

扫描哈特曼方法的像质检测性能分析

戴勋义^{1,2}, 谭毅^{1,2*}, 任戈^{1,2}, 谢宗良^{1,2}

¹中国科学院光电技术研究所光束控制重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 扫描哈特曼技术是检测大口径望远镜像质的常用方法,但其对不同阶次像差的检测能力和不同子孔径分布下的检测精度尚不明确。利用基于 Zemax 和 Matlab 的仿真模型对该技术的检测性能进行了探究。仿真结果表明:扫描哈特曼法能有效检测到最高第 28 阶像差,方均根(RMS)相对误差在 5%以内,在对多阶混合像差检测时难以有效分辨其中的高阶成分;采用相切子孔径分布能较好地平衡检测精度和检测效率;增加子孔径数目能提升检测精度,但增加到一定数目后精度提升十分缓慢,同时检测时间大幅增加。

关键词 测量;扫描哈特曼技术;Zernike 多项式;像质检测;子孔径斜率

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0712002

Analysis of Image Quality Detection Performance of Scanning Hartmann Technology

Dai Xunyi^{1,2}, Tan Yi^{1,2*}, Ren Ge^{1,2}, Xie Zongliang^{1,2}

¹Key Laboratory of Beam Control, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The scanning Hartmann technology is a commonly used method to detect the imaging quality of large-aperture telescopes; however, the detection performance of different-order aberrations and the detection accuracy under different sub-aperture distributions remain unclear. Therefore, we develop a simulation model using Matlab and Zemax to study detection performance of this technology. The simulation results show that the highest 28th-order aberration can be detected using the scanning Hartmann technology and that the root mean square (RMS) relative error is less than 5%. Further, it is difficult to distinguish the high-order aberration component when detecting multi-order aberrations. The usage of tangent sub-aperture distribution can better balance the detection accuracy and efficiency. The usage of a large number of sub-apertures can effectively increase the detection accuracy; however, the accuracy is slowly improved after the number of sub-apertures is increased to a certain number, while the detection time is greatly increased.

Key words measurement; scanning Hartmann technology; Zernike polynomials; image quality testing; sub-aperture slope

OCIS codes 120.4630; 120.4800; 120.4820

1 引 言

随着望远镜的口径不断增大,传统的检测手段如干涉仪自准检测法、平行光管检测法,已经难以完成像质量的检测工作,其主要原因在于没有相应大口径的检测器具。子孔径拼接法^[1]不需使用大口径

检测器具就能完成检测,但存在拼接误差传递导致检测精度降低的问题,因此其应用受到一定限制。夏克-哈特曼传感器法是自适应光学中波前探测常用的方法,因其光能利用率高,方便快捷,而受到广泛应用。利用时间累积获取空间延展的思路,将微透镜阵列变换成子孔径扫描的形式,并将其应用于

收稿日期: 2019-07-30; 修回日期: 2019-10-25; 录用日期: 2019-12-09

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室开放基金(SKL2018KF05)、四川省科学委员会优秀青年基金(2019JDJQ0012)、中国科学院青年创新促进会(2018411)

* E-mail: tandeman@126.com

大口径望远镜像质检测工作中,这就是扫描哈特曼技术^[2]。

汤国茂等^[3]进行了径向哈特曼像质检测方法的研究,利用双五棱镜对径向偏移不敏感的特性优化了扫描装置,对口径为 700 mm 的望远镜系统进行了检测,提高了实际应用的可行性。魏海松等^[4]开展了基于扫描哈特曼法的像质检测工作,并对模式波前复原进行了实验验证和误差分析,结果证明扫描哈特曼技术是切实可行的。何煦等^[5]进行了基于子孔径斜率采样的波前重构技术研究,对比了迭代算法和模式算法的精度,对二者的收敛性进行了分析。李新阳等^[6]分析了 Zernike 模式的模式耦合和模式混淆现象,解释了误差的来源。冯婕等^[7]发现单纯地增加用于拟合的 Zernike 多项式项数并不能绝对地提高拟合精度,反而可能因导致重构矩阵病态而降低精度,基于此,提出了用前 23 阶多项式拟合的观点,对模式算法进行分析,阐述了拟合 Zernike 多项式对检测精度的影响。目前而言,扫描哈特曼技术的检测性能尚不明确,具体体现在:该方法对不同阶次像差的检测能力是否相同,是否存在检测极限;不同子孔径数目和排布方式如何影响检测精度。

针对以上问题,本文建立了理想条件下的仿真模型,研究了扫描哈特曼技术对不同阶次像差的检测能力,明确了其检测极限阶次,对比了不同子孔径排布方式对检测精度的影响,总结了检测精度随子孔径数目变化的规律,这对该技术的工程应用具有指导意义。

2 扫描哈特曼技术

2.1 夏克-哈特曼传感器

夏克-哈特曼传感器由微透镜阵列(LA)和 CCD 探测器组成。其检测波前像差的原理是:当平行光入射到传感器后,波前被各个微透镜分割成小口径光束,各光束经微透镜聚焦在电荷耦合器件(CCD)上形成光斑,该光斑正好位于对应的微透镜光轴上,如图 1(a)所示。对于非平面波前而言,像差的存在使得像面上的光斑发生偏离,如图 1(b)所示。光斑质心的偏差记录了各小口径波前的像差,求得所有光斑质心的偏差后,利用波前复原算法即可复原波前。

2.2 扫描哈特曼技术

扫描哈特曼技术与夏克-哈特曼传感器都是用子孔径斜率信息恢复波前的^[8],区别在于夏克-哈特

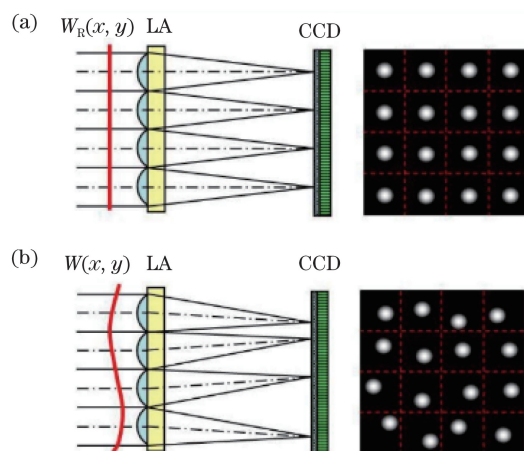


图 1 夏克-哈特曼传感器原理^[4]。(a)平面波前光斑; (b)携带像差波前光斑

Fig. 1 Principle of Shack-Hartmann sensor^[4]. (a) Spots of flat wavefront; (b) spots of wavefront with aberration

曼传感器是并行执行的,即利用微透镜阵列一次完成全口径波前斜率的获取;而扫描哈特曼法是串行执行的,即依靠高精度扫描机构带动平行光源遍历整个通光口径,从而获得一系列斜率数据。扫描哈特曼法检测的对象是大口径望远镜,望远镜系统的像差来源于镜面的变形、倾斜及位移等。当光源移动到某一位置时,平行光经过望远镜携带上像差并聚焦,光源对准的这部分镜面就相当于夏克-哈特曼传感器其中的一个微透镜,图 2 是单个子孔径检测示意图。使用扫描机构带动光源遍历所有镜面区域,如图 3 所示,就可依次获得各子孔径的对应光斑,利用斜率重构算法便可完成对大口径望远镜像差的检测。

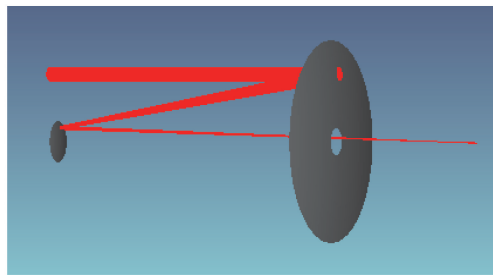


图 2 单个子孔径检测过程示意图

Fig. 2 Diagram of testing process of single sub-aperture

2.3 波前重构算法

利用子孔径斜率信息恢复波前的算法分为模式法和区域法。在空域上,任何一个波面都可以用一组正交的多项式的线性组合表示,多项式的每一项为一个波前模式。在光学检测中,常使用 Zernike 正交多项式来进行波面拟合^[9],这是由于 Zernike

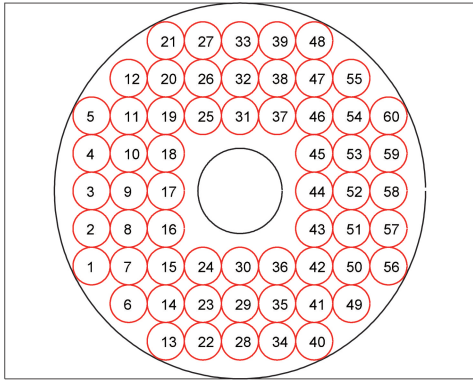


图 3 子孔径覆盖镜面区域
Fig. 3 Mirror area covered by sub-apertures

正交多项式的每一项都有明确的物理意义,并与初级像差具有一一对应的关系,对进一步分析有很好的指导作用。Zernike 多项式在单位圆域上正交,适用于光学检测中常见的圆形波前。任意光学波前可以表示为

$$\Phi(x, y) = \sum_{i=1}^k C_i Z_i(x, y), \quad (1)$$

式中: k 为用来拟合波前的 Zernike 多项式阶数,一般来说用于拟合的阶数越多,则拟合结果越精确; $Z_i(x, y)$ 为第 i 项 Zernike 多项式; C_i 为 Zernike 多项式系数。将全口径波前分别对 x, y 求偏导,可以得到 x 方向上的斜率 S_x 和 y 方向上的斜率 S_y 。由于在检测过程中将完整波前分成了有限数目的子孔径,故波前斜率应是离散的,其矩阵表达式为

$$\mathbf{Z} * \mathbf{C} = \mathbf{S}, \quad (2)$$

式中: \mathbf{S} 为子孔径的斜率信息, $\mathbf{S} = \mathbf{L}/f$, \mathbf{L} 为测得的子孔径光斑质心与理想位置的偏差, f 为待检系统的焦距。当采用的子孔径的大小、数目、布局方式,以及用于拟合的 Zernike 多项式阶数确定后,重构矩阵 \mathbf{Z} 可以完全确定下来。一般来说,当子孔径数目远大于拟合阶数时,则此超定方程可采用最小二乘法求解:

$$\mathbf{C} = (\mathbf{Z}^T \mathbf{Z})^{-1} * \mathbf{Z}^T \mathbf{S}. \quad (3)$$

求得 Zernike 多项式各项系数后,便可得到复原波前。

3 仿真模型建立

为了对扫描哈特曼技术的检测性能进行研究,利用 Zemax 光学软件建立了一个典型的卡塞格林系统,这是大型望远镜常用的结构形式。系统的关键参数为入瞳直径 $D = 300 \text{ mm}$,有效焦距 $f = 3200 \text{ mm}$,波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,最终得到望远镜的结

构如图 4 所示。衡量光学系统波像差的指标主要包括波前方均根(RMS)值和峰谷(PV)值,一般而言 RMS 更能反映像差的整体情况。本系统经过优化后像差得到了很好的控制,RMS 小于万分之一波长,如图 5 所示。

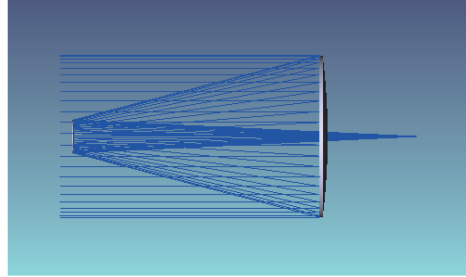


图 4 卡塞格林系统结构
Fig. 4 Structure of Cassegrain system

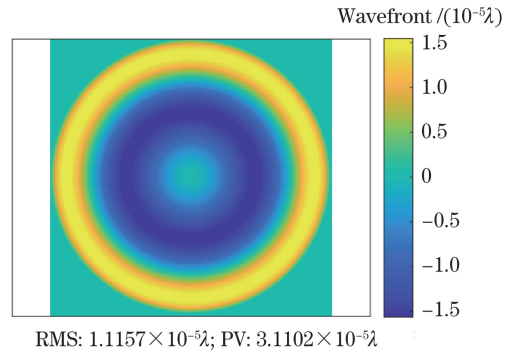


图 5 系统的初始像差
Fig. 5 Initial aberration of the system

由于系统自身像差很小,要获得明显的检测效果,需要人为引入待测像差。在 Zemax 中,将望远镜的次镜设置为 Zernike 标准面型,Zemax 中描述 Zernike 标准面型的方程为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+a)c^2 r^2}} + \sum_{i=1}^8 \alpha_i r^{2i} + \sum_{i=1}^k C_i Z_i(\rho, \varphi), \quad (4)$$

式中: $Z_i(\rho, \varphi)$ 为 Zernike 多项式的极坐标形式; c 为曲率; a 为圆锥常数; r 为径向光线坐标。通过设置 Zernike 多项式系数 C_i ,引入特定像差作为参考波前。

为了模拟实际的扫描过程,首先将光学系统转换成非序列模式,添加平行光源、探测器等器件。为保证所有子孔径对应的像斑能够完全落到探测器上,又不至于产生过大的计算量,采用尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,分辨率为 101×101 的探测器。然后利用 Matlab 工具逐次传递平行光管的位置坐标,同时记录该子孔径下光斑的图像,读取各像素的灰度

值。最后利用质心算法计算得到光斑的质心位置,即

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\sum x_i I(x_i, y_i)}{\sum I(x_i, y_i)} \\ \bar{y} = \frac{\sum y_i I(x_i, y_i)}{\sum I(x_i, y_i)} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: (x_i, y_i) 为像素点的坐标; $I(x_i, y_i)$ 为像素的灰度值; (\bar{x}, \bar{y}) 为求得的质心坐标。将该质心坐标与理想像点坐标作差,即可得到偏移量数据。

4 性能分析

4.1 检测极限仿真研究

为探究扫描哈特曼技术能检测到的像差阶次极限,首先对单一 Zernike 模式即单阶像差进行检测。根据 Zernike 模式的理论,任意波前可由多阶 Zernike 模式叠加而成,则扫描哈特曼技术的检测极限受到构成像差的最高阶模式成分的制约,即只有检测到波前中的最高阶成分,才能确保对完整波前的检测。

在 Zemax 中,给 Zernike 面型的各阶次依次赋予相同的系数,引入不同阶次的像差,然后基于相同的子孔径布局对各阶次像差进行检测。令平行光源口径 $d = 20 \text{ mm}$,选择各子孔径相切的分布形式,然后确定子孔径数目。施密特-卡塞格林系统的有效通光区域为环形,因此处于中心圆域的子孔径应当去除,被环形区域边缘切割的子孔径要有所取舍,否则容易影响该子孔径下斜率的获取,最终得到 136 个子孔径。用前 37 阶多项式拟合待测像差,将 Zemax 自动生成的像差作为参考,绘制复原波前 RMS 相对误差随像差阶次的变化曲线,如图 6 所示。

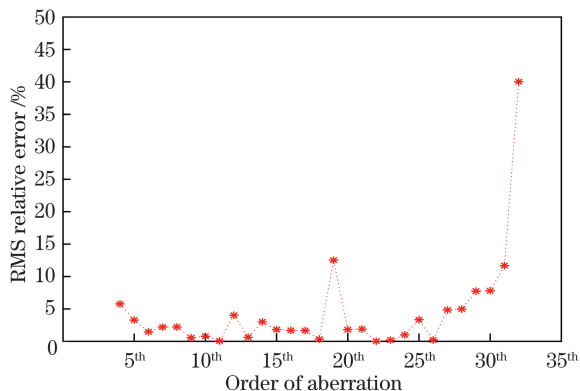


图 6 RMS 相对误差随像差阶次的变化

Fig. 6 Variation of RMS relative error with the order of aberration

从图 6 可以看到,随着检测像差阶次的提高,检测误差整体上呈上升趋势。对于较低阶的像差(28 阶以内),波前 RMS 相对误差不超过 5%,仅有第 19 阶偏差较多但不影响整体趋势,考虑到引入的像差仅为 0.062λ 左右,可以认为扫描哈特曼技术有较高的检测精度。结合具体例子,图 7 为第 8、29 阶像差复原结果,可以直观地看到,第 8 阶像差恢复效果较好,像差形态和 RMS、PV 指标都十分接近于参考值;检测第 29 阶像差时,仍能恢复像差的基本形态,但波前边缘细节已无法分辨,波前 PV 值也存在较大的偏差。这一结果符合文献[4]的理论,即扫描哈特曼技术检测像差是一个低通滤波的过程。

实际像差往往是多阶像差的复杂组合,因此为了得到更一般性的结论,还需要进行进一步仿真。首先在第 7 阶和第 12 阶模式上分别设置系数引入组合像差,根据前面的结论,这是检测精度较高的低阶部分,组合像差的参考波前和恢复波前如图 8 所示。

然后在低阶像差的基础上增加一个高阶像差,例如第 29 阶,设置与低阶像差同样的系数以确保研究的变量是像差的阶次。为得到高阶像差的复原结果,分别计算低阶像差和高阶像差的残差,如图 9 所示。

从图 9(a)、(b)可知,加入高阶像差后,复原结果的形态与参考像差较为一致,但是 RMS 已经产生 12.2% 偏差。对残差图进行分析,图 9(c)为低阶组合像差的残差,图 9(d)为高阶组合像差的残差,显然加入高阶像差后波前残差大幅增加,该残差恰好对应单独检测第 29 阶像差时无法分辨的边缘细节,与之前的分析相吻合。以上结果表明,扫描哈特曼技术检测多阶组合像差时,对低阶成分检测精度较高,对 28 阶以上阶次的像差检测存在较大误差,在实际检测结果中,如果高阶像差的 Zernike 系数较大,则可认为检测结果的可信度较低,还需进行进一步检测。

4.2 子孔径数目和布局对检测精度的影响

研究采用不同子孔径分布形式对检测精度带来的影响。扫描哈特曼技术对子孔径的分布形式没有限制,子孔径的形状可以是圆孔、方孔乃至各种组合,但考虑到工程上的易用性,平行光源采用圆形孔径更合适。常见的子孔径分布形式可分成三种,稀疏子孔径分布、相切子孔径分布、密集子孔径分布,如图 10 所示。稀疏子孔径分布中,各子孔径彼此没有接触,其覆盖的有效镜面区域的面积有限,因此能

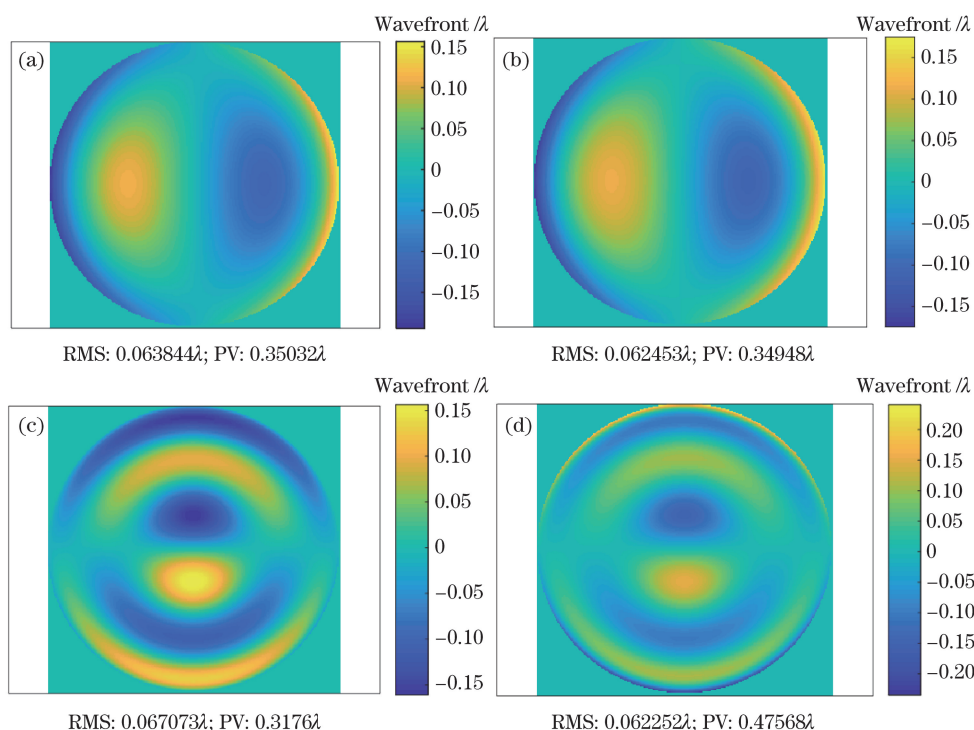


图 7 不同阶次像差复原效果对比。(a)第 8 阶像差复原波前;(b)第 8 阶像差参考波前;
(c)第 29 阶像差复原波前;(d)第 29 阶像差参考波前

Fig. 7 Recovery effect comparison of different order aberrations. (a) Recovery wavefront of the 8th-order aberration; (b) reference wavefront of the 8th-order aberration; (c) recovery wavefront of the 29th-order aberration; (d) reference wavefront of the 29th-order aberration

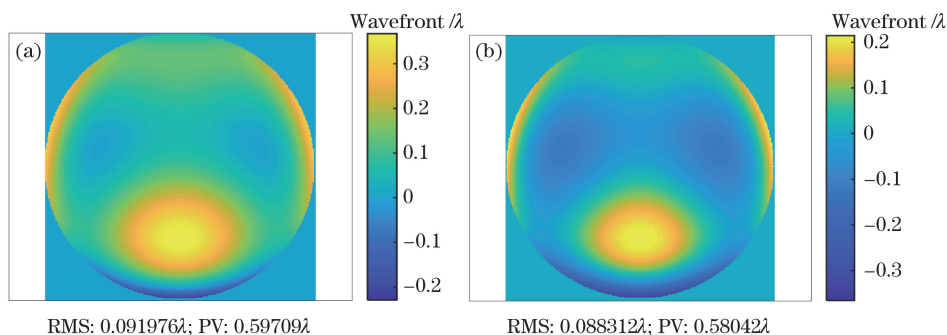


图 8 低阶像差的检测效果。(a) 参考像差;(b) 复原像差

Fig. 8 Detection effect of low-order aberrations. (a) Reference aberration; (b) recovery aberration

恢复的像差信息相对较少;相切子孔径分布中,相邻子孔径之间是相切的关系,紧密排列,仅有一个近似菱形区域未被覆盖,扫描步距等于光源口径;密集子孔径分布中,相邻子孔径之间存在重叠区域,对应的镜面区域被完全覆盖,采样面积最大但重叠部分造成了浪费。

在系统 Zernike 面形上任意选择几阶低阶模式(20 阶以内),赋予合适的系数引入目标像差,在三种子孔径分布形式下分别对系统进行检测。使用前 37 阶 Zernike 模式进行拟合,得到图 11 所示的仿真结果。从图 11 可以看到,稀疏子孔径分布的复原精

度较低,虽然能大致分辨出像差的形态,但与参考波前的 RMS 相对误差为 23.6%,复原结果几乎不可用;在采用相切子孔径分布和密集子孔径分布的情况下,二者的复原效果都很好且差距很小,与参考波前的 RMS 相对误差分别为 1.10%和 1.18%。仿真中相切子孔径分布采用了 136 个子孔径,密集子孔径分布采用了 264 个子孔径,约为前者的 2 倍。综合考虑复原精度和检测效率,使用相切的子孔径分布形式较为合理。

进一步研究不同子孔径数目下检测精度的变化情况。基于相切子孔径分布的形式,逐步改变子孔

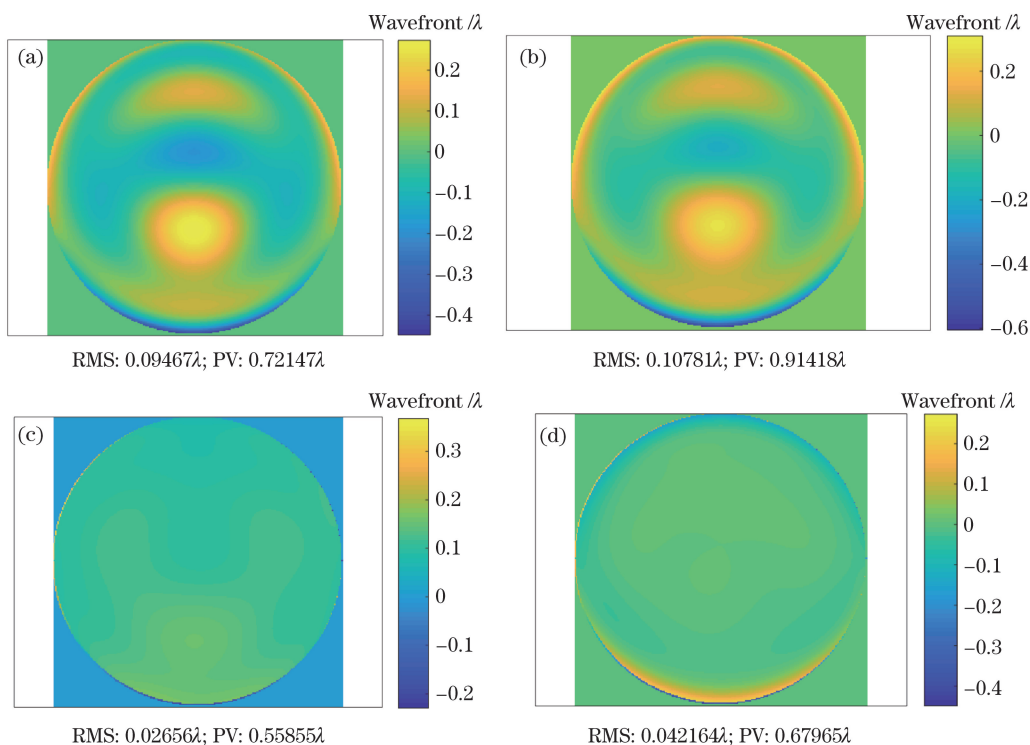


图 9 增加高阶像差的检测结果。(a)复原波前;(b)参考波前;(c)低阶残差;(d)高阶残差

Fig. 9 Detection results while adding high-order aberrations. (a) Recovery wavefront; (b) reference wavefront; (c) low-order residual; (d) high-order residual

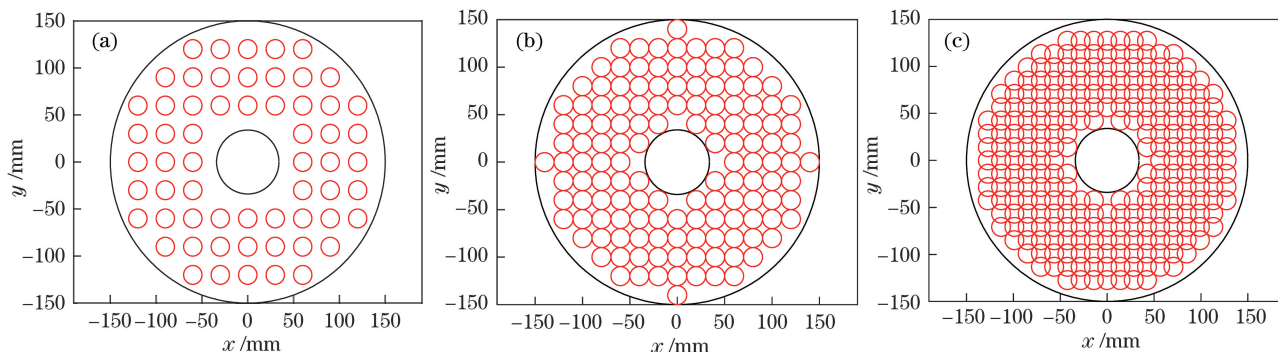


图 10 三种子孔径的排布形式。(a) 稀疏子孔径排布;(b) 相切子孔径排布;(c) 密集子孔径排布

Fig. 10 Three distribution types of sub-aperture. (a) Sparse sub-aperture distribution; (b) tangent sub-aperture distribution; (c) intensive sub-aperture distribution

径的口径,由 30 mm 减小到 8 mm,得到的子孔径数目分别为 60, 80, 92, 116, 136, 172, 220, 300, 400, 500, 620, 728, 972。在这些子孔径数目下依次对望远镜进行检测,获取的检测结果如图 12 所示。

根据图 12 可知,增加采用的子孔径数目可以提高扫描哈特曼技术的检测精度。从整体趋势上看,子孔径数目越多精度越高。从理论上来说,子孔径数目越多,覆盖的镜面面积越大,包含的像差信息越完整,检测精度越高。具体地分析可知:当子孔径数目达到 300 时,波前 RMS 相对误差已经低于 0.5%;继续增加子孔径数目,检测精度提升不

明显;400 至 972 个子孔径的检测精度几乎相同。而子孔径数目的增加会延长检测周期,容易带来更多的不确定因素,因此子孔径数目不是越多越好,在允许的精度要求下选择较少的子孔径更有利于工程应用。

为了将仿真结果更好地用于实际工程,需对以上结果进行数据拟合。本研究利用 Matlab 的曲线拟合工具对检测波前误差进行拟合,对比多种拟合结果,最终确定一个幂函数为最优拟合结果,其表达式为 $y = 372.4x^{(-1.164)}$,此拟合结果可以作为确定子孔径数目的参考(见图 13)。

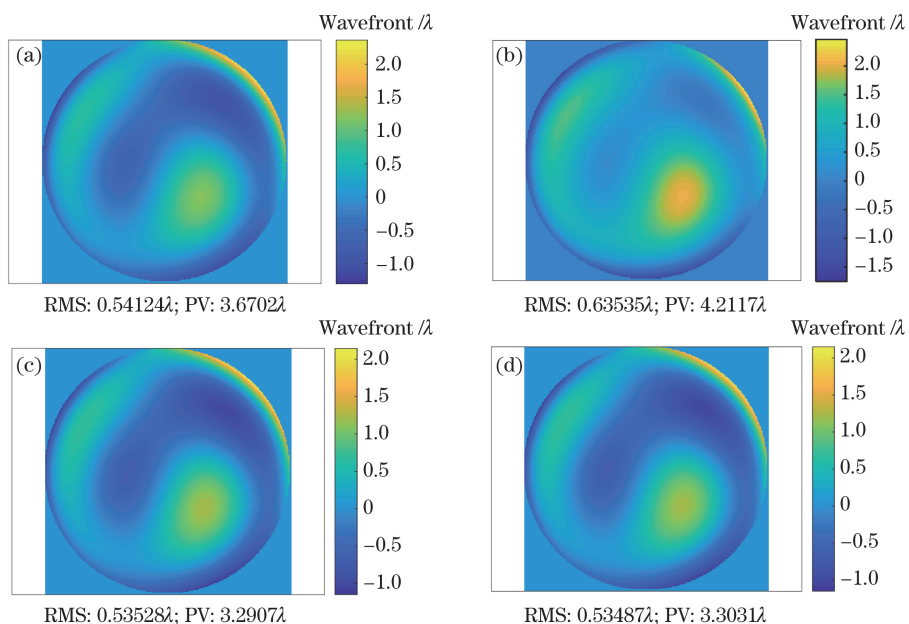


图 11 采用不同子孔径分布形式的复原效果对比。(a) Zernike 面型引入的参考像差;(b) 稀疏子孔径分布的复原波前;(c) 相切子孔径分布的复原波前;(d) 密集子孔径分布的复原波前

Fig. 11 Recovery effect comparison of different sub-aperture distribution types. (a) Reference aberration introduced by the Zernike surface type; (b) recovery wavefront of sparse sub-aperture distribution; (c) recovery wavefront of tangent sub-aperture distribution; (d) recovery wavefront of intensive sub-aperture distribution

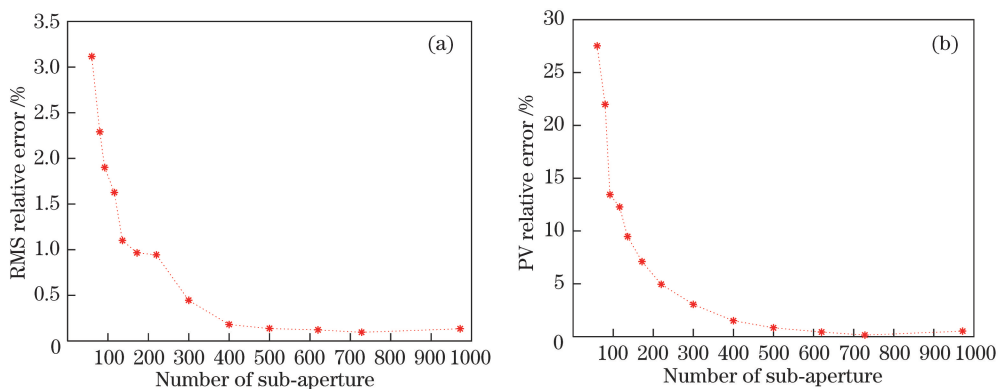


图 12 不同子孔径数目的检测误差曲线。(a) RMS 相对误差;(b) PV 相对误差

Fig. 12 Detection error curves under different sub-aperture numbers. (a) RMS relative error; (b) PV relative error

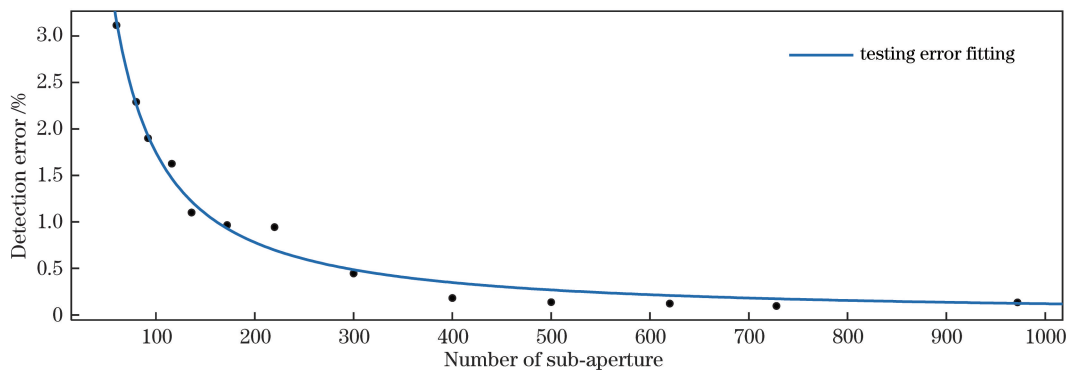


图 13 检测误差随子孔径数目变化的拟合曲线

Fig. 13 Fitting curve of detection error with the number of sub-apertures

5 结 论

为评价扫描哈特曼技术的检测性能,建立了仿真模型。在仿真条件下,扫描哈特曼技术能检测到的像差阶次存在上限,对上限阶次以内的低阶像差有较高的检测精度,对高于上限的高阶像差只能恢复其基本形态而无法分辨出细节,检测精度较低。子孔径的数目和排布形式对扫描哈特曼技术的检测精度有较大影响,相切的子孔径分布形式较为合理。缩小子孔径口径来增加子孔径数目可以提高检测精度,但增加到一定数目后精度提升十分缓慢,并且会使检测周期变长。以上结论都建立在理想的仿真环境下,即光源是理想的平行光,扫描机构能够实现完美定位,但现实中平行光源存在一定像差,扫描机构定位精度也有限,因此后续还需要在非理想环境下进行更深入的工作。

参 考 文 献

- [1] Stuhlinger T W. Subaperture optical testing: experimental verification [J]. Proceedings of SPIE, 1986, 0655: 350-359.
- [2] Díaz-Uribe R, Granados-Agustín F, Cornejo-Rodríguez A. Classical Hartmann test with scanning [J]. Optics Express, 2009, 17(16): 13959-13973.
- [3] Tang G M, He Y M, Liao Z. Radial Hartmann method for measuring large optical system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(3): 795-799. 汤国茂, 何玉梅, 廖周. 大型光学系统径向哈特曼像质检测方法 [J]. 中国激光, 2010, 37(3): 795-799.
- [4] Wei H S. Large aperture space optical system test based on scanning Hartmann [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics, and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018. 魏海松. 基于扫描哈特曼的大口径空间光学系统检测技术 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
- [5] He X, Yuan L. Wavefront reconstruction based on discrete sampling of sub-aperture slope [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(1): 20-29. 何煦, 袁理. 基于子孔径斜率离散采样的波前重构 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(1): 20-29.
- [6] Li X Y, Jiang W H. Zernike modal wavefront reconstruction error of Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(10): 1236-1240. 李新阳, 姜文汉. 哈特曼夏克传感器的泽尼克模式波前复原误差 [J]. 光学学报, 2002, 22(10): 1236-1240.
- [7] Feng J, Bai Y, Xing T W. Fitting accuracy of wavefront using Zernike polynomials [J]. Electro-Optic Technology Application, 2011, 26(2): 31-34. 冯婕, 白瑜, 邢廷文. Zernike 多项式波面拟合精度研究 [J]. 光电技术应用, 2011, 26(2): 31-34.
- [8] Southwell W H. Wave-front estimation from wavefront slope measurements [J]. Journal of the Optical Society of America, 1980, 70(8): 998-1006.
- [9] Noll R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. Journal of the Optical Society of America, 1976, 66(3): 207-211.