

# Study on the Influence of Translation Error of Large Aperture Stitching Mirror on Its Imaging Quality

Xuewei Chen

School of Science, Changchun University of Technology, Changchun Jilin  
Email: 1562517981@qq.com

Received: Mar. 6<sup>th</sup>, 2019; accepted: Mar. 19<sup>th</sup>, 2019; published: Mar. 27<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

As one of the development trends of larger aperture astronomical telescopes, the common phase errors among the sub-mirrors of the mosaic mirror have a great impact on the image quality of the mosaic mirror. In this paper, the effect of piston error, one of common phase errors, on image quality of stitching mirror is analyzed theoretically, and the effect of translation error on point spread function of stitching mirror system under different wavelengths is simulated and analyzed.

## Keywords

Piston Error, Point Spread Function, Space Telescope, Co-Phasing

---

# 大口径拼接镜平移误差对其成像质量影响研究

陈雪微

长春理工大学理学院, 吉林 长春  
Email: 1562517981@qq.com

收稿日期: 2019年3月6日; 录用日期: 2019年3月19日; 发布日期: 2019年3月27日

---

## 摘要

拼接镜作为更大口径天文望远镜的发展趋势之一, 其各子镜之间存在的共相误差对拼接镜的成像质量有着非常大的影响。本文理论分析了共相误差之一——平移误差对拼接镜成像质量的影响, 并对不同波长下平移误差对拼接镜系统点扩散函数的影响进行了仿真分析。

## 关键词

平移误差, 点扩散函数, 空间望远镜, 共相

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着太空探索需求的增加, 为了能观测到更遥远更暗弱的天体[1], 天文望远镜要具备更高的分辨能力和更强的集光能力, 这就需要望远镜的口径不断增大[2] [3]。而以现有的技术水平, 建造十米或者更大口径的单一主镜望远镜, 无论在镜面材料、加工检测、支撑结构还是造价以及运输发射、后续维护方面, 都存在极大挑战[4]。因此, 为了使建造更大口径的望远镜成为可能, 上世纪 70 年代, 人们提出了建造拼接性望远镜的概念[5]。对比传统的单口径望远镜, 拼接镜有效地减少了主镜的质量、造价及加工周期, 简单化了支撑结构, 方便了运输发射, 为建造更大口径望远镜提出了一个新方向[6]。但拼接镜在拼接过程中, 子镜与子镜间会产生共相误差, 对整个拼接镜系统的成像质量造成极大影响。其中对成像质量造成影响最大的就是平移(piston)误差, 以及倾斜(tip-tilt)误差, 只有检测并校正这些误差, 才能保证拼接镜成像质量[7]。目前国际上常用的共享无擦检测技术有: 夏克哈曼特检测法、四棱锥检测法、相位差法、色散条纹传感技术等等。夏克哈特曼宽带法是根据微透镜后的光斑形状随子镜间 piston 误差变化来检测子镜间的 piston 误差, 而夏克哈特曼窄带法补足了宽带法精度不足的劣势。色散条纹传感技术是利用色散条纹传感器得到色散条纹来检测平移误差, 而相位差法是分别利用单色点光源成像系统和扩展光源成像系统实现子镜间平移误差的检测[8] [9] [10]。本文讨论的正是对拼接镜成像质量影响最大的两个共相误差之一——平移误差对拼接镜成像质量的影响。本文通过对拼接镜子镜的出瞳处增加两个掩膜版, 使得仿真结果更加清晰, 便于分析平移误差对点扩散函数的影响。

## 2. 平移误差对拼接镜成像质量影响理论分析

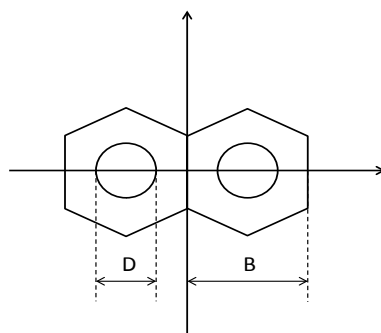


Figure 1. Structure of segmented telescope

图 1. 主镜结构示意图

主镜拼接方式如图 1 所示, 取右边的子镜为参照镜, 左边的子镜为测量镜, 为了简化计算过程, 使仿真效果更加清晰, 分别在两片子镜的出瞳处设置一个带圆孔的掩膜版, 圆孔直径设为  $D$ , 圆心到坐标原点的距离为  $B/2$ , 此时可以将存在误差时主镜系统的复振幅函数简化为:

$$U(x, y) = A(x, y) \left[ \text{circ} \frac{x - \frac{B}{2}}{\frac{D}{2}} * e^{i\phi_1} + \text{circ} \frac{x + \frac{B}{2}}{\frac{D}{2}} * e^{i\phi_2} \right] \quad (1)$$

式(1)中  $A(x, y)$  是孔径函数, 理想情况下我们认为:

$$A(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{子孔内径} \\ 0, & \text{子孔外径} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)中  $\text{circ}$  函数为光瞳函数, 由于设置了掩膜版, 因此光瞳函数简化为了圆孔的透过率函数, 式(1)中:

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} p \quad (3)$$

式(3)中  $\phi$  为系统相差,  $p$  为平移误差, 对公式(1)的复振幅函数进行傅里叶变换, 得到点扩散函数为:

$$PSF(u, v, \lambda) = |FT[U(x, y)]|^2 = 2 \frac{D^2/2 J_1^2(\pi D \sqrt{u^2 + v^2})}{u^2 + v^2} \quad (4)$$

式中  $u = x/\lambda f$ ,  $v = y/\lambda f$ ,  $\lambda$  为观测波长,  $f$  为望远镜的焦距。将  $u, v$  带入公式(3)中得到:

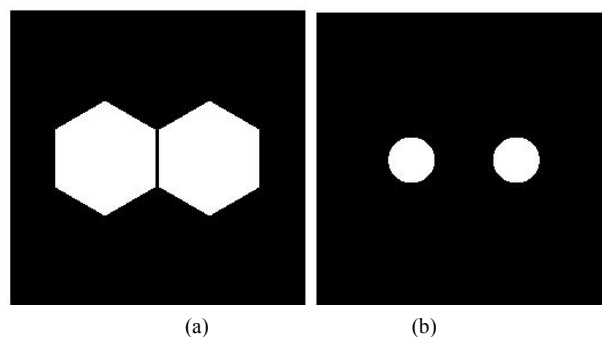
$$PSF(x, y, \lambda) = 2 \frac{D^2/2 f^2 \lambda^2 J_1^2(\pi D/\lambda f \sqrt{x^2 + y^2})}{x^2 + y^2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi p}{\lambda} - \frac{2\pi B}{\lambda f} x\right) \right] \quad (5)$$

当入射光不为单色光时, 设入射光的中心波长为  $\lambda_0$ , 带宽为  $\Delta\lambda$ , 将带宽  $\Delta\lambda$  分为  $n$  个区间, 可以写出此时系统的 PSF 为:

$$PSF_i(u, v, \lambda) = \sum_{k=1}^n \frac{PSF(u, v, \lambda_k) \Delta\lambda}{n} \quad (6)$$

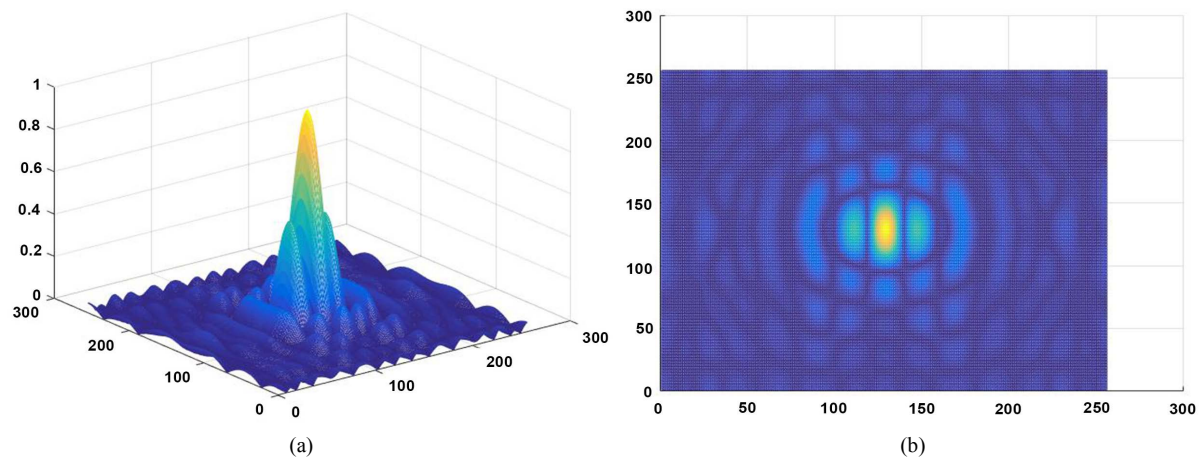
### 3. 平移误差对拼接镜成像质量影响仿真分析

根据最终得到的公式(6), 通过 matlab 建立如图 2 所示两片镜子组成的拼接镜系统。

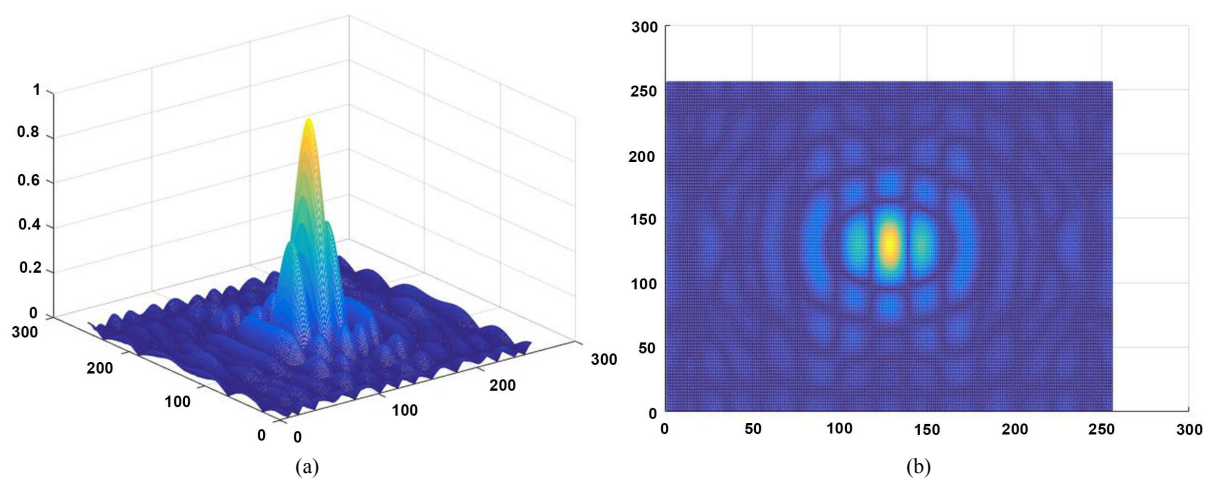


**Figure 2.** Simulated double pupil structure. (a) Hexagon structure of; (b) Segmented telescope with mask segmented telescope  
**图 2.** MATLAB 仿真双瞳结构。(a) 六边形主镜系统示意图; (b) 加上掩膜版后主镜系统

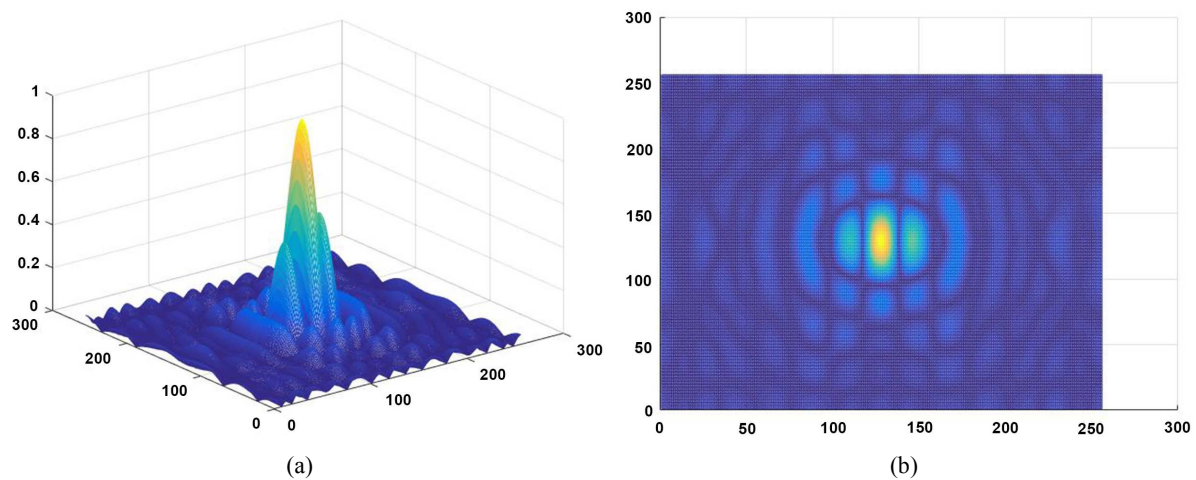
设右边的子镜存在平移误差, 将误差带入拼接镜光学模型中, 仿真得到的系统点扩散函数(PSF)如图 3~图 7 所示。



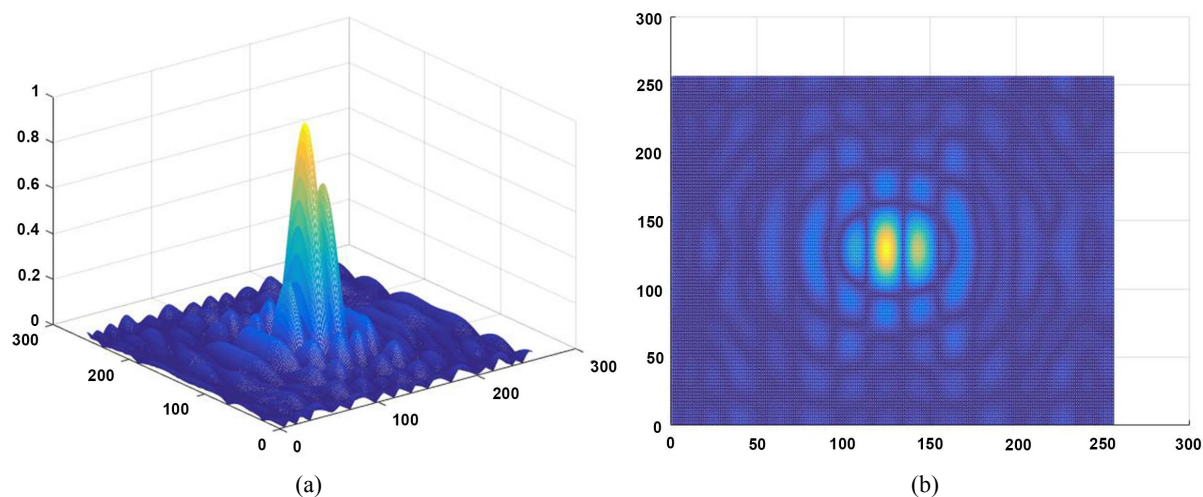
**Figure 3.** PSF and far field facula at piston error equals 0  
**图 3.** 无误差时 PSF 与远场光斑图



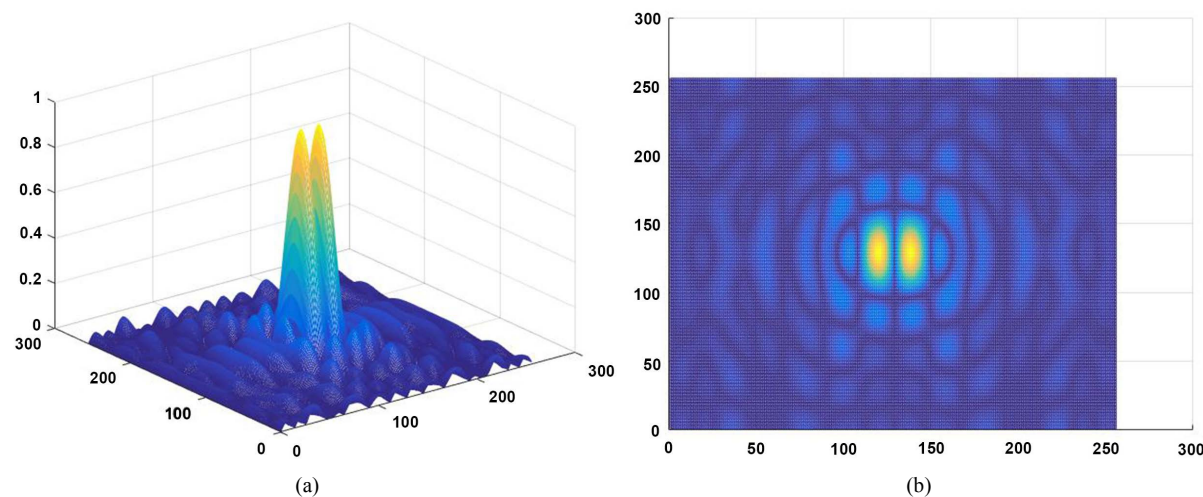
**Figure 4.** PSF and far field facula at piston error equals  $\lambda/16$   
**图 4.** 误差为  $\lambda/16$  时 PSF 与远场光斑图



**Figure 5.** PSF and far field facula at piston error equals  $\lambda/8$   
**图 5.** 误差为  $\lambda/8$  时 PSF 与远场光斑图



**Figure 6.** PSF and far field facula at piston error equals  $\lambda/4$   
**图 6.** 误差为  $\lambda/4$  时 PSF 与远场光斑图



**Figure 7.** PSF and far field facula at piston error equals  $\lambda/2$   
**图 7.** 误差为  $\lambda/2$  时 PSF 与远场光斑图

图 3~图 7 分别为  $256 \times 256$  像素下无误差、误差为  $\lambda/16$ 、 $\lambda/8$ 、 $\lambda/4$ 、以及  $\lambda/2$  时主镜点扩散函数的仿真图像与远场光斑图。从图中可以看出，随着单块子镜平移误差的增大，次光斑与主光斑的对比度越来越低，直至无法分清次光斑与主光斑。而且平移误差较小时，对于点扩散函数以及远场光斑的影响不是非常明显，随着平移误差的逐渐增大，其对系统点扩散函数及远场光斑的影响变得越来越明显。这说明拼接的两片子镜不在同一相面上，也就是说右边的子镜发生了沿光轴方向的偏移。这就造成了拼接主镜系统所成的相不在同一像面上，也就是说成像质量将会下降。因此，仿真结果表明，两片子镜间的平移误差越小，其成像质量越好。

#### 4. 结论

近年来，拼接镜在大口径望远镜研究中开始被广泛的运用。然而拼接过程中，子镜与子镜间会产生共相误差，对整个拼接镜系统的成像质量造成极大影响。本文通过理论研究及仿真分析了平移误差对大

口径拼接镜成像质量的影响。结果表明, 在入射波长一定的情况下, 平移误差较小时对拼接镜点扩散函数的影响并没有很大; 而随着平移误差的增大, 可以明显的看出远场光斑对比度几乎为 0。由傅里叶光学理论可知, 通过 CCD 相机得到的图像为观测目标与系统点扩散函数的离散卷积, 因此点扩散函数对成像质量有着很大的影响, 可以说在观测目标不变的情况下, 点扩散函数的好坏决定了成像质量的清晰与否。因此, 为了保证拼接镜的成像质量, 有必要对拼接镜平移误差进行及时的检测及校正。

## 参考文献

- [1] 王金, 鲜浩, 王胜千, 等. 拼接式望远镜子镜间平移、倾斜误差及子镜间隙对成像质量的影响[J]. 光电工程, 2014(10): 55-62.
- [2] Lamb, M., Correia, C., Sauvage, J.F., *et al.* (2017) Quantifying Telescope Phase Discontinuities External to AO-Systems by Use of Phase Diversity and Focal Plane Sharpening. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, **3**, Article ID: 039001.
- [3] 卞毓麟. 光学天文望远镜的足迹[J]. 物理, 2008, 37(12): 844-852.
- [4] 薛艳杰, 薛随建, 朱明, 等. 天文望远镜技术发展现状及对我国未来发展的思考[J]. 中国科学院院刊, 2014(3): 368-375.
- [5] 杨李成, 凌宁. 发展中的能动薄镜技术[J]. 激光与光电子进展, 2002, 39(2): 10-14.
- [6] Kendrick, S.E. and Brown, R.J. (2003) Lightweighted Beryllium Cryogenic Mirrors for Both Monolithic and Segmented Space Telescope. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, Waikoloa, 241-253.
- [7] Schipani, P., Perrortta, F. and Marty, L. (2006) Active Optics Correction Forces for the VST 2.6M Primary Mirror. *Proceedings of SPIE*, Orlando, Vol. 6273, 62733A. <https://doi.org/10.1117/12.670532>
- [8] Bely, P.Y. (2003) *The Design and Construction of Large Optical Telescopes*. Springer Science & Business Media, Berlin.
- [9] 王珊珊, 朱秋东, 曹根瑞. 空间拼接主镜望远镜共相位检测方法[J]. 光学学报, 2009, 29(9): 2435-2440.
- [10] Chanan, G., Troy, M., Dekens, F., *et al.* (1998) Phasing the Mirror Segments of the Keck Telescopes: The Broadband Phasing Algorithm. *Applied Optics*, **37**, 4706-4714. <https://doi.org/10.1364/AO.37.000140>

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5450, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [oe@hanspub.org](mailto:oe@hanspub.org)