

文章编号 1004-924X(2017)10-2572-08

## 大口径光学系统的镜面视宁度检测

杨 飞<sup>1\*</sup>, 安其昌<sup>1,2</sup>, 张 静<sup>3</sup>, 赵宏超<sup>1</sup>, 郭 鹏<sup>1,2</sup>, 姜海波<sup>1</sup>

(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; 3. 长春理工大学, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 为了保证大口径光学镜面加工检测的质量和效率, 提出了提高大口径光学系统镜面视宁度检测精度的方法。利用电子自准直仪以及平面镜确定波前斜率, 推导了基于斜率信息与镜面视宁度之间的关系。为了提高测量精度, 突破单台自准直仪精度限制, 采用三台自准直仪进行互标校。为了进一步降低误差, 使用六自由度平台支撑立方反射体, 使精度提高至 0.01"量级。另外, 结合频响函数的相关理论, 估计得到了六自由度平台在检测环境下所引入的误差。最后, 引入标准化点源敏感性(PSSn)对结果进行评价, 并开展了数值仿真实验。针对模拟镜面视宁度, 分别计算两个方向的斜率功率谱以及原始波前功率谱, 然后利用之前给出的功率谱与 PSSn 之间的关系得到了两个方向的 PSSn 均为 0.999。该镜面视宁度测量方法可以在模拟望远镜实际工况下, 完成对于系统主镜视宁度的定量预测。

**关键词:** 光学检测; 镜面视宁度; 大口径光学系统; 功率谱; 自准直仪

**中图分类号:** TH743; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172510.2572

## Seeing metrology of large aperture mirror of telescope

YANG Fei<sup>1\*</sup>, AN Qi-chang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jing<sup>3</sup>, ZHAO Hong-chao<sup>1</sup>, GUO Peng<sup>1,2</sup>, JIANG Hai-bo<sup>1</sup>

(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;

3. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

\* Corresponding author, E-mail: yangflying@163.com

**Abstract:** To ensure the quality and efficiency of manufacturing and detecting large aperture optical systems, a method to improve the seeing metrological accuracy was proposed. By determining the wavefront slope with electronic autocollimators and a flat mirror, the relationship between slope information and mirror seeing was deduced. With the purpose to enhance the accuracy and to exceed the limit of only one autocollimator, three autocollimators were used to calibrate each other. To decrease errors, a hexapod platform was adopted to support the cube mirror to improve the accuracy to 0.01". Moreover, hexapod platform errors induced from the test environment was estimated by the related principle of frequency response function. Finally, the normalized Point Source Sensitivity (PSSn) was deduced to evaluate the testing results. The simulation and experiment were performed. For mirror

收稿日期: 2017-05-27; 修订日期: 2017-07-03.

基金项目: 中国科学院青年创新促进会基金资助项目(No. 2016198); 国家自然科学基金资助项目(No. 11403022, No. 11673080)

seeing, the slope power spectra and original power spectra in two different directions were calculated, and both PSSn in two directions are 0.999 based on the relation between power spectra and PSSn. This method can be used to quantitatively predict the mirror seeing of primary mirrors under actual working conditions of the telescopes.

**Key words:** optical test; mirror seeing; large aperture optical system; Power Spectral Density(PSD); autocollimator

## 1 引 言

光学望远镜朝着更大口径方向发展,并带动与之相关的光学制造和光机电系统集成等相关技术的发展。国际上,30米级口径巨型地基光学望远镜已经开始建造,而我国目前的光学望远镜制造水平尚驻留于4米级,与国际先进水平存在不小的差距。

视宁度是表征观测目标受湍流影响而变得模糊和闪烁程度的物理量。随着光学望远镜口径的增大,当超出了镜面湍流尺度时,镜面视宁度对于后端成像会造成闪烁、散斑等影响,同时还会给光学加工检测带来不利影响。为了保证大口径光学镜面加工检测的质量和效率,以及系统集成应用的效果,需要准确测量镜面视宁度,以利于大口径光学加工检测以及望远镜系统工程的有效开展。镜面视宁度测量的本质为测量镜面附近的折射率变化。传统测量方法需要与主光学系统共用光路,如美国国家光学天文台 NOAO(National Optical Astronomy Observatory)利用位于焦点的干涉仪以及日本 SUBARU 望远镜利用主光学系统观测的间隔来进行视宁度测量。近年来,人们开始使用独立的测量系统来实现镜面视宁度的测量<sup>[1-3]</sup>。

基于点扩散函数的方法为有焦测量手段。KECK II 望远镜是一台十米级望远镜,利用收集到的光线进行干涉成像,在该模式下像质的要求非常高。该设备主要使用闪烁计数器来测量镜面附近的视宁度。闪烁计数器的主要作用是发射与接收光电子,并计算二者之间的幅值差异。镜面视宁度的测量结果用传递函数半高全宽(Full Width and Half Maximum,FWHM)衡量,数值为 $0.3''$ 。利用上述技术,国外大口径望远镜可以直接测量或者估计出由于大气湍流(视宁)所引起的抖动。作为有焦系统,望远镜的制造与装调都

会受到一定的限制,特别是 F 数限制,使光路不能无限延伸,且折叠的自由度也受到了限制。随着大口径望远镜系统尺寸与复杂程度的提高,一种无焦系统的研制就显得十分必要。

大口径光学望远镜主要通过单镜大口径与多镜面拼接相结合的技术手段来实现,如欧洲的 E-ELT(European Extremely Large Telescope)主镜为 798 块 1 米级子镜拼接而成,美国的 TMT(Thirty Meter Telescope)主镜为 492 块 1 米级子镜拼接而成,GMT(Giant Magellan Telescope)由 7 块 8 米级的子镜拼接而成。这三台望远镜的主镜口径均达到了 30 米量级,是目前为止国际上在建的口径最大的地基光学望远镜。镜面视宁度检测在大口径镜面高精度加工检测、子镜镜面的高效率流程化加工检测、大口径镜面系统集成中的重要作用日益凸显,并成为大口径望远镜发展的关键技术。

目前,Zygo 以及 4D 干涉仪等主流的波前检测仪器已经可以较好地解决环境振动所带来的影响,而湍流所引入的误差依旧没有很好的解决办法。随着光学望远镜口径的增大,尤其当超出了镜面湍流尺度时,镜面视宁度不仅给光学加工检测过程带来不利影响,还给后端成像带来闪烁、散斑等影响。为了保证大口径光学镜面加工检测的质量和效率以及系统集成应用的效果,有必要对镜面视宁度进行准确测量,以利于大口径光学加工检测以及望远镜系统工程的有效开展。为了提高检测精度,采用三台电子自准直仪进行互标校,并使用六自由度平台支撑立方反射体及标准化点源敏感性(Normalized Point Source Sensitivity,PSSn)的相关理论,检测得到镜面视宁度的表征指标<sup>[4-7]</sup>。

在镜面视宁度检测的起步阶段,检测思路与镜面面形检测类似,即通过检测与理想波前的偏差来确定镜面视宁度。这种测量方法主要受限于干涉仪的响应速度以及口径。随后的大口径望远

镜开始采用专用仪器来测量,如 KECK 与 SUBARU。但是专门设备制造昂贵并且可移植性差。1989 年, Malley 提出了一种相对经济、快捷的直接光学测量方法。自准直仪发出的小口径光束沿  $y$  方向通过流场后经反射镜反射后再次进入自准直仪,自准直仪的输出电压即反映了光束入射点相对于出射点的偏移量,根据流向和横向偏移量进而可计算出视宁度<sup>[8-9]</sup>。另一方面,镜面视宁度的评价指标一开始使用结构函数,这是一种带变尺度效果的评价方式,只能定性评价镜面视宁度的分布与湍流的聚集尺寸,其定量评价效果较差。 $\theta_{\text{FWHM}}$ 表示系统成像的能量集中度,其数值越小表示能量越集中,湍流影响越小,虽然可以较好地定量评价镜面视宁度,但它只能评价系统所成像的中心区域,并不能全面地评价系统。本文针对大口径望远镜的镜面视宁度,提出了一种基于 PSSn 和光学传递函数所有区域的积分平均评价方法。

## 2 基本推导

本文使用功率谱来分析镜面周边湍流的时间特征,并由此得到合理的采样方案,最后可以得出不同评价尺度下各种评价指标的数值。只考虑 RMS 即可得到该情况下的结构函数,若同时计算斯特利尔比或者 PSSn 即可实现变尺度评价,这表明无焦系统(平面镜系统)可以实现变尺度评价,这正是无焦系统测试的优势。

基于波前斜率信息的计算方法如图 1 所示。假设波前斜率测量沿一个方向,利用自准直仪等斜率测量仪器,通过求偏导数可以得到波前斜率信息。

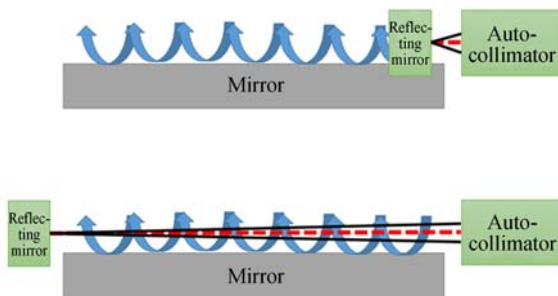


图 1 波前斜率测量原理图

Fig. 1 Principle of wavefront slope testing

首先,将某时刻的自准直仪的状态设为零点,之后自准直仪测量相当于测量一个口径与其通光口径  $\Phi$  相当的空气柱内由折射率变化而引起的光线偏折。由于反射镜可以将光路进行对称折叠,形成  $N$  层介质层。假设最外层介质为理想空气  $n_0=1$ ,可得空气总的偏移量为:

$$\Delta\theta_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N 2\Delta n_i \varphi_i, \quad (1)$$

其中:  $\Delta n_i = n_{i-1} - n_i$ , ( $i=1, 2, \dots, N$ ),  $\varphi_i$  为第  $i$  层介质的偏移角,  $N$  为介质层数。

$$\Phi\Delta\theta_{\text{total}} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N 2\Delta n_i dz_i - \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=1}^N 2\Delta n_i dz_i = \sum_{j=1}^N n_j dz_i - \sum_{j=1}^{N-1} n_j dz_i = \text{diff}(OPD),$$

其中  $\Phi$  为通光口径,  $dz$  为介质层厚度,  $\text{diff}(\cdot)$  表示差分算子,  $OPD(x, y, t)$  表示系统波像差。可见,通过连续测量波前斜率可以得到光程差信号。

另一方面,波前信息可以理解为长度为  $N$  的随机序列,故在频域上表达为:

$$\text{FFT}(OPD) = \sum_{i=1}^N OPD(x, y, t_i) e^{\frac{2\pi i k t_i}{N}},$$

其中  $t_i$  为离散时间,  $i$  为整数。

同理,波前斜率信息在频域上表达为:

$$\text{FFT}(\text{slope}_x) = \sum_{i=1}^N \text{slope}_x(y, t_i) e^{\frac{2\pi j k t_i}{N}}. \quad (2)$$

根据功率谱的概念,随机过程  $[x_1, x_2, \dots, x_N]$  的功率谱为:

$$S(e^{j\omega})_s = \frac{1}{2\pi N} \left| \sum_{n=1}^N x_n e^{-j\omega n} \right|^2, \quad (3)$$

其中  $\omega$  为角速度。考虑线性时不变系统,其输出的自相关序列为:

$$\begin{aligned} R_{yy}(n, m+n) &= E[y(n)y(n+m)] = \\ E\left[ \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)x(n-k) \sum_{r=-\infty}^{\infty} h(r)x(n+m-r) \right] &= \\ \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \sum_{r=-\infty}^{\infty} h(r) R_{xx}(m-r+k) &= \\ \sum_{l=-\infty}^{\infty} R_{hh}(l) R_{xx}(m-l). \end{aligned}$$

进而可以得到功率谱的关系:

$$S(e^{j\omega})_{yy} = S(e^{j\omega})_{xx} |H(e^{j\omega})|^2, \quad (4)$$

式中  $i$  为整数。根据之前的分析可以得到原始波前信号功率谱与波前斜率信息功率谱,分别为:

$$S_{\text{OPD}} = \frac{1}{2\pi N} \left| \sum_{i=1}^N OPD(x, y, t_i) e^{\frac{2\pi i k t_i}{N}} \right|^2, \quad (5)$$

$$S_{\text{slope}} = \frac{1}{2\pi N} \left| \sum_{i=1}^N \text{slope}_x(y, t_i) e^{\frac{2\pi j k t_i}{N}} \right|^2. \quad (6)$$

根据之前的推导可以得到:

$$S_{\text{slope}} = \left( \frac{2\pi k}{N} \right)^2 S_{\text{OPD}}. \quad (7)$$

采用合成的方法得到系统的 PSSn 为:

$$\text{PSSn} = \prod \lim_{i \rightarrow \infty} \left[ 1 - \int_{f_i}^{f_{i+1}} \beta(f) S_{\text{OPD}}(f) 2\pi f df \right], \quad (8)$$

其中:

$$\beta(f) = \begin{cases} \mu r_0 f^2 (f < \frac{1}{r_0}) \\ 2 (f \geq \frac{1}{r_0}) \end{cases},$$

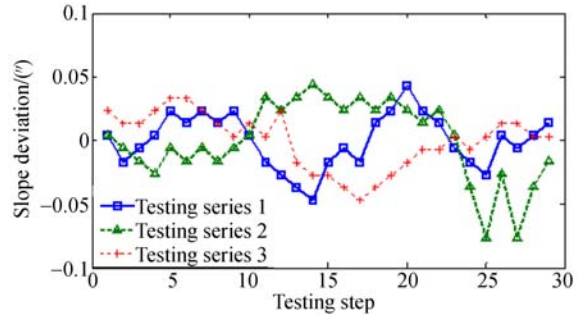
其中:  $\mu=2.22$ ,  $r_0$  为大气相关长度。

系统原理的验证与初始标定都可采用如图 1 所示的方法。同理,本文都是利用波前畸变的相对变化值来表征系统局部视宁度的变化。波前斜率测量设备如图 2 所示,系统由德国 TRIOPTICS 公司的自准直仪构成,在不同距离处安放反射镜作为反射元件,在 2 m 的距离之外获得的波前斜率数据如图 3(a)所示;当反射镜移动到接近自准直仪的位置时,获得的数据如图 3(b)所示,可见系统可以测量出实验室大气湍流的情况,验证了实验原理的正确性。

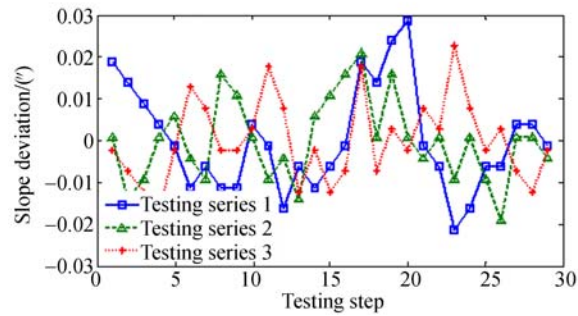


图 2 波前斜率测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wavefront slope testing



(a)@2 m



(b)@0.01 m

图 3 波前斜率测量

Fig. 3 Testing result of wavefront slope

### 3 自准直仪互标校

根据误差合成原则,使用多台仪器进行测量会增加测量误差,但是利用三台自准直仪进行互相标定却可以突破单台仪器本身的测量精度,如图 4 所示。具体来说,假设正方体的旋转角度用欧拉角来表示:  $R_Z - R_Y - R_X : \alpha - \beta - \gamma$ 。

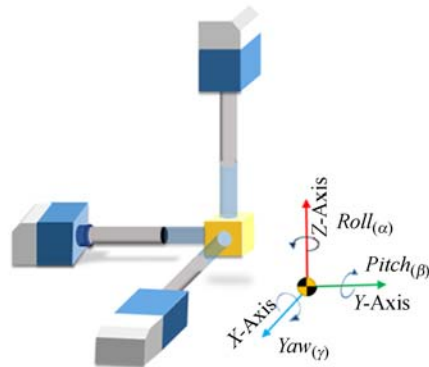


图 4 自准直仪互标校示意图

Fig. 4 Schematic diagram of mutual calibration of autocollimators

根据镜面反射公式,不考虑绕镜面法线方向的旋转。假设光线沿着 X 轴入射,其向量为:

$$\mathbf{u}_{\text{in}} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

反射镜面经过绕 Z 轴、Y 轴的两次旋转,其向量为:

$$\mathbf{u}_{\text{ref}} = \begin{pmatrix} 2\cos^2 \alpha \cos^2 \beta - 1 \\ \sin(2\alpha) \cos^2 \beta \\ \cos \alpha \sin(2\beta) \end{pmatrix}.$$

根据小角度进行近似处理,即  $\sin \alpha \approx \alpha$  以及  $\cos \alpha \approx 1 - \frac{\alpha^2}{2}$  可得:

$$\mathbf{u}_{\text{ref}} \approx \begin{pmatrix} 2(1 - \sin^2 \alpha)(1 - \sin^2 \beta) - 1 \\ \sin(2\alpha)(1 - \sin^2 \beta) \\ \left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right) \sin(2\beta) \\ \left. \begin{matrix} 1 - 2\alpha^2 - 2\beta^2 + 2\alpha^2\beta^2 \\ 2\alpha - 2\alpha\beta^2 \\ 2\beta - \alpha^2\beta \end{matrix} \right\} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

舍去最高阶的四阶小量可得:

$$\mathbf{u}_{\text{ref}} \approx \begin{pmatrix} 1 - 2\alpha^2 - 2\beta^2 \\ 2\alpha - 2\alpha\beta^2 \\ 2\beta - \alpha^2\beta \end{pmatrix}.$$

利用上述结论,可以计算正方体绕 3 个轴旋转的角度  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$  与自准直仪所得角度  $(\alpha_1, \beta_1), (\alpha_2, \beta_2), (\alpha_3, \beta_3)$  之间的关系:

$$\begin{cases} \alpha_1 = -\varphi_z \\ \beta_1 = -\varphi_y \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} \alpha_2 = -\varphi_z + \varphi_x \varphi_y \\ \beta_2 = \varphi_x \left(1 - \frac{1}{2} \varphi_y^2\right), \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \alpha_3 = \varphi_x \left(-1 - \frac{1}{2} \varphi_y^2 + \frac{1}{2} \varphi_z^2\right) + \varphi_z \varphi_y \\ \beta_3 = \varphi_y \left(-1 + \frac{1}{2} \varphi_x^2 + \frac{1}{2} \varphi_z^2\right) - \varphi_x \varphi_z \end{cases}. \quad (12)$$

利用立方体三个面互成角度的封闭性,可以联立获得高于自准直仪本身精度的测量结果。具体做法为通过式(10)~式(12)获得正方体绕 3 个轴旋转的角度的估计值  $\hat{\varphi}_x, \hat{\varphi}_y, \hat{\varphi}_z$ ,再代入求解自准直仪所得角度  $(\hat{\alpha}_1, \hat{\beta}_1), (\hat{\alpha}_2, \hat{\beta}_2), (\hat{\alpha}_3, \hat{\beta}_3)$ 。为了获得更高的精度,可结合高精度的位置执行元件,通过提高  $\hat{\varphi}_x, \hat{\varphi}_y, \hat{\varphi}_z$  的精度获得更好的  $(\hat{\alpha}_1, \hat{\beta}_1), (\hat{\alpha}_2, \hat{\beta}_2), (\hat{\alpha}_3, \hat{\beta}_3)$  的估计。

Stewart 平台是 20 世纪法国工程师 Stewart 所提出的六自由度调节机构,近年来,越来越多地被应用于主动光学的调整环节中。在传统的大口径光电设备中,Stewart 平台多作为次镜组的调节组件,在某些情况下平台上还附加了斩波功能,如 SOFIA 望远镜,作为一个天基系统,其次镜就要兼顾调节与斩波的双重任务。

将反射正方体安置于 Stewart 平台上,可以实现高精度的角度转动,更好地估计  $(\hat{\alpha}_1, \hat{\beta}_1), (\hat{\alpha}_2, \hat{\beta}_2), (\hat{\alpha}_3, \hat{\beta}_3)$ 。PI 公司的 M850 Stewart 平台角度精度为  $0.01''$ ,重复性为  $0.003''$ 。通过 Stewart 平台的标校可以实现更高精度的互标校。

为了更好地评估测量精度,还需要考虑 Stewart 平台所引入的振动。本文对于德国 PI 公司的 M850 平台进行了模态定标实验,实验现场如图 5 所示。

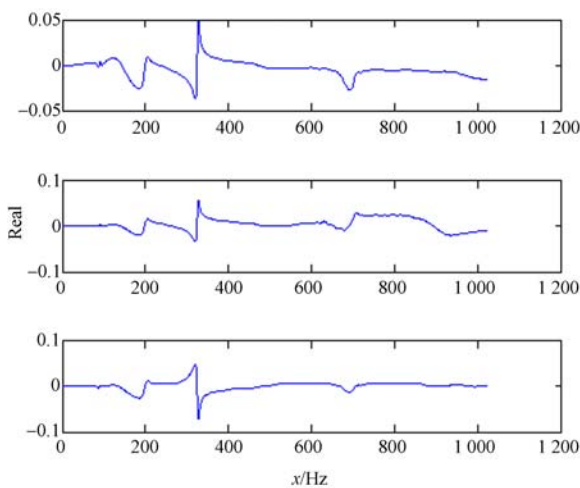


图 5 Stewart 平台模态测试示意图

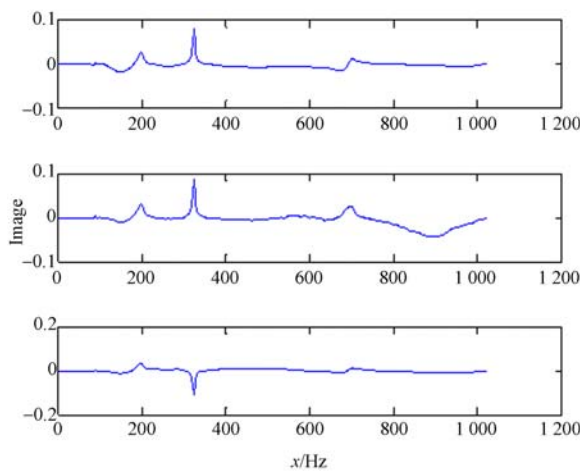
Fig. 5 Diagram of modal testing for Stewart platform

频域分析法是随傅里叶变换的问世而发展起来的,其基本特征是简单直观,其次的优点就是受噪声的影响很小。频响函数是频域方法的基本数学模型。通过模态分析仪可以获得其传递函数的实部与虚部,分别如图 6(a)和 6(b)所示。以  $\hat{\varphi}_y$  为例,通过计算可得外部振动与  $\hat{\varphi}_y$  之间的频响函数,如图 7 所示。

对于受外界激励产生的抖动,首先需要具体工况下的振动信号,值得注意的是,无论经验谱还是实测谱,都需要考虑带宽问题,即以最窄的带宽为准。图 8 所示为某现场下的功率谱密度,可得其 RMS 小于  $0.001''$ 。



(a)实部曲线  
(a)Real part



(b)虚部曲线  
(b)Imaginary

图 6 传递函数曲线

Fig. 6 Curves of frequency response transfer function

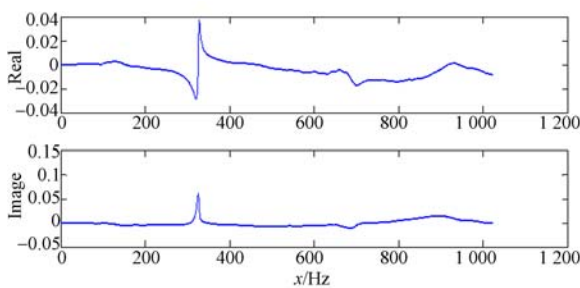


图 7 六自由度平台频响函数

Fig. 7 Frequency response function of Stewart platform

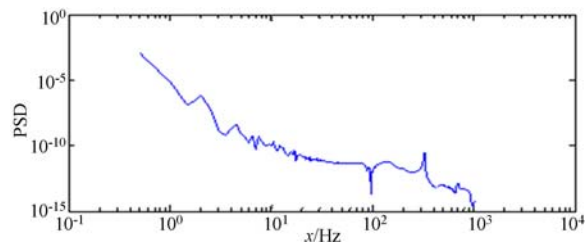


图 8 抖动的功率谱密度

Fig. 8 Power spectral density of jitter

### 4 仿真实验

在实际应用中,首先在镜面下部布置循环系统,保证镜面温度处于一个恒定值。镜面之上的气刀或者风扇保证镜面处于强迫对流,关闭风扇可以获得自然对流的情况。此部分设备负责模拟镜面处于实际工作时的状态。

利用三台自准直仪进行互相标定,不仅可以省去使用平面镜对每一个自准直仪进行标定的过程,同时还可以突破自准直仪的精度极限,达到更好的测量效果。利用 Stewart 平台上所搭载的立方体反射元件,可实现自准直仪的标校。这里利用相位屏技术,根据功率谱反演可以获得符合一定统计学规律的波前得到 RMS 为 20 nm 的模拟大气湍流,如图 9 所示。理想系统的 PSSn 为 1,随着数值的下降,与理想系统的差别变大。

根据经验公式:

$$1 - PSSn \approx \frac{\gamma \sigma_{\text{slope}}^2}{\lambda^2},$$

其中  $\gamma = 0.11 \text{ m}^2/\text{rad}^2$ ;  $\lambda$  为以微米为单位的波长,取  $0.5 \mu\text{m}$ 。

作为核心设备的自准直仪,测量精度为  $0.05''$ 。根据  $3\sigma$  准则,可以得到斜率测量的方差为  $0.017''$ ,进而得到  $\sigma_{\text{slope}}^2 = 0.007 \mu\text{rad}^2$ ,PSSn 的测量精度为 0.003。当自准直仪的分辨率为  $0.005''$ 时,镜面视宁度测量仪 PSSn 的测量分辨率为 0.0003;当自准直仪的重复性为  $0.03''$ 时,镜面视宁度测量仪的 PSSn 测量重复性为 0.003。根据公式推导可得镜面视宁度测量仪的测量视场角为  $0.3''$ 。两个方向采集的斜率信息如图 10(a)和 10(b)所示。

然后分别计算其斜率功率谱以及原始波前功率谱,如图 11 所示。再利用之前给出的功率谱与 PSSn

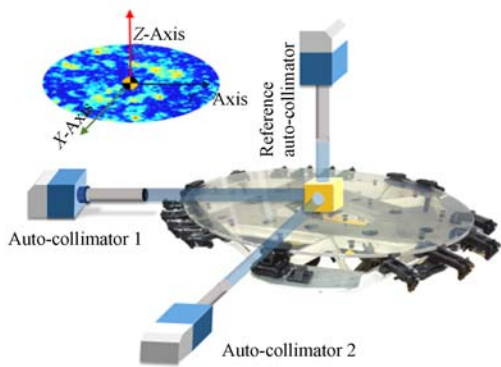
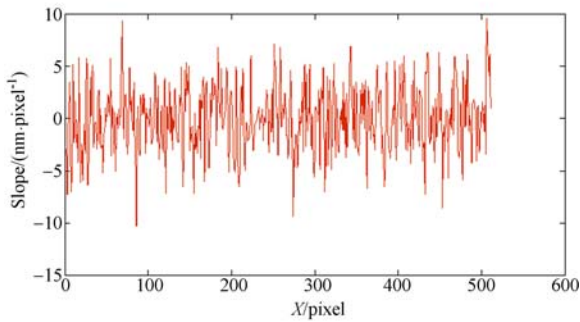
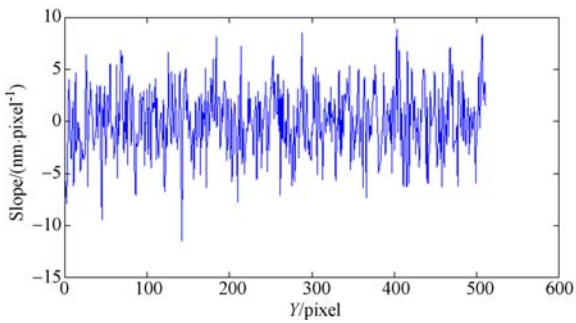


图 9 镜面视宁度测量设备示意图

Fig. 9 Schematic diagram of mirror seeing measuring facility



(a) x



(b) y

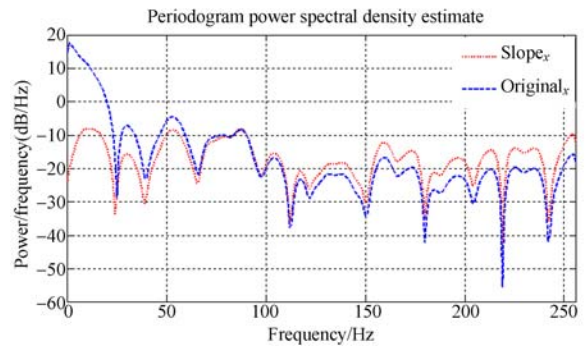
图 10 数值模拟波前斜率

Fig. 10 Numerical simulation of wavefront slope

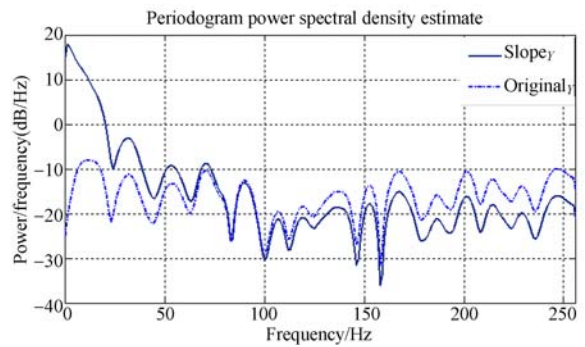
之间的关系可以得到两个方向 PSSn 都为 0.999。

参考文献:

[1] ANGELI G Z, CHO M K, SHEEHAN M, et al. . Characterization of wind loading of telescopes[J]. SPIE, 2002, 4757: 72-83.  
 [2] POTTEBAUM T, MACMYNOWSKI D G. Buffeting of large telescopes: wind-tunnel measurements



(a) x



(b) y

图 11 数值模拟波前功率谱以及斜率功率谱

Fig. 11 Numerical simulated PSD of wavefront slope and original wavefront

5 结 论

本文利用电子自准直仪以及平面镜来确定波前斜率,从波前斜率信息获得原始波前信息;然后利用冻结湍流假设将波前斜率的时间历程转化为空间分布,之后根据傅里叶变换得到原始波前功率谱,并利用功率谱以及 PSSn 的相关理论,检测得到镜面视宁度的表征指标。该镜面视宁度测量方法可以在模拟望远镜的实际工况下,完成系统主镜视宁度的定量预测。同时,利用三台自准直仪结合 Stewart 平台可以获得更高的测量精度。

of the flow inside a generic enclosure[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2006, 22(1): 3-19.  
 [3] VOGIATZIS K. Transient aero-thermal simulations for TMT[J]. *SPIE*, 2014, 9150: 91500P.  
 [4] MACMARTIN D G, THOMPSON P M, COLAVITA M M, et al. . Dynamic analysis of the actively-

- controlled segmented mirror of the thirty meter telescope[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 22(1): 58-68.
- [5] 高松涛, 武东城, 苗二龙. 大偏离度非球面检测畸变校正方法[J]. *中国光学*, 2017, 10(3): 383-390. GAO S T, WU D CH, MIAO E L. Distortion correcting method when testing large-departure asphere[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 383-390. (in Chinese)
- [6] KAN F W, EGGERS D W. Wind vibration analyses of giant Magellan telescope[J]. *SPIE*, 2006, 6271: 62710Q.
- [7] CHO M K, STEPP L M, KIM S. Wind buffeting effects on the Gemini 8-m primary mirrors [J]. *SPIE*, 2001, 4444: 302-314.
- [8] 张磊, 刘东, 师途, 等. 光学自由曲面面形检测技术[J]. *中国光学*, 2017, 10(3): 283-299. ZHANG L, LIU D, SHI T, *et al.*. Optical free-form surfaces testing technologies[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 283-299. (in Chinese)
- [9] WEISS K A, ASSMUS M, JACK S, *et al.*. Measurement and simulation of dynamic mechanical loads on PV-modules[J]. *SPIE*, 2009, 7412: 741203.

#### 作者简介:



杨 飞(1982—),男,湖北天门人,博士,副研究员,2003年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,2017年于长春理工大学获得博士学位,主要从事大口径光电望远镜光机系统方面的研究。E-mail: yangflying@163.com



安其昌(1988—),男,山西太原人,硕士,助理研究员,2011年于中国科学技术大学获得学士学位,2014年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事空间机构学的研究。E-mail:anj@mail.ustc.edu.cn