

哈特曼原理子口径斜率扫描检测及误差研究

赵宪宇^{1,2}, 薛栋林¹, 程 强¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 提出了一种基于哈特曼原理子口径斜率扫描再重构波面的检测方式, 研究了一种解决大口径光学系统不同俯仰角下的像质评价的方法。该方法无需同等口径标准镜, 通过扫描方式获取波面信息。采用光学软件与数学分析软件通过 DDE 接口连接进行计算机联合仿真的方式进行探究, 仿真光学系统采用主镜 $\Phi 720$ mm, 次镜 $\Phi 100$ mm 的卡塞-格林系统来验证该方法的可行性, 利用随机误差注入及多次扫描平均的方法进行了该检测方式中重构波面精度的研究; 系统探究了光斑中心提取误差、子口径定位误差、子口径倾斜误差对于该检测方法重构波面精度的影响。给出了该方法仿真结果与光学软件仿真结果的对比, 并获取了误差注入时各误差与重构波面精度的物理模型。

关键词: 波面检测; 哈特曼原理; 大口径光学系统; 斜率扫描

中图分类号: O439; O436.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0813003

Research on Hartmann principle based on sub-aperture slope scanning detection and error

Zhao Xianyu^{1,2}, Xue Donglin¹, Cheng Qiang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A method of detecting reconstructed wavefront was introduced based on Hartmann principle sub-aperture slope scanning to solve image quality evaluation for large aperture optical system at different elevation angles. The method does not need the same size caliber standard mirror. The information of wavefront can be obtained by scanning. The optical software and mathematical analysis software were used to carry out computer simulation through DDE link. The simulation optical system used Cassegrain system with primary mirror 720 mm and secondary mirror 100 mm to verify the feasibility of this method. Random error inducing and multiple scanning averaging were used to study the accuracy of reconstructed wavefront. The error included spot centroid error, sub-aperture positioning error and sub-aperture tilt error. The comparison between the simulation results and the results of optical software was given, and the physical models of errors and reconstructed wavefront accuracy during error

收稿日期: 2019-03-11; 修订日期: 2019-04-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500100); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-JSC038-02); 国家自然科学基金青年科学基金(61605202)

作者简介: 赵宪宇(1992-), 男, 硕士生, 主要从事像质评价方面的研究。Email: 1246849081@qq.com

导师简介: 薛栋林(1979-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光学系统精密制造方面的研究。Email: xuedl@ciomp.ac.cn

injection were obtained.

Key words: wavefront detection; Hartmann principle; large aperture optical system; slope scanning

0 引言

光学系统口径越大,集光能力越强,空间分辨率也越高。因此研制更大口径的望远镜,已成为地基望远镜系统的发展方向。伴随着光学制造技术的发展,目前地基望远镜的口径已经发展到 4 m 甚至 8 m 量级^[1]。而光学系统口径越大系统受重力影响越大,重力作用在镜面本身以及镜片的支撑等结构上,影响镜面本身面形以及镜片间的相对位置;从而造成了整个光学系统的像质在不同俯仰角下的巨大的变化^[2-3],因而对大口径光学系统不同俯仰角下的像质检测具有十分重要的意义。

传统的光学系统像质评价方法主要是自准直检测法^[4]和平行光管检测法^[5],二者分别通过干涉条纹获取波面和通过点扩散函数获取传递函数的方式来评估光学系统像质。自准直检测需要与待检口径相同的标准镜做为参考镜、平行光管法也需要口径大于待检口径,焦距为待检系统两倍的平行光管。以上问题对制造成本和制造难度都提出了极大地挑战,并且如此大口径的标准镜与平行光管也同样面临着重力的影响以至于难以完成不同俯仰角下待检光学系统的像质评价。

在传统检测手段基础上发展出的子口径拼接检测方法^[6-7]在很大程度上解决了大口径参考镜的问题,然而这一技术需要控制标准子口径平面镜与光学系统口径的比例。子口径镜的口径越小,子口径需要进行拼接的次数就越多;而进行拼接时算法本身会产生一些难以消除的误差,导致拼接结果的检测精度变低。例如 JWST 在进行 6.5 m 量级的拼接时,单个子口径需要保证在 1.5 m 量级方能完成其检测精度要求^[8-9]。

文中介绍了一种新型的基于哈特曼原理采用子口径扫描获取系统波面斜率信息再重构波面的波像差方法,该方法无需大口径准直标准镜,镜并采用小口径平行光管扫描合理的避免了重力对于光学系统的影响,有望实现大口径光学系统在不同俯仰角下的像质检测。

1 原理及方法

1.1 原理及模型介绍

哈特曼检测法由德国科学家 Hartmann J 提出,通过测量波面各部分斜率信息进而重构反射镜的波前。单一点光源发出的光束经哈特曼光阑分成多个子光束照射在反射镜上,反射光束聚焦的光斑像点会经过焦点位置的哈特曼板上,光斑的位置对应着子孔径波面的信息,通过计算哈特曼板上光斑位置与理想汇聚位置的偏差,便可得到到反射镜各采样区域的斜率信息,进行拟合重构出待测反射镜的面形^[10-12]。

子口径斜率扫描检测光学系统基于哈特曼检测反射镜原理,测量光线的横向像差,通过与波面斜率信息关系进行波前重构拟合得到波像差。在子口径斜率扫描中,进行扫描的小口径平行光管发出小口径平行光束对待检系统进行检测,移动子口径光源来进行平面二维扫描以遍历整个光学系统的通光口径,小口径平行光束通过待检光学系统最终汇聚于像面的 CCD 上,提取汇聚光斑的像点质心与理想像点位置的偏差即可获得测量子口径所在位置对应波面的斜率。再经过波面拟合算法计算得到光学系统的波面从而进行像质评价。如图 1 所示为子口径斜率扫描示意图。

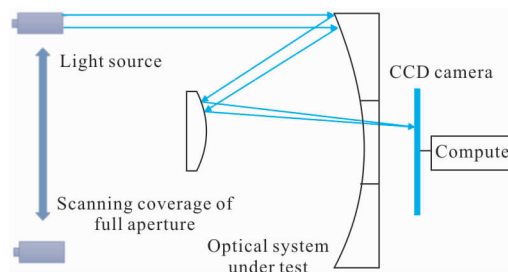


图 1 子口径斜率扫描示意图

Fig.1 Sub-aperture slope scanning diagram

该方法无需标准镜,采用小口径平行光管(口径 40 mm)进行覆盖待检口径扫描,小口径平行光管将重力对于检测系统的影响降至合理的范围内。可采用将安装小光管的二维扫描支架架设于待见望远镜

镜筒等方式实现对于大口径光学系统不同俯仰角下的像质评价。

根据几何像差理论,子口径发出光线在焦面处产生的横向偏离量与光学系统出瞳处所对应波像差之间可建立对应关系式,关系表示如图 2 所示。

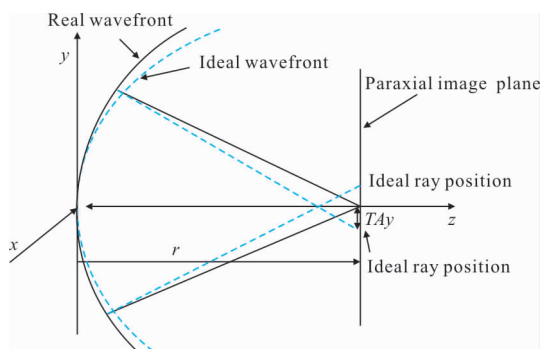


图 2 光线横向像差与出瞳波像差关系示意图

Fig.2 Relationship between transverse aberration of light and out-of-pupil wavefront aberration

通过归一化算法将各测量数据统一至待检光学系统口径,其中 TAx_n 、 TAy_n 为 x 和 y 方向上的横向像差, r 为球面光波归一化的曲率半径(可由口径与焦距归一化得到), $W(x, y)$ 为光学系统的波像差,波像差对于 x 、 y 的偏导数是波面的斜率信息,因此该方法属于斜率测量的一种。

$$\begin{cases} TAx = -r \cdot \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \\ TAy = -r \cdot \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} \end{cases} \quad (1)$$

利用模式重构算法中的 Zernike 多项式进行波面重构:

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^k A_i Z_i(x, y) \quad (2)$$

式中: A_i 为第 i 项 Zernike 系数; $Z_i(x, y)$ 为第 i 项 Zernike 多项式; k 为 Zernike 项项数。一般采用 36 项 Zernike 多项式进行 Seidel 低阶像差复原,Zernike 在单位圆域上正交,对于文中要进行重构的圆形波面效果良好。

将 Zernike 多项式代入公式(1)可得到 72 项的超定方程组。

$$\begin{cases} TAx_n = - \sum_{i=1}^{36} A_i r \frac{\partial Z_i(x_n, y_n)}{\partial x} \\ TAy_n = - \sum_{i=1}^{36} A_i r \frac{\partial Z_i(x_n, y_n)}{\partial y} \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_n 、 y_n 为扫描子口径位置; TAx_n 、 TAy_n 为对应位置光斑能量中心相对于理想位置的偏移量; n 为扫描点个数。

将其中的 Zernike 多项式写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial Z_{11}(x, y)}{\partial x} & \frac{\partial Z_{12}(x, y)}{\partial x} & \dots & \frac{\partial Z_{1n}(x, y)}{\partial x} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Z_{i1}(x, y)}{\partial x} & \frac{\partial Z_{i2}(x, y)}{\partial x} & \dots & \frac{\partial Z_{in}(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial Z_{11}(x, y)}{\partial y} & \frac{\partial Z_{12}(x, y)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial Z_{1n}(x, y)}{\partial y} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Z_{i1}(x, y)}{\partial y} & \frac{\partial Z_{i2}(x, y)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial Z_{in}(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{x1} \\ \vdots \\ W_{xi} \\ W_{y1} \\ \vdots \\ W_{yi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

公式(4)可简写为:

$$AZ = W \quad (5)$$

再根据最小二乘定理:

$$(ZA - W)^2 = \min \quad (6)$$

对上式求系数矩阵 A 求偏导数:

$$\begin{cases} \frac{\partial (ZA - W)}{\partial A_1} = 0 \\ \frac{\partial (ZA - W)}{\partial A_2} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial (ZA - W)}{\partial A_n} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

得到:

$$Z^T ZA = Z^T W \quad (8)$$

矩阵 $Z^T Z$ 是非奇异矩阵,存在逆矩阵,可求出系数矩阵的最小二乘最优解:

$$Z = (Z^T Z)^{-1} Z^T W \quad (9)$$

将公式(9)代入公式(3)便可以重构出波面的信息。

1.2 仿真方法

该仿真采用数学分析软件与光学软件通过 DDE 接口连接的模式进行光学-数学计算机联合仿真的手段,借此方式完成子口径的移动扫描过程、实现在不同扫描位置中光学软件信息的快速提取处理并实现误差随机数矩阵在光学系统中的注入,具体的仿真方法如图 3 所示。

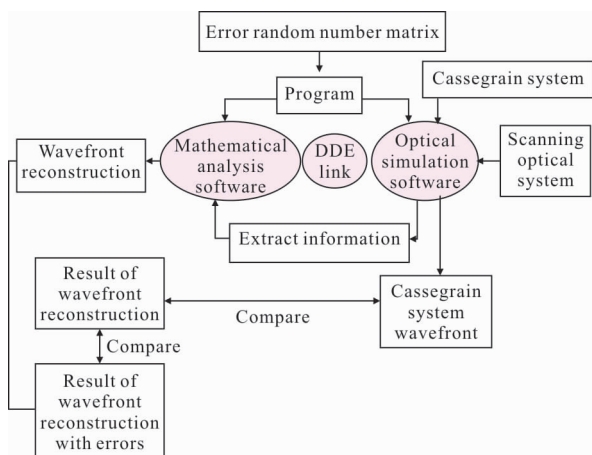


图 3 仿真方法示意图

Fig.3 Schematic diagram of simulation method

可行性仿真验证:(1)设计待检光学系统,在光学仿真软件中得到待检光学系统的仿真结果;(2)通过 DDE 接口及控制调用方法在数学分析软件中构造采样点坐标矩阵,在待检光学系统中加入选取口径及位置的扫描光源;(3)编译扫描控制、检测参数提取等程序;(4)完成扫描并从在光学软件中进行所需信息提取;(5)将提取的数据进行处理并在数学软件内利用 Zernike 多项式进行波面重构最终获取子口径斜率扫描的仿真波面重构结果;(6)利用联合仿真的结果与光学软件仿真结果进行对比验证子口径斜率扫描方法的可行性验证。

各误差影响仿真:(1)在数学分析软件中构造各种误差在不同误差区间同一误差分布下的随机数矩阵,并将其编辑进入程序;(2)按照可行性验证中的仿真方法进行再仿真以获得带有各单项误差下检测系统重构出的波面结果;(3)引入带入误差重构后每个重构点与未带误差重构的对应每点相减后的方差 ΔRMS 值来描述各单项误差后对于波面重构结果所造成的影响。

$$\Delta RMS = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{i\text{误}} - x_i)^2}}{n} \quad (10)$$

式中: n 为重构点个数; $x_{i\text{误}}$ 为代入重构点数值; x_i 为代入误差重构点数值。

2 仿真结果分析

2.1 子口径斜率扫描重构波面方法可行性

仿真光学系统(如图 4 所示)采用卡塞格林系统,其主镜为 $\Phi 720$ mm 的抛物面,次镜为 $\Phi 100$ mm 的双曲面,其为二镜同心的共轴光学系统。扫描系统中,子口径斜率扫描仿真系统(如图 5 所示)采用单色光源进行扫描、发射理想平行光束、其波长 λ 为 632.8 nm。子口径距离待检卡塞格林系统主镜镜面为 2 m,子口径直径为 $\Phi 40$ mm,扫描位置的采样间距为 40 mm,在口径为 $\Phi 720$ mm 的待检口径上均匀分布 216 个采样点来进行采样。

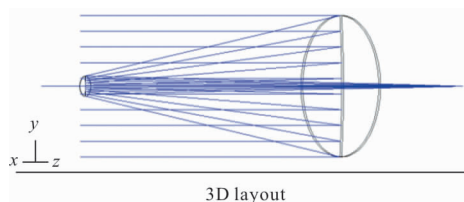


图 4 仿真用卡塞-格林光学系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of Cassegrain optical system for simulation

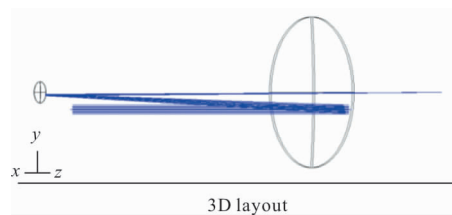


图 5 子口径斜率扫描仿真光学系统示意图

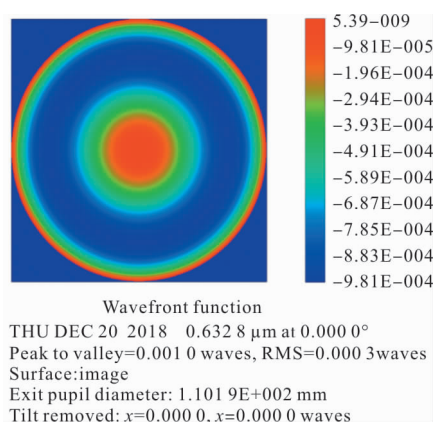
Fig.5 Sub-aperture slope scanning simulated optical system

其中,采样位置 x_n, y_n 由数学仿真软件规划出,质心位置偏移 TAx_n, TAy_n 由接口控制光学软件并在光学软件中获取,提取信息在数学软件中进行重构波面。图 6 所示为光学软件波面图与子口径斜率扫描联合仿真重构波面图。

其中光学软件全口径仿真波面 RMS 值为 0.000 3 λ , PV 值为 0.001 0 λ ,系统最大误差项(Fringe Zernike

第九项——球差项)为 $0.000\ 703\ 87\lambda$ 。

子口径斜率扫描联合仿真重构波面 RMS 值为 $0.000\ 297\lambda$, PV 值为 $0.000\ 938\lambda$ 。系统最大误差项(Fringe Zernike 第九项——球差项)为 $0.000\ 683\ 56\lambda$ 。波面均方根值偏差为 1%, 在此像质下仿真结果误差值较小。

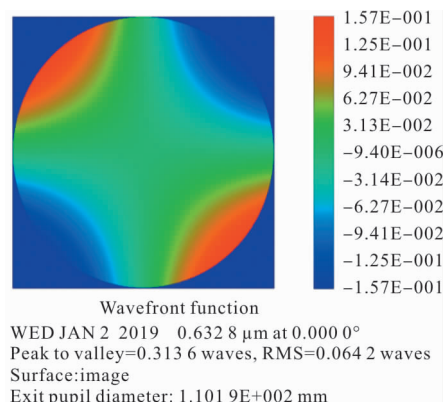


(a) 光学软件波面图

(a) Optical software wavefront

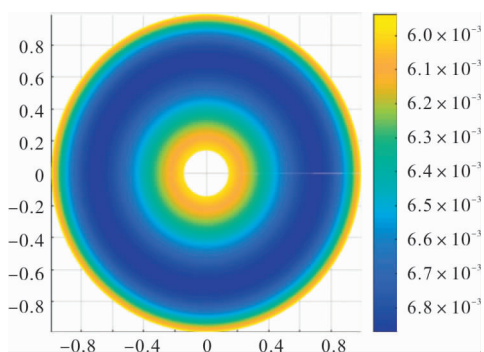
其中光学软件全口径仿真波面 RMS 值为 $0.064\ 2\lambda$, PV 值为 $0.313\ 6\lambda$, 系统最大误差项(Fringe Zernike 第六项)为 $-0.157\ 429\lambda$ 。

子口径斜率扫描联合仿真重构波面 RMS 值为 $0.064\ 9\lambda$, PV 值为 $0.322\ 4\lambda$ 。系统最大误差项(Fringe Zernike 第六项)为 $-0.160\ 970\lambda$ 。波面均方根值偏差为 1.09%, 在此种像质下仍然具有良好的复原结果。



(a) 光学系统像质退化后光学软件波面图

(a) Optical software wavefront after image quality degradation of optical system



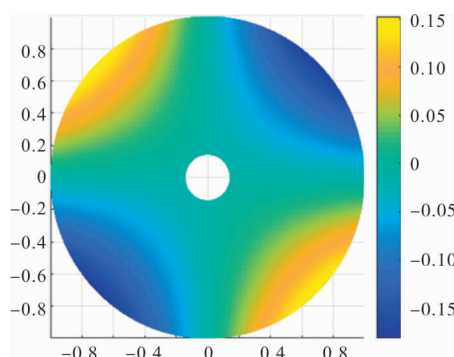
(b) 子口径斜率扫描联合仿真重构波面图

(b) Reconstructed wavefront of sub-aperture slope scanning joint simulation

图 6 仿真波面对比

Fig.6 Simulated wavefront comparison

由于光学设计中的理想光学系统在其加工制造中会引入新的误差, 从而造成其像质退化。为了验证本检测方法检测较大像差光学系统进行的可行性, 先将待检卡塞格林系统主镜镜面注入 Zernike 第六项系数(45° 像散项)进行光学系统的像质退化, 在此基础上进行子口径斜率扫描检测仿真。如图 7 所示为光学系统像质退化后的光学软件波面图与子口径斜率扫描联合仿真重构波面图。



(b) 光学系统像质退化后子口径斜率扫描联合仿真重构波面图

(b) Reconstructed wavefront of sub-aperture slope scanning joint simulation after image quality degradation of optical system

图 7 光学系统像质较差情况下的仿真波面对比

Fig.7 Comparison of simulation wavefront under poor image quality of optical system

由表 1 可知, 以上两种像质条件下, 全口径自准直检测仿真结果与子口径斜率扫描再重构波面计算机联合仿真结果的波面均方根值偏差均接近 1%; 子口径斜率扫描在不存在误差的情况下重构

表 1 光学软件仿真波面与子口径斜率扫描联合仿真波面对比

Tab.1 Comparison between optical software wavefront and sub-aperture slope scanning joint simulation reconstructed wavefront

Item	Optical software wavefront	Reconstructed wavefront	Optical software wavefro (Optical system degradation)	Reconstructed wavefront (Optical system degradation)
RMS	0.000 3λ	0.000 297λ	0.064 2λ	0.064 9λ
PV	0.001 0λ	0.000 938λ	0.313 6λ	0.322 4λ
Maximum error term	0.000 703 87λ	0.000 683 56λ	-0.157 429λ	-0.160 970λ

复原波面精度较好,此检测方式具有良好的可行性。

2.2 子口径斜率扫描波前重构误差影响

子口径定位误差是指作为扫描平行光束光源的子口径光管与二维扫描导轨之间配合不精准等因素造成的光束位置偏差;子口径倾斜误差是指扫描子口径光管在行进过程的角度偏差在采样时造成的光束倾斜;光斑中心提取误差是由于光斑中心提取算法、质心与 CCD 像元边界等因素造成的计算出的质心位置与实际质心不重合所引起的光斑位置误差。子口径斜率扫描过程中,小口径平行光管的位置、倾角等误差源变化在大数据样本情况下呈正态分布形式。而且实际工作中无法彻底避免,需要研究其对波前重构所带来的影响。

研究误差影响时保证了各扫描点误差的随机性。将同标准正态分布,同满足随机数分布在 $\pm 3\sigma$ 置信区间范围内(3σ 为误差阈值)、其统计概率为 99.7%;不同阈值区间的各种单项误差随机数矩阵单独注入;在现有实际误差情况下,进行合理的误差区间分配来研究误差变化该方法在卡塞格林系统中对于波面重构的影响。

在同种误差同误差分布同一区间进行多次仿真

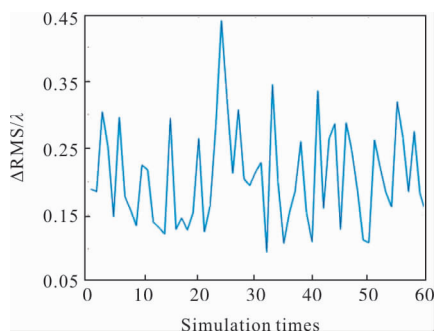
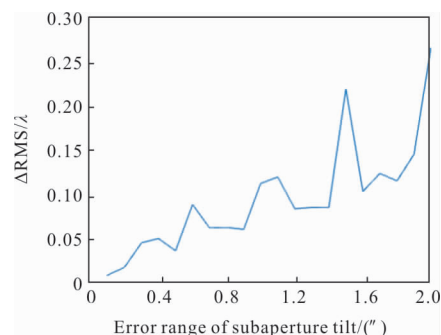


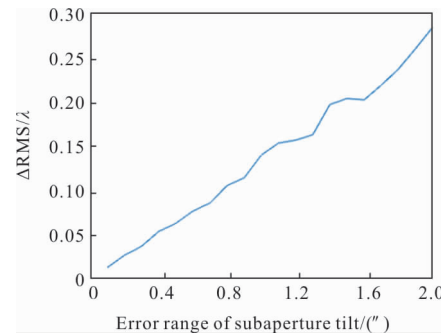
图 8 子口径倾斜误差区间 $\pm 2''$ 时多次仿真重构结果精度变化
Fig.8 Precision changes of reconstructed results from multiple simulations with sub-aperture tilt errors in $\pm 2''$

时,发现进行多次仿真时的 ΔRMS 值不稳定,如图 8 所示为子口径倾斜误差区间在 $\pm 2''$ 时的多次仿真重构结果精度变化曲线,其 ΔRMS 在 $0.1\lambda \sim 0.45\lambda$ 之间震荡变化,如此大的重构精度变化已经严重影响了子口径倾斜误差范围对重构精度影响曲线的走势与判断。

由于正态分布在样本容量大时收敛性较好,对于整个检测系统采用多次扫描、重构波面叠加取平均的方式来研究子口径倾斜研究误差造成的影响。图 9 所



(a) 单次扫描重构误差 ΔRMS 随子口径倾斜误差变化
(a) Single scanning reconstruction error ΔRMS varies with sub-aperture tilt error

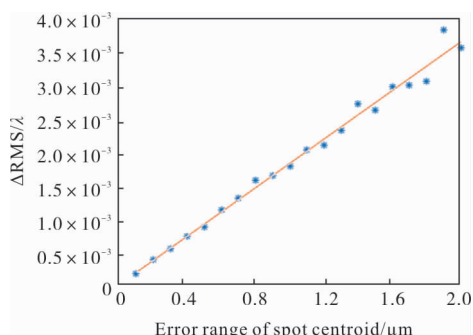


(b) 60 次扫描平均处理重构误差 ΔRMS 随子口径倾斜误差的变化
(b) Change of average reconstruction error ΔRMS with subaperture tilt error after 60 scanning averages

图 9 波面叠加平均化处理效果

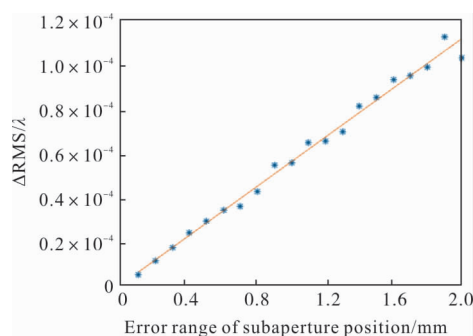
Fig.9 Effect of wavefront superposition averaging

示为单次扫描采样未做平均重构误差 ΔRMS 随子口径倾斜误差(单位("))的变化与 60 次扫描叠加波面平均化处理后重构误差 ΔRMS 随子口径倾斜误差的变化。从图 9(b)的曲线中可以看出误差区间的增长与波面的重构误差呈现出线性相关,对其曲线做最小二乘拟合获得 ΔRMS 值随子口径倾斜误差的变化关系。



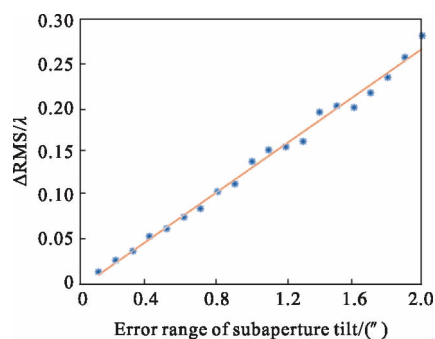
(a) 光斑中心提取误差对重构误差 ΔRMS 的影响

(a) Effect of spot centroid error on reconstruction error ΔRMS



(b) 子口径定位误差对重构误差 ΔRMS 的影响

(b) Effect of sub-aperture position error on reconstruction error ΔRMS



(c) 子口径倾斜误差对重构误差 ΔRMS 的影响

(c) Effect of sub-aperture tilt error on reconstruction ΔRMS

图 10 三种误差对波面重构误差 ΔRMS 的影响
Fig.10 Effect of the three errors on wavefront reconstruction error ΔRMS

采用以上方式分别验证三种误差变化对于重构精度 ΔRMS 影响。图 10 分别为光斑中心提取误差、子口径定位误差和子口径倾斜误差对重构误差 ΔRMS 的影响。

进行最小二乘拟合后,各单项误差源改变量与波面复原误差 ΔRMS 值在主镜 $\Phi 720$ mm,次镜 $\Phi 100$ mm 的卡塞-格林系统中呈现出以下关系式:

$$\Delta RMS = 0.001\ 817\ 2\lambda \times \Delta_c \quad (11)$$

$$\Delta RMS = 0.000\ 055\ 253\lambda \times \Delta_p \quad (12)$$

$$\Delta RMS = 0.134\ 68\lambda \times \Delta_T \quad (13)$$

式中: Δ_c 为分别为光斑中心提取误差, μm ; Δ_p 为子口径定位误差,mm; Δ_T 为子口径倾斜误差,(")。

常规光学系统的近衍射极限为 $\lambda/14$; 作为高精度的光学检测,其光学检测精度指标需达到待检光学系统精度的两倍($\lambda/28$)。在此基础上提出一种对子口径斜率扫描检测系统中的误差在现有可控误差变化量范围合理的误差分配方案,如表 2 所示。

表 2 子口径斜率扫描系统误差分配方案

Tab.2 Error allocation scheme of sub-aperture slope scanning system

Error type	Range of error	ΔRMS
Spot centroid error	5 μm	0.009 086 λ
Sub-aperture	1 mm	0.000 552 53 λ
Sub-aperture tilt	0.2"	0.026 936 λ

总体误差合成参见公式(14):

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} \quad (14)$$

式中: σ_{total} 为总体误差; σ_1 为光斑中心提取误差; σ_2 为子口径定位误差; σ_3 为子口径倾斜误差所导致重构波面的误差值。以上误差分配方案总体检测误差为 0.028 433 λ ,满足高精度光学检测条件。

3 结论

文中介绍了一种基于哈特曼原理的子口径斜率扫描重构波面的检测方法,采用了光学软件与数学分析软件通过 DDE 接口进行计算机联合仿真的模式对主镜 $\Phi 720$ mm,次镜 $\Phi 100$ mm 的卡塞-格林系统的光学系统进行子口径斜率扫描的检测仿真。验证了子口径斜率扫描的可行性,并在此基础

上研究了光斑中心提取误差、子口径定位误差、子口径倾斜误差对于波前重构精度 ΔRMS 值的影响。

可行性验证仿真中对于系统 RMS 值为 0.000 3 λ 和 0.064 2 λ 两种像质的待检系统进行检测,与全口径检测仿真结果对比两次子口径斜率扫描联合仿真的结果均方根值偏差均小于 1%,该方法具有良好的可行性。其有望成为降低波面检测成本的新思路,并成为解决地基大口径光学系统不同俯仰角下像质评价问题的新方向。

研究误差变化对于波面重构精度的仿真中采用随机数误差矩阵注入,并进行多次扫描平均方法和以 ΔRMS 表征重构误差的方式。其中多次扫描叠加波面平均处理改善结果稳定性的方式在子口径斜率扫描实际检测中也有望成为改良子口径斜率重构波面的收敛性、获取稳定结果的方案。

在误差影响的研究中,探究了子口径斜率扫描中主要误差与重构波面精度的关系并给出了一种合理的误差分配方案。现有误差抑制技术条件下,选用小像素尺寸 CCD、采取高效光斑质心提取算法并合理控制机械行程中的定位精度,光斑质心提取误差与子口径位置误差所造成的影响可以被忽略。而子口径倾斜误差变化对于该检测检测方案重构出波面的影响较大,在实际的检测工作中应该被重点关注;在后续的工作中,需要高精度准直仪来时时监测扫描过程中的倾角变化,并对子口径倾斜误差进行抑制。

参考文献:

- [1] Wang Jianli, Chen Tao, Zhang Jingxu, et al. General requirements and key technologies for the ground-based high resolution EO imaging telescope [J]. *Opt Precision Eng*, 2008, 16(5): 1-16. (in Chinese)
- [2] Li Hongzhuang, Wang Zhichen, Wang Fuguo, et al. Method of wavefront error test in the outfield for large aperture telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(1): 39-42. (in Chinese)
- [3] Yang Fei, Ming Ming, Chen Baogang, et al. Influence of diversification of elevation to the opto-mechanical system of 1.23m telescope [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 39-42. (in Chinese)
- [4] Malacara D. Optical Shop Testing [M]. 3rd ed, US: John Wiley & Sons Inc, 2012.
- [5] Bell R M, Robins G C, Eugeni C, et al. LOTIS at completion of collimator integration [C]//SPIE, 2008, 7107: 7017D.
- [6] Yan Lisong. Research on algorithm test optical mirror by subaperture stitching interferometry [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [7] Yan Gongjing, Zhang Xianzhong. Technology of subaperture stitching testing optical convex spherical mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0517002. (in Chinese)
- [8] Feinberg L D, Hagopian J G, Diaz C. New approach to cryogenic optical testing the JWST [C]//SPIE, 2006, 6265: 23.
- [9] Feinberg L D, Barto A, Waldman M, et al. James webb space telescope system cryogenic optical test plans [C]//SPIE, 2011, 8150: 815007.
- [10] Malacara-Hernandez D, Malacara-Doblado D. What is a Hartmann test[J]. *Applied Optics*, 2015, 54: 2296-2301.
- [11] Qi Erhui, Luo Xiao, Li Ming, et al. Error analysis of scanning pentaprism system in optical testing on large aperture flat mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 639-646. (in Chinese)
- [12] Knight J S, Feinberg L, Howard J, et al. Hartmann test for the james webb space telescope [C]//SPIE, 2016, 9904: 99040C.