

文章编号 1004-924X(2016)01-0020-10

基于子孔径斜率离散采样的波前重构

何 煦*, 袁 理

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 由于现有评价与测试方法不能满足 3~4 m 地基光电探测系统在不同仰角下对光学系统波前检测的需求, 本文提出了基于子孔径斜率离散采样, 再重构全口径波面轮廓的波像差测试方法。采用光学模拟与数学分析协同仿真的方法, 研究了波面重构算法的不确定度以及扫描运动引起的子孔径倾斜误差、子孔径扫描位置误差、像点坐标测量误差与波前复原精度间的作用规律。仿真结果显示, 迭代算法的相对误差 ΔPV 为 0.0028λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), 模式算法的相对误差 ΔPV 为 0.0027λ 。当子孔径倾斜误差小于 $0.2''$, 波面重构误差 ΔPV 约为 0.02λ 。当子孔径采样位置精度优于 0.2 mm , 其引入的波面重构误差小于 0.04 nm(PV) ; 当子孔径像点坐标提取精度优于 $5\text{ }\mu\text{m}$, 波面重构误差 ΔPV 约为 0.03λ 。研究表明, 当考虑波面重构过程中的实际测量误差时, 模式算法的误差容限较高, 收敛性更好。此外, 构建实际测试装置时, 需引入角度监测与算法误差补偿机制, 子孔径倾斜角度监测系统的测角精度需优于 $0.2''$ 。

关键词: 大口径光电望远镜; 像质评价; 波像差; 子孔径斜率

中图分类号: TH743; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162401.0020

Wavefront reconstruction based on discrete sampling of sub-aperture slope

HE Xu*, YUAN Li

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China)

* Corresponding author, E-mail: hexu_ciomps@sina.com

Abstract: Existing evaluation and testing methods are difficult to apply to the wavefront aberration test at different elevation angles for a photoelectric telescope with 3—4 m aperture. Therefore, this paper presents a Wavefront Error (WFE) test method by subaperture wavefront slope discrete sampling and then reconstructing the full aperture wavefront aberration. On the basis of the co-simulation by mathematical analysis and optical simulation, it studies the relationship between wavefront reconstruct accuracy and sub-aperture scanning motioned tilt error, sub-aperture scanning position tilt error, image point coordinate measuring error and wavefront reconstruction algorithm uncertainty. Collaborative simulation results show that the relative error (ΔPV) of iterative algorithm is about -0.0028λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), and the relative error (ΔPV) of pattern algorithm is -0.0027λ . When the sub-aperture tilt error is less than $0.2''$, the wavefront reconstruction error (ΔPV) is about 0.02λ . When the sub-sampling aperture position error is less than 0.2 mm , the wavefront

收稿日期: 2015-06-25; 修订日期: 2015-08-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61307114); 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所知识创新工程领域前沿项目 (No. Y40722P140)

reconstruction error(PV) introduced is less than 0.04 nm. And when position error of imaging point is less than 5 μm , the wavefront reconstruction error (ΔPV) introduced is less than 0.03 λ . The results demonstrate that the pattern algorithm has a higher error margin, and the convergence is better when the measurement errors are considered. Moreover, it suggests that it should take the angle monitoring and error compensation mechanisms into account and the angle measuring accuracy of the sub-aperture tilt monitoring system should be better than 0.2'' when an actual measuring equipment is established.

Key words: large aperture optical telescope; imaging quality evaluation; wavefront aberration; sub-aperture slope

1 引 言

伴随人类太空活动的持续升温,光学望远镜的用途由纯粹的天文观测扩展至对地球轨道上各类人造飞行器、空间碎片的普查编目、定轨监视和成像识别^[1]。口径在 3~4 m 量级的空间目标地基光电探测系统可用于对近地轨道附近各类目标的稳定跟踪及高分辨率成像。但由于目标的相对速度大幅提高,导致主光学系统始终处于高速运动状态^[2],这使得附加在大口径光学系统的转动惯量等载荷急剧增加,这些载荷与重力分量耦合后作用在大口径光学元件、机械支撑系统上,并随着主光学系统仰角变化,不仅会破坏大口径光学元件的面形,还会改变各光学元件间的相对位置和姿态,从而导致大口径光学系统的波前随仰角大幅变化。因此,在大口径光电探测系统实验室集成过程中需要测量在不同仰角下的系统波前,以确保系统波前变化的幅值小于后续自适应光学系统的动态补偿范围。

波前测量的传统思路是利用与待测系统口径相当的平面反射镜和干涉仪形成准直,从而进行波像差检测。例如俄罗斯的立式光学测试装置(LOTF)^[3]、美国国家航空航天局(NASA)为检测詹姆斯韦伯太空望远镜(JWST)研制的 6.5 m 的口径光学准直系统(LOTIS)^[4]、长春光机所使用口径为 1 m 的平面反射镜装调口径为 1.23 m 的自适应光电探测系统^[5]等都遵循全口径检测思路。但全口径检测难以适用于口径为 3~4 m 的光电探测系统在不同仰角下的实验室像质测评。在这种情况下,子孔径拼接检测技术应运而生。James H. Burge 等采用 1 m 子孔径拼接检测一块尺寸为 2.5 m \times 3.5 m 的平面反射镜面形^[6]。Tony L. Whitman 等报道了约翰逊中心使用 3

块口径为 1.8 m 的平面反射镜检测 JWST 垂直状态下的波像差^[7]。Bloemhof E. 等分析了使用子孔径拼接检测空间望远镜调制传递函数(MTF)的可行性^[8]。

上述研究表明,全口径或子孔径拼接检测可进行光学系统单一姿态下的像质评价,但对于口径为 3~4 m 的光电探测系统却存在一定的局限性。首先,口径相当的高质量平面反射镜或平行光管难以在保证像质的条件下进行大范围俯仰角的调整。其次,若采用子孔径拼接,单个子孔径仍需在 1~1.5 m^[9],难以保证不同仰角下的拼接精度。此外,由于难以定量补偿环境扰动,测试精度会受到较大的影响。

因此,人们提出子孔径波面斜率离散采样,再重构全口径波前的方法。该方法受环境扰动影响小,无需大口径、高质量的参考波前,有望实现大口径光电探测系统不同仰角下的像质评价^[10-11]。四川大学常山、曹益平等开展了子孔径波面斜率采样与重构方法的研究^[12]。成都光电所的汤国茂等报道了基于子孔径波面斜率扫描,再重构波前的验证实验^[13]。但目前有关子孔径斜率重构算法的收敛性、波前重构精度与子孔径倾斜误差、子孔径位置误差等参量的作用规律未见报道。本文从测试装置构建过程中误差监测光路的精度需求及仪器误差分配出发,对有关波面重构精度的分析方法开展了理论研究,以期为基于子孔径波面斜率离散采样的波前检测提供指导。

2 波前重构原理

2.1 数学物理模型

当波前某处相对其理想波面存在倾斜时,光束聚焦位置会改变,因此,若可确定光线在焦平面附近的焦点位置,以及该位置与理想波面对应焦

点间的偏差就可计算子孔径波面斜率,再通过重构算法即可复原全口径波面轮廓、计算波像差。

依据上述原理,通过测量各子孔径准直光束在待测系统焦面内的汇聚像点坐标,以及各子孔径采样点的空间位置,再进行坐标归一化处理,就可计算子孔径波面的斜率并复原全口径连续波前。

测量原理如图 1 所示,利用小口径准直光束模拟子孔径平面波,并控制其依据规划的采样路径在待测系统入瞳面内进行二维扫描,即可动态模拟一系列用于子孔径波面斜率采样的小口径平行光。子孔径光束经待测系统成像至 CCD,并通过图像处理获取光斑的质心坐标。由于待测系统存在由设计残差、光学制造与装调误差、力学环境改变等综合因素引起的系统波前畸变,上述沿主光轴入射的子孔径平面波会产生畸变从而不再聚焦于理论位置。这样,依据每一子孔径对应的像点坐标、采样位置坐标、待测系统光学参数等就可计算出由波前畸变引起的像点坐标的相对偏移,并进一步计算出光瞳面上各离散子孔径的波面斜率。

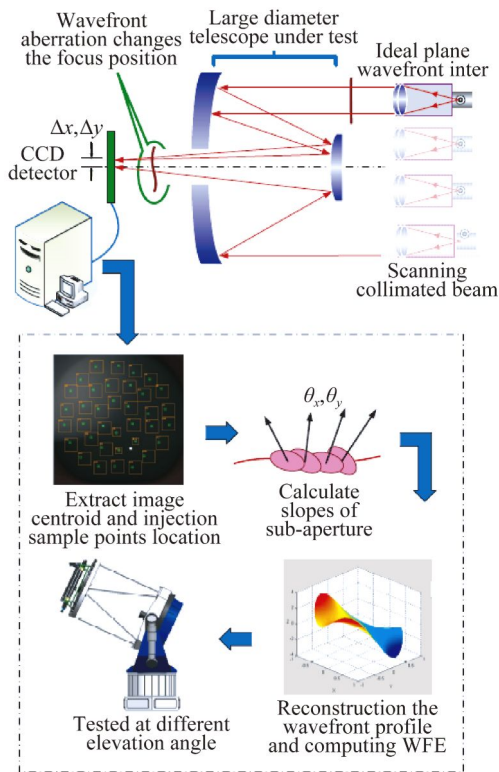


图 1 全口径波前重构测量原理

Fig. 1 Principle of wavefront reconstruction

各测量数据均统一至待测系统坐标系,以 $Z_i(x, y)$ 表示第 i 项 Zernike 多项式, C_i 表示第 i 项 Zernike 系数, f 为待测系统焦距, $2r$ 表示待测系统口径, (x_n, y_n) 为子孔径采样点坐标, $(\Delta x_n, \Delta y_n)$ 为像点坐标偏移量。则可将 W 表示为 36 项 Zernike 多项式之和:

$$W = \sum_{i=1}^{36} C_i Z_i(x, y). \quad (1)$$

利用式(2)建立超定方程组以解算与波像差对应的 Zernike 系数 C_i :

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial x} &= \sum_{i=1}^{36} C_i \frac{\partial Z_i(x_n, y_n)}{\partial x} = -\frac{\Delta x_n}{f} r, \\ \frac{\partial W}{\partial y} &= \sum_{i=1}^{36} C_i \frac{\partial Z_i(x_n, y_n)}{\partial y} = -\frac{\Delta y_n}{f} r, \end{aligned} \quad (2)$$

式中: i 表示 Zernike 项数, N 表示子孔径采样个数。进一步展开式(2)可得:

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^{36} C_i \frac{\partial Z_i(x_1, y_1)}{\partial x} &= -\frac{\Delta x_1}{f} r \\ \sum_{i=1}^{36} C_i \frac{\partial Z_i(x_2, y_2)}{\partial x} &= -\frac{\Delta x_2}{f} r \\ &\vdots \\ \sum_{i=1}^{36} C_i \frac{\partial Z_i(x_n, y_n)}{\partial x} &= -\frac{\Delta x_n}{f} r \\ &\vdots \\ \sum_{i=1}^{36} C_i \frac{\partial Z_i(x_N, y_N)}{\partial x} &= -\frac{\Delta x_N}{f} r \\ \sum_{i=1}^{36} C_i \frac{\partial Z_i(x_1, y_1)}{\partial y} &= -\frac{\Delta y_1}{f} r \\ \sum_{i=1}^{36} C_i \frac{\partial Z_i(x_2, y_2)}{\partial y} &= -\frac{\Delta y_2}{f} r \\ &\vdots \\ \sum_{i=1}^{36} C_i \frac{\partial Z_i(x_n, y_n)}{\partial y} &= -\frac{\Delta y_n}{f} r \\ &\vdots \\ \sum_{i=1}^{36} C_i \frac{\partial Z_i(x_N, y_N)}{\partial y} &= -\frac{\Delta y_N}{f} r \end{aligned} \right. \quad (3)$$

其中: $i=1, 2, 3, \dots, 36, n=1, 2, 3, \dots, N$ 。

在上述模型中,待测系统焦距 f 、口径 $2r$ 、子孔径采样位置的坐标 (x_n, y_n) ,以及对应的像点坐标偏移量 $(\Delta x_n, \Delta y_n)$ 均可通过图 1 所示方案测量得到,这样就可根据测量数据建立如式(3)和式(4)所示的超定方程组(当子孔径数量大于 Zernike 项数)。再通过相应的算法求解方程组即

用 W 表示系统波像差,并通过归一化算法将

可得到对应的 Zernike 系数,并重构系统的全口径波前。

2.2 精度分析

基于图 1 的测试原理,需构建相应的扫描检测装置才能测量得到式(3)和式(4)中与子孔径波面斜率相关的各项参数。因此,需要基于波面重构模型系统分析波面复原精度与各参数测量误差间的作用规律,从而为子孔径扫描系统的设计和误差分配提供理论依据。如式(3)和式(4)所示,波前重构精度与重构算法收敛性、子孔径采样密度、输入子孔径的倾斜误差、子孔径采样位置误

差、像点质心坐标提取误差等因素相关。其中,影响较为显著的是子孔径倾斜误差、采样位置误差和像点坐标提取误差。

采用光学模拟与数学仿真协同分析的方法,可建立波面重构精度的计算模型,步骤如图 2 所示。首先利用光学软件生成具有确定参数的光学系统,并得到系统波像差、波前轮廓、各项 Zernike 系数等,并以此作为理论值。然后,在光学软件中模拟图 1 所示的子孔径波面斜率的采样过程,可获得像点坐标和采样点坐标矩阵。

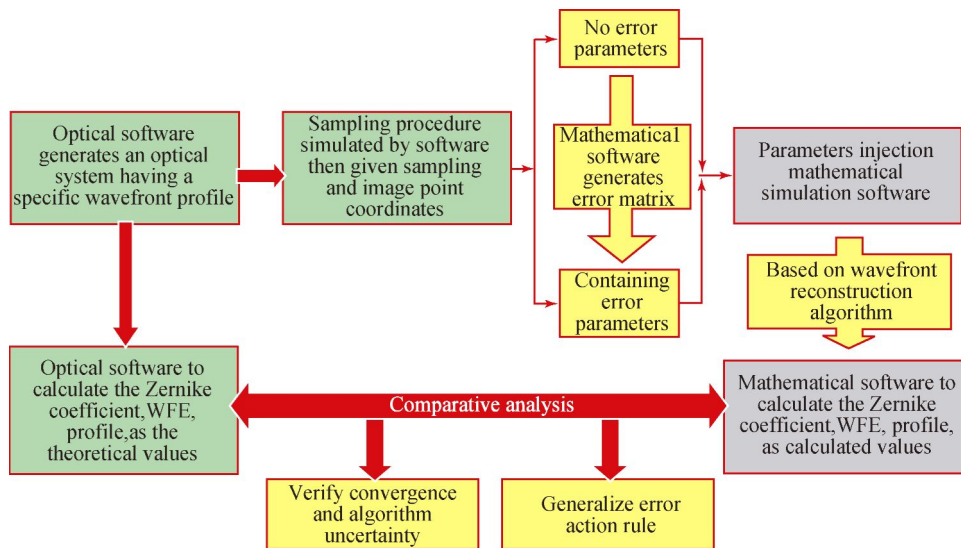


图 2 波面重构精度分析方法框图

Fig. 2 Procedures of precision analysis for wavefront reconstruction

第二步,在数学仿真软件中输入上述像点坐标、采样点坐标、光学参数等,依据重构算法拟合波面轮廓、计算 Zernike 系数,并以此作为计算值。再与上述理论值进行比对分析,可得到重构算法自身的不确定度。

第三步,在数学仿真软件中生成若干具有不同阈值区间的误差矩阵,用来代表各参数的随机测量误差。再利用波面重构算法,依据上述加入误差矩阵的仿真测量数据再次重构波前并计算 Zernike 系数。通过综合对比分析波面重构精度与参数测量误差间的作用规律。

3 算法收敛性分析

首先使用光学软件模拟一个离轴反射式光学系统,如图 3 所示。

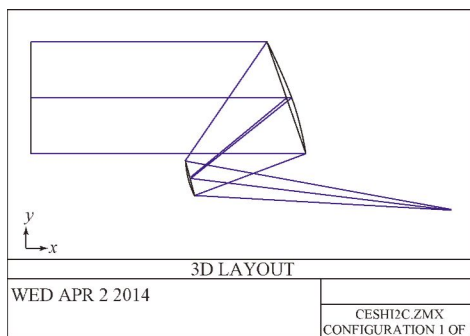


图 3 离轴反射式光学系统

Fig. 3 Layout of off-axis two-mirror reflective optical system

光学系统口径为 600 mm,焦距为 6 000 mm。由光学软件直接仿真上述光学系统的波前分布,如图 4 所示。为便于分析比对,图 5 的波前伪彩图是根据图 4 中各点高程坐标重绘得到,其中光学软件的波像差计算结果为:PV=0.503 6 λ , RMS=0.125 2 λ ($\lambda=632.8$ nm)。

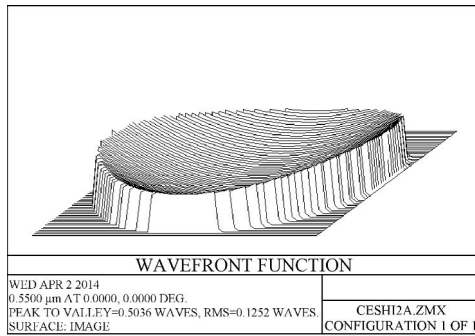


图 4 光学软件计算的波前结果

Fig. 4 Result of wavefront calculation by software

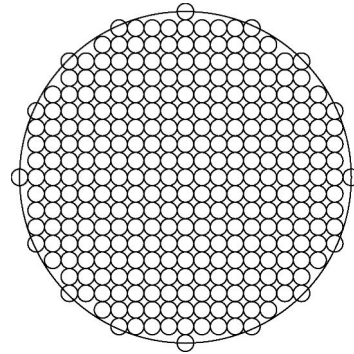


图 7 采样点位置在入瞳内的分布示意图

Fig. 7 Distribution of sample points in entrance pupil

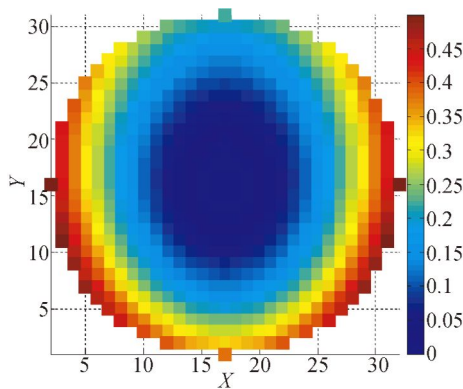


图 5 根据仿真结果重绘的波前伪彩图

Fig. 5 Pseudo-color map redrawn according to simulation wavefront

然后,再使用光学软件逐个模拟上述子孔径的采样过程,如图 6 所示。子孔径的光束口径选为 30 mm,扫描采样间隔为 30 mm。对应的小口径平行光束扫描路径及扫描位置分布如图 7 所示,在 $\Phi 600$ mm 入瞳内共包含 309 个子孔径斜率采样点。

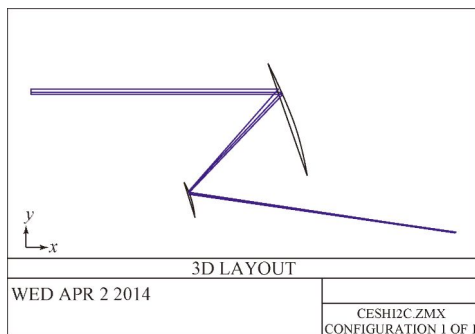


图 6 子孔径斜率采样过程的模拟

Fig. 6 Simulation of sampling process of sub-apertures slopes

由光学软件直接计算出子孔径采样位置的坐标 x_n 和 y_n , 以及对应焦面位置的像点偏移 Δx_n 和 Δy_n 、系统焦距 f 和口径 $2r$, 将输出结果直接输入数学软件进行仿真计算。依据式(3)的计算模型, 解超定方程组即可重构上述离轴反射式光学系统的波前。

重构波前如图 8、图 9 所示。在计算过程中, 分别采用迭代算法和模式算法计算系统波像差。其中迭代法计算结果为: $PV=0.5008\lambda$, $RMS=0.1255\lambda$, 相对误差 $\Delta PV=-0.0028\lambda$, $\Delta RMS=0.0003\lambda$ 。模式算法的计算结果为: $PV=0.5009\lambda$, $RMS=0.1255\lambda$, 相对误差 $\Delta PV=-0.0027\lambda$, $\Delta RMS=0.0003\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm)。

比对分析上述结果表明, 在不考虑测量误差的条件下, 模式算法和迭代算法的收敛性较好。与光学仿真计算结果相比, 由算法和采样效应引起的误差可忽略, 两种算法均可用于波前重构误差的仿真分析。

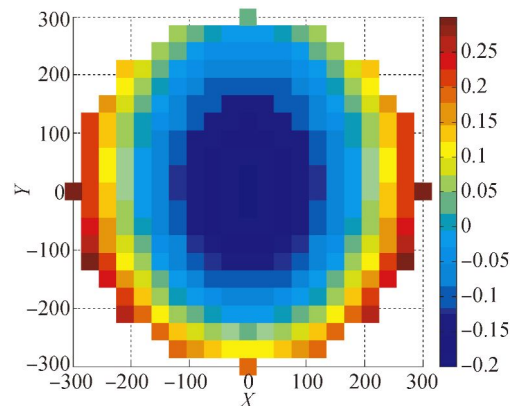


图 8 迭代算法重构波前分布伪彩图

Fig. 8 Pseudo-color map of wavefront reconstructed by iterative algorithm

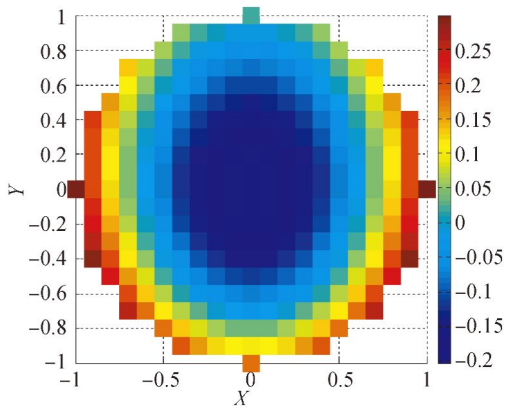


图 9 模式算法重构波前分布伪彩图

Fig. 9 Pseudo-color map of wavefront reconstructed by pattern algorithm

4 波前重构误差分析

4.1 子孔径倾斜误差

如图 10 所示,实际测量过程中受扫描装置的机械制造精度、运动控制误差等影响,采样子孔径

光轴与待测系统主光轴间会产生夹角,进而引入各子孔径倾斜误差。因此,需要通过误差分析来确定在一定的波前重构精度范围内子孔径倾斜误差的容限。这里利用模式算法和迭代算法分别考察子孔径倾斜误差与波前重构精度间的作用规律。

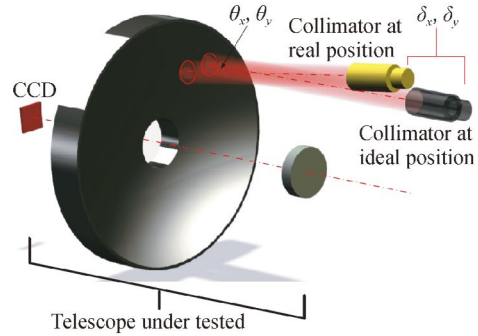


图 10 波前重构误差产生原理示意图

Fig. 10 Generation principle of wavefront reconstruction errors

表 1 迭代算法得到的子孔径倾斜误差与波面重构精度

Tab. 1 Wavefront reconstruction precisions and sub-aperture tilt errors calculated by iterative algorithm

	$(-0.5'', 0.5'')$	$(-0.2'', 0.2'')$	$(-0.1'', 0.1'')$	$(-0.05'', 0.05'')$	$(-0.02'', 0.02'')$	无输入误差
1	PV:1.152 1λ RMS:0.209 6λ	PV:0.599 7λ RMS:0.129 2λ	PV:0.557 0λ RMS:0.126 4λ	PV:0.513 7λ RMS:0.125 9λ	PV:0.509 1λ RMS:0.125 3λ	
2	PV:1.171 8λ RMS:0.188 5λ	PV:0.639 9λ RMS:0.140 6λ	PV:0.577 2λ RMS:0.133 7λ	PV:0.519 8λ RMS:0.124 7λ	PV:0.512 1λ RMS:0.125 1λ	PV:0.500 8λ RMS:0.125 5λ
3	PV:1.058 2λ RMS:0.213 5λ	PV:0.605 4λ RMS:0.135 9λ	PV:0.549 3λ RMS:0.130 5λ	PV:0.517 5λ RMS:0.125 3λ	PV:0.505 1λ RMS:0.126 0λ	
均值	PV:1.127 3λ RMS:0.203 8λ	PV:0.615 0λ RMS:0.135 2λ	PV:0.561 1λ RMS:0.130 2λ	PV:0.517 0λ RMS:0.125 3λ	PV:0.508 7λ RMS:0.125 4λ	

表 2 模式算法得到的子孔径倾斜与波面重构精度

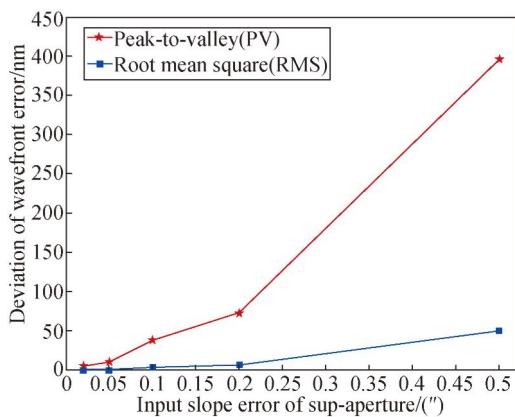
Tab. 2 Wavefront reconstruction precisions and sub-aperture tilt errors calculated by pattern algorithm

	$(-0.5'', 0.5'')$	$(-0.2'', 0.2'')$	$(-0.1'', 0.1'')$	$(-0.05'', 0.05'')$	$(-0.02'', 0.02'')$	无输入误差
1	PV:0.674 1λ RMS:0.154 5λ	PV:0.568 5λ RMS:0.135 4λ	PV:0.534 7λ RMS:0.130 1λ	PV:0.510 0λ RMS:0.125 2λ	PV:0.503 2λ RMS:0.125 3λ	
2	PV:0.468 3λ RMS:0.116 2λ	PV:0.484 8λ RMS:0.120 0λ	PV:0.492 4λ RMS:0.122 4λ	PV:0.497 0λ RMS:0.123 5λ	PV:0.500 0λ RMS:0.125 3λ	PV:0.500 9λ RMS:0.125 5λ
3	PV:0.581 5λ RMS:0.129 1λ	PV:0.517 9λ RMS:0.124 9λ	PV:0.505 5λ RMS:0.124 9λ	PV:0.518 9λ RMS:0.128 5λ	PV:0.499 5λ RMS:0.125 0λ	
均值	PV:0.574 6λ RMS:0.133 2λ	PV:0.523 7λ RMS:0.126 7λ	PV:0.510 8λ RMS:0.125 8λ	PV:0.508 6λ RMS:0.125 7λ	PV:0.500 7λ RMS:0.125 2λ	

在模拟子孔径采样过程中,在各采样位置的小口径平行光束上加入 x 向和 y 向倾斜误差 θ_x , θ_y , 这些倾斜误差随机分布在 $(-a, a)$, 其中 a 表示子孔径倾斜误差角的极大值。加入倾斜误差后,使用光学软件重新仿真,并重新给出各采样位置对应的像点偏移 Δx 和 Δy 。再分别使用迭代算法和模式算法分别重构全口径波前、计算系统波像差。计算结果分别如表 1 和表 2 所示。其中,由于误差是在 $(-a, a)$ 随机产生的,每个误差区间仿真计算 3 次,并求平均值(表中 $\lambda=632.8 \text{ nm}$)。

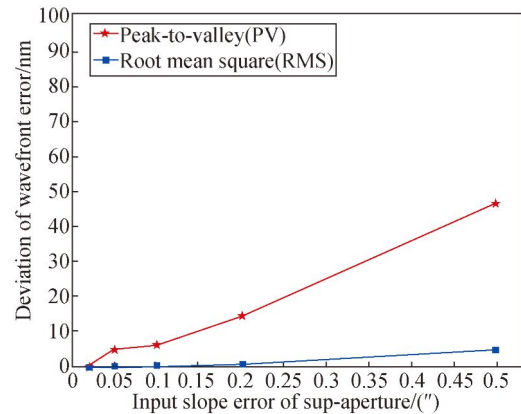
对上述仿真计算结果进行数学分析,可得到波前理论值与重构值之间的偏差随输入子孔径倾斜误差的变化曲线,如图 11(a)、11(b)所示。

图 11 及表 1、表 2 中的协同仿真数据表明,模式算法重构波前的收敛性较好,稳定度较高。当使用模式算法重构系统波前时,扫描运动引起的输入子孔径倾斜误差需控制在 $0.2''$ 以内,由它引入的波前重构误差为 14.4 nm(PV) 、 0.76 nm(RMS) 。仿真结果表明,采样点子孔径的倾斜误差要小于 $0.2''$,方可达到波像差检测的精度要求;而常规的机械扫描与传动系统难以实现该条件,因此需要考虑构建精度优于 $0.2''$ 的角度监测光路(光路布置方案此文暂不赘述),配合子孔径扫描系统实时监测各测量点之间的三维(或二维)倾斜角度。同时在波面重构算法中引入修正系数矩阵,依据监测光路获取的子孔径倾角,逐点进行补偿。



(a) 迭代算法

(a) Iterative algorithm



(b) 模式算法

(b) Pattern algorithm

图 11 波前重构误差与子孔径倾斜的关系

Fig. 11 Relationships between wavefront reconstruction precision and sub-aperture tilt

4.2 子孔径采样位置误差

如图 10 所示,扫描过程中运动系统除引入子孔径倾斜误差外,还将引入子孔径采样位置误差。因此,需使用类似方法对子孔径采样位置误差与波面重构精度间的关系进行协同仿真,为位置误差的分配提供理论依据。

采样子孔径的位置误差是指小口径准直光束在入瞳面上与理论采样位置间的偏差。在各采样位置的 x 向和 y 向分别加入位置误差 δ_x , δ_y , 这些误差在 $(-b, b)$ 随机产生,其中 b 表示位置误差的极大值。注入位置误差后,由光学软件重新给出各位置的像点偏移 $(\Delta x_n, \Delta y_n)$,再使用迭代算法和模式算法分别计算系统波像差,得到结果分别如表 3、表 4 所示。

表 3 迭代算法得到的子孔径位置误差与波面重构精度

Tab. 3 Wavefront reconstruction precisions and sub-aperture position errors calculated by iterative algorithm

位置 /(mm,mm)	(-0.5,0.5)	(-0.2,0.2)	无输入误差
1	PV:0.500 9λ RMS:0.125 5λ	PV:0.500 8λ RMS:0.125 5λ	
2	PV:0.501 0λ RMS:0.125 5λ	PV:0.500 9λ RMS:0.125 5λ	PV:0.500 8λ RMS:0.125 5λ
3	PV:0.501 2λ RMS:0.125 5λ	PV:0.501 0λ RMS:0.125 5λ	
均值	PV:0.500 9λ RMS:0.125 5λ	PV:0.500 9λ RMS:0.125 5λ	

表 4 模式算法得到的子孔径位置误差与波面重构精度

Tab. 4 Wavefront reconstruction precisions and sub-aperture position errors calculated by pattern algorithm

位置/ (mm,mm)	(-0.5,0.5)	(-0.2,0.2)	无输入误差
1	PV:0.501 2λ	PV:0.501 1λ	
	RMS:0.125 5λ	RMS:0.125 5λ	
2	PV:0.500 9λ	PV:0.500 9λ	PV: 0.500 9λ
	RMS:0.125 4λ	RMS:0.125 4λ	RMS:0.125 5λ
3	PV:0.501 0λ	PV:0.501 0λ	
	RMS:0.125 5λ	RMS:0.125 5λ	
均值	PV:0.501 0λ	PV:0.500 9λ	
	RMS:0.125 5λ	RMS:0.125 5λ	

对表 3、表 4 中的数据进行数学分析,可得到波前理论值与重构值的偏差随子孔径采样位置误差的关系曲线,如图 12 所示。

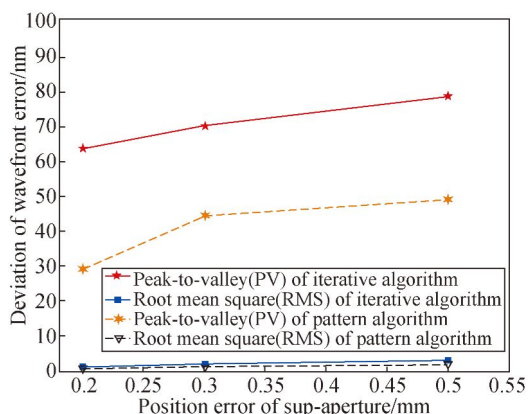


图 12 波前重构误差与子孔径位置的关系

Fig. 12 Relationships between wavefront reconstruction precision and sub-aperture position error

图 12 及表 3、表 4 中的协同仿真数据显示,若采用模式算法重构波前,子孔径采样位置误差对波面重构精度的影响较小,当位置误差小于 0.2 mm 时,波前重构精度可满足要求。这表明在子孔径扫描测试系统中需要加装直线光栅尺等位置反馈元件,以实时测量子孔径采样位置的坐标,且其精度需达到 0.2 mm。

4.3 像点位置提取误差

在子孔径扫描过程中,待测光电成像系统 CCD 探测器上提取的像点坐标应与每一子孔径采样位置一一对应,这是影响全口径波面复原精度的重要因素,需要分析像点坐标提取误差与波面重构精度间的作用规律。

使用光学软件模拟子孔径采样过程,并获得偏移像点坐标 Δx_n 和 Δy_n 。在输出的各像点坐标上加入像点提取误差 v_x, v_y ,并且上述误差随机分布在 $(-c, c)$ 。将上述各参量及光学系统参数输入数学仿真软件,再使用模式算法重构系统波前并计算波像差,结果如表 5 所示。

对表 5 中的数据进行数学仿真,可得到波前理论值与重构值间的偏差随子孔径像点坐标误差的关系曲线,如图 13 所示。

图 13 及表 5 中的协同仿真数据显示,若采用模式算法重构波前,当子孔径像点坐标的提取精度达到 $5 \mu\text{m}$ 时,波前重构误差约为 17.66 nm(PV)、2.7 nm(RMS)。例如光电探测系统选用 CCD 探测器的像元尺寸为 $8.75 \mu\text{m} \times 8.75 \mu\text{m}$,则各子孔径入射光束在待测系统焦面上所成像点的质心坐标的提取精度优于 1/2 像元,即可达到波面复原精度。

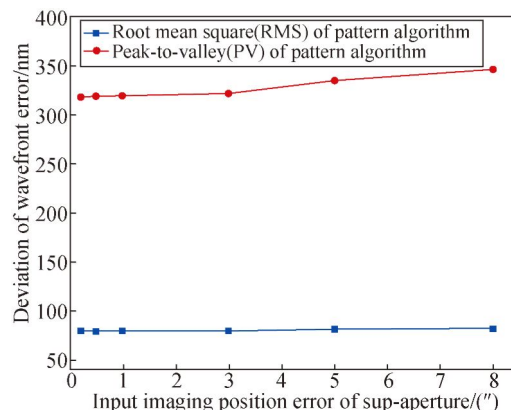


图 13 波前重构误差与子孔径像点坐标误差的关系

Fig. 13 Relationship between wavefront reconstruction precision and imaging position error

表 5 模式算法得到的子孔径像点坐标误差与波面重构精度

Tab. 5 Wavefront reconstruction precision and sub-aperture imaging position errors calculated by pattern algorithm

位置/ $(\mu\text{m}, \mu\text{m})$	(-8,8)	(-5,5)	(-3,3)	(-1,1)	(-0.5,0.5)	(-0.2,0.2)	无误差
1	PV:0.585 8 λ	PV:0.484 4 λ	PV:0.490 3 λ	PV:0.498 0 λ	PV:0.508 4 λ	PV:0.501 3 λ	
	RMS:0.134 1 λ	RMS:0.131 6 λ	RMS:0.127 6 λ	RMS:0.124 4 λ	RMS:0.126 7 λ	RMS:0.125 4 λ	
2	PV:0.485 5 λ	PV:0.559 7 λ	PV:0.508 5 λ	PV:0.505 0 λ	PV:0.503 3 λ	PV:0.502 4 λ	PV:0.500 9 λ
	RMS:0.119 7 λ	RMS:0.130 1 λ	RMS:0.128 0 λ	RMS:0.127 0 λ	RMS:0.125 3 λ	RMS:0.125 4 λ	RMS:0.125 5 λ
3	PV:0.567 7 λ	PV:0.542 3 λ	PV:0.524 5 λ	PV:0.509 7 λ	PV:0.500 0 λ	PV:0.500 3 λ	
	RMS:0.139 2 λ	RMS:0.127 7 λ	RMS:0.125 7 λ	RMS:0.126 0 λ	RMS:0.125 3 λ	RMS:0.125 1 λ	
均值	PV:0.546 3 λ	PV:0.528 8 λ	PV:0.507 8 λ	PV:0.504 2 λ	PV:0.503 9 λ	PV:0.501 3 λ	
	RMS:0.131 0 λ	RMS:0.129 8 λ	RMS:0.127 1 λ	RMS:0.125 8 λ	RMS:0.125 7 λ	RMS:0.125 3 λ	

此外,还需要在检测前标定探测器的响应非线性。本文采用高亮度光源照明小口径光学系统,以提高子孔径像点的信号强度。上述措施可以降低探测器的响应非线性和随机噪声对像点坐标提取精度的影响。

4.4 讨论

基于图 1 的测试原理进行子孔径波面斜率测量,需构建相应的扫描测试装置,才可获得参与全口径波面重构计算的各参量。首先,根据采样定理,采样密度越大,复原波面的中高频信息越多;但所需测量的子孔径数量越多,长测试周期内的环境扰动对测试精度的影响越显著。因此,采用差分采样的方式,同步采集两个子孔径的斜率,并依次计算各相邻采样点的相对斜率,以代替绝对斜率,由此可降低长测量周期内环境扰动对测量精度的影响。

其次,为实现测量装置与待测光电系统的固连,以保证稳定性和位置精度,测量装置需要进行轻量化,这加剧了机械扫描系统的运动误差。因此,需引入子孔径倾斜误差监测与倾角补偿机制。通过在扫描路径内建立角度监测光路和基准,实时获取由扫描机构引入的子孔径倾角,并将各点监测数据作为补偿系数,修正子孔径的倾斜误差。

此外,需要对小口径光学准直系统的光学参数、照明与目标发生系统进行优化设计,以提高子孔径像点的质量,并满足图像处理算法的精度需求。

5 结论

本文基于子孔径斜率离散采样重构系统波前的检测方法,采用光学模拟与数学仿真协同分析的方法研究了重构算法的收敛性,以及主要测量参数的测试误差与波前重构精度间的作用规律。仿真结果表明:仅单独考察重构算法及采样效应引起的波面复原误差,模式算法或迭代算法均可获得较高的重构精度。其中迭代算法的相对误差为 $\Delta\text{PV}=0.002\ 8\lambda$ 、 $\Delta\text{RMS}=0.000\ 3\lambda$,模式算法的相对误差为 $\Delta\text{PV}=0.002\ 7\lambda$ 、 $\Delta\text{RMS}=0.000\ 3\lambda$ 。但实际仍存在参数测量误差,此时模式算法的误差容限更高,收敛性更好。

若采用模式算法重构系统波前,当子孔径倾斜误差小于 $0.2''$ 时,波前重构误差约为 $\Delta\text{PV}=0.02\lambda$ 、 $\Delta\text{RMS}=0.001\ 2\lambda$ 。该结果表明,只有在扫描测量装置中加入角度监测系统,实时获取各扫描测量位置的倾斜误差,并在波面重构过程中予以补偿,方可达到波面重构精度。

子孔径采样位置误差对全口径波前重构精度的影响较小,当采样位置误差为 $0.2\ \text{mm}$ 时(口径比为 0.6%),由它引入的波面重构误差小于 $0.04\ \text{nm(PV)}$ 。

子孔径像点坐标的提取误差要小于 $5\ \mu\text{m}$,对应的波前重构误差约为 $17.66\ \text{nm(PV)}$ 。高性能光电探测系统所使用的探测器的像元尺寸一般小于 $10\ \mu\text{m}$,质心提取图像算法可达到子孔径像点坐标的提取精度。

参考文献:

- [1] 张景旭. 国外地基光电系统空间目标探测的进展 [J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(1): 11-16.
ZHANG J X. Progress in foreign ground-based optoelectronic detecting system for space target detection [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(1): 11-16. (in Chinese)
- [2] SHATOKHINA L, OBEREDER A. Preprocessed cumulative reconstructor with domain decomposition: a fast wavefront reconstruction method for pyramid wavefront sensor [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(12): 2640-2652.
- [3] SERGEEV P A, GOGOLEV Y A. Collimator equipment of the large optical test facility vertical for testing space telescopes [J]. *SPIE*, 1995, 2478: 348-358.
- [4] SHELDON B H, ANDREW C. Updated status and capabilities for the LOTIS 6.5 meter collimator [J]. *SPIE*, 2008, 7106: 710618.
- [5] 孙敬伟, 陈涛, 王建立. 主次镜望远系统的计算机辅助装调技术 [J]. 光学精密工程, 2011, 10(8): 2156-2163.
SUN J W, CHEN T, WANG J L. Computer-aided alignment for primary and secondary mirrors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 10(8): 2156-2163. (in Chinese)
- [6] JAMES H B, ZHAO CH Y. Applications of subaperture stitching interferometry for very large mirrors [J]. *SPIE*, 2013, 8450: 84500X.
- [7] TONY L W, THOMAS R S. Optimizing the cryogenic test configuration for the James Webb Space Telescope [J]. *SPIE*, 2006, 6271: 62710B.
- [8] BLOEMHOF E, AN X, KUANG G. Telescope alignment from sparsely sampled wavefront measurements over pupil subaperture [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(3): 394-400.
- [9] GOLDBERG K A, GEARY K. Wave-front measurement errors from restricted concentric subdomains [J]. *JOSA A*, 2001, 18(9): 2146-2152.
- [10] VAN D, MARCOS A, LANE R G. Wave-front sensing from defocused images by use of wavefront slopes [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(26): 5497-5502.
- [11] 汤兆鑫, 黄玮, 许伟才, 等. 差分五棱镜扫描法在波前检测中的应用 [J]. 中国光学, 2014, 7(6): 1003-1011.
TANG ZH X, HUANG W, XU WC, *et al.*. Application of differential pentaprism scanning in wavefront detection [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 1003-1011. (in Chinese)
- [12] 常山, 曹益平, 陈永权. 五棱镜的运动误差对波前测量的影响 [J]. 光学仪器, 2005, 27(3): 12-16.
CHANG SH, CAO Y P, CHEN Y Q. Kinematic error effect of pentagonal prism on wavefront measurement [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(3): 12-16. (in Chinese)
- [13] 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.
TANG G M, HE Y M, LIAO ZH. Radial hartmann method for measuring large optical system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(3): 795-799. (in Chinese)

作者简介:



何 煦(1981—),男,博士,副研究员,主要研究方向为成像质量评价与测试仪器。E-mail:hexu_ciomp@sina.com