

PSSn 在大口径望远镜误差评估中的应用

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 100049)

摘要:为了更好地对大口径望远镜进行误差分析以及分配,引入了由美国 30 m 望远镜(TMT)团队所提出的标准化点源敏感性(PSSn),来进行大口径望远镜的各项误差及其之间的协调与分配。为了更好地利用 PSSn 进行误差分配,首先根据其定义对 PSSn 的基本性质进行了研究,论述了 PSSn 作为全频域评价指标的优越性,然后与传统的评价指标(波前均方根)进行了比较,重点分析了 PSSn 的合成特性以及合成误差的特点,之后利用 Zernike 多项式分析系统静态误差与 PSSn 的关系,得到了不同的 Zernike 系数与 PSSn 之间的关系。对于系统的动态载荷,利用功率谱结合光学传递函数的方法来研究系统的光学特性并对实际的大口径波前做出了仿真研究,得到系统的 PSSn 从 0.996 下降到 0.991。所做的研究可以更好地理解大口径望远镜的误差特性,同时也可以帮助系统工程师对大口径望远镜的误差进行更好的分配。

关键词: 30 m 望远镜; 标准化点源敏感性; 光学传递函数; 机械振动

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1218001

Evaluation of the performance of large telescope based on normalized point source sensitivity

An Qichang^{1,2}, Zhang Jingxu¹, Yang Fei¹, Zhao Hongchao¹

- (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)

Abstract: To evaluate the performance of large telescope under different kinds of error source, the normalized Point Source Sensitivity (PSSn) was introduced, which is firstly studied by the group of Thirty Meter Telescope (TMT) team to balance all the deviation of the telescope and also budget the error. First and foremost, character of the normalized PSSn was studied specifying the advantage in the evaluation in all the frequency domain. Then, the PSSn was compared with the traditional metric (FWHM, Strehl ratio, MTF, etc.). And the multiplication property was discussed. Using of Zernike polynomials allowed linking PSSn to the static error faced by large telescope, and the dynamic one was linked to PSSn by MTF. Lastly, the method was applied to a large telescope. Under mechanical vibration, the PSSn of this

收稿日期:2016-04-05; 修订日期:2016-05-11

基金项目:国家自然科学基金(11403022,11673080);中国科学院青年创新促进会(2016198)

作者简介:安其昌(1988-),男,助理研究员,博士生,主要从事大口径光机系统检测装调方面的研究。Email:anj@mail.ustc.edu.cn

导师简介:张景旭(1964-),男,研究员,博士生导师,主要从事大型光电望远镜结构总体技术方面的研究。Email:Zhangjx@ciomp.ac.cn

telescope main mirror decreased from 0.996 to 0.991. It aimed to guide beginner in the field of large telescope in the error analysis field.

Key words: Thirty Meter Telescope; normalized point source sensitivity; optical transfer function; mechanical vibration

0 引言

随着望远镜的规模越来越大,望远镜系统的众多误差源不仅具有不同的频域特性,而且它们之间的统计学相关性也越来越复杂。在此情况下,传统上使用的误差分析方法(均方根等)已经很难适应大口径望远镜的误差分析^[1-3]。

斯特利尔比表征的是实际望远镜点扩散函数的能量集中情况与望远镜衍射极限下能量集中度的比值,对空间望远镜以及经过自适应光学处理之后的系统,斯特利尔比可以较好地体现系统的特性,但是对偏离衍射极限过大的系统,其适用性明显降低。随着大气视宁度的影响逐渐加大,斯特利尔比已经不适应作为评价指标,之前在此情况下使用较多的是中心能量集中度(Central Intensity Ratio, CIR)^[4-8]。不论是对小像差进行表征的斯特利尔比,还是对大气视宁主导情况下使用的中心能量集中度,都只是利用了点扩散函数的中间区域。如果有一种评价指标可以全面的考虑在全频域上的特性,就可以更好地评价系统的成像质量。

30 m 望远镜(Thirty Meter Telescope, TMT)是由美国、加拿大、日本、中国以及印度联合发起的国际合作项目,是目前在建最大口径的光学望远镜之一。在此条件下,美国 30 m 望远镜团队提出了标准化的点源敏感性(PSSn)作为大口径望远镜的误差分配指标。文中将基于 PSSn 来研究大口径望远镜的误差评估过程^[9-10]。

系统波前的静态误差可以使用 Zernike 多项式来表达,文中将通过分析 Zernike 多项式与 PSSn 之间的关系来对静态误差进行研究。动态误差最常用的分析方法为功率谱方法,对不同的谱可以模拟不同的工况。将复杂的功率谱转化为理论上分析简便的正弦信号,其基本的思路就是在某一个小的频段内,正弦函数的中心频率为该小段功率谱的中心频

率,功率谱的总能量与所对应基频的某个正弦函数能量相等。

1 PSSn 的基本概念

在实际的工程应用中,不同职责的工作人员所考虑问题的重点有所不同,项目经理人所关心的是经费,控制系统团队所关心的是以角秒计的指向精度,跟踪架团队所考虑的都是毫米量级的变形,而镜面支撑团队得出的结果往往是只有几十纳米的镜面面形。但是这些团队所关心的最终目的只有一个:即望远镜可以满足之前设定的科学目标。所以需要有一个完备且易于计算的指标作为整个系统误差分配与评价的标准。

一般用来表征系统性能有几个较为常用的指标:

PSF(θ),点扩散函数,相当于光学系统的脉冲响应函数。影响点扩散函数的因素有许多,最根本的因素是系统的衍射极限,正是由于这个原因才会产生点扩散函数。除此之外,大气的扰动、系统自身的误差都会影响其形状,为简化问题,点扩散函数一般被假设为高斯型。

FWHM,是一种基于点扩散函数的评价标准,是指点扩散函数下降到顶点一半所对应的宽度。但是 FWHM 是一个极度依赖点扩散函数形状的量,如果对高斯型的点扩散函数,FWHM 可较好表征系统特性,但如果 PSF 的轮廓比较复杂,就无法很好体现系统的成像性能。假设系统点扩散函数服从高斯分布,其均值为 0,方差为 σ (单位:(")),那么 FWHM=2.35 σ 。

80%EE,80%能量集中度,指的是可以包括点扩散函数 80%能量区域的半径。对均值为 0、方差为 σ 的正态分布,其 80%EE=3.59 σ 。一般为了简便起见,使用 2 σ ,相对应的为 63%EE。

MIF,是指调制传递函数,与点扩散函数互为傅里叶变换对,对圆形口径的望远镜,调制传递函数一

一般都是旋转对称的,对低频的部分传递更有效。

Strehl Ratio, 斯特利尔比是实际的点扩散函数与衍射极限下点扩散函数中心高度的比,但是在视宁主导的大像差情况下表现一般不甚理想,故常用在太空望远镜的误差评价之中。

标准化点源敏感性(PSSn)是美国 30 m 望远镜团队所提出的对大口径望远镜误差分配的新指标,其基本定义为^[5]:

$$PSSn = \frac{\int |PSF_{t+a+e}|^2}{\int |PSF_{t+a}|^2} = \frac{\int |OTF_{t+a+e}|^2}{\int |OTF_{t+a}|^2} \quad (1)$$

式中:PSF_{t+a+e}、PSF_{t+a}为含有误差的望远镜在视宁影响下的点扩散函数以及理想望远镜在视宁影响下的点扩散函数;OTF_{t+a+e}、OTF_{t+a}为含有误差的光学传递函数以及理想望远镜在视宁影响下的光学传递函数。

利用点扩散函数的独立性可得^[5]:

$$PSSn = \frac{\int |PSF_{t+a+e}|^2}{\int |PSF_{t+a}|^2} = \frac{\int |OTF_{t+a+e}|^2}{\int |OTF_{t+a}|^2}$$

式中:PSF_e、PSF_{t+a}为误差的点扩散函数以及理想望远镜在视宁影响下的点扩散函数;OTF_{t+a+e}、OTF_{t+a}为误差的光学传递函数以及理想望远镜在视宁影响下的光学传递函数。利用该基本性质可以选择合适的方式来计算 PSSn。

2 PSSn 合成特性的推导

均方根(RMS)的平方合成规律的成立条件为若干个统计量之间互相独立,而大口径望远镜的诸多误差项或多或少存在着相关性,故不可能完全解耦,一般来说,随着合成项数的提高,最后的合成误差会越来越大,这对复杂的系统十分不利。

PSSn 与传统的 RMS 相比,合成误差更小。PSSn 最大的特点在于其是通过相乘即可得到合成后的 PSSn:

$$PSSn_m = \prod PSSn_i$$

式中:PSSn_m为合成的 PSSn;PSSn_i为各个部分的 PSSn。

下文将基于此来研究 PSSn 的合成之后的误差特性,首先定义基于背景的平均函数⟨·⟩:

$$\langle \cdot \rangle = \frac{\int (\cdot) |PSF_{t+a}|^2}{\int |PSF_{t+a}|^2}$$

式中:PSF_{t+a}为理想望远镜在视宁影响下的点扩散函数。

根据之前的定义可得 PSSn 的表达式:

$$PSSn = \langle |PSF_e(\lambda \vec{f})|^2 \rangle$$

式中:⟨·⟩为基于背景的平均函数。

由于 PSSn 为一个较为接近 1 的物理量,故可以表示为:

$$PSSn = \langle (1 - \varepsilon(\lambda \vec{f})) \rangle$$

式中:ε(λf)为误差函数;⟨·⟩为基于背景的平均函数。

现假设有两组波前需要进行合成,其 PSSn 如下所示:

$$PSSn_1 = \langle (1 - \varepsilon_1(\lambda \vec{f})) \rangle$$

$$PSSn_2 = \langle (1 - \varepsilon_2(\lambda \vec{f})) \rangle$$

其直接合成的 PSSn 与通过相乘获得的 PSSn 如下所示:

$$PSSn_c = 1 - \langle \varepsilon_1(\lambda \vec{f}) \rangle - \langle \varepsilon_2(\lambda \vec{f}) \rangle + \langle \varepsilon_1(\lambda \vec{f}) \varepsilon_2(\lambda \vec{f}) \rangle$$

$$PSSn_m = 1 - \langle \varepsilon_1(\lambda \vec{f}) \rangle - \langle \varepsilon_2(\lambda \vec{f}) \rangle + \langle \varepsilon_1(\lambda \vec{f}) \rangle \langle \varepsilon_2(\lambda \vec{f}) \rangle$$

式中:PSSn_c为直接合成的 PSSn;PSSn_m为相乘获得的 PSSn。

其合成误差可得:

$$\delta = PSSn_c - PSSn_m = \langle \varepsilon_1(\lambda \vec{f}) \varepsilon_2(\lambda \vec{f}) \rangle - \langle \varepsilon_1(\lambda \vec{f}) \rangle \langle \varepsilon_2(\lambda \vec{f}) \rangle$$

将其展开可得:

$$\delta = \left\langle \begin{matrix} \varepsilon_1(\vec{\theta}) \varepsilon_2(\vec{\theta}) - \\ \langle \varepsilon_2(\vec{\theta}) \rangle \langle \varepsilon_1(\lambda \vec{f}) \rangle - \\ \langle \varepsilon_2(\lambda \vec{f}) \rangle \langle \varepsilon_1(\lambda \vec{f}) \rangle + \\ \langle \varepsilon_2(\lambda \vec{f}) \rangle \langle \varepsilon_1(\lambda \vec{f}) \rangle \end{matrix} \right\rangle = \left\langle \begin{matrix} \varepsilon_1(\lambda \vec{f}) \varepsilon_2(\lambda \vec{f}) - \\ \varepsilon_2(\vec{\theta}) \langle \varepsilon_1(\vec{\theta}) \rangle - \\ \varepsilon_1(\lambda \vec{f}) \langle \varepsilon_1(\lambda \vec{f}) \rangle + \\ \langle \varepsilon_2(\lambda \vec{f}) \rangle \langle \varepsilon_1(\lambda \vec{f}) \rangle \end{matrix} \right\rangle =$$

$$\langle [\varepsilon_1(\lambda \vec{f}) - \langle \varepsilon_1(\lambda \vec{f}) \rangle] \times [\varepsilon_2(\lambda \vec{f}) - \langle \varepsilon_2(\lambda \vec{f}) \rangle] \rangle$$

以上的表达式为 ε₁(λf)与 ε₂(λf)的互协方差,根据互协方差的基本性质,两个随机变量的互协方差小于其标准差的积:

$$\delta \leq \sqrt{[\varepsilon_1^2(\lambda \vec{f}) - \langle \varepsilon_1(\lambda \vec{f}) \rangle]^2 [\varepsilon_2^2(\lambda \vec{f}) - \langle \varepsilon_2(\lambda \vec{f}) \rangle]^2} \quad (2)$$

利用公式(2)可以确定 PSSn 合成的误差的上确界,由于其数值二者标准差本来就比较小,故乘积之后数值会进一步降低。

利用 PSSn 的合成特征可以简便全面地分析在多重影响下的系统误差特性,只需要将其 PSSn 相乘就可以得到最后综合的 PSSn。

3 PSSn 对静态误差的评价方法

下面将研究 PSSn 与静态误差的关系。其中使用了 Zernike 多项式作为静态误差的代表。

对长曝光系统,系统的光学传递函数为其出瞳波前的自相关函数。所以当把系统波前的平移与倾斜去掉之后,系统的光学传递函数可以分解为衍射极限项以及误差项。

系统的波前误差可以分为稳定部分 ϕ_{static} 与动态部分 $\delta\phi$:

$$\phi(\vec{r}, t) = \phi_{\text{static}}(\vec{r}, t) + \delta\phi(\vec{r}, t)$$

其动态部分的均值为零:

$$E[\delta\phi(\vec{r}, t)] = 0$$

对长曝光系统,其光学传递函数为光瞳函数的自相关函数,表征了理想的衍射系统成像。另一项代表的是具体的系统对成像的影响,表示系统因为自己的特征而丢失的成像质量。

$$E[\text{OTF}(\lambda\vec{f})] = \frac{1}{S_{\text{pupil}}} \iint_{\infty} P_{\text{pupil}}(\vec{r}) P_{\text{pupil}}(\vec{r} + \lambda\vec{f}) \times e^{[-2\pi i(\phi_{\text{static}}(\vec{r}) - \phi_{\text{static}}(\vec{r} + \lambda\vec{f}))]} e^{[-\frac{1}{2}D_{\phi}]} d\vec{r} = e^{[-\frac{1}{2}D_{\phi}]} \text{OTF}_{\text{diffraction}}(\lambda\vec{f})$$

式中: $D_{\phi}(\vec{r}, \lambda\vec{f})$ 为波前结构函数; f 为空间频率,单位为 circle/rad; λ 为波长; $P_{\text{pupil}}(\vec{r})$ 为光瞳函数; S_{pupil} 为光瞳面积。

结合上式及 PSSn 基本定义可得公式(3):

$$\text{PSSn} = e^{[-(D_{\phi})]} \quad (3)$$

结构函数的基本意义为在不同评价尺度下系统波前的 RMS。由该定义可以得出,当评价尺度与波前的尺寸相当时,结构函数的数值与波前的 RMS 应该有一定关系。

$$D_{\phi}(\vec{r}, \lambda\vec{f}) = 2\sigma_x^2 - \text{cov}[\delta\phi(\vec{r})\delta\phi(\vec{r} + \lambda\vec{f})]$$

式中: σ_x^2 为波前相位的方差,可见结构函数的上限为波前均方根平方的二倍。

由此可得,根据结构函数的性质,可以得到 $D_{\phi} <$

$2\sigma_{\phi}^2$,故可以用简便的方法估计系统 PSSn 的区间。

$$\text{PSSn} = e^{[-(D_{\phi})]} > e^{-2\sigma_{\phi}^2} \approx 1 - 2\sigma_{\phi}^2$$

另一方面,小像差情况下,通过麦克劳林展开式对斯特利尔比 S 进行简化,可得:

$$S \approx e^{-\sigma_{\phi}^2} \approx 1 - \sigma_{\phi}^2$$

故可以来预估 PSSn 的下限:

$$\text{PSSn} > S^2 \quad (4)$$

实际上可以利用上式的思路进行分析,根据函数的连续性可以得到:

$$\text{PSSn} = 1 - \alpha_{\phi} \sigma_{\phi}^2$$

式中: α_{ϕ} 为拟合系数。Zernike 多项式是单位圆域上的正交基,可以先将波前分解为 Zernike 多项式。故分析 Zernike 多项式的 PSSn,对理解 PSSn 的主要影响因素以及与空间频率的关系都十分必要。

利用公式(5)就可以建立起 Zernike 多项式误差以及 PSSn 的关系式。系统的静态误差可以由 Zernike 多项式来合成,这就相当于建立起 PSSn 与静态误差之间的关系。

标准 Zernike 多项式的 RMS 为 1,故单个 Zernike 静态误差与所带来的 PSSn 为:

$$\text{PSSn} = 1 - \alpha_{\phi} k^2 \alpha_{\text{Zernike}}^2$$

即

$$\text{PSSn} \geq \prod (1 - 2k^2 \alpha_{\text{Zernike}}^2) \quad (5)$$

式中: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数,用来转化光程误差与相位误差。

为了研究公式(5)中大于等于号的成立条件,在此对不同系数的 Zernike 模拟波前计算所对应的 PSSn。根据 TMT 所提供的经验公式:

$$1 - \text{PSSn} \approx \frac{\gamma \sigma_{\text{slope}}^2}{\lambda^2} \quad (6)$$

式中: $\gamma = \eta r_0$, η 为常数 2.26, r_0 为大气相关长度; λ 为以 μm 为单位的波长,取 $0.5 \mu\text{m}$; σ_{slope} 的单位为 μrad 。

对于具体的视宁情况,还有可能要考虑天顶角。大气相干长度 r_0 与天顶角 ξ 的关系如下:

$$r_{0@xi} = r_0 (\cos(\xi))^{\frac{3}{5}}$$

式中: r_0 为大气相关长度。现假设在此所考虑的天顶

角 $\xi=0$ 。

使用 Zernike 多项式进行静态误差评估时,主要使用的是其不同阶数所对应的系数,而文中正是建立起 PSSn 与 Zernike 系数之间的关系。

分析 Zernike 多项式中的像散、离焦项与 PSSn 的关系如图 1、2 所示,可得在大气视宁较好的情况下系统本身的误差才能够较为明显的体现。同时,在小像差情况下公式(5)中的等号才会成立。故可利用该关系建立起小像差情况下 Zernike 多项式系数与 PSSn 之间的关系,这对系统初期的评估与概念设计打下很好的基础。

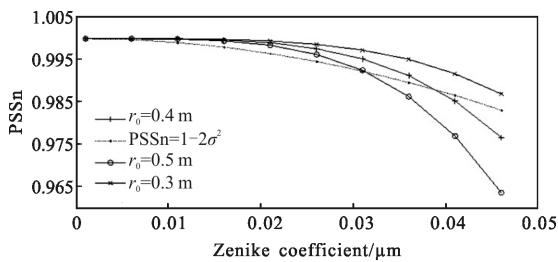


图 1 PSSn 与像散的关系

Fig.1 Relationship between PSSn and astigmatism

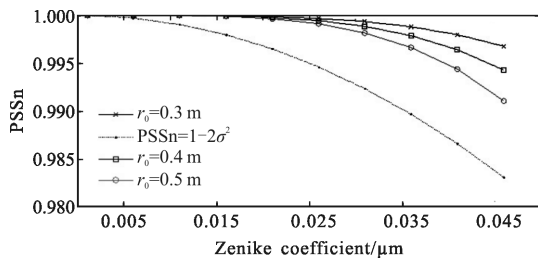


图 2 PSSn 与离焦的关系

Fig.2 Relationship between PSSn and defocus

4 基于 PSSn 的振动影响分析

系统的动态误差主要来源于系统内部以及外部的振动。由于振动引起的图像模糊所造成的光学传递函数 OTF 为零阶贝塞尔函数的形式^[11-12]:

$$OTF=J_0(D2\pi f) \quad (7)$$

式中: D 为抖动的幅值; f 为外界振动的频率; J_0 为零阶贝塞尔函数。不同抖动幅度下的光学传递函数如图 3 所示。

光学传递函数的一个重要性质为其合成特性,最后合成的传递函数 OTF_c 为不同的振动分量所引起的光学传递函数 OTF_1, OTF_2 的乘积。

$$OTF_c=OTF_1 \times OTF_2=J_0(D_1\Omega)J_0(D_2\Omega)$$

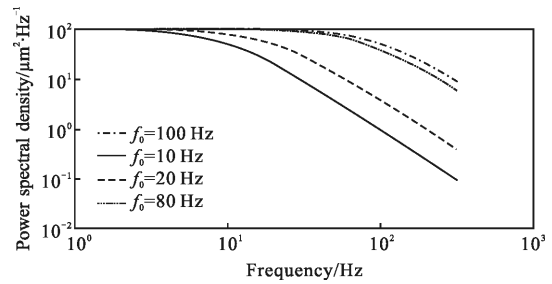


图 3 不同参数的载荷功率谱

Fig.3 Power spectral density for different load parameter

对一个具有许多频率分量的复杂运动来说,利用等效振幅法可以获得其光学传递函数。

$$OTF_c=\prod OTF_i=\prod J_0(D_i\Omega)$$

考虑在某一个频段内,将

$$D_i^2(\omega_i)/2=PSD(\omega_i)d\omega$$

$$OTF(\Omega)=\prod J_0(\sqrt{2d\omega PSD(\omega)} \Omega)=$$

$$\prod_{i=0}^{N_{PSD}} J_0\left(\sqrt{2(\omega_{i+1}-\omega_i) \frac{PSD(\omega_{i+1})+PSD(\omega_i)}{2}} \Omega\right) \quad (8)$$

式中:PSD 为振动信号功率谱。考虑之前提到的大气扰动占主导的情况就可以获得:

$$PSSn=\langle |OTF_c(\lambda f)|^2 \rangle$$

$$\frac{\int \left| \prod_{i=0}^{N_{PSD}} J_0\left(\sqrt{2(\omega_{i+1}-\omega_i) \frac{PSD(\omega_{i+1})+PSD(\omega_i)}{2}} \Omega\right) \right|^2 |OTF_d|^2}{\int |OTF_d|^2}$$

对不同的截止频率可以获得不同的功率谱,利用之前的推导可以获得对应功率谱下不同的传递函数。简单来说,载荷的功率谱可以表示如下:

$$PSD_{wind}=\frac{A}{1+\left(\frac{f}{f_0}\right)^\gamma} \quad (9)$$

式中: A 为幅值表征激励的剧烈程度; f_0 为截止频率,体现了载荷的频率分布; γ 为衰减系数。

利用之前的分析将功率谱分割为许多区域,每个区域都对应计算出正弦波的幅值,利用之前的推导可以获得由于振动所带来的动态误差。

从图 4 中可以看出,随着振动幅值的加大,由于振动所引起的光学成像模糊越来越明显。同时,不同的截止频率下其由振动所引起的光学传递函数也不同,越是高的截止频率,影响系统的分量逐渐增加,

由传递函数可得，逐渐增多的频率成分会对光学传递函数的影响逐渐加大。

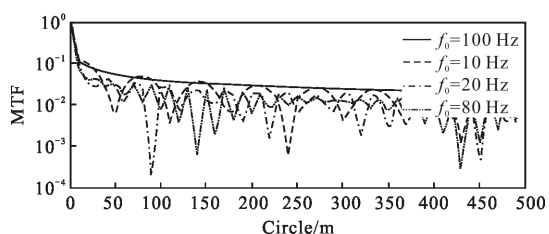


图 4 不同载荷谱下的光学传递函数

Fig.4 OTF at different load power spectral densities

在 $A=10$ 、 $f_0=20$ 、 $\gamma=2$ 的情况下可以得到对应的波前变化。

具体来说,首先对大口径主镜进行面形检测,如图 5 所示。



图 5 用于实验的大口径镜面

Fig.5 Large aperture mirror under test

利用传递函数的思想,结合公式(6),得到某大口径反射镜在振动影响前后的面形如图 6 所示。PSSn 从 0.996 下降到 0.991,利用该结论可以将振动因素与其他光学误差源有机地结合起来,而传统的指标无法胜任这一点。

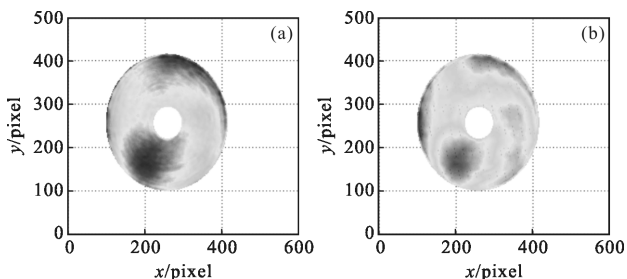


图 6 振动影响下的大口径镜面

Fig.6 Large aperture mirror figure under vibration

5 结论

文中所论述的 PSSn 用于大口径望远镜误差评估的流程图如图 7 所示。通过文中的研究可以提高误差项合成与分解的精度,在系统误差分配的过程中不论是采取自上而下还是自下而上的方法都可以增加分配的准确性。之前简单的合成方法得到的联合分布误差均方根的下确界往往还需要结合主观色彩很浓的安全系数。提高合成精度后,可以更加合理地分配现有的误差。另一方面,由于 PSSn 评价的全面性,不同频段分布的误差如果合理考虑可以适当地放宽其误差限。通过以上两点可以有效地减少在误差分析之中的“过估计”现象,同时不同的频段考虑误差既符合科学规律又符合经济原则。

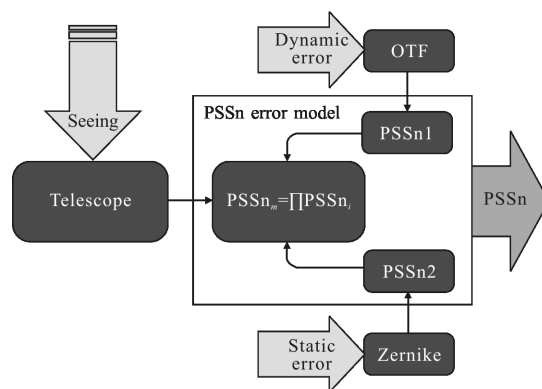


图 7 PSSn 用于大口径望远镜误差评估的流程图

Fig.7 Large telescope error analysis procedure using PSSn

参考文献:

[1] Su Yanqin, Zhang Jingxu, Wang Fuguo, et al. Seismic analysis of TMT M3 cell assembly based on spectral response[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 996-1003. (in Chinese)
 苏燕芹, 张景旭, 王富国, 等. 基于谱分析的 30 m 望远镜三镜支撑结构地震分析 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 996-1003.

[2] Wang Fuguo, An Qichang. Evaluation of mirror surface figures for TMT based on SlopeRms [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(5): 1171-1175. (in Chinese)
 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.

[3] MacMartin D G, Thompson P, Colavita M M, et al. Dynamic

- analysis of the active-controlled segmented mirror of the Thirty Meter Telescope [J]. *IEEE Trans Control Sys Tech*, 2013, 22: 58–68.
- [4] Zhao Hongchao, Zhang Jingxu, Yang Fei. TMT M3 system tilt axis bearing method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 122–127. (in Chinese)
赵宏超, 张景旭, 杨飞. TMT 三镜系统 tilt 轴轴承方案研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 122–127.
- [5] Seo B J, Nissly C, Angeli G, et al. Analysis of normalized point source sensitivity as performance metric for large telescopes[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(31): 5997–6007.
- [6] Tang Zhaoxin, Huang Wei, Xu Weicai, et al. Application of differential pentaprism scanning in wavefront detection [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 1003–1011. (in Chinese)
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.
- [7] Barr L D, Fox J, Poczulp G A, et al. Seeing studies on a 1.8 m mirror [C]//SPIE, Advanced Technology Optical Telescopes IV, 1990, 1236: 492–506.
- [8] Akihiko Miyashita, Ryusuke Ogasawara, Naruhisa Takato, et al. Temperature control for the primary mirror and seeing statistics of Subaru Telescope[C]//SPIE, Large Ground-based Telescopes, 2003, 4837: 255–263.
- [9] Zhao Xing, Zheng Yi, Zhang Zan, et al. Characterization of freeform optical surfaces based on surface slope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23 (7): 1957–1964. (in Chinese)
赵星, 郑义, 张赞, 等. 基于面形斜率的光学自由曲面表征[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1957–1964.
- [10] Angeli G Z, Seo B J, Nissly C, et al. A convenient telescope performance metric for imaging through turbulence [C]//SPIE, 2011, 8127: 812709.
- [11] Rudoler S, Hadar O, Fisher M, et al. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part 2 [J]. *Opt Eng*, 1991, 30(5): 577–589.
- [12] Guo Peng, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. Design and buckling analysis of TMT tertiary mirror cell assembly flexure structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3650–3655. (in Chinese)
郭鹏, 张景旭, 杨飞, 等. TMT 三镜镜室组件柔性结构设计分析与屈曲分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3650–3655.