

大型合成孔径望远镜标准化点源敏感性分析

安其昌^{1,2}, 张景旭¹, 杨飞¹, 赵宏超^{1*}, 曹海峰^{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 100039)

摘要: 为了更好地对大口径光学系统进行误差分析、分配, 本文在美国 TMT 主镜团队所提出的“标准化点源敏感性”的基础上, 研究了大口径合成孔径望远镜各项误差的特性及其分配。首先, 对“标准化点源敏感性”的基本性质进行了研究, 论述了其作为大口径合成孔径望远镜全频域评价指标的优越性; 之后, 分析了不同误差源对合成孔径望远镜“标准化点源敏感性”的影响, 以及在不同评价尺度下对应的标准化点源敏感性; 最后, 利用标准化点源敏感性与斜率均方根之间的关系, 针对合成孔径望远镜子镜间相对位置误差存在封闭性的特点, 提出了基于“Brownian Bridge”过程与“标准化点源敏感性”的误差模型。本文的工作对于类似的大口径系统设计及检测也有着一定指导意义。

关键词: 合成孔径; 大口径望远镜; 误差建模; 标准化点源敏感性

中图分类号: TH751 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20191203.0567

Normalized point source sensitivity analysis of large sparse telescopes

AN Qi-chang^{1,2}, ZHANG Jing-xu¹, YANG Fei¹, ZHAO Hong-chao^{1*}, CAO Hai-feng^{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 100039, China)

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

Abstract: To carry out the error analysis and allocation for large optical systems, on the basis of the “normalized Point Source Sensitivity” (PSSn) proposed by the TMT primary mirror team, the characteristics and distribution of errors of large sparse aperture telescopes were investigated. Firstly, the basic properties of PSSn was studied and its advantages as an all-frequency domain evaluation metric of large sparse aperture telescopes was discussed. After that, the influence of different error sources on large sparse aperture telescopes was ana-

收稿日期: 2018-02-23; 修订日期: 2018-04-04

基金项目: 国家自然科学基金(No.11673080, No.11803034); 国家重点研发计划(No.2017YFE0102900); 中国科学院青年创新促进会(No.2016198); 吉林省科技发展计划优秀人才基金项目(No.20180520171JH)

Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No.11673080, No.11803034); National Key Research and Development Program of China(No.2017YFE0102900); the Youth Innovation Promotion Association(No.2016198); Jilin Science and Technology Development Program(No.2018052017JH)

lyzed using PSSn. PSSn at different evaluation scales was analyzed. Finally, based on the relationship between the PSSn and slope root mean square, an error model using the “Brownian Bridge” walk and PSSn was proposed, considering the closure characteristics of the position error between the mirrors. The work has guiding significance for the design and testing of a similar large telescope system.

Key words: synthetic aperture; large telescope; error modeling; normalized point source sensitivity

1 引言

瑞利判据指出一定波长下望远镜的分辨能力与口径成正比。为了获得更强的集光能力,实现对更深、更远、更暗宇宙目标的探索,天文望远镜的口径也随之增加。借助于主动光学与自适应光学技术,不论是空间望远镜还是地基望远镜,其观测能力都得到了空前增长。目前单镜口径已达到 8 m 量级,由于材料制备、加工工艺以及检测手段的限制,利用整块主镜已经无法更进一步地增加集光能力。在此背景下,拼接镜与合成孔径望远镜成为了目前提高集光能力的两种主要方法^[1-3]。

Giant Magellan Telescope (GMT) 是由哈佛大学、麻省理工、亚利桑那大学、密歇根大学以及澳大利亚国家大学等单位联合发起的下一代地基大口径望远镜项目,其设计阶段由 2003 年开始,目前处于实际建设阶段。GMT 的工作波段覆盖了极紫外到近红外的广阔区间;其主要科学目标包括了探索类地行星、观测宇宙起源等目前科学界亟需解决的问题。GMT 的 7 块主镜由硼硅酸盐铸造而成,每一块主镜直径均为 8.4 m;其集光面积相当于直径为 21.9 m 的整镜,在近红外波段工作时,其衍射极限相当于 24.5 m 口径的望远镜。目前我国的合成孔径大口径望远镜尚处于起步阶段,哈尔滨工业大学的研究团队曾建造了等效口径约为 500 mm 的原理样机,国家天文台与苏州

大学也对合成孔径望远镜进行了有益的研究^[4-8]。

大口径地基望远镜系统性能评价和误差分配是一个复杂的系统工程,其涉及面广、环节众多、与实际应用需求联系极为紧密。误差分析、分配准则的研究,本质上是建立大口径望远镜科学目标与望远镜实际性能指标之间的关系。不仅如此,性能评价和误差分配实际上是相互关联的,即误差分配本身是一个平衡过程:在既定的性能评价标准下,需要综合考虑系统误差的敏感性和实际加工、生产能力以及成本等因素,进而实现误差的分配。合成孔径望远镜的初衷在于提高建设的集成化与模块化,降低建设成本,为了达到此目标合理的误差分析分配指标与流程都有着至关重要的作用^[9-13]。

在此,本文引入标准化点源敏感性 (normalized Point Source Sensitivity, PSSn) 作为评价指标,对大口径合成孔径望远镜的静态与动态误差进行了分析。与此同时,针对合成孔径望远镜镜筒间的相对位置误差存在封闭性的特点,提出了基于“Brownian Bridge”过程的 PSSn 误差模型。

2 标准化点源敏感性与误差分析

PSSn 是利用点扩散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,故可以全面评价系统的成像质量。PSSn 的定义与计算方法如式(1)所示:

$$PSSn = \frac{\iint_{A(x,y)} |PSF_e|^2 |PSF_{t+a}|^2}{\iint_{A(x,y)} |PSF_{t+a}|^2} = \frac{\iint_{A(f_x, f_y)} |OTF_e|^2 |OTF_{t+a}|^2}{\iint_{A(f_x, f_y)} |OTF_{t+a}|^2} \quad (1)$$

其中, PSF_e 、 PSF_{t+a} 为误差的点扩散函数,以及理想望远镜在视宁度影响下的点扩散函数 OTF_e ,

OTF_{t+a} 为误差的光学传递函数,以及理想望远镜在视宁度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。

离散孔径的 PSSn 定义如式 (2) 所示:

$$PSSn = \frac{\iint_{A(f_x, f_y)} |OTF_e|^2 |OTF_{t+a}|^2 |P(x + \gamma f_x, y + \gamma f_y) P(x - \gamma f_x, y - \gamma f_y)|^2}{\iint_{A(f_x, f_y)} |OTF_{t+a}|^2 |P(x + \gamma f_x, y + \gamma f_y) P(x - \gamma f_x, y - \gamma f_y)|^2}, \quad (2)$$

其中, $P = \sum_{i=1}^N e^{i2\pi(\rho_i z/\lambda) \cos(\delta_i)}$ 为广义光瞳函数, 为了

简化表达, 设 $\tan\zeta = \frac{\sqrt{x^2+y^2}}{z}$ 以及 $\gamma = \frac{\lambda z}{2}$ 。

根据式 (2) 可得, 合成孔径 PSF 复振幅包络线与单一口径相同, 但其内部存在更多的起伏。这导致合成孔径的 PSSn 相对下降, 同时, 随着入瞳形状的变化, 系统 PSSn 也会产生相应的变化 (在没有光线通过的极限情况下, PSSn 下降为 0)。同时, 由于通光口径形状的影响, 利用离散孔径测量所得到的 PSSn 也存在上限。

粗糙度是光学表面精抛光阶段的评价指标, 其相关理论一般只能适用于较小的评价范围。但对于极大口径望远镜而言, 根据 Jerry Nelson 的研究, 由主镜局部低阶像差所引起的波前误差对系统出瞳处的影响与小口径元件表面粗糙度类似。因此, 可将小口径镜面粗糙度的评价方法应用于大口径光学元件低阶面形分析。

斜率均方根定义为波前斜率的样本标准差。由于斜率均方根和诸多光学指标均有关联, 通过斜率均方根, 可分析评价尺度与评价结果之间的关系。大口径光学元件在重力印透作用下的面形 RMS 如式 (3) 所示:

$$\sigma_{RMS} = \xi \frac{qS^2}{M^2 D} \sim \frac{S^2}{M^2 h^2}, \quad (3)$$

其中 ξ 为系数, q 为单位面积上的压力, M 为支撑点数, $D = Eh^3/12(1-\nu)^2$ 为刚度模量, E 为弹性模量, h 为镜面厚度, ν 为泊松比, S 为面积。

为了适应不同的孔径形状, 在此使用总取样点数 N 代替取样间隔 T , 代入式 (3)。利用基本的几何关系 $NT^2 = S$, 可得斜率均方根的量纲表达如式 (4) 所示:

$$\sigma_{Slo} = \sigma_{RMS}/T = \xi \frac{qS^2}{DM^2 u} = \xi \frac{q\sqrt{N}S^{\frac{3}{2}}}{M^2 D} \sim \frac{S^2}{T^2 M^2 h^2}. \quad (4)$$

由式 (2) ~ (3) 可以看出, 不同的评价尺度下

获得的评价结果也不尽相同, 下面通过评价指标与评价尺度之间的解析关系, 进一步研究误差的分析与分配。

根据 Beckmann 与 Spizzichino 对粗糙度的研究, 实际的点扩散函数与理想点扩散函数之间存在如下关系, 如式 (5) 所示:

$$|PSF_{t+a+e}|^2 = e^{-\xi} |PSF_{t+a}|^2 + \frac{\pi T^2}{\lambda^2} e^{-\xi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\xi^m}{m! m} e^{-k^2 \theta^2 T^2 / 4m}, \quad (5)$$

其中 $\xi = (\frac{4\pi\sigma}{\lambda})^2$, m 为整数。通过式 (5) 可以建立起粗糙度评价方法与大口径望远镜性能评价之间的关系。对式 (5) 等式两边在空间域上进行积分, 可得式 (6):

$$\int_0^\theta |PSF_{t+a+e}|^2 d\theta = \int_0^\theta e^{-\xi} |PSF_{t+a}|^2 d\theta + \int_0^\theta \frac{\pi T^2}{\lambda^2} e^{-\xi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\xi^m}{m! m} e^{-k^2 \theta^2 T^2 / 4m} d\theta. \quad (6)$$

对式 (2) ~ (5) 进行分部积分, 可得式 (7):

$$\int_0^\theta |PSF_{t+a+e}|^2 d\theta = \int_0^\theta e^{-\xi} |PSF_{t+a}|^2 d\theta + 1 - e^{-\xi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\xi^m}{m!} e^{-k^2 \theta^2 T^2 / 4m}. \quad (7)$$

由于系统的误差一般相对较小, 故 $\xi = (\frac{4\pi\sigma}{\lambda})^2 \ll 1$ 。对式 (7) 可以进行近似化简, 可得式 (8):

$$\int_0^\theta |PSF_{t+a+e}|^2 d\theta = (1 - \xi) \int_0^\theta |PSF_{t+a}|^2 d\theta + \xi (1 - e^{-k^2 \theta^2 T^2 / 4}), \quad (8)$$

结合 PSSn 的定义式, 利用 $\int_0^\theta |PSF_{t+a}|^2 d\theta$ 对等式两边进行归一化可得式 (9):

$$PSSn_\theta = \frac{\int_0^\theta |PSF_{t+a+e}|^2 d\theta}{\int_0^\theta |PSF_{t+a}|^2 d\theta} = (1 - \xi) + \xi \frac{(1 - e^{-k^2\theta^2 T^2/4})}{\int_0^\theta |PSF_{t+a}|^2 d\theta} \quad (9)$$

根据 Born 的研究, 结合傅立叶光学相关理论, 可得衍射极限下的 PSF 如式 (10) 所示:

$$PSF(u, v) = \frac{i}{\lambda} \iint_{A(x, y)} e^{-ik(ux+vy)} dx dy \quad (10)$$

其中 u, v 为衍射空间的坐标, x, y 为物空间的坐标。对于圆形的孔径, 其点扩散函数如式 (11) 所示:

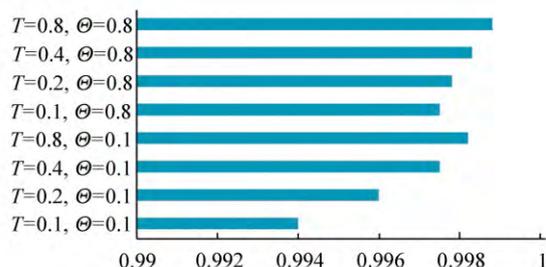
$$PSF(u, v) = \frac{2A^2}{\lambda^2} \frac{J_1(kT\sqrt{u^2+v^2})}{kT\sqrt{u^2+v^2}} \cdot \left[\sum_{j=1}^Q e^{-ik(ux_j+vy_j)} \right] \quad (11)$$

其中 Q 为孔径数量, 对于最简化的情况, PSSn 如式 (12) 所示:

$$PSSn_{\theta, T} = (1 - \xi) + \xi \frac{(1 - e^{-k^2\theta^2 T^2/4})}{1 - J_0^2(kT\theta) - J_1^2(kT\theta)} \quad (12)$$

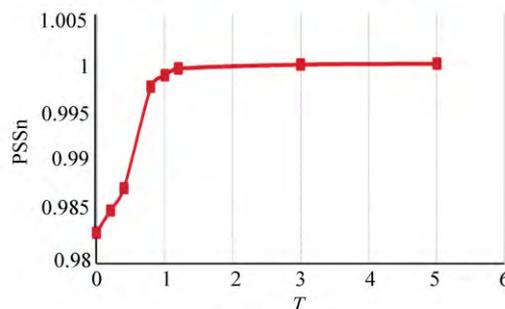
其中 J_0 为 0 阶贝塞尔函数, J_1 为 1 阶贝塞尔函数。通过分析可得, 当 $\xi = (\frac{4\pi\sigma}{\lambda})^2$ 较小时, 系统的 PSSn 接近于 1; 当 $\xi = (\frac{4\pi\sigma}{\lambda})^2$ 较大时, 表示系统的波前误差基本被误差所支配。相应的, 式 (12) 相当于当系统误差较小时, 系统的性能主要由受孔径影响的衍射极限所决定, 当误差达到一定程度时, 性能完全由误差所决定。

其中 $D = (\frac{2\pi\sigma}{\lambda})^2 (1 - e^{-k^2\theta^2 T^2/4})$, 被称为单一空间频率分量波前结构函数。与表征大气的结构函数原理相同。PSSn 与评价尺度 T 以及积分范围 θ 的关系如图 1 所示。



(a) 不同 T 以及 θ 下的 PSSn

(a) PSSn under different T and θ



(b) PSSn 与 T 的关系

(b) PSSn varies with T

图 1 PSSn 与评价尺度 T 以及积分范围 θ 的关系

Fig.1 Relationship between PSSn and evaluation scale T and integral range θ

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 0 阶贝塞尔函数, 如式 (13) 所示:

$$OTF_{vib} = J_0(A\omega) \quad (13)$$

其中 A 为抖动的幅值, ω 为外界振动的频率, J_0 为 0 阶贝塞尔函数。根据光学传递函数的基本性质可得式 (14):

$$\iint_{A(u, v)} |PSF_{vib}|^2 = \iint_{A(f_x, f_y)} |OTF_{vib}|^2 \quad (14)$$

根据式 (14), 结合 PSSn 的定义式 (1), 利用

$$\int_0^\theta |OTF_{vib}|^2 d\omega \quad (15):$$

$$PSSn_{\theta, T, A} = (1 - \xi) + \xi \frac{(1 - e^{-k^2\theta^2 T^2/4})}{\int_0^\theta |OTF_{vib}|^2 d\omega} \quad (15)$$

另一方面, 结合贝塞尔函数的基本性质可得

式(16):

$$\int_0^\theta |OTF_{\text{vib}}|^2 d\omega = \int_0^\theta J_0^2(A\omega) d\omega = \omega J_0^2(A\omega) \Big|_0^\theta - \int_0^\theta 2A\omega J_0(A\omega) d\omega = \omega J_0^2(A\omega) \Big|_0^\theta - 2A\omega J_1(A\omega) \Big|_0^\theta = 2A\theta J_1(A\theta) - \theta J_0^2(A\theta) \quad (16)$$

根据式(16)可得动态误差影响下的 PSSn 如式(17)所示:

$$PSSn_{\theta, T, A} = (1 - \xi) + \xi \frac{(1 - e^{-k^2\theta^2 T^2/4})}{2A\theta J_1(A\theta) - \theta J_0^2(A\theta)} \quad (17)$$

由于

$$\frac{\partial}{\partial A} 2A\theta J_1(A\theta) - \theta J_0^2(A\theta) =$$

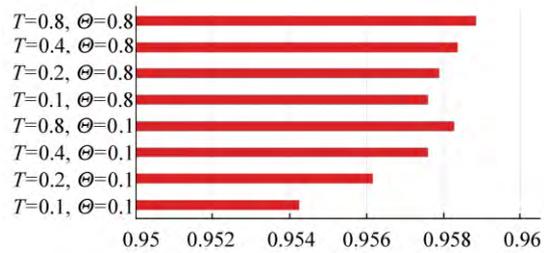
$$2A\theta^2 J_0(A\theta) + 2\theta^2 J_0(A\theta) J_1(A\theta) > 0,$$

可见 PSSn 对于 A 是减函数, PSSn 与振幅的解析关系如图 2 所示。根据 PSSn 随振动的线性衰减特性, 可以内插得到任意振动条件下的 PSSn。

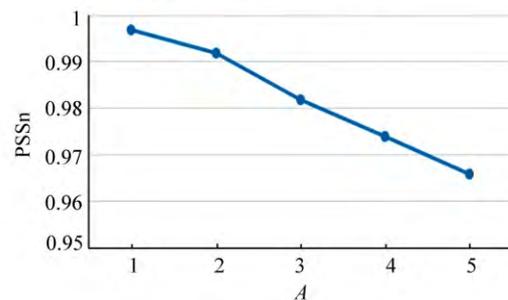
根据之前的推导, 针对已有面形数据进行仿真实验。首先, 将波前切割为圆形离散式样, 之后根据式(17), 利用传递函数可以获得在不同振动载荷下的 PSSn, 如图 3 所示。PSSn 随振动的衰减基本呈线性。据此可以内插得到任意振动条

根据之前的分析, 使用 PSSn 作为评价系统误差的标准, 同时以概率的标准考虑所有潜在的状态, 即可全面分析分配系统的误差。PSSn 是光学传递函数在全部区域的广义平均, 充分地考虑了背景对光学能量传递所带来的影响, 故可以全面评价系统的成像质量; 同时, PSSn 具有良好的线性合成特性, 可以通过各部分 PSSn 的乘积, 简单、准确地获得多因素影响下的综合误差。

由于每个合成孔径为大口径波前的一部分, 在较小的局部范围内, 低阶像差主要表现为 Piston、Tip/Tilt 或者凹陷。另一方面, 由于测量误差的存在, 导致合成孔径之间也存在着一定的相对 Piston 与 Tip/Tilt 误差。如果保留这些分量会极大影响结果精度。在此, 以 PSSn 为评价标准, 使



(a) 不同 T 以及 θ 下的 PSSn
(a) PSSn under different T & θ



(b) PSSn 与振幅的关系
(b) PSSn varies with amplitude

图 2 PSSn 与评价尺度 T、积分范围 θ 以及振幅的关系

Fig.2 Relationship between PSSn and evaluation scale T, integral range θ and amplitude

件下的 PSSn。通过上述方法, 可预测系统在不同振动水平下的 PSSn。

用优化方法, 可去除子孔径内的刚体位移。测量误差引起的子孔径 tip/tilt 误差如式(18)与式(19)所示。由于在每次测量中, Piston、Tip/Tilt 会被去除, 故会对结果的不确定度产生影响^[14-15]。

$$\delta\sigma_{\text{slo}_n\text{,tip}}^2 = \frac{2\sigma_{\text{mea}}^2}{\int X^2} = \frac{2\sigma_{\text{mea}}^2}{\frac{1}{4}\pi R^4 + \pi\mu^2 R^4 \sin^2\{[(n - \frac{1}{2}(n \bmod 2))\delta]\}} \quad (18)$$

$$\delta\sigma_{\text{slo}_n\text{,til}}^2 = \frac{2\sigma_{\text{mea}}^2}{\int Y^2} = \frac{2\sigma_{\text{mea}}^2}{\frac{1}{4}\pi R^4 + \pi\mu^2 R^4 \cos^2\{[(n - \frac{1}{2}(n \bmod 2))\delta]\}} \quad (19)$$

其中 $\delta\sigma_{\text{slo}_n\text{,tip}}^2$ 与 $\delta\sigma_{\text{slo}_n\text{,til}}^2$ 为测量环节对斜率均方根的影响, 而 σ_{mea}^2 是沿镜面法向的测量误差。N 个子孔径由于测量所引入的误差对整体 PSSn 影响, 如式(20)所示:

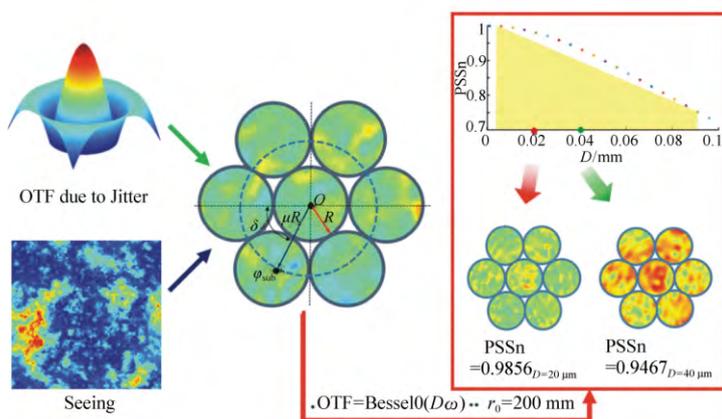


图 3 PSSn 与振幅的关系

Fig.3 Relationship between PSSn and amplitude

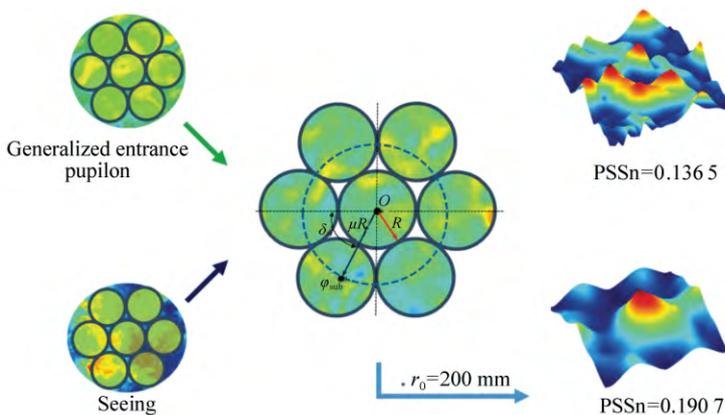


图 4 PSSn 与子镜刚体位移的关系

Fig.4 Relationship between PSSn and rigid body motion of sub-mirror

$$\delta PSSn_{P\&T} \approx 1 - \frac{2\gamma}{\lambda^2} \sum_{n=1}^N \delta\sigma_{slo_n_tip}^2 + \delta\sigma_{slo_n_til}^2, \tag{20}$$

其中, λ 为以微米为单位的波长, 取 $0.5 \mu\text{m}$ 。斜率均方根的单位为微弧度。

3 基于 Brownian Bridge 的误差建模

误差分析、分配本身就是一个具有统计学意义的过程。对于误差评价指标而言, 不仅需要拥有全面的性能表征能力, 同时也必须兼顾误差的统计学特性。从统计学的角度研究 PSSn, 可以更好地将 PSSn 作为误差分析分配准则。根据随机过程的观点, 如果一个过程在若干步转移之后, 以概率 1 达到某个状态, 该过程被称为“Brownian

Bridge”过程, 记为 $B(t)$ 。将不同子系统的 PSSn 作为随机变量, 可以从动态的观点对误差的生成、积累以及传递等一系列过程进行诠释。在不同的边界条件下, 利用转移概率矩阵, 可以有效利用已获得的误差信息, 并对系统的行为进行有效预测。与此同时, 在计算系统的统计矩时, 不可避免地需要考虑系统误差的概率分布情况。对于大口径系统, 传统上假设误差服从高斯分布的独立变量方法, 由于没有考虑到误差在传递过程中的边界条件(如封闭误差链), 会造成明显的过估计情况。

首先, 对 $B(t)$ 的定义进行说明, 与 Wiener 过程类似, “Brownian Bridge”过程的相关函数满足式(21)。

$$E[B(t)B(t+v)] = \frac{t}{T} - \frac{t(t+v)}{T^2}, \tag{21}$$

其中, T 为以概率 1 达到某个状态的时间。利用求解随机过程特征值的定义, 可得式(22):

$$\Psi(t) = \lambda \int_0^T E[B(t)B(t+v)]\Psi(v)dv, \quad (22)$$

其中, $\Psi(t)$ 为“Brownian Bridge”过程特征函数, 满足式(23) λ 为“Brownian Bridge”过程特征值,

$$\int_0^T \Psi^2(t)dt = 1. \quad (23)$$

令 $\lambda = k^2$, $\Psi(t) = \sin kt$, 在连续时间下定义“Brownian Bridge”如式(24)所示:

$$B(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\lambda_n}} \Psi_n(t) X_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sqrt{2}}{\pi n} \sin(\pi n t) X_n(t). \quad (24)$$

将“Brownian Bridge”表达为离散过程, 即将以概率 1 达到某个状态的时间 T , 替换为转移步数 N , 如式(25)所示:

$$B_i = \sum_{n=1}^{N-1} \frac{\sqrt{2} \sin(\pi i n / N)}{\sin(\pi n / 2N)} X_n. \quad (25)$$

下面以合成孔径望远镜的子镜倾斜为研究目标, 分析“Brownian Bridge”在大口径望远镜误差分析分配中的应用。由于子镜之间有位置传感器, 虽然不能保证每个子镜的绝对位置精度, 但是考虑任何子镜所形成的环路, 最后的位置误差一定为传感器的位置测量残差。另一方面, 根据 Jerry Nelson 对 Keck 的研究可以得出, 子镜的倾斜, 在系统规模的计算中, 可以认为是整镜局部的斜率变化, 利用 PSSn 与斜率均方根的关系,

参考文献:

- [1] 赵天骄, 乔彦峰, 孙宁, 等. 经纬仪主镜在支撑系统下的面形变化[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 477-483.
ZHAO T J, QIAO Y F, SUN N et al.. Surface deformation of theodolite primary mirror under the support system[J]. *Chinese Optics* 2017, 10(4): 477-483. (in Chinese)
- [2] JOHNS M, MCCARTHY P J, RAYBOULD K et al.. Giant magellan telescope: overview[J]. *Proceedings of SPIE* 2012, 8444: 84441H.
- [3] CONAN R, BENNET F, BOUCHEZ A H et al.. The giant magellan telescope laser tomography adaptive optics system[J]. *Proceedings of SPIE* 2012, 8447: 84473P.
- [4] VAN DAM M A, MCLEOD B A, BOUCHEZ A H et al.. Dispersed fringe sensor for the giant magellan telescope[J]. *Applied Optics* 2016, 55(3): 539-547.
- [5] MARTIN H M, BURGE J H, CUERDEN B et al.. Progress in manufacturing the first 8.4 m off-axis segment for the giant magellan telescope[J]. *Proceedings of SPIE* 2008, 7018: 7018C.
- [6] AN Q CH, ZHANG J X, YANG F et al.. Normalized point source sensitivity analysis in GSSM prototype[J]. *Chin. Opt.*

$1 - PSSn \sim \sigma_{slo}^2$ 可以得出子镜倾斜 PSSn 在“Brownian Bridge”下的表达如式(26):

$$1 - PSSn_c = N \sum_{n=1}^{N-1} \frac{1 - PSSn_n}{[2N \sin(\pi n / 2N)]^2}. \quad (26)$$

4 结 论

通过引入 PSSn 提高合成精度, 可以更加合理地分配现有误差, 减少主观色彩很浓的安全系数; 另一方面, 由于 PSSn 评价的全面性, 可以适当放宽某些频段的误差限, 通过以上两点可以有效地减少误差分析中的“过估计”现象。在不同的频段考虑误差, 既符合科学规律又符合经济原则。利用 PSSn 的合成性质, 可将重力印透、大气视宁、抖动以及其他的误差源所引入的 PSSn 进行合成, 进而建立系统的误差模型。从 3 个方面结合标准化点源敏感性进行了分析。首先, 将非离面误差转化为倾斜, 并与标准化点源敏感性建立联系。之后分析了热载荷下, 镜面球差与标准化点源敏感性之间的关系。最后, 利用厚板振动理论, 对于非离面风载的影响进行了分析。对于口径较小的元件, 使用 RMS 结合 PSSn 进行分析评价, 可以为 PSSn 评价方法在实际工程中的应用积累经验, 但是对于大口径系统, 使用 RMS 则难以合理地表现各个误差源对集成后系统性能的影响。本文的工作对大型合成孔径望远镜建设有着重要意义, 同时对于类似的大口径系统的误差分析与检测也有着一定指导意义。

- Lett. 2017 ,15 (11) : 111202 .
- [7] 董世则 郭抗 李显凌 等.光学元件狭缝柔性调节机构的设计与分析[J].中国光学 2017 ,10(6) : 790-797.
DONG SH Z ,GUO K ,LI X L *et al.*. Design and analysis of adjustment mechanism with slit diaphragm flexures for optical elements[J]. *Chinese Optics* 2017 ,10(6) : 790-797.(in Chinese)
- [8] CHANAN G ,TROY M ,DEKENS F *et al.*. Phasing the mirror segments of the keck telescopes: the broadband phasing algorithm[J]. *Applied Optics* ,1998 ,37(1) : 140-155.
- [9] WIZINOWICH P ,ACTON D S ,SHELTON C *et al.*. First light adaptive optics images from the Keck II telescope: a new era of high angular resolution imagery[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 2000 ,112(769) : 315-319.
- [10] 王富国 乔兵 张景旭.2 m SiC 反射镜柔性被动支撑系统[J].光学 精密工程 2017 ,25(10) : 2591-2598.
WANG F G ,QIAO B ,ZHANG J X. Flexible passive support system for 2 m SiC reflective mirror[J]. *Opt. Precision Eng.* , 2017 ,25(10) : 2591-2598.(in Chinese)
- [11] 李剑锋 吴小霞 李玉霞 等.基于液压支撑的大口径主镜稳像技术[J].光学 精密工程 2017 ,25(10) : 2599-2606.
LI J F ,WU X X ,LI Y X *et al.*. Position control technology of large aperture mirror based on hydraulic support[J]. *Opt. Precision Eng.* 2017 ,25(10) : 2599-2606.(in Chinese)
- [12] 胡海飞 赵宏伟 刘振宇 等.4 m 口径 SiC 反射镜原位检测用静压支撑系统[J].光学 精密工程 2017 ,25(10) : 2607-2613.
HU H F ,ZHAO H W ,LIU ZH Y *et al.*. Hydrostatic support system for in-situ optical testing of a 4 m aperture SiC mirror [J]. *Opt. Precision Eng.* 2017 ,25(10) : 2607-2613.(in Chinese)
- [13] 赵宏超 张景旭 杨飞 等.1.2 m 望远镜次镜支撑结构设计[J].光学 精密工程 2017 ,25(10) : 2614-2619.
ZHAO H CH ,ZHANG J X ,YANG F *et al.*. Secondary mirror supporting structure for 1.2 m telescope[J]. *Opt. Precision Eng.* 2017 ,25(10) : 2614-2619.(in Chinese)
- [14] SMITH G A ,BURGE J H. Subaperture stitching tolerancing for annular ring geometry[J]. *Applied Optics* 2015 ,54(27) : 8080-8086.
- [15] CHEN SH Y ,LI SH Y ,WANG G L. Subaperture test of wavefront error of large telescopes: error sources and stitching performance simulations[J]. *Proceedings of SPIE* 2014 ,9298: 929817.

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工学学士学位,2014 年于中国科学院大学获得硕士学位,主要从事大口径光机系统检测装调方面的研究。E-mail: anjj@mail.ustc.edu.cn



赵宏超(1985—)男,山东泰安人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员,主要从事望远镜轴系设计技术方面的研究。E-mail: zhaohccomp@163.com