fourier transform, (b) one-dimensional meridian point spread function calculated by fast Fourier transform and its two boundaries

3.2 点列图的边界

相对于传统的成像系统产生的点列图,波前编码系统的点列图有它的独特性,尤其是应用上述的奇对称型相位板的系统。由图 2、图 3 以及图 4 可以发现,与传统各种像差的点列图相比较,4 阶的奇

对称型相位板形成的点列图完全集中在第一象限内,而没有弥散到其它象限。这种特性与彗差残留系统的点列图有一定的相似性,而且这种特性同时也存在于其它的奇对称型相位板的点列图中。

研究(10)式可以发现,奇对称型相位板的点列

图可以用三条边界来表示,其中第一、二边界分别对应于二条直线 $\Delta X=0, \Delta Y=0$,而第三边界则对应于位于光阑边界上 $X^2+Y^2=r^2$ 时的点列图分布

$$(\Delta X)^{\frac{2}{m-1}} + (\Delta Y)^{\frac{2}{m-1}} = r^2 [(n-1)m f A]^{\frac{2}{m-1}}. \quad (12)$$

为了验证以上结论,同时也为了能够更直观地了解奇对称型相位板点列图的边界特性,图 5(a)~图 5(c)分别绘出了 $m=2,3,4$ 时由(4)式计算得到的点列图以及相应的由以上分析计算得到的三条边界。为了方便比较,在图 5 中的三种类型的相位板

具有相同的归一化参量,即面型具有相同的 $P-V$ 值。由(12)式及图 5(b)可知,对于在波前编码系统中常见的三次型相位板($m=3$),第三条边界对应于一条直线,因此常见的三次型相位板在不离焦时其点列图形状是一个等腰直角三角形;而对于 $m>3$ 的奇对称型相位板,第三条边界是凹向原点的,并且这种凹陷的程度会随着阶次的增高而增大;对于 $m=2$ 的奇对称型相位板,第三条边界是凸离原点的。

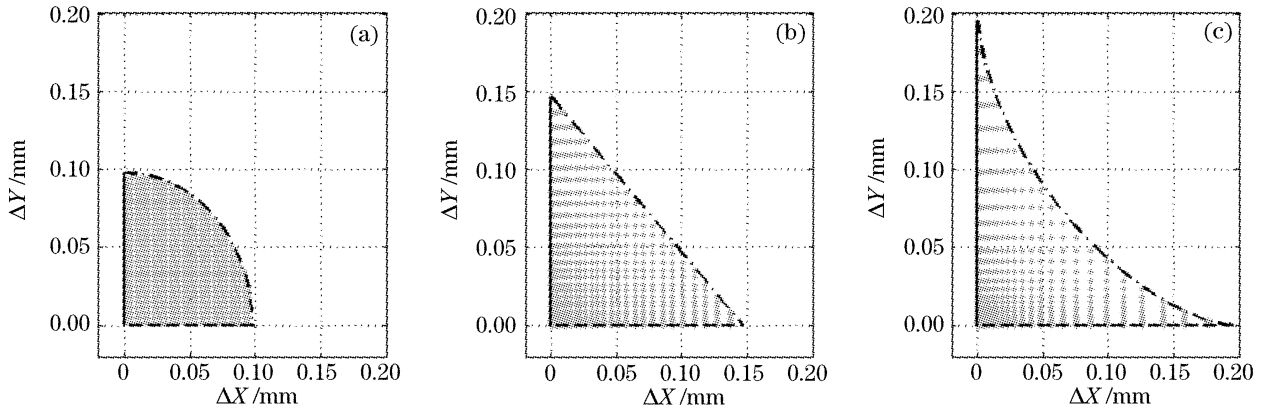


图 5 (a) $m=2$, (b) $m=3$, (c) $m=4$ 时的点列图及三条边界,其中实线、虚线、点划线分别代表第一、二、三边界
Fig. 5 Spot diagrams and their corresponding three boundaries for (a) $m=2$, (b) $m=3$, (c) $m=4$, where the 1st, 2nd, and 3rd boundary are drawn in solid, dashed and dash-dot lines, respectively

3.3 点列图的光线结构

由于点列图在一定程度上可以近似为点扩展函数,可以通过分析点列图的光线疏密程度来对奇对称型相位板波前编码系统在焦面上的光线能量分布进行简单的分析。在这里不考虑渐晕、材料吸收反射等因素,而认为在光阑面上的光线是均匀分布,或

者是等概率密度分布的,即在光阑面上的光线密度随光阑坐标变化的函数为

$$f(X,Y) = \begin{cases} 1/(\pi r^2), & X^2 + Y^2 < r^2 \\ 0, & X^2 + Y^2 \geq r^2 \end{cases} \quad (13)$$

则由(10)式可得在像面上的光线密度为

$$g(\Delta X, \Delta Y) = \begin{cases} \frac{(\Delta X \Delta Y)^{\frac{2-m}{m-1}}}{\pi r^2 (m-1)^2 [(n-1)m f A]^{\frac{2}{m-1}}}, & (\Delta X)^{\frac{2}{m-1}} + (\Delta Y)^{\frac{2}{m-1}} < r^2 [(n-1)m f A]^{\frac{2}{m-1}} \\ 0, & (\Delta X)^{\frac{2}{m-1}} + (\Delta Y)^{\frac{2}{m-1}} \geq r^2 [(n-1)m f A]^{\frac{2}{m-1}} \end{cases} \quad (14)$$

为了比较(14)式与通过快速傅里叶变换方法从傅里叶光学途径计算得到对应的点扩展函数的差异,在图 6(a)~图 6(c)分别绘出了 $m=2,3,4$ 时子午方向上的一维点扩展函数以及相应的光线密度。在这里我们对点扩展函数的幅值进行了和值归一化操作,以便和(14)式比较。由图 6 可以发现(14)式的光线密度函数近似等于点扩展函数的振幅;同时对于三次型相位板,通过比较从傅里叶光学途径推导得到的点扩展函数近似表达式可知,(14)式与点扩展函数近似表达式的振幅具有相同的数学形式^[9]。除了

$m=2$ 奇对称型相位板在像面的光线分布较为均匀之外,其余高阶奇对称型相位板在像面的光线分布主要集中在主光线附近,并且光线在主光线附近的密集度随着相位板阶数的升高而升高。对于点列图中,光线能量则主要集中在第一、二边界,即 $\Delta X=0, \Delta Y=0$ 附近,并且随着阶次的升高第一、二边界上的光线分布更加密集。这同样也可以从奇对称型相位板的第三边界随着阶数升高而不断凹向原点的分析中得到相同的结论。

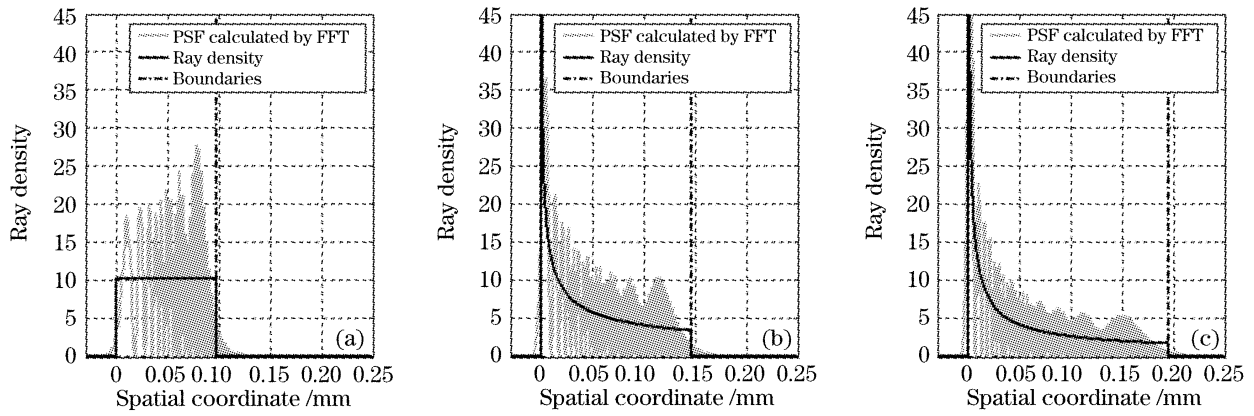


图 6 (a) $m=2$, (b) $m=3$, (c) $m=4$ 时子午方向上的一维点扩展函数及光线密度

Fig. 6 One-dimensional meridian point spread function and the ray intensity for (a) $m=2$, (b) $m=3$, (c) $m=4$

3.4 点列图的大视场效应

比较图 3 与图 2 可知,相对于轴上平行光入射,轴外平行光入射引入了更大的光线像差,并且点列图更加聚焦在第一象限内。从(9)式可以发现,相位板引入的光线像差在随着入射光线的视场角而不断增强的同时,光线的像差形式也在发生变化,这种变化改变了点列图的形状,使得点列图的第一、二边界偏离了子午面与弧矢面,并且第三边界也发生了变化。相对于轴上平行光,在轴外平行光入射下,按(9)式可以写出第一、二、三边界的方程为

$$\Delta X = \frac{\cos \alpha_0 \cos \beta_0}{\cos^2 \beta_0 + \cos^2 \gamma_0} \Delta Y, \quad (15a)$$

$$\Delta Y = \frac{\cos \alpha_0 \cos \beta_0}{\cos^2 \alpha_0 + \cos^2 \gamma_0} \Delta X, \quad (15b)$$

$$\begin{aligned} & [(\cos^2 \beta_0 + \cos^2 \gamma_0) \Delta X - \cos \alpha_0 \cos \beta_0 \Delta Y]^{\frac{2}{m-1}} + \\ & [(\cos^2 \alpha_0 + \cos^2 \gamma_0) \Delta Y - \cos \alpha_0 \cos \beta_0 \Delta X]^{\frac{2}{m-1}} = \\ & \left[\frac{m A f r^{m-1} (\sqrt{n^2 - 1 + \cos^2 \gamma_0} - \cos \gamma_0)}{\cos \gamma_0} \right]^{\frac{2}{m-1}}. \end{aligned} \quad (15c)$$

为了更加清晰地显示视场对引入光线像差的影响,同时也为了验证(15)式的准确性,图 7 绘出 $m=4$ 奇对称型相位板在子午及弧矢视场角 $\pm 20^\circ$ 内的 25 个位置上的由(4)式计算的点列图以及由(15)式计算的三条边界。由图不难发现,无论轴上或轴外平行光入射形成的点列图都能够通过(15)式较好地近似。此外,除了点列图聚集在第一象限内,点列图在轴外平行光入射下也会也弥散到第二、三象限,这种点列图的不对称性,主要是由于相位板的非旋转对称性造成的。对于主光线在子午面以及弧矢面内的轴外平行光入射形成的点列图,除子午与弧矢方向上的像差增强之外,并没有出现聚集或弥散现象。图 7 的结果同 CODE V 中理想透镜加相位板模拟

的情况基本上是一致的。

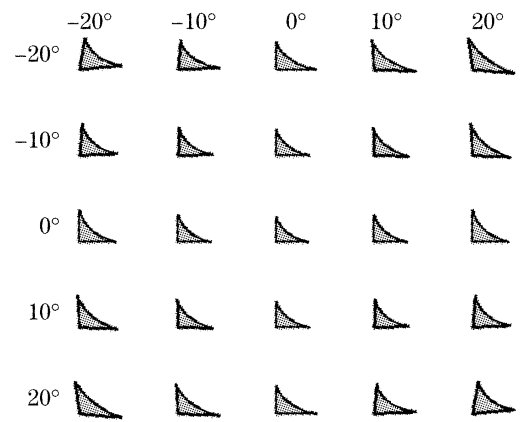


图 7 25 个视场位置上的点列图(灰色)和边界(黑色)

Fig. 7 Spot diagrams (in gray dots) and boundaries (in black lines) for 25 view-field positions

对于主光线在子午面内的轴平行光入射,记入射角为 θ ,即入射光线的方向余弦矢量为 $[\sin \theta, 0, \cos \theta]$,则增强效应按(9)式可以描述为

$$\begin{cases} S_x = \frac{\sqrt{n_1^2 - 1 + \cos^2 \theta} - \cos \theta}{(n-1) \cos^3 \theta}, \\ S_y = \frac{\sqrt{n_1^2 - 1 + \cos^2 \theta} - \cos \theta}{(n-1) \cos \theta}, \\ S = \frac{S_x}{S_y} = \frac{1}{\cos^2 \theta}, \end{cases} \quad (16)$$

其中 S_x, S_y 分别代表 θ 视场角时子午与弧矢方向上的光线像差与轴上平行光入射时光线像差的比值,而 S 则代表 θ 视场角时子午与弧矢方向光线像差的比值。图 8 绘出(16)式描述的两条曲线,可知大视场角对光线像差的增强效应是非常明显的。在波前编码成像系统中使用相位板的目的是在不同位置上形成基本相同的点扩展函数(或者光学传递函数),从这个角度说,在波前编码光学系统的设计中应当注意避免大角度倾斜光线入射到相位板。

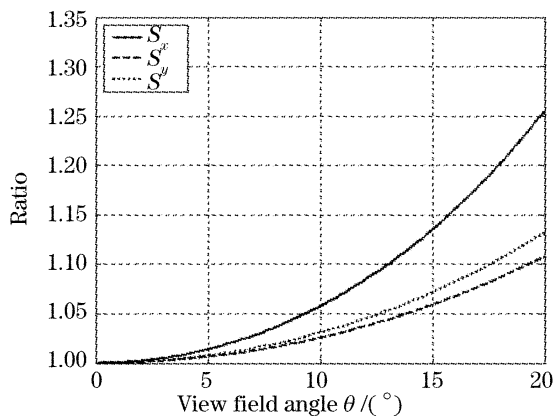


图 8 视场光线像差增强效应

Fig. 8 Ray aberration enhancement due to the view-field position

4 结 论

本文在导出平行光入射任意面型相位板情况下的光线像差近似表达式的基础之上,从点列图的大小、边界、光线结构以及视场效应四个方面分析了奇对称型相板波前编码系统的点列图特性,并进一步与从傅里叶光学途径得到的结果进行了比较,从而验证了从几何光学得到的分析结果的准确性。对奇对称型相位板波前编码系统点列图的特性分析,提供了分析波前编码相位板成像特性的一种新视角,对进一步理解波前编码技术,设计大视场情况下的波前编码系统,如何保持点列图或点扩展函数的一致性,从而实现大视场大景深成像,具有一定的指导意义。我们籍此设计的波前编码系统,由于有了上述理论的指导,有意识地减少通过孔径附近光线入射到波前编码板上光线的角度,可以将波前编码

系统的视场角扩大到 50° 以上,而不引发点列图或点扩展函数的明显扭曲效应,从而基本保持点列图或点扩展函数的一致性,这样采用视场中心的点扩展函数就可以较好地实现波前编码系统的解码,取得良好的解码效果。

参 考 文 献

- 1 E. R. Dowski, G. E. Johnson. Wavefront coding: A modern method of achieving high performance and/or low cost imaging systems[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3779**: 137~145
- 2 W. T. Cathey, E. R. Dowski. New paradigm for imaging systems[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(29): 6080~6092
- 3 E. R. Dowski, W. T. Cathey. Extended depth of field through wavefront coding[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(11): 1859~1866
- 4 G. E. Johnson, P. E. X. Silveira, E. Dowski. Analysis tools for computational imaging systems [C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5817**: 34~44
- 5 E. Dowski, K. Kubala. Design and optimization of computational imaging systems[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5299**: 155~162
- 6 A. Castro, J. O. Castañeda. Increased depth of field with phase-only filters: ambiguity function[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5827**: 1~11
- 7 Wenzhi Zhang, Yanping Chen, Tingyu Zhao *et al.*. Simple Strehl ratio based method for pupil phase mask's optimization in wavefront coding system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(9): 515~517
- 8 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. The 7th edition, Yang Jiasun transl., Beijing: Publishing Housing of Electronics Industry, 2006. 744~745 (in Chinese)
马科斯·波恩,埃米尔·沃尔夫. 光学原理[M]. 第七版,杨葭孙译,北京:电子工业出版社,2006. 744~745
- 9 Chen Yanping, Zhang Wenzhi, Zhao Tingyu *et al.*. Analyzing the imaging characteristics of wavefront coding system within spatial domain[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): (in Chinese)
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**(9):