

文章编号 1004-924X(2016)05-0979-07

基于标准化点源敏感性的镜面视宁度评价

杨 飞^{1*}, 安其昌^{1,2}

- (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:考虑光学望远镜系统的设计和配备与镜面视宁度相关,本文引入了标准化点源敏感性(PSSn)来改善传统评价手段的局限性,以实现镜面视宁度的全频域内评价。介绍了镜面视宁度的概念以及各大口径望远镜对镜面视宁度的检测与评价方法,同时指出了之前使用的评价指标与评价方法的缺点不足。基于 30 m 望远镜研究团队所提出的全频域评价指标——标准化点源敏感性(PSSn)提出了新的评价方法。分析了 PSSn 的特性,并利用其良好的合成特性以及不同的曝光函数,得到了不同曝光条件以及视宁条件下的 PSSn 表达式。最后,利用在大口径波前上随机选取子孔径的方法,模拟了冻结湍流假设下的镜面视宁情况,并对其 PSSn 的变化进行了估计,验证了本文方法的可行性。基于本文所提出的对于镜面视宁度的评价与分析,系统工程师可以全面客观地评价大口径系统的镜面视宁度,结合 PSSn 的优良合成特性建立合理的误差树,有效提高匹配精度,降低系统建造成本。

关键词:大口径望远镜;镜面视宁度;标准化点源敏感性(PSSn);视宁度评价;冻结湍流;功率谱

中图分类号:TH751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162405.0979

Evaluation of mirror seeing based on PSSn

YANG Fei^{1*}, AN Qi-chang^{1,2}

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

Abstract: As the design and assembly of optical systems in an optical telescope with large aperture mirrors are related to the mirror seeing, this paper introduces the normalized point source sensitivity (PSSn) to improve the limitation of traditional evaluation method and to realize the evaluation of mirror seeing in all frequencies. The concepts of the mirror seeing and its detection and evaluation methods were introduced and the shortcomings of the traditional evaluation methods and evaluation factors were pointed out. The evaluation index PSSn proposed by the 30 m large aperture telescope research group was introduced the new evaluation method. The PSSn properties were analyzed, and the expressions of the PSSn in different exposure conditions and seeing conditions were obtained based on the multiplication property and exposure conditions of the PSSn. The calculation procedure was given by considering the shutter time, mirror figure and atmosphere turbulence. Finally, with the help of random selection of sub-aperture on a large aperture wavefront, the ‘frozen turbulence’ was

收稿日期:2015-10-29;修订日期:2015-12-07.

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

used to generate the simulated seeing condition over the mirror surface. The evaluation procedure was verified by this simulation. Based on the evaluation and analysis method presented in this paper, the system engineers could evaluate the mirror seeing for the large aperture optical system more objectively, and could build the error budget tree more reasonably to decrease the cost of the optical system.

Key words: large aperture telescope; mirror seeing; Normalized Point Source Sensitivity (PSSn); seeing evaluation; frozen turbulence; power spectral density

1 引言

随着光学望远镜朝着更大口径的方向发展,光学机械加工制造及系统集成等相关技术逐渐成为光学望远镜发展的主流趋势。这些技术的进步促使望远镜系统的性能指标不断提高,从而提高了系统各元件的要求。主镜作为大口径望远镜的核心元件,对镜面的加工与支撑的要求也越来越高。

视宁度是用于描述天文观测目标受大气湍流影响而变得模糊和闪烁程度的物理量。本质上,它是指波前经过湍流之后与理想波前的光程差(Optical Path Difference, OPD)。视宁度分为大气视宁度、圆顶视宁度以及镜面视宁度。大气视宁度主要是指由于光线通过大气传播,在长距离的传播路径上由于积分作用所产生的像差,其矫正主要通过自适应光学元件。圆顶视宁度主要是指圆顶一方面保护了望远镜免受外界的扰动,另一方面也制造了一个小环境,当小环境与大环境发生物质能量交换时所引起的视宁度变化。圆顶视宁度主要是由圆顶内的环境控制系统来解决,并且随着近几年敞开式圆顶的广泛应用,圆顶视宁度的影响也得以下降。镜面视宁度主要是指由于镜面表面的湍流所导致的像质下降。镜面的气体流动可以分为自然对流、强迫对流以及介于两者之间的混合对流。其中,自然对流主要是由上浮的热空气主导;而强迫对流则主要指分布在镜面上被打碎的湍流^[1-4]。

一颗遥远天体所发出的光线在不受大气湍流影响的条件下,在望远镜像面上所成的像为一个理想的艾里斑,而能量受到大气的影晌会变得分散。将点光源通过一个受大气影响系统的点扩散函数定义为视宁度盘,视宁度盘的大小就称为视宁度。

视宁度的表征主要包括点扩散函数的半高全宽(Full Width Half Maximum, FWHM)、大气相干长度 r_0 以及时间常数 t_0 。其中,75%以及 90%

点扩散函数的能量集中半径与 FWHM 类似,都是通过分析像面所成像来确定视宁度的。大气相干长度(弗雷德常数)以及时间常数用于直接描述湍流本身的特征,分别对应“湍流元胞”运动的尺度与快慢。对于一般站址,运动尺度为 0.1 m,而特征时间为 0.01 s,即尺度为 0.1 m 的湍流元胞以 100 Hz 的频率运动。故对于一般的长曝光系统,最后的视宁度是某段时间的平均效应。

由于镜面加工与支撑的误差要求已接近纳米级,故在大口径镜面的加工检测和系统装调过程中,镜面视宁度的影响不可忽略。根据 1979 年,2.5 m 口径望远镜的检测结果,当镜面视宁度起主导作用时,其 75% 能量集中半径为 6", 与其不起主导作用时(1")升高了 500%。而 2.5 m 望远镜的衍射极限为 0.1", 可见大气视宁度对于大口径望远镜的影响很大。

1989 年,美国国家天文光学实验室(NOAO)对于直径为 1.8 m 的球面轻量化镜进行了镜面视宁度的测量实验,通过结构函数获得了镜面视宁度的尺度。Keck II 望远镜是两台 8 m 级望远镜中的一台,两台望远镜需要利用收集到的光线干涉成像,该模式对于像质的要求非常高。该设备主要使用闪烁计数器来测量镜面附近的视宁度,并以 FWHM 进行表征。昴星团(SUBARU)望远镜为 8 m 量级的望远镜,坐落于夏威夷莫纳克亚火山之上。该站址的昼夜温差较大,温控系统要将主镜温度控制在环境温度 1 °C 以下,然后利用卡氏焦点设备“自动对准系统”测量主镜视宁度,并以 FWHM 进行表征。南京天文光学所在 6 m 级太阳望远镜的概念设计中,计划使用滤波片,并利用刀口进行视宁度检测^[5-10]。

针对镜面视宁度的影响,光学望远镜系统的设计与装配也会采取相应的技术措施。因此,镜面视宁度的研究对光学望远镜系统,尤其是对大口径光学望远镜系统的设计、光学加工和装调检测具有重要的意义。本文基于标准化点源敏感性

(normalized Point Source Sensitivity, PSSn)对大口径元件的镜面视宁度进行了分析与评价,以指导大口径望远镜光学系统的误差分配与加工装调。

2 理论推导

大气湍流是一种频率范围分布较广泛的误差,当系统波前误差被视宁主导时,所呈现的误差特性与经过磨削加工的反射镜表面的统计学特性有明显的区别,而对于大口径系统而言所面临的问题可能更加复杂。为了评价大口径望远镜的成像质量,常用的指标均方根(RMS)已经不能全面地评价镜面质量。针对越来越大的口径,亟需一种新的评价方式来权衡波前误差^[10-11]。

天文学与自适应光学对于大气湍流的表征略有不同,前者使用 FWHM 等参数,而后者则使用基于相干长度的评价方法,它们都是对于大气在一个较长的积分路径上的累积效果。然而,镜面视宁度着重于镜面附近很小范围内的湍流情况,不受站址等因素的影响,反而受镜面附近小环境的直接影响。此外,受气流沉降的影响,视宁度在不同天顶角下的表现也不同,在此特殊的情况下,就需要更现实且便于分析的参数。PSSn 由美国 30 m 望远镜(Thirty Meter Telescope, TMT)团队提出,是指导大口径望远镜误差分配的新指标。相对于传统的评价方法, Pssn 具有更好的分解与合成精度。

TMT 团队使用 PSSn 作为整个系统误差评价与分配的准则,其主要原因有两方面:一是其全面的评价效果。大口径光学系统使用子孔径加工技术,即使用直径小于镜面的磨头来加工大口径光学元件,在此情况下往往会产生中频误差,而仅依靠表面的均方根是很难全面表征中频误差的完整信息;另一方面是其良好的合成特性。具体来说,利用 PSSn 评价不同误差源引入的波前误差时,可以通过 PSSn 合成来精确估计最后的数值,而传统方法合成得到的结果与考虑所有误差源建立统一模型之后计算得到的结果出入较大^[12]。

PSSn 的基本定义为:

$$PSSn = \frac{\int |\text{PSF}_{t+a+e}(\boldsymbol{\theta})|^2}{\int |\text{PSF}_{t+a}(\boldsymbol{\theta})|^2}$$

其中:PSF 代表点扩散函数, PSF_{t+a+e} 为考虑误

差项时的点扩散函数, PSF_{t+a} 为不考虑误差影响的点扩散函数, $\boldsymbol{\theta}$ 为频域坐标向量。

镜面视宁度的影响因素主要有湍流、曝光时间以及镜面俯仰角等。一般来说,镜面的湍流越接近自然对流,视宁度会相对较差;而在有风的强迫对流情况下,镜面视宁度则相对较好。随着曝光时间的增加,系统缺陷随着积分效应会越来越明显。由于热空气向上运动越大,系统俯仰角相对于镜面指向水平的情况下热空气的对流更加剧烈,故 PSSn 的计算需要考虑以上三个因素。

PSSn 评价利用的是点扩散函数在整个频域上的数据,而传统的评价方式,如 70% 能量集中度以及 FWHM,基本都只考虑了较为靠近中心的部分。另一方面, PSSn 不仅可以评价镜面视宁度,也可以较为全面地评价系统其他的误差源。根据定义, PSSn 的计算需要对于整个光学系统进行建模,以获得系统的点扩散函数或者传递函数。但是,在实际的面形评价以及误差分配中,每次计算都进行机械光学系统的联合仿真计算,成本太高,故需要建立一种简化的计算方法。

PSSn 的最大优势在于其合成特性^[12],即:

$$PSSn_m = \prod PSSn_i$$

各部分引起的 PSSn 可以直接通过乘积进行合成,总体的 PSSn 可以由各个频段的 PSSn 进行合成。故为了简化 PSSn 的计算,采用合成的方法得到系统的 PSSn^[13]:

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

取频域中一段 $[f_i, f_{i+1}]$ 来进行 PSSn 计算,在该频段内记空间频率为 f 。在较低频段内, $\beta(f)$ 符合平方规律, $\beta(f) = \mu r_0 f^2$, 截止频率为 $\frac{1}{r_0}$, 其中 μ 为常数 2.22, r_0 为大气相干长度^[13];而在频率较高的区域 $\beta(f)$ 为定值 2。由此可得, PSSn 是一个与大气视宁条件有关的评价标准。如图 1 所示,当大气环境较好,系统点扩散函数受到的影响较小时, PSSn 会有所升高。

以往的研究没有考虑曝光时间,那是因为在曝光时间极短的情况下,视宁度并没有得到累积,故影响要相对小一些。但是长曝光系统的传递函

数正比于系统出瞳的自相关函数,因此有必要考虑曝光时间的影响。

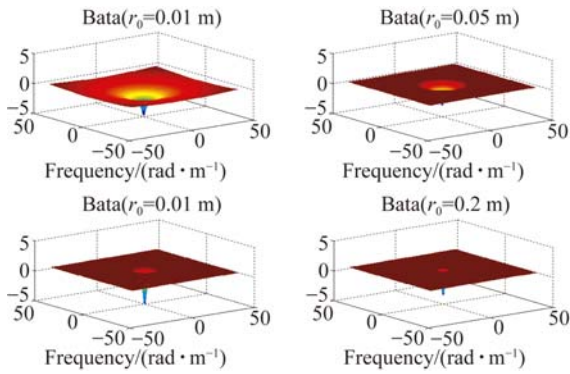


图 1 大气相干长度对 β 的影响

Fig. 1 Influence of atmospheric coherent length on β

利用曝光函数,在系统频域指标的计算时进行加窗处理,此时利用波前功率谱来计算波前均方根可得:

$$\sigma^2(\tau) = \int_0^{f_n} PSD(f) [1 - \text{sinc}^2(\tau f)] df, \quad (2)$$

其中:空间频率为 f , σ 为在波前误差以及曝光时间共同作用下的误差均方根, $PSD(f)$ 为波前误差功率谱, τ 为曝光时间。

根据式(2)可知波前系统误差与曝光时间的关系,即随着曝光时间 τ 的不同,振动影响的频段也不相同。当 $\tau=1$ ms 时,低频段几乎无法影响结果;当 $\tau=10$ ms, 100 Hz 左右的扰动就会对结果产生较为明显的影响,如图 2 所示;而当 $\tau=50$ ms 时,几乎全部频段的信号都会对结果产生影响。

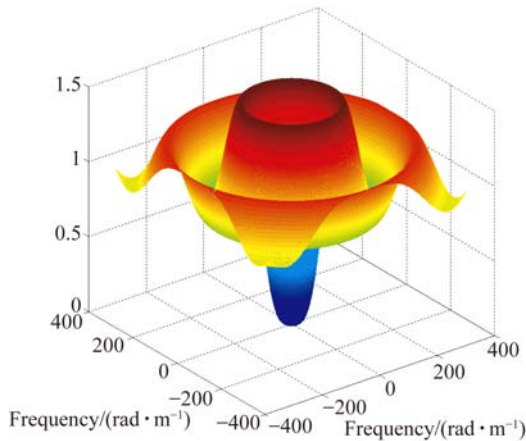


图 2 三维曝光函数($\tau=10$ ms)

Fig. 2 Three-dimensional exposure function($\tau=10$ ms)

参考式(2)修正 PSSn 的计算公式,可得:

$$PSSn_{\tau} =$$

$$\prod \lim_{f \rightarrow \infty} \left(1 - \int_{f_i}^{f_{i+1}} \beta(f) [1 - \text{sinc}^2(\tau f)] PSD(f) 2\pi f df \right).$$

$$\text{其中: } \beta(f) = \begin{cases} \mu r_0 f^2 & \left\{ f < \frac{1}{r_0} \right\} \\ 2 & \left\{ f \geq \frac{1}{r_0} \right\} \end{cases}.$$

为了将视宁度评价与望远镜其他部分的误差分配结合起来,本文利用 Simulink 建立了 PSSn 的计算模型。输入数据为所要计算的面形,是与大气视宁度相关的 beta 函数,以及与曝光时间相关的曝光函数。使用 Simulink 的优势在于其封装性与移植性比直接利用 Matlab 通用程序文件更好。同时,由于系统的结构域控制部分多使用 Simulink 建模,通过各部分之间的有机连接,系统工程师可以更好地把握整体的误差分配流程。搭建的系统如图 3 所示。

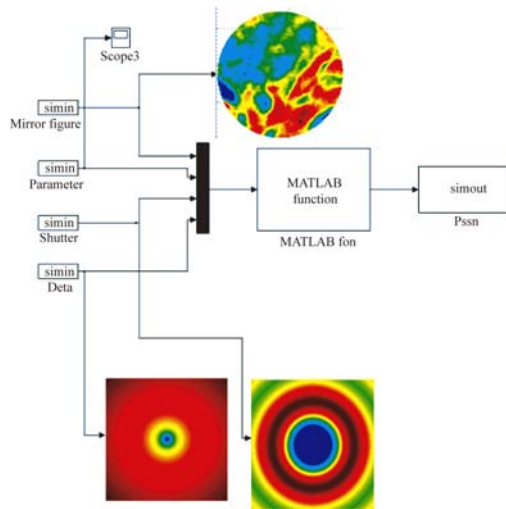


图 3 PSSn 计算模型

Fig. 3 Calculation model of PSSn

3 实验验证

在实际检测过程中,为了分离大气视宁度对于镜面视宁度的影响,测量应该尽量贴近镜面进行,并采用与主光路分离的形式。一方面可以仿照 KECK 采用“闪烁仪”,通过分析理想点光源的扩散程度来计算镜面视宁度。另一方面,也可以使用自准直系统,两台电子自准直仪分别位于光

学镜面正交方向的一侧,每台电子自准直仪后端均设有具有采集功能的 CCD 图像传感器。通过自准直系统检测记录光线偏离,实现镜面视宁度测量。本文仅进行了半物理仿真实验,具体实验将是下一步的工作重点。

实验验证的基本思路为:首先测量得到受镜面视宁度影响的一个大口径波前,之后截取较小口径的波前,但是其口径仍大于该地的大气相干长度。在这种情况下,镜面数据本身的统计学差异被降到最低,同时又避免了使用单一镜面所带来的局限性。本文在大口径主镜的面形上取子孔径,然后对该面形数据进行插值来得到实验所需的面形。实际测量波前包含大气与镜面本身加工所带来的起伏,利用这样的波前进行分析,更加接近真实情况。

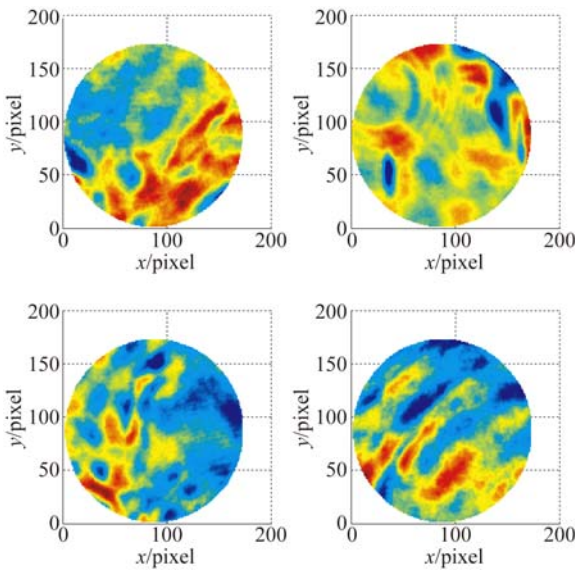


图 4 计算所需的子孔径波前

Fig. 4 Sub aperture wavefronts for calculation

在一个较大口径的波前上(直径为 2 m)随机截取 7 个 1 m 的口径,部分波前如图 4 所示。为了避免采样带来的分辨率下降问题,通过插值将镜面数据重新恢复到 2 m 镜面的数据水平。然后对于不同子孔径获得的数据进行统计学分析,结果如图 5 所示。

由统计学分析可知,本方法获得的波前数据虽有相似的概率分布,但又存在一定的差异性,因此对于镜面视宁度的表征有着很好的效果。

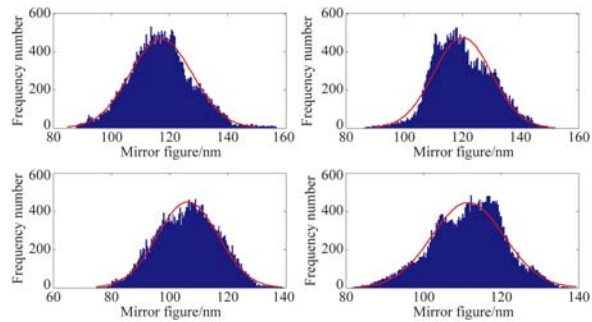


图 5 子孔径统计学分析

Fig. 5 Statistics analysis of subapertures

对不同孔径获得的模拟波前进行功率谱分析可以验证前面的分析。统计直方图是从时域上分析数据的,而功率谱则从频域上验证了几个波前的统计学同源性以及局部的异性差,如图 6 所示。

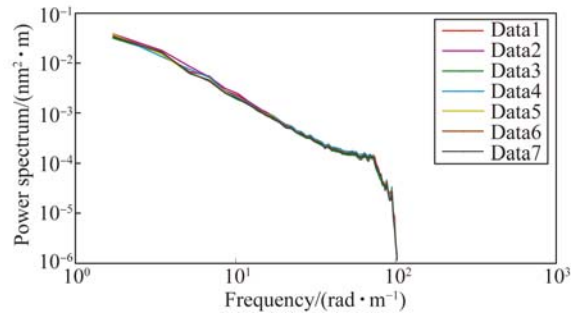


图 6 子孔径功率谱分析

Fig. 6 Power spectra densities of subapertures

综上所述,本文方法获得的波前不仅可以作为验证算法有代表性的数据来源;另一方面,根据“冻结湍流假设”,镜面视宁度是由于大气冷冻层的移动产生的(这种现象又称为“麋风”),冻结波前会以一定速度通过镜面。本文方法还可以认为是对同一个系统的持续观测,在系统的采样频率下获得了这 7 个波前^[14]。

利用 Simulink 系统计算 PSSn,结果如图 7 所示,各个波前的 RMS 如图 8 所示。该过程既是对算法的验证,也是对波前的在线分析。对比图 7 和图 8 所示的实验结果可知,PSSn 相差极小时(3th,5%),利用 RMS 所得到的数值相差却很多(3th,20%)。但是由于 PSSn 是基于传递函数进行计算的,其数值与成像质量的相关性更好,故两个样本最后的成像效果十分接近,这意味着不需要投入更多的成本即可开展进一步的加工与装调。

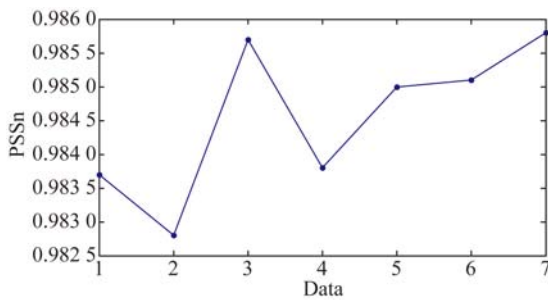


图 7 不同子孔径对应的 PSSn

Fig. 7 PSSn of subapertures

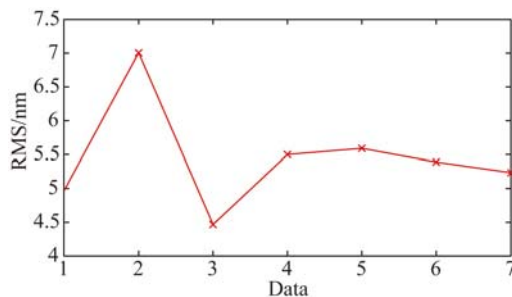


图 8 不同子孔径对应的 RMS

Fig. 8 RMSs of subapertures

参考文献:

- [1] ZHANG H Y, LI X N, MENG X H, *et al.*. Mirror seeing control of large infrared solar telescope [J]. *SPIE*, 2010, 7733, doi:10.1117/12.856099.
- [2] CHAFFEE H F, CROMWELL R H. Seeing measurements at the multiple mirror telescope obtained with a very high quality 1.8-m primary mirror [J]. *SPIE*, 1990, 1236:13-17.
- [3] 师途, 杨甬英, 张磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术[J]. *中国光学*, 2014, 7(1):26-46.
SHI T, YANG Y Y, ZHANG L, *et al.*. Surface testing methods of aspheric optical elements [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1):26-46. (in Chinese)
- [4] LAWRENCE D B, JOHN F, GARY A, *et al.*. Seeing studies on a 1.8 m mirror [J]. *SPIE*, 1990, 1236:492-506.
- [5] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3):776-783. (in Chinese)
- [6] AKIHIKO M, RYUSUKE O, NARUHISA T, *et al.*. Temperature control for the primary mirror and seeing statistics of Subaru Telescope [J]. *SPIE*, 2003, 4837:255-263.
- [7] TIMOTHY G H, ANDREW J A, TIMOTHY C C, *et al.*. Thermal performance and facility seeing at the upgraded 3.8 m UK Infrared Telescope (UKIRT) [J]. *SPIE*, 2000, 4004:104-114.
- [8] 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 W C, *et al.*. Application of differential pentaprism scanning in wavefront detection [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6):1003-1011. (in Chinese)
- [9] FRANK G D, DAVID K, GARY A C, *et al.*. High-speed seeing measurements at the Keck Telescope [J]. *SPIE*, 1994, 2201:310-313.
- [10] CARL N, BYOUNG J S, MITCHELL T, *et al.*. Wavefront sensing and control performance modeling of the Thirty Meter Telescopes for systematic trade analyses [J]. *SPIE*, 2014, 9150:91500S(1-10).
- [11] 王富国, 安其昌. 30 m 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 slope RMS [J]. *Opt. Pre-*

对图 4 中不同子孔径对应的 PSSn 数据使用直线进行一阶保持, 结果如图 7 所示, 这样可以认为图 7 是对实际系统连续观测的结果。与传统的 RMS 相比, PSSn 不仅合成特性具有很大的优势, 由于是全频域指标, 评价也更加全面。

4 结 论

镜面视宁度的测量对大口径望远镜的意义重大, 本文引入了 PSSn, 在考虑大气与曝光等相关因素下评价了镜面视宁度。使用了大波前裁剪的数据仿真方法, 不仅保证了波前的统计学同源性, 也更接近实际测量结果。结合实际的制造、装调以及使用情况进行了镜面视宁度分析, 对大口径光学系统误差分配以及成本控制具有较好的指导意义。利用本文方法, 系统工程师可以更好地评价由于镜面视宁度所造成的误差, 并利用 PSSn 结合其他误差源的情况进行系统误差分配。

- cision Eng.*, 2014,22(5):1171-1175. (in Chinese)
- [12] BYOUNG J S, CARL N, GEORGE A, *et al.*. Analysis for Normalized Point Source Sensitivity as a performance metric for the Thirty Meter Telescope [J]. *SPIE*,2008,7071:70170T.
- [13] GEORGE Z A, BYOUNG J S, CARL N, *et al.*. A convenient telescope performance metric for imaging through turbulence [J]. *SPIE*, 2011, 8127:812709.
- [14] POYNEER L A, DAM M V, VÉRAN J P. Experimental verification of the frozen flow atmospheric turbulence assumption with use of astronomical adaptive optics telemetry [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*,2009,26(4):833-846.

作者简介:



杨 飞(1982—),男,湖北天门人,硕士,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,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,博士研究生,研究实习员,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

(版权所有 未经许可 不得转载)