

文章编号 1004-924X(2017)02-0433-08

基于结构函数的大口径望远镜中频误差分配研究

安其昌^{1,2*}, 张景旭¹, 杨 飞¹, 赵宏超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 100039)

摘要:为了更好地对于大口径望远镜中频误差进行评价与分配, 本文引入了结构函数来进行研究。本文首先对于结构函数的基本性质进行了推导, 并与传统的误差均方根(RMS)进行比较, 表明了其表征不同尺度误差的能力。之后分析了系统波前在不同的评价尺度下的统计特性差异, 得出在较小尺度下, 系统的误差分布可以较好的服从正态分布, 而随着尺度的增加(如大于 100mm)会逐渐偏离正态分布的结论。然后根据结构函数的基本性质, 提出了一种可以同时考虑诸多误差源的大口径望远镜中频误差分配方法。结合美国三十米望远镜(TMT)团队所提出的标准化点源敏感性(normalized Point Source Sensitivity, PSSn), 建立起了由结构函数到标准化点源敏感性的换算关系, 通过此方法来进行误差分配指标间的交叉验证以及与其他单元技术之间的对接。最后, 根据本文所提出的方法, 对于某大口径望远镜的主镜系统进行了误差分配, 得到在大尺度均方根为 25nm, 粗糙度为 1nm, 中频尺度为 250mm, 大气相干长度为 0.4m(检测环境)的要求下, 该系统的结构函数满足要求, 同时由要求结构函数所计算得到的 PSSn=0.999 6 大于由镜面数据直接得到的 PSSn=0.999 5, 同样满足要求。

关键词:大口径望远镜; 标准化点源敏感性; 中频误差; 结构函数

中图分类号: TH751 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172402.0433

On middle frequency error distribution of large telescope based on structure function

AN Qi-Chang^{1,2*}, ZHANG Jing-xu¹, YANG Fei¹, ZHAO Hong-chao¹

(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)

* Corresponding author, E-mail: anjj@mail.ustc.edu.cn

Abstract: To better evaluate and distribute the middle frequency errors of large telescope, structure function was put forward for such purposes in this paper. Firstly, we carried out a derivation in basic property of the structure function and compared it with traditional root mean square (RMS), which indicates its capability of representing different-scale errors; secondly, conducted an analysis on the statistical property difference of system wavefront under different evaluation scales, which indicates that system error distribution can better follow the normalized distribution under small scale and tend

收稿日期: 2016-07-20; 修订日期: 2016-08-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 11403022)

to deviate from the normalized distribution with the scale increase (e. g. : a scale greater than 100 mm); then a method for middle frequency error distribution of large telescope that can simultaneously cover multiple error sources was put forward based on basic property of the structure function; established a conversion relation between the structure function and normalized point source sensitivity (PSSn) put forward by TMT team, and then completed the cross validation among the error distribution indexes and transfer of techniques; finally, carried out an error distribution in primary mirror system of a large telescope based on the method put forward in this paper, which indicates that structure function of the system can meet the requirements under the condition where large-scale RMS is 25nm, roughness is 1nm, middle frequency scale is 250 mm and atmospheric coherent length is 0.4 m (testing environment), and that $PSSn=0.9996$ obtained from the structure function is greater than $PSSn=0.9995$ directly obtained from mirror data can also meet the corresponding requirement.

Key words: large telescope; normalized Point Source Sensitivity; middle frequency error; structure function

1 引言

随着地基大口径望远镜的口径逐渐增大,对其光学元件的误差需要进行更加细致的划分。1995年INF提出使用功率谱来分析面形,获得了很多的应用。对于小口径系统,其各向同性的性质较为明显。功率谱可以选取任意的单方向进行评价,不同的评价方向对于结果的影响并不明显。但是对大口径系统,误差的分布不可能如此的均匀,故有研究人员使用Fried提出的结构函数来评价面形^[1-3]。

Fried指出,结构函数是一种统计矩,可以较好的研究系统波前的中频特性。但之前的研究基本是在使用结构函数分析面形误差,而没有对误差进行有效分配。同时,也没有把加工,装调以及检测等环节有机的结合起来。不同的加工条件与方法,对镜面的误差分布存在不同的影响。由于国外的很多元件都采用外包的方式加工,这一点在大口径望远镜的建设过程中逐渐被重视起来;随着我国大口径设备的发展,不同频段的误差分析与分配也变得十分重要^[4,5]。

在实际加工中,如果加工的光学元件小于磨头的尺寸,就会在磨盘下同时安放多个镜坯同时研磨;如果加工的元件尺寸大于磨头尺寸,则会移动磨头,在不同的位置研磨,为“子孔径加工技术”。一旦磨头在镜面上运动,各部分面形误差之间的统计学特征就会有显著的差别。

另一方面,作为地基设备,不论在加工检测阶

段还是对天观测阶段,对于视宁度的影响也必须充分考虑。1989年美国国家天文光学实验室(NOAO)对直径为1.8m的球面轻量化镜进行了镜面视宁度(镜面附近湍流状况)的测量实验,对镜面视宁度的分析,NOAO引入了结构函数来评价。之后,结构函数开始表征视宁度的影响^[6,7]。

标准化点源敏感性(normalized Point Source Sensitivity, PSSn)是利用光学传递函数所有区域的积分平均,同时充分考虑了背景对光学能量传递所带来的影响,可以全面的评价系统的成像质量,本文建立了结构函数与PSSn的关系,即通过之前分配得到的结构函数,可以得到与之相对应的传递函数,进而可以获得其PSSn。这样就可以实现多个指标之间的交叉检验与对接^[8-11]。

在此首先研究了大口径元件的统计学分布,引出结构函数。结合PSSn对系统的中频误差进行了分析。最后通过实验验证了方法的正确性。

2 大口径望远镜中频误差的频域特性与统计特征

2.1 波前中频误差的频域特性

对小口径光学元件加工、检测而言,单一指标足够判断元件能否可以实现设计者的意图。传统使用的波前评价指标主要是波前均方根,它对小口径系统适用的主要原因为:小口径系统在加工

时,磨头的尺寸与镜面相差不大,镜面各部分的面形统计特性较为接近,故无需考虑“子孔径效应”。另一方面,小口径系统受大气湍流的影响较小,而大口径系统必须将这些因素都考虑在内。

首先引入正弦函数来表征具有单一频率分量的波。一般来说,波前可以用彼此正交的基底来表示,Zernike 多项式在圆域上具有较好的应用,但是其频率特征表现不明显,在此引入三角级数作为基底。

三角级数基底如式(1)所示,其中 A 可以表征波前波动的幅值, f_x 与 f_y 为两个方向的基频, N 为波前的采样数, m, n 为整数:

$$W_{xy}(m, n) = A \sin \left[\frac{2\pi}{N} (f_x m + f_y n) \right]. \quad (1)$$

由基本的代数推导可以得出,对于相同的 RMS 的波前,却具有不同的能量分布,为波前上的位置参数。其中 A 可以表征波前波动的幅值, f_x 为该方向上的基频,或者成为特征频率。

为分析简便起见,只考虑单方向的连续正弦波前:

$$W_x(x) = A \sin(2\pi f_x x). \quad (2)$$

得到其波前均方根为:

$$\text{RMS}_{\sin \text{ wavefront}} = \sqrt{\int_{-\frac{1}{2f_x}}^{\frac{1}{2f_x}} [A \sin(2\pi f_x x)]^2 dx} = \frac{A}{\sqrt{2}}.$$

可见,对于特征频率为 f_x 的正弦波前,其波前均方根与 f_x 无关。所以波前均方根无法全面评价系统的频域特性。为了更好的说明,利用傅里叶变换可以得到具有相同均方根的波前远场光斑。

根据傅里叶光学理论,不同正弦波前所对应的远场光斑如图 1 所示。即使波前的 RMS 相同,但实际的成像效果可能不同。

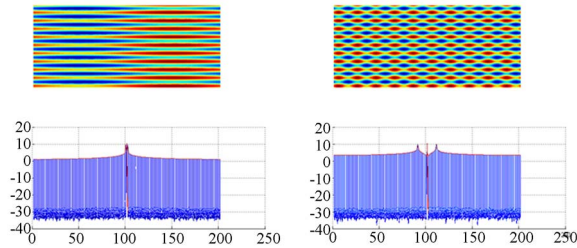
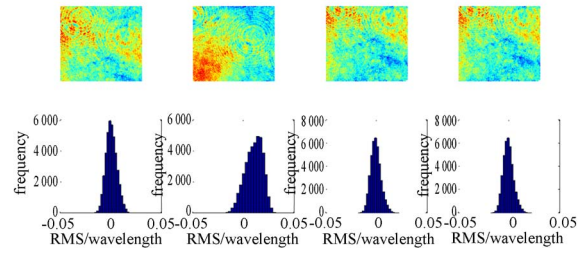


图 1 具有不同的特征频率的波前及其远场光斑

Fig. 1 Wave front with different character frequency and its far field spot

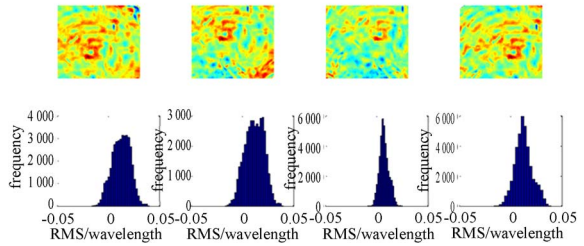
2.2 大口径元件的中频误差统计特性

对于小口径系统,去除低阶起伏之后的面形数据的接近符合正态分布,但是由于不同口径所引起的加工工艺,支撑条件等的不同,会对其分布产生不同的影响。同时,取样尺度也会在一定程度上影响检测结果的统计学特性。由图 2 可以看出,在小范围内,镜面的各部分之间的统计学特征较为相似;随着取样口径的增大,在小范围内的统计学均一性受到了影响;当尺度达到了 250 mm,分布的形状已经非常明显的偏离正态分布。



(a) 采样尺度为 25 mm 的波前

(a) Wave front @r=25 mm



(b) 采样尺度为 250 mm 的波前

(b) Wave front @r=250 mm

图 2 不同的采用尺度下的波前以及其误差分布

Fig. 2 Wave front under different sampling scale and its distribution

3 结构函数作为中频误差评价指标

3.1 结构函数的基本性质

利用复面形理论,可以迅速获得波前的结构函数的合成特性,即可以通过直接相加来获得得到:

$$\tilde{D}_{\text{wavefront}}(\lambda f) = \langle [\phi(\mathbf{r}) + j l(\mathbf{r}) - \phi(\mathbf{r} + \lambda \mathbf{f}) - j l(\mathbf{r} + \lambda \mathbf{f})]^2 \rangle = \langle [\phi(\mathbf{r}) - \phi(\mathbf{r} + \lambda \mathbf{f})]^2 \rangle + \langle [l(\mathbf{r}) - l(\mathbf{r} + \lambda \mathbf{f})]^2 \rangle, \quad (3)$$

其中: ϕ, l 为检测所得到的波前, \mathbf{r} 为波前上的位置矢量。 f 为空间频率(circle/rad), λ 为波长, $\langle \cdot \rangle$ 表示在波前上的平均,表示 \mathbf{r} 将取遍所有的位置, f 取遍所有的方向,最后求平均,最后得到

是一维的评价指标,与单值评价指标相比,可以更全面的评价系统误差。

结合之前的规律,利用三角函数可以得到波

$$D_{\text{wavefront}}(\lambda f) = \int_{-\frac{1}{2f_x}}^{\frac{1}{2f_x}} [\text{Asin}(2\pi f_x m) - \text{Asin}(2\pi f_x(m + \lambda f))]^2 dm = \int_{-\frac{1}{2f_x}}^{\frac{1}{2f_x}} [2A\cos(\pi f_x m + \pi f_x \lambda f) \sin(\pi f_x \lambda f)]^2 dm = A^2 \sin^2(\pi f_x \lambda f), \quad (4)$$

其中:A可以表征波前波动的幅值, f_x 为该方向上的基频, f 为空间频率(circle/rad), λ 为波长。

根据小角度近似原则, $\sin(\theta) \approx \theta$,可得:

$$D_{\text{wavefront}}(\lambda) \approx A^2 (\pi f_x \lambda f)^2. \quad (5)$$

利用式(5)可以得到结构函数服从幂次方规律,同时其最大值为波前均方根平方的2倍,这对于误差分配是一个非常重要的性质。

一般来说,使用功率谱进行面形评价时,会在LOG/LOG SPACE内设置一条直线,称为NTP(Not To Pass)曲线,如果系统的功率谱曲线没有超过该条曲线,可以认为该系统的误差满足要求。同理,结构函数在对数空间(LOG/LOG SPACE)也可以使用直线作为评价的边界。

首先考虑大气的结构函数 $D_{\text{atmosphere}}(r_e)$:

$$D_{\text{atmosphere}}(r_e) = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 6.88 \left(\frac{r_e}{r_0}\right)^{5/3}, \quad (6)$$

其中: r_0 为大气相干长度, λ 为波长, r_e 为评价尺度。

不同视宁情况下的大气结构函数如图3所示。其中横轴表示评价尺度,纵轴为结构函数。可以看出在LOG/LOG SPACE中,由于大气所引起的结构函数为直线,这对误差分配过程提供了较大的便利。由式(3)可得,结构函数可以通过简单的相加来进行合成。只要将大气的部分添加到之前由系统所确定的结构函数上即可。

望远镜所面临的运动分为4个层次:

第一个层次为地球的运动,它造成了太阳东升西落以及斗转星移。由于这种运动有着严格的周期性,可以利用look up table来标校后,其量级为角分。目前已知的大口径望远镜很多都配有消旋机构,如电子消旋,道威棱镜消旋以及K镜消旋。

第二个层次为望远镜自身的跟踪架的变形、指向运动的残差以及由于温度梯度所引起的运

前结构函数的一些基本性质,由三角函数而得到的波前的结构函数:

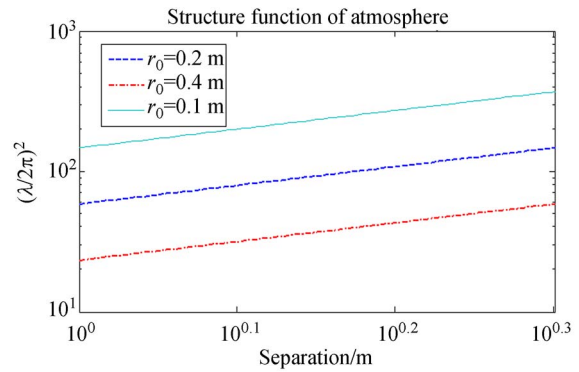


图3 大气的结构函数

Fig. 3 Structure function of the atmosphere

动,在利用look up table来标校后,其量级为角秒。

第三个层次为望远镜所受视宁的影响,其量级为亚角秒。视宁可以分为大气视宁度,圆顶视宁度,以及镜面视宁度。对于大气视宁度,其主要形式为波前的倾斜;圆顶视宁度主要影响为大团气流的沉降或者上升;而镜面视宁度是镜面附近气流的影响。对于圆顶视宁度,Keck使用闪烁仪进行测量,通过在圆顶中折叠数次的光路,最后会得到受到视宁度影响的点扩散函数。而对于镜面视宁度NOAO曾利用干涉仪对1.8 m直径的镜面进行测量,得出镜面视宁度的作用程度为1 m。

第四个层次为风载中的高频分量与内部振动所引起的运动。传统的理论认为,静风压对望远镜的影响最大,但是近几年的研究发现,简单的遮挡物就可以改变风载在低频区的能量分布,将一部分能量转移到高频区域去,同时,由于传统的理论没有考虑风载的方向,即迎风面以及背风面的区别,其夸大了静风压的影响,实际上由于风向的

变化,在一段平均时间内,通过平均,低频分量的影响要小于高频分量。内部振动所引起的振动也越来越受到重视。在 Keck 等大口径望远镜之中,对各主要设备都设置了加速度传感器^[12,13]。

之前这些运动所造成的像点移动,都可以等效于某个大气相干长度下大气所引起的。斯佩罗判据认为复合亮斑不存在中心暗斑时,两个像斑恰好处在分开的临界状态,故根据分辨率的斯佩罗判据,可得出不同大气相干长度所对应的角半径值。

$$\theta = 0.95 \frac{\lambda}{r_0}$$

实际上,由于之前的考虑都是基于高斯型的点扩散函数,故更接近不考虑中心暗斑的情况,故使用斯佩罗判据,就可以将运动所带来的误差与结构函数联系起来。

假设抖动的 FWHM(Full Width Half Maximum)为 1",那么相当于在 500 nm 的波长下,一个 101 mm 的大气相干长度。

$$PSSn = \frac{\int |\text{PSF}_{\text{telescope+atmosphere+error}}(\vec{f})|^2}{\int |\text{PSF}_{\text{telescope+atmosphere}}(\vec{f})|^2} = \frac{\int |\text{OTF}_{\text{telescope+atmosphere+error}}(\vec{f})|^2}{\int |\text{OTF}_{\text{telescope+atmosphere}}(\vec{f})|^2}$$

$\text{PSF}_{\text{telescope+atmosphere+error}}(\vec{f})$ 为望远镜,大气以及误差合成的点扩散函数。 $\text{PSF}_{\text{telescope+atmosphere}}(\vec{f})$ 望远镜与大气合成的点扩散函数, $\text{OTF}_{\text{telescope+atmosphere+error}}(\vec{f})$ 为望远镜,大气以及误差合成的光学传递函数。 $\text{OTF}_{\text{telescope+atmosphere}}(\vec{f})$ 望远镜与大气合成的光学传递函数此定义为可以理解为望远镜误差在背景下的平均。

将(7)式带入 PSSn 定义式可得:

$$PSSn = \frac{\int |e^{-\frac{1}{2}k^2 D_{\text{wavefront}}(\lambda f)}|^2 |e^{-3.44(\frac{\lambda f}{r_0})^{5/3}}|^2}{\int |e^{-3.44(\frac{\lambda f}{r_0})^{5/3}}|^2} \quad (8)$$

4 实验验证

PSM(Point Source Microscope)是近几年由美国亚利桑那大学光学实验室 Robert E. Parks 所提出的大口径望远镜装调设备。其基本原理是在尽可能小的体积下,产生一束 0.2 mW 的 6 mm 直径的准直激光或者红色 LED 光。通过镜

3.2 结构函数的作为中频误差的分配准则

中频误差分配可分为如下几个步骤:首先,研究不同尺度的波前误差,利用统计学方法来对其进行分析,得到中频误差的范围及其统计学特征;之后,通过对数空间的直线表征法,可以获得要求的结构函数,此结构函数可以用来进行大口径望远镜中频误差分配。

在得到了特征的结构函数之后,利用结构函数与标准化点源敏感性的关系得到 PSSn。由于结构函数可以表征系统的频域信息,故由结构函数可以较为容易的得到系统光学传递函数,根据之前的分析可以得出以结构函数为标准的表征,就可以得到满足要求的光学传递函数 OTF:

$$\text{OTF}_{\text{optical}}(\vec{f}) = e^{-\frac{1}{2}k^2 D_{\text{wavefront}}(\lambda f)}, \quad (7)$$

其中: k 为波数, $D_{\text{wavefront}}(\lambda f)$ 为波前的结构函数。 f 为空间频率(circle/rad), λ 为波长。

标准化点源敏感性(normalized point source sensitivity, PSSn)是美国三十米望远镜团队所提出的误差评价准则,其基本定义为:

头形成一个接近理想的点光源。点光源发出的光线通过系统反射回来在 CCD 靶面成像。由于系统具有内置的科勒照明系统,可以作为显微镜来使用,这正是其名字中 microscope 的来源。当去掉镜头,单独使用其准直光时,可以相当于一个具有 1"精度的电子自准直仪,测量范围为水平 $\pm 1.4^\circ$,垂直 $\pm 1.0^\circ$ 。

Robert E. Parks 提出,由于 PSM 体积较小(100X150X300mm)故特别适合复杂精密系统。同时由于可以使用激光作为光源,对实验室的照明没有过多的要求。在此将 PSM 作为实验室内视宁度检测的工具,在合适检测的环境下,其点扩散函数所占的像素数应小于某个阈值。点光源显微镜以及视宁度测量装置如图 4 所示。

对 PSM 检测实验室视宁度的结果进行分析。假设点扩散函数为高斯型,点扩散函数标准差为:

$$g(\rho) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

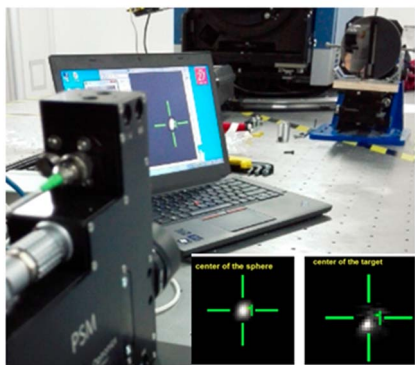


图 4 点光源显微镜以及视宁度测量装置

Fig. 4 PSM and the set up for seeing testing

取像元的灰度值的平方和为能量值,可通过计算得到 80% 能量集中度。对于高斯型点扩散函数 $EE_{80\%} = \sigma \sqrt{2 \ln(5)}$ 。得到实验室在基本无扰动(Series 1)以及开门有人进入后的视宁情况(Series 2)。

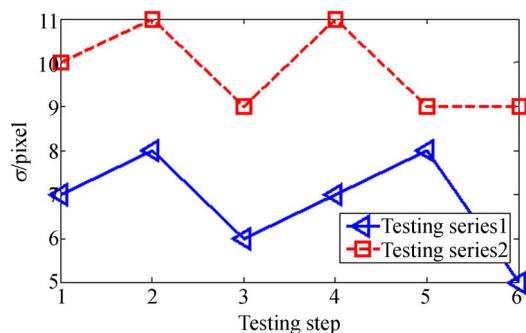


图 5 实验室视宁检测结果

Fig. 5 Result of lab seeing testing

根据之前的分析过程可以得出利用结构函数对大口径系统的中频误差分配的具体过程。

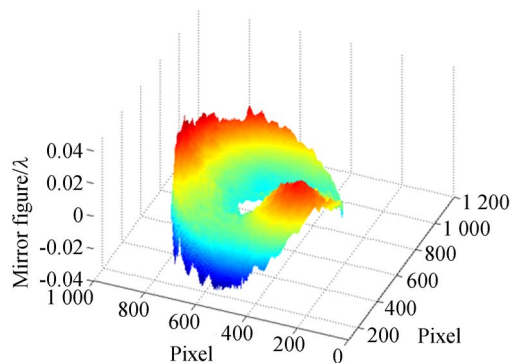
首先确定截止频率,对于大口径反射镜,指的是在光学系统加工过程中可以控制面形的范围,如果使用磨头进行子孔径加工,小于磨头直径的范围,都是系统中频误差的作用尺度,使用该尺寸的磨头不论如何迭代加工,都无法减少该尺度的误差。对于变形镜,系统可以矫正的尺度与其促动器的间隔有关,其残余误差又与其展平误差有关。

下一步是确定系统在最小评价尺度上的误差,可以使用粗糙度来表征的,再来确定系统的误差上限,由之前的分析可以得到结构函数的上限与 RMS 之间有相对应的关系。当确定了结构函

数的两点之后,在对数空间就可以利用连线的方法,获得系统的目标传递函数。

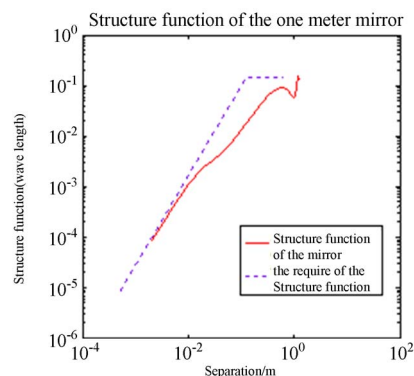
针对某大口径望远镜进行中频误差分配,将大尺度均方根设定为 25 nm,粗糙度设定为 1 nm,将中频尺度设定为 250 mm,将大气相干长度设定为 0.4 m(检测环境)。进而可以通过对数空间连线法来获得目标结构函数。根据对数空间的性质,在对数空间的直线将在线性空间中变为曲线。这样就避免了仅使用直线进行误差分配导致的阶数不足的情况。

其目标结构函数如图 6(b)虚线所示。实际的检测得到的波前如图 6(a)所示。其计算得到的结构函数如图 6(b)实线所示。



(a) 实际检测得到的面形

(a) Mirror figure under testing



(b) 要求结构函数以及实际的结构函数

(b) Required structure function and the tested curve

图 6 实际的面形以及结构函数

Fig. 6 Mirror figure and the structure function

利用之前结构函数与 PSS_n 的关系可以得到要求结构函数所对应的 PSS_n ,同时利用经验公式来获得实际的 PSS_n ,并进行比较。

理想系统的 PSS_n 为 1,随着数值的下降,与

理想系统差别变大。根据经验公式:

$$1 - PSS_n \approx \frac{\gamma \sigma_{\text{slope}}^2}{\lambda^2}, \quad (10)$$

其中: γ 为 $0.11 \frac{\text{m}^2}{\text{rad}^2}$, λ 为以微米为单位的波长,取 $0.5 \mu\text{m}$ 。 σ_{slope} 单位为微弧度;可得实际的 $PSS_n=0.9996$ 。

可见系统的中频误差满足要求且由式(5)可得:要求 $PSS_n=0.9995$,实际 $PSS_n=0.9996$ 同样满足要求。

5 结 论

本文对比之前的使用功率谱作为评价系统的

面形的方法,作为其的改进的二维功率谱,研究了两个正交维度的信息。而结构函数所描述的是任意方向下某间隔的信息,表现的更加全面。同时,与功率谱相比,结构函数可以与光传递函数更好的联系。对于实际的大口径光学系统,可根据各个元件的具体情况,来获得结构函数曲线,最后通过简单的相加即可合成最后系统的误差曲线。对机械与跟踪所带来的误差,可以通过光学传递函数来对其进行统一的考虑并进行误差分配。通过本文的工作,可以对于系统的中频误差进行控制,合理分配有限的精度指标,同时还可以预测实际系统的光学信息传递性能。可以更加全面的理解系统误差中不同的频率分量起到的不同作用,也可以让有限的资源获得更充分的利用。

参考文献:

- [1] FRIED D L. Statistics of a Geometric Representation of Wavefront Distortion[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965,55(11):1427.
- [2] YASHCHUK V V, FRANCK A D, IRICK S C, et al.. Two-dimensional power spectral density measurements of x-ray optics with the Micro map interferometric microscope [J]. *Proc. SPIE*, 2005, 58580A.
- [3] ZHAO C, BURGE J. Orthonormal vector polynomials in a unit circle, Part II: completing the basis set [J]. *Optics Express*, 2008,16(9):6586-6591.
- [4] 陶小平. 大口径反射镜加工机床在线检测高精度对准方法[J]. *中国光学*, 2015,8(6): 1027-1034.
TAO X P. Precise alignment method of online optical testing for large-aperture mirror fabrication[J]. *Chinese Optics*, 2015,8(6): 1027-1034.
- [5] SRUDOLER OHADAR MFISHER, et al.. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations[J]. *Opt. Eng.*, 1991, 30(5):577-589.
- [6] LAWRENCE D. Barr ; John Fox ; Gary A. Poc-zulp and Claude A. Roddier"Seeing studies on a 1.8-m mirror [J]. *Proc. SPIE* 1236, *Advanced Technology Optical Telescopes IV*, doi: 10.1117/12.19220.
- [7] 刘祥意, 张景旭, 吴小霞, 等. 环境对大口径 SiC 轻量化主镜视宁度的影响[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3): 776-783.
LIU X Y, ZHANG J X, WU X X, et al.. Affect of environment on mirror seeing of large-aperture SiC lightweight primary mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015,23(3): 776-783.
- [8] BYOUNG J S, CARL N, GEORGE A, et al. Analysis of Normalized Point Source Sensitivity as a performance metric for the Thirty Meter Telescope[J]. *Proc. SPIE* 7017, *Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy III*, 2008.
- [9] 王富国, 安其昌. 30m 望远镜三镜镜面面形误差的斜率均方根评价[J]. *光学精密工程*, 2014,22(5): 1171-1175.
WANG F G, AN Q CH. Evaluation of mirror surface figures for TMT based on SlopeRms[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014,22(5): 1171-1175.
- [10] SEO B J. Analysis of Normalized Point Source Sensitivity as a performance metric for the Thirty Meter Telescope[J]. *Proc. SPIE*, 2008,7017.
- [11] 苏燕芹, 王富国, 张景旭, 陈宝刚. 基于时程分析的

TMT 三镜支撑系统地震分析[J]. 光学学报, 2013, 33(11):1112002.

SU Y Q, WANG F G, ZHANG J X, *et al.*. TMT M3 System Seismic Analysis Based on Time History Method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33 (11): 1112002.

[12] MACMYNOWSKI D G, ANDERSEN T. Wind

buffeting of large telescopes [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(4):625-636.

[13] MACMYNOWSKI D G, COLAVITA M M, SKIDMORE W, *et al.*. Primary mirror dynamic disturbance models for TMT: Vibration and wind[J]. *Proc. SPIE*, 7738, (2010).

作者简介:



安其昌(1988—),男,山西太原人,博士研究生,助理研究员。2011 于中国科学技术大学获得学士学位。2014 年于中国科学院大学获得硕士学位,研究方向为大口径光机系统检测装调。