

文章编号: 1003-501X(2011)01-0039-05

# 基于 Shack-Hartmann 的子孔径 拼接波前检验技术

吴 晶<sup>1, 2</sup>, 王建立<sup>1</sup>, 林旭东<sup>1, 2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 针对传统的地基大口径望远镜自准直干涉检测受器材限制和环境影响而检测困难的问题, 提出了基于 Shack-Hartmann 波前探测器的子孔径拼接波前检测方法。介绍了子孔径拼接检测理论和拼接算法, 研究了 Shack-Hartmann 下实现子孔径上波前精确测量的方法, 设计了具有透射孔的光阑实现自准直光路中子孔径毫米级的定位。实验使用 32 单元的 Shack-Hartmann 波前探测器和 40 mm 的平面反射镜, 实现了口径扩展比 1.8 的子孔径拼接检测; 对比表明均化误差的处理方法优于两两拼接方法, 其拼接检测结果与全口径检测结果之差的 PV 值为 0.5 波长。实验结果表明, 这种技术在大口径望远镜波前自准直检测中有很好的应用前景。

**关键词:** 光学检测; 夏克-哈特曼波前探测器; 子孔径拼接

中图分类号: TN247

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2011.01.008

## Wave-front Test by Sub-aperture Stitching Technique Based on Shack-Hartmann Wave-front Sensor

WU Jing<sup>1,2</sup>, WANG Jian-li<sup>1</sup>, LING Xu-dong<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The ground-based telescope is traditionally tested by autocollimation against a flat mirror. As the aperture of telescope goes larger, the testing can not be performed any more because of the more severe limitation of unstable environment and impracticably flat mirror. The solution of testing wave-front by sub-aperture stitching technique based on Shack-Hartmann wave-front sensor is introduced. This paper begins with a simple description of Sub-Aperture Test (SAT) theory, and explores the methods aiming at more accurate Shack-Hartmann sub-aperture test result. A new trick, that put a plane with holes in the parallel light path, can make sure the location of sub-aperture hit the target. A 32 units Shack-Hartmann wave-front sensor and a 40mm flat mirror is used for testing a optical system 1.8 times larger than the flat mirror and the sub-aperture test results are stitched by two different ways. The experimental results show that error averaging method is superior in error propagation property to stitching one-by-one method, and Peak-to-Valley of the difference between the direct measurement and SAT result is 0.5 wavelength. It is concluded that the technique is useful and has a good application future in practically testing the wave-front error of great telescopes.

**Key words:** optical testing; Shack-Hartmann wave-front sensor; sub-aperture stitching

收稿日期: 2010-08-12; 收到修改稿日期: 2010-09-12

作者简介: 吴晶(1985-), 男(汉族), 甘肃敦煌人。硕士研究生, 主要研究工作是望远镜的装调与检测。E-mail: puppy\_314@hotmail.com。

## 0 引言

望远镜的成像质量是望远镜的关键参数。在一个典型望远镜的工程周期中,几乎每个阶段(概念研究阶段,预分析,工程定义,设计制造,试运行,运行与维护)都涉及到成像质量和检测<sup>[1]</sup>。在小口径(小于1 m)望远镜的制造中,基于激光干涉的自准直检测方法是光学车间中进行整个望远镜检验的重要方法。在望远镜口径增大时,这样的检测需要真空室、隔振台等严格的条件和短曝光的方法来减小空气扰动或振动的影响。此外,制造和望远镜口径等大的反射镜成本高,技术困难。大多数地基大口径望远镜的检测都不再使用反射镜自准直的方式进行波像差的检测,而是通过对星成像的方式,在测量结果分析的时候考虑大气的影响<sup>[2-3]</sup>。但是,一些应用中需要检测望远镜水平指向时的波前差情况<sup>[4]</sup>,对星成像的方式无法实现这一点,这时,尝试采用受空气扰动和振动影响较小的 Shack-Hartmann 波前探测器,在自准直光路中通过移动小口径反射镜代替大的标准平面镜,即子孔径拼接检测技术(SAT),实现对大口径望远镜的波像差的光学车间检测。

## 1 Shack-Hartmann 波前探测器下的子孔径拼接方法

Shack-Hartmann 波前探测器由亚利桑那大学光学中心(OSC)发明,利用微透镜阵列对入射波前斜率采样来重构出整个波前。相对于干涉仪来说,其整个系统结构简单紧凑,对环境(温度改变,振动等)有较强的抗性;重构的波前基于对时间积分的 Hartmann 图上亮点的位置,可大大降低空气扰动的影响。并且随着当代大阵列、高衍射率微透镜阵列和高灵敏度、高量子效率、低噪声的新型高性能 CCD 的应用,Shack-Hartmann 波前传感器的精度不断提高<sup>[5]</sup>。

子孔径拼接检测技术是目前较为成熟的一种检测技术,在大口径平面,非球面,自由曲面检测领域得到深入的研究和广泛的应用。其基本原理是,按照一定的规划和设计,将全口径波前或面型分为若干个可容易检测的部分,再将每部分的检测结果数学上拼接起来,得到完整的检验结果。追踪 SAT 发展表明<sup>[6-7]</sup>,要想获得精确的检测结果,需要做到 a) 子孔径的精确定位; b) 当前子孔径上波前的精确获得; c) 合理的算法。

### 1.1 拼接图设计和子孔径定位

SAT 拼接图设计最基本的要求是所有的子孔径的叠加能够覆盖全口径,并且每个子孔径必须存在一定的重叠区域,使得可以在重叠区域上找到3个(或4个,跟算法有关,见1.3节)不在同一直线上的点来实现拼接。在望远镜光学系统波前的自准检验中,子孔径的大小受限于标准反射镜的面积,是确定的。当各个子孔径间有较大的重叠面积时,组成全口径的子孔径数目增多,完成测量的周期变长,环境影响的累积效应会造成误差变大;当各个子孔径重叠面积较小时,子孔径间波前位相关联程度降低,拼接算法引入的误差变大;因而,在进行拼接图设计时需要参考实际的情况。一般说来,使相邻子孔径的边缘位于当前子孔径的中心,是个适中的选择,此时,重叠面积达到39.10%。

SAT 中子孔径的移动是通过机械结构实现的,其定位精度受限于机械精度。在提高定位精度的方法中<sup>[8]</sup>,标记点法因其简单可靠的特点得到广泛的应用。根据自准直光路的特点,我们设计了具有透射孔的光阑这种新方法来实现子孔径的标记和定位,它放松了对机械移动精度的限制,其原理如图1所示。

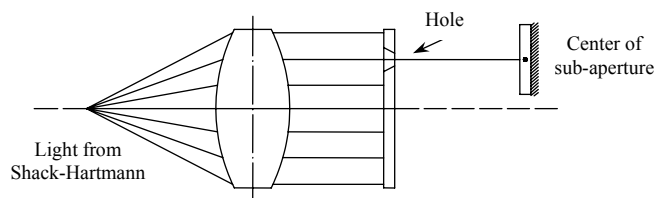


图1 子孔径定位原理

Fig.1 The principle of sub-aperture

### 1.2 子孔径上的波前测量

在使用 Shack-Hartmann 波前探测器测量子孔径波前,存在若干新的特点。由于 Shack-Hartmann 波前探测器采用微透镜阵列对波前进行一定密度的采样,一般情况单个子孔径上边缘部分的波前并不完全覆盖对应的微透镜,波前重构时忽略最外圈的采样点,可保证子孔径上波前测量的精度。此外,位于拼接图边

缘处的子孔径, 受全口径波前边缘的裁剪, 其子孔径内的采样点呈不规则分布。而子孔径内的波前重构是在一个圆型孔径内进行的, 采用坏点标记法, 可减小不规则孔径引入的误差。

### 1.3 子孔径拼接(Sub-aperture Stitching)算法

利用 Shack-Hartmann 波前探测器获得的数据是各个子孔径数字化的位相差, 测量的最终目的是要获得全口径的波前数据。由子孔径波前图恢复出正确的全口径波前, 称之为子孔径拼接(Subaperture Stitching)算法。子孔径算法经过长期的研究发展和改进, 具有相对成熟的理论<sup>[9]</sup>。

根据 SAT 理论, 在全口径的系统坐标系  $x-o-y$  中, 存在两个具有重叠区域的子孔径, 其对应的子孔径坐标系为  $x_1-o_1-y_1$  和  $x_2-o_2-y_2$ , 对应的波前为  $W_1$  和  $W_2$ 。在实际的测量中, 因测量区域的移动使得测量结果中重叠区域的位相并不相同, 包含了平移, 倾斜和离焦误差, 因此, 重叠区域的位相满足:

$$W(x, y) = W_1(x, y) + P_1 + T_{x1}x + T_{y1}y + D_1(x^2 + y^2) = W_2(x, y) + P_2 + T_{x2}x + T_{y2}y + D_2(x^2 + y^2) \quad (1)$$

其中:  $P$  为平移修正量,  $T_x$  为  $x$  方向倾斜修正量,  $T_y$  为  $y$  方向倾斜修正量,  $D$  为离焦修正量。根据式(1), 对重叠区内的采样点列方程, 可得到一个线性方程组, 通过最小二乘方法可得到各个系数的估计值。从而将子孔径上的位相值统一到全口径上。对接后的  $W(x, y)$  去除无关的平移量、倾斜量和离焦量, 得到最终的波前信息。

若将  $W_1$  定义为一个基准孔径, 在式(1)中, 所有有关  $W_1$  的修正值将为 0。像这样在确定一个子孔径的修正量时, 只参考一个基准孔径, 这样的拼接方式称为两两拼接方法; 若对所有的重叠区域上的采样点都按式(1)列方程, 在最小二乘所有重叠区内的相关值的平方和同时达到最小, 这样的拼接方式称为误差均化拼接方法。

## 2 实验结果和分析

实验使用的 Shack-Hartmann 使用 635 nm 的激光做光源, 其微透镜阵列为六边形排布, 对角线方向最大微透镜数目为 32 个。使用一个有效口径 72 mm 焦距 300 mm 光学系统, 用一块 40 mm 的反射镜搭建自准直光路做子孔径检测, 用一 100 mm 的反射镜做全口径检测。其实验光路示意图和实物图如图 2。

光学系统全口径 72 mm, 投影在 Shack-Hartmann 上占 640 pixels; 平面反射镜 40 mm, 投影在 CCD 上

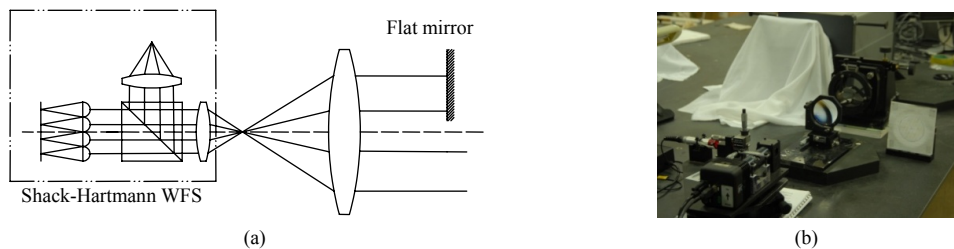


图 2 实验光路图(a)和实物图(b)

Fig.2 Layout of light path(a) and photograph of experiment(b)

占 354 pixels。在考虑到检测次数和拼接精度的折中后, 采用了 7 个子孔径实现全口径的覆盖, 其子孔径分布图和对应子孔径上的波前测量结果见图 3。

### 2.1 两两拼接方法

根据两两拼接的原理和算法, 结合子孔径分布设计图, 选择 0 号中心孔径为基准孔径, 对基准周围 6 个子孔径做两两拼接, 计算出待拼接子孔径相对于基准子孔径的修正系数见表 1。由表中数据, 校正各个子孔径的波前, 可得到全口径拼接波前(图 4(b))。对全口径拼接波前做多项式拟合, 去除平移、倾斜、离焦后得到全口径的拼接测量波前图(图 4(c))。与全口径直接测量波前图(图 4(a))相比, 其差别(图 4(d))的  $PV$  值为 0.52 波长。

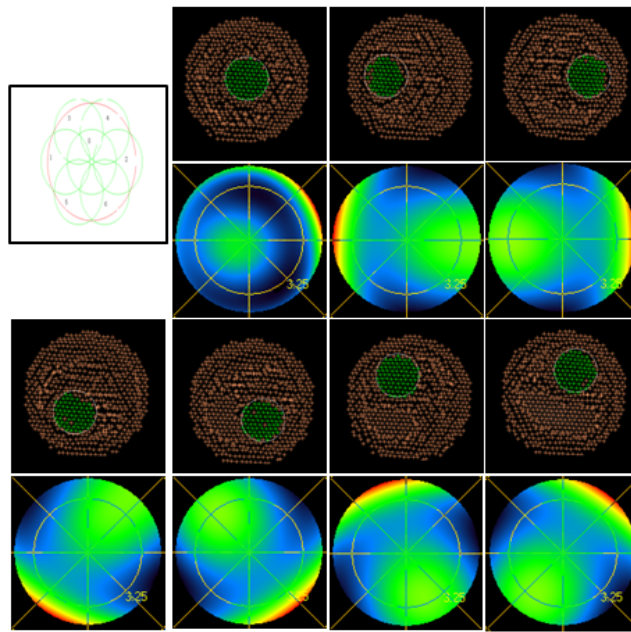


图 3 子孔径分布图和波前测量结果

Fig.3 The lattice design and the wavefront measured on each sub-aperture

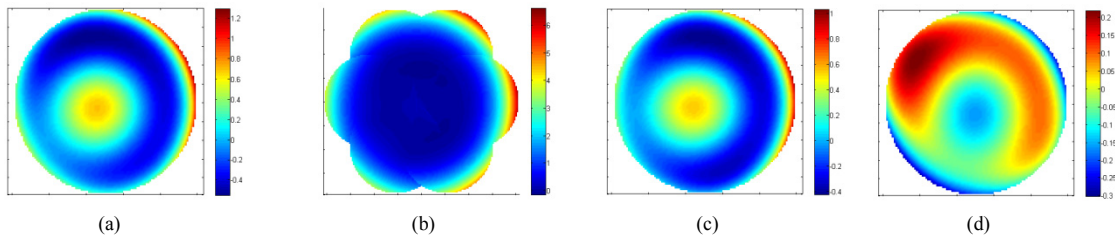


图 4 波前图

(a) 全口径测量波前; (b) 7 个子孔径测量结果的拼接; (c) 子孔径拼接测量的波前; (d) 子孔径拼接波前与全口径测量的差别

Fig.4 Color map of wavefront

(a) Direct measurement of full aperture; (b) Stitching of 7 sub-apertures; (c) SAT of full aperture; (d) Difference between SAT and direct measurement

表 1 两两拼接下的子孔径波前的修正系数

Table 1 Modifying coefficient of each sub-aperture in stitching-1-by-1

No. of S.A	1	2	3	4	5	6
Piston( $\lambda$ )	0.673 7	1.183 9	0.581 8	0.837 4	0.750 2	1.061 5
Tip9( $\lambda$ )	0.072 1	0.079 3	-0.552 0	-0.777 4	0.808 0	1.007 8
Tilt( $\lambda$ )	-0.762 4	1.340 9	-0.408 6	0.586 0	-0.363 3	0.689 1
Defocus( $\lambda$ )	0.333 1	0.584 8	0.315 0	0.477 7	0.439 6	0.552 0

## 2.2 均化误差方法

按照均化误差的原理和算法, 取 0 号中心孔径的所在的坐标系为全局坐标系, 计算出待拼接在全局坐标系内的修正系数见表 2。按照上节同样的处理方式, 可得到全口径的拼接测量波前图 5。与全口径直接测量波前图相比, 其差别的 *PV* 值为 0.50 波长。

表 2 均化误差方法下的子孔径波前的修正系数

Table 2 Modifying coefficient of each sub-aperture in error averaging method

No. of S.A	1	2	3	4	5	6
Piston( $\lambda$ )	0.710 7	1.125 9	0.599 2	0.732 8	0.857 7	1.114 1
Tip9( $\lambda$ )	0.062 3	0.083 2	-0.579 4	-0.684 6	0.882 0	1.055 9
Tilt( $\lambda$ )	-0.786 2	1.288 5	-0.394 5	0.560 3	-0.426 4	0.704 7
Defocus( $\lambda$ )	0.348 8	0.562 9	0.350 1	0.451 6	0.473 3	0.571 5

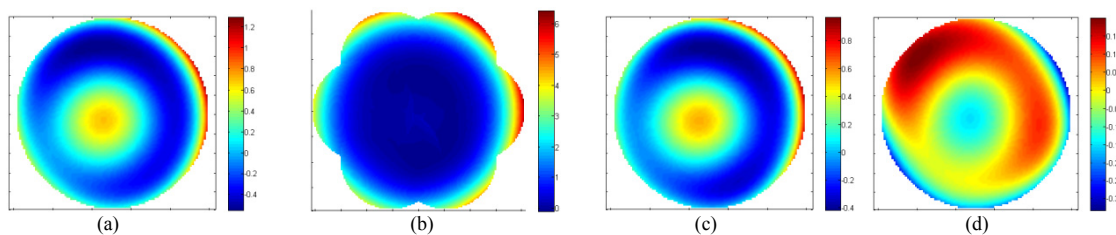


图 5 波前图

(a) 全口径测量波前; (b) 7 个子孔径测量结果的拼接; (c) 子孔径拼接测量的波前; (d) 子孔径拼接波前与全口径测量的差别

Fig.5 Color map of wavefront

(a) Direct measurement of full aperture; (b) Stitching of 7 sub-apertures; (c) SAT of full aperture; (d) Difference between SAT and direct measurement

### 3 结 论

本文针对基于 Shack-Hartmann 的子孔径拼接检测技术进行了实验研究, 设计了具有透射孔的光阑来实现子孔径的定位, 并采用坏点标记和边缘采样点去除的方法提高 Shack-Hartman 在子孔径上的测量精度, 采用两种不同的子孔径拼接算法实现全口径的拼接检测。实验结果表明, 在实验室条件下自准直光路中, 利用具有透射孔的光阑可实现小于 1 mm 精度的定位; 利用 Shack-Hartmann 波前探测器和 40 mm 的平面反射镜, 使用自准直拼接检测方法, 实现了对 72 mm 光学系统的波前检验, 其中, 使用均化误差的拼接算法的检验结果偏差的 PV 值为 0.50 波长, 优于两两拼接算法; 两种拼接方法得到的结果全口径测量结果的差别空间分布情况差别不大, 说明误差的主要来源在于测量误差。在做必要的改进和提高后, 可在实际的工程上用于对大口径望远镜的波前检测。

#### 参考文献:

- [1] PIERRE Y, BELY. **The Design and Construction of Large Optical Telescopes** [M]. Springer, 2002: 62-105.
- [2] HARMS F, JWOLF, WADDELL P, *et al.* On sky testing of the SOFIA telescope in preparation for the first science observations [J]. **SPIE(S0277-786X)**, 2009, **7453**: 745303.
- [3] KOEHLER B, KRAUS M, MORESMAU J M, *et al.* The VLTI Auxiliary Telescopes commissioning of AT1 [J]. **SPIE(S0277-786X)**, 2004, **5491**: 600-610.
- [4] CRAIG H S, BRUCE C H, Michael Midkiff, *et al.* Telescopes for optical/IR interferometry: the NASA/JPL Outriggers [J]. **SPIE(S0277-786X)**, 2004, **5489**: 720-731.
- [5] 朱守深. 波前处理机中的 Hartmann 技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.  
ZHU Shou-shen. A Study of Wavefront processing System Based on Technology of Hartmann [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [6] 汪利华, 吴时彬, 侯溪, 等. 子孔径拼接干涉检测大口径平面波前 [J]. 光电工程, 2009, **36**(6): 126-130.  
WANG Li-hua, WU Shi-bin, HOU Xi, *et al.* Measurement of Flat Wavefront by Sub-aperture Stitching Interferometry [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2009, **36**(6): 126-130.
- [7] 戴一帆, 曾生跃, 陈善勇. 环形子孔径测试的迭代拼接算法及其实验验证 [J]. 光学 精密工程, 2009, **17**(2): 251-256.  
DAI Yi-fan, ZENG Sheng-yue, CHEN Shan-yong. Iterative stitching algorithm for annular subaperture testing with experimental verification [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2009, **17**(2): 251-256.
- [8] 王月珠, 田义, 李洪玉, 等. 基于标记点的子孔径全局优化拼接检测法 [J]. 光电工程, 2009, **36**(5): 83-87.  
WANG Yue-zhu, TIAN Yi, LI Hong-yu, *et al.* Sub-aperture Stitching Interference Measurement Method Based on Marker Location and Global Optimization [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2009, **36**(5): 83-87.
- [9] CHEN Shan-yong, LI Sheng-yi, DAI Yi-fan, *et al.* Experimental study on subaperture testing with iterative stitching algorithm [J]. **Opt.Express(S1094-4087)**, 2008, **16**(7): 4760-4765.