

文章编号 1004-924X(2015)01-0117-05

基于结构函数的大口径望远镜光机系统误差分配

杨 飞^{1,2*}, 刘国军¹, 安其昌²

- (1. 长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:从结构函数的角度分析和研究了大口径望远镜光机系统的评价方法。分析了基于结构函数的系统误差传递特性, 利用功率谱反演得到大气扰动的数值模拟, 并建立了基于结构函数的系统误差分配方法。将本文的方法应用于长春光学精密机械与物理研究所的 1.23 m 口径望远镜进行了实验验证, 结果证明了提出理论的正确性以及方法的可行性。最后将其应用于 30 m 望远镜(TMT)三镜系统, 研究了其在大气湍流下的印透效应, 实验表明其在考虑了不同的视宁情况下, 分辨印透峰的能力没有减弱。本文的研究对提高大口径望远镜的性价比, 降低大口径望远镜在研制和使用过程中的技术风险颇有意义。

关键词:30 m 望远镜; 大口径望远镜; 光机系统; 结构函数; 误差分配

中图分类号:TH751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152301.0117

Error allocation of opto-mechanical system for large aperture telescope based on structure function

YANG Fei^{1,2*}, LIU Guo-jin¹, AN Qi-chang²

- (1. State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
- * Corresponding author, E-mail: yangflying@163.com

Abstract: An error evaluation method for the opto-mechanical system of a large aperture telescope was proposed based on structure function. The error transfer property of the structure function was analyzed, and the numerical simulation of the atmosphere disturbance was obtained by inverting the Power Spectral Density(PSD). Then, the error allocation of opto-mechanical system was built with the structure function consequently. The method was proved to be correct and feasible with the application in the 1.23 m telescope in the Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. Finally, the method was used in the tertiary mirror system of 30 m telescope(TMT), and the print through effect of the system in the atmosphere disturbance was researched. The experiment show that the resolution ability of the system for print through peaks does not weaken at different seeing. The method proposed has important significant for reducing the cost efficient of the large aperture

收稿日期:2013-11-12;修订日期:2014-01-06.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11403022)

telescope and lowering its risk in developing and use processing.

Key words: Thirty Meters Telescoping (TMT); large aperture telescope; opto-mechanical system; structure function; error allocation

1 引言

随着科学技术的不断发展,大口径光学系统在天文光学、空间光学、地基空间目标探测与识别等高技术领域得到了越来越广泛的应用^[1-3]。光电探测系统口径的不断增大,使光学系统评价的难度也随之增加;尤其是对在大气层内工作的光学系统,其成像能力和系统性能不仅与本身的制造精度有关,还受大气湍流的限制。

传统光学系统的评价与误差分配的指标为波像差均方根。对于小口径系统,由于视场有限,在局部范围内可以认为大气视宁条件良好,在评价的时候只需考虑系统本身设计制造的误差;但对于大口径光学系统,大气的各向异性以及统计学不同源性将大大制约系统的成像能力。不考虑使用环境直接对大口径光学系统进行成像质量评价以及误差分配,将给系统后续的制造与使用带来巨大的困难^[4-9]。比如由美国加州理工学院、加州大学系统和加拿大大学天文研究联盟联合发起的 30 m 望远镜(TMT)计划。中国承担的三镜系统三镜为椭圆形平面镜,长轴为 3.594 m,短轴为 2.536 m。对于如此巨大的平面镜反射系统,传统的检测技术以及误差分配标准已不再适用^[10]。

结构函数最初是 20 世纪在自适应光学领域提出的数学概念,是对于不同尺度的大气湍流进行评价的有力工具;近年来,欧美的一些专家将此方法应用于大口径反射镜面形的评价之中,用来描述不同尺度反射镜面形的起伏情况,即重力的印透效应,取得了不错的效果^[5,11-12]。本文将结构函数的两种功能结合,很好地解决了实际视宁情况下系统的误差分配问题。

本文首先分析了基于结构函数的系统误差传递特性,得出与均方根类似的误差合成方法;之后利用功率谱反演得到大气扰动的数值模拟,模拟了大气对于系统的影响;然后将其应用于 1.23 m 口径反射镜,得出了直接计算结构函数与合成得到结果较为接近的结论,证实了理论的正确性以

及方法的可行性;最后将其应用于 TMT 三镜,研究了其在大气湍流下的印透效应,证明了其在考虑了不同的视宁情况下,分辨印透峰的能力依旧没有减弱。结果可作为各种光学系统设计的借鉴,同时,对于 TMT 的顺利完成有着重要的意义。

2 基本推导

2.1 结构函数

对于非均匀各向同性的局部均匀各向同性随机场,空间相关函数不仅与两点间的空间距离有关,还与其各自的位置有关。具体来说,对于实际的系统波像差,只有在比较小的范围内为宽平稳过程,故对其取增量相关函数为:

$$SF(r) = \langle (\varphi(x+r) - \varphi(x))^2 \rangle_x \quad (1)$$

式(1)即为国外一些学者提出的结构函数,其中 $\varphi(x)$ 为系统波像差, r 为采样点之间的空间距离。为了从不同空间频率上(尤其是中频)研究光学反射镜表面面形,对式(1)进行变形可得:

$$\begin{aligned} SF^2(r) &= \langle (\varphi(x+r) - \varphi(x))^2 \rangle_x = \\ &\langle (\varphi(x+r) - \bar{\varphi} + \bar{\varphi} - \varphi(x))^2 \rangle_x = \\ &\langle (\varphi(x+r) - \bar{\varphi})^2 \rangle_x + \langle (\varphi(x) - \bar{\varphi})^2 \rangle_x - \\ &2 \langle (\varphi(x+r) - \bar{\varphi})(\varphi(x) - \bar{\varphi}) \rangle_x = \\ &\sigma_x^2 + \sigma_{x+r}^2 - 2\text{cov}(\varphi(x+r), \varphi(x)) = \\ &2(\sqrt{\sigma_x^2 \sigma_{x+r}^2} - \text{cov}(\varphi(x+r), \varphi(x))) = \\ &2\sigma_x^2 - 2\text{cov}(\varphi(x+r), \varphi(x)). \quad (2) \end{aligned}$$

其结果等于波像差均方根平方的 2 倍,而对于后面一项,当 r 足够大(比如大于大气相干长度的两个观测值由于大气湍流作用,认为是不相关的),两个观测值的相关函数为 0。故在检测孔径比较大的表面时:

$$SF^2 = 2\sigma_x^2 \quad (3)$$

结构函数可以反映在不同尺度下系统波像差的起伏情况;一般来说以均方根作为评判标准的系统,其误差合成为:

$$RMS_s^2 = \sum RMS_i^2 \quad (4)$$

结合(2)式,可以得到结构函数的合成方法:

$$SF_S^2 = \sum SF_i^2. \quad (5)$$

为了验证式(5)的正确性,对于合成波像差的结构函数进行如下推导:

$$\begin{aligned} SF_S^2 &= \langle (\varphi(x+r) + \delta(x+r) - \varphi(x) - \delta(x))^2 \rangle_x = \\ &= \langle (\varphi(x+r) - \varphi(x))^2 \rangle_x + \langle (\delta(x+r) - \delta(x))^2 \rangle_x + \\ &= 2\langle (\varphi(x+r) - \varphi(x)) \times (\delta(x+r) - \delta(x)) \rangle_x. \end{aligned} \quad (6)$$

对于实际情况,由于制造以及支撑所造成的波像差与大气湍流引起的波像差之间的相关性一般来说都比较小,故可以得到:

$$SF_S^2 = \langle (\varphi(x+r) + \delta(x+r) - \varphi(x) - \delta(x))^2 \rangle_x = \langle (\varphi(x+r) - \varphi(x))^2 \rangle_x + \langle (\delta(x+r) - \delta(x))^2 \rangle_x. \quad (7)$$

以上推导证明了式(5)所作假设的正确性。对于某一特定的工作环境,其大气视宁情况会随时间有所变化,但是其服从的统计规律却是相对稳定的;根据其统计规律,可以得到其结构函数,之后结合制造与支撑,就可以更好地指导误差分配。

2.2 功率谱反演

由已知波像差可以由式(1)得到结构函数,但是为了证明本文理论,就要由已知统计学指标反演得到波像差。

对于大气湍流,专家提出了两种统计学表示方法,即功率谱与结构函数。由于功率谱的反演公式简单并可以使用快速算法,故其成为多数情况下的选择。在考虑功率谱的选择时,既可以利用 Kolmogorov 谱,由之前的统计规律给出;也可以根据实际的情况测量站址功率谱的稳态增益与截止频率,之后再用于指导误差分配。

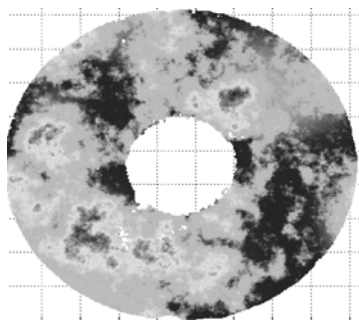


图 1 数值仿真波前

Fig. 1 Numerical simulation wavefront

利用自适应光学中功率谱反演的方法,得到的带中心孔的、直径为 1.23 m 的反射镜的数值仿真波前如图 1 所示。

利用该方法可以数值仿真以及实验验证提出的基于结构函数的系统误差分配方法。

3 实验验证

利用结构函数作为大口径光学系统评价标准的核心问题是:通过结构函数来研究系统不同尺度下的起伏,进而指导制造与支撑;并根据经验与理论得出 NTP 曲线作为定量的评判标准。通过数值仿真以及实验验证证明了式(3)的正确性,同时对于实际的误差分配,也做出一定的指导。

在视宁情况良好的实验室中利用 ZYGO 干涉仪测得带中心孔的、直径为 1.23 m 大口径反射镜的面形如图 2 所示。

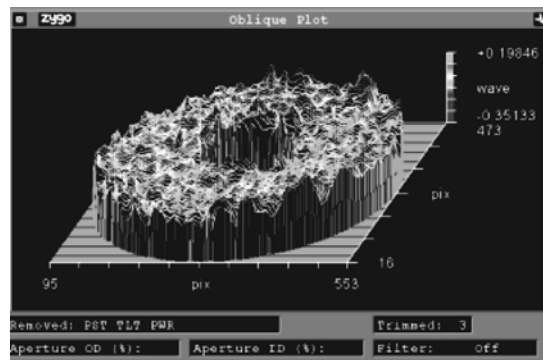


图 2 Φ1.23 m 反射镜实测数据

Fig. 2 Data of Φ1.23 meter reflecting mirror

将由波像差均方根为 10 nm,截止频率为 3 Hz 的功率谱反演得到的大气湍流波像差叠加到镜面数据上,如图 3 所示;其模拟显示了在实际的视宁条件下,大气湍流对于镜面的各个尺度起伏均产生了影响。在实际的工程应用中,需要合理地考虑大气的视宁情况,一味地提高单个光学表面、某一种尺度下的质量,对于合理的分配光电系统误差的帮助不大。

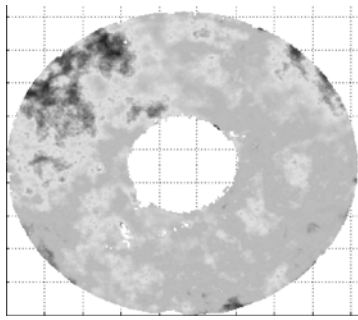


图 3 经过叠加的系统波前

Fig. 3 System wavefront after superposition

分别对其直接进行结构函数计算以及利用式(3)得到合成的结构函数如图 4 所示。

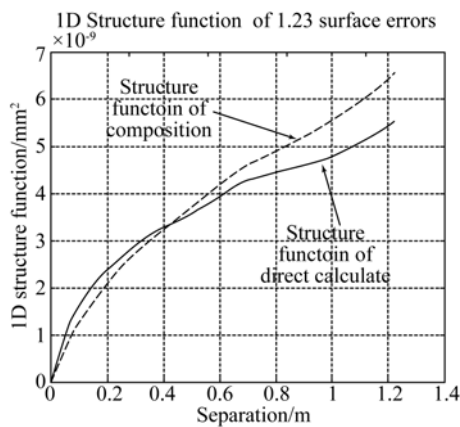


图 4 系统结构函数

Fig. 4 Structure functions of system

由图 4 可知,在中小尺度上,由于非相关性较好,两种方法得到的结果较为吻合;随着评价尺度增加,偏差有所增大,但是对于全孔径的 80%,其误差依旧在 10%之内。

另一方面,根据式(2)可得,结构函数的稳定值应为波像差均方根平方的 2 倍。由基本不等式可得,平方和大于和的平方,故该方法在大尺度上的计算结果偏大,相当于安全系数作用,不会对于大口径系统误差分配产生负面影响。

4 在 TMT 中的应用

由美国加州理工学院、加州大学系统和加拿大大学天文研究联盟联合发起的 30 m 望远镜(TMT)计划。中国承担的三镜系统三镜为椭圆形平面镜,长轴为 3.594 m,短轴为 2.536 m。对

于如此巨大的平面镜反射系统,传统上使用的检测技术以及误差分配标准已经不再适用。

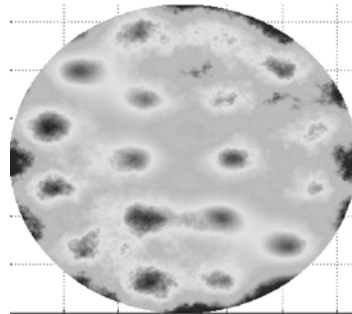


图 5 TMT 三镜波前

Fig. 5 Wavefront of TMT M3

利用上节方法,模拟实际工况中考虑视宁情况的系统波前,归一化后如图 5 所示。得到系统结构函数如图 6 所示。

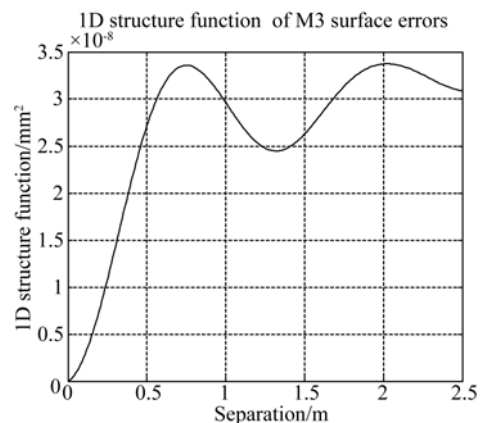


图 6 系统结构函数

Fig. 6 Structure function of system

由图可知,通过分析系统结构函数不仅可以得到印透效应,而且同时考虑了实际的视宁条件。对于此类大口径反射镜,重力印透是设计与检测中主要的考虑因素,利用该方法可以对更好地控制该因素。同时,对比等口径下的 Zernike 多项式对应的印透峰,也可以轻易地分辨出其基本的印透模式。另一方面,由于已经叠加了大气的结构函数,其 NTP 曲线的提出也更具实际意义。

5 结论

本文通过分析系统结构函数的误差传递特性

以及均方根误差合成方法,提出了基于结构函数的误差分配方法;之后利用功率谱反演1.23 m口径反射镜数据,得出了直接计算结构函数与合成得到结果较为接近的结论,并分析了误差来源;最

后将其应用于 TMT 三镜,研究了其在大气湍流下的印透效应。本文结果可用于指导各种光学系统的设计,同时对于 TMT 的顺利完成也有着重要的意义。

参考文献:

- [1] 王富国,安其昌. 30 m 望远镜三镜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. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1171-1175. (in Chinese)
- [2] 刘巨,董得义,辛宏伟,等. 大口径反射镜组件温度适应性 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3169-3175.
LIU J, DONG D Y, XIN H W, et al.. Temperature adaptation of large aperture mirror assembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12): 3169-3175. (in Chinese)
- [3] 李宗轩,金光,张雷. 3.5 m 口径空间望远镜单块式主镜技术展望 [J]. 中国光学, 2014, 7(4): 532-541.
LI Z X, JIN G, ZHANG L. Overview and outlook of monolithic primary mirror of spaceborne telescope with 3.5 m aperture [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 532-541. (in Chinese)
- [4] 张丽敏,张斌,杨飞. 主动光学系统力促动器的设计和测试 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 38-44.
ZHANG L M, ZHANG B, YANG F. Design and test of force actuator in active optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 38-44. (in Chinese)
- [5] 毕勇,翟嘉,吴金虎,等. 一种光学仪器镜面面形的处理方法 [J]. 光学技术, 2009, 35(1): 10-17.
BI Y, ZHAI J, WU J H, et al.. One method for mirror surface figure treatment in optical instrument [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(1): 10-17. (in Chinese)
- [6] 王栋,杨洪波,陈长征. 光学表面面形的计算机仿真 [J]. 计算机仿真, 2007, 24(2): 298-301.
WANG D, YANG H B, CHEN C Z. Computer simulation of the optical surface [J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(2): 298-301. (in Chinese)
- [7] ROSS Z. Specification of optical surface accuracy using the structure function [J]. *Proc. SPIE*, 2011, 8083: 808310-1~808310-10.
- [8] 林旭东,刘欣悦,王建立,等. 137 单元变形镜的性能测试及校正能力实验 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 267-273.
LIN X D, LIU X Y, WANG J L, et al.. Performance of correction capability of 137-element deformable mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 267-273. (in Chinese)
- [9] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述 [J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327-336.
ZHANG J X. Overview of structure of technologies of large aperture ground based telescope [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327-336. (in Chinese)
- [10] ANASTACIA M H, JAMES H B. Structure function analysis of mirror fabrication and support errors [J]. *Proc. SPIE*, 2007, 6671: 66710A-1-10.
- [11] ANASTACIA M H, JAMES H B. Structure function analysis of mirror fabrication and support errors [J]. *SPIE*, 2007, 6671: 66710A-1-10.
- [12] ERKIN SIDICK. Power spectral density specification and analysis of large optical surfaces [J]. *SPIE*, 2009, 7390: 73900L-1-10.

作者简介:



杨 飞(1982—),男,湖北天门人,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,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硕士学位,主要从事空间机构学的研究。E-mail: anjj@mail.ustc.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)