

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.z1.20

# 子孔径拼接实验样机研制及共相检测方法研究进展

陈欣扬, 颜召军, 郑立新, 李可新, 张聪聪, 朱能鸿

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

**摘要:** 斐索型光干涉技术是将若干独立小口径望远镜或子孔径组成二维阵列, 利用光学干涉原理直接在像平面形成观测目标的干涉像, 并获得与单一大口径望远镜等效的空间高分辨率。子孔径拼接式是基于该技术的一种望远镜结构形式, 具有中心遮挡较小、成像终端可安装于独立光学平台的优点, 但同时存在着检测与保持离轴子镜共相性的技术难点。在研制主镜直径 500 mm 的子孔径拼接实验样机的基础上, 重点研究了两种用于子镜共相精调的平移误差检测方法: 宽光谱条纹对比度法和色散干涉法。阐述了方法的基本原理和介绍了校正结果, 最后分析了目前的远场成像情况。

**关键词:** 天文光干涉; 子孔径拼接; 共相; 条纹对比度; 色散干涉

**中图分类号:** P111.2      **文献标识码:** A

## 1 引言

斐索型天文光干涉技术是将若干独立小口径望远镜或子孔径组成二维阵列, 通过合理的基线配置以及一定的时间域和空间域观测积累, 由像平面上的干涉条纹图像中获得足够的空间频域信息, 进而重构出最接近真实天体目标的图像或者直接成像。斐索型光学干涉望远镜上的各子孔径被安装在同一个跟踪机架上, 在观测过程中无须使用光学延迟线来补偿大行程范围内的外部光程差, 只需用小行程位移器件来快速补偿因重力变形或者温度梯度变化引起的内部光程差。当前我国 4 m 以上大口径镜面研制尚处于探索阶段, 大镜面加工与检测的关键技术难点尚未完全攻克。对于空间大口径望远镜而言, 目前在建造成本、载荷重量限制等方面都有不小的挑战。斐索型光学干涉望远镜恰好弥补上述不足之处, 能够以较小口径和较少的成本获得与单一大口径望远镜相当的空间高分辨率观测结果。斐索型光学干涉望远镜主要有独立子孔径和子孔径拼接两种结构形式。前者例如已建成的 LBT<sup>[1]</sup>, 后者例如在研的 GMT<sup>[2]</sup>。独立子孔径形式是指子孔径望远镜具有各自独立的主、副镜光学系统; 子孔径拼接

资助项目: 上海天文台重大突破项目

通讯作者: 陈欣扬, xychen@shao.ac.cn

式是指望远镜主镜由各子镜单元间隔排布组成,共同使用一个完整的副镜。与独立子孔径形式相比,拼接式望远镜副镜造成的遮挡较小,转折平面镜较少,成像终端能够脱离望远镜主体,直接在独立平台上工作,减少了震动影响。

保持子孔径之间的共相性是实现干涉成像的前提条件和影响成像质量优劣的重要因素。斐索型光干涉望远镜的共相误差主要有各子孔径之间存在的平移误差(Piston)和各子孔径本身的倾斜误差(Tip/Tilt)。随着共相误差的增加,系统点扩展函数的主瓣会发生偏移和延展,并且其峰值强度下降,造成角分辨率降低,严重的共相误差可造成成像畸变和能量分布不均,乃至不能有效形成干涉。近年来,随着国际上开始启动极大口径望远镜项目,高精度共相检测技术成为一项研究热点。陆续出现了宽带夏克-哈特曼法<sup>[3]</sup>及窄带夏克-哈特曼法<sup>[4]</sup>、色散条纹法<sup>[5]</sup>等早期的共相检测方法以及诸如四棱锥法<sup>[6]</sup>、色散条纹哈特曼法<sup>[7, 8]</sup>、泽尼克相位对比度法<sup>[9]</sup>等一些新的共相检测方法。这些检测方法在捕获范围、测量精度和检测效率上各有千秋,需要根据实际情况借鉴。

基于以上研究目的,我们首先研制一台主镜直径500 mm的子孔径拼接式望远镜实验室样机,阵列排布方式与GMT类似,但子孔径分布更为稀疏,其填充因子约为0.63(GMT为0.74)。然后围绕该样机开展子镜共相误差检测方法的研究。本文首先总结500 mm子孔径拼接实验样机研制,然后阐述基于宽带光源的干涉条纹对比度测量方法、色散干涉方法如何进行平移误差的检测和实验结果,最后介绍样机经过共相校正后的实际远场成像情况。

## 2 样机研制

2014年我们开展了样机研制工作。该样机的主镜采用抛物面型,由中央1块环形子镜和四周6块均布的子镜组成。主镜直径500 mm,焦距为1 250 mm;子镜直径150 mm,环形子镜内径60 mm。面型精度均方根值(RMS)优于 $1/40\lambda$ ,峰谷值(P-V)优于 $1/6\sim 1/8\lambda$ ,子镜间距15 mm,材料为微晶玻璃。主镜机架用于安装7块分离子镜及子镜调节机构(见图1)。子镜定位调节机构是其中最关键设计,每套子镜均具备沿X、Y、Z轴平移和绕X、Y、Z轴旋转共6个自由度的调节功能。采用高强度钢丝作为子镜与定位调节机构之间的柔性联接元件,在每个子镜背面布置3个线性微位移促动器,推动钢丝改变子镜的法向位移和两维偏摆。

微位移促动器采用PI公司的N-111促动器,该促动器行程10 mm,闭环分辨率5 nm。另外还设计了一个电动旋转光阑用于选择远场成像的子镜,由步进电机和嵌入式PXI总线运动控制卡驱动控制。光源选择宽光谱超连续激光光源并配以带宽滤波器用于选择光源输出带宽,能够为共相检测提供短相干光,控制系统见图2。

主镜后端光路包括远场干涉成像、Piston误差检测(色散干涉)、Tip/Tilt误差检测三个环节。基于色散干涉法检测子镜Piston时,需要实时采集色散条纹图像,并根据条纹信号计算出Piston误差,进行Piston闭环校正。Tip/Tilt误差检测时需要实时采集远场离焦图像,根据光斑几何偏差量计算出Tip/Tilt误差,进行闭环校正。

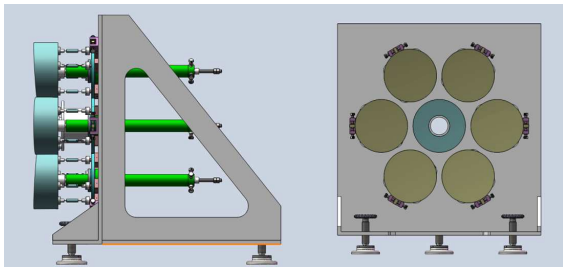


图 1 子镜机架结构

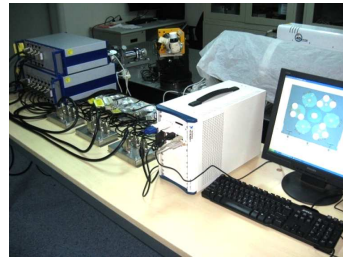


图 2 控制系统

我们采取粗、精两级方式来实现分离子镜面的共相。其中，粗共相是通过基于 4D 动态相位干涉仪的光学波前检测和机械结构调整来完成。精共相则是在粗共相基础上，利用远场条纹或色散干涉条纹信息和离焦几何偏差来校正 Piston、Tip/Tilt 共相误差项。

具有系统自准直检验功能和宽光谱成像功能的实验光路见图 3。实验第一阶段需要完成四块子镜共相拼接。首先，在 4D 干涉仪和 500 mm 口径平行光管建立起光轴基准；其次，将宽光谱光源与干涉仪调整光学同轴，利用分光镜实现宽光谱光源与干涉仪光源同时或分时输出；最后，建立系统检测光路，500 mm 直径平行光经过分离主镜和准直透镜组后变为 16 mm 直径平行光，再通过小平面镜将平行光反射回干涉仪中形成干涉检验。最终粗调后的四块子镜的波相差精度 RMS 值均优于 25 nm。

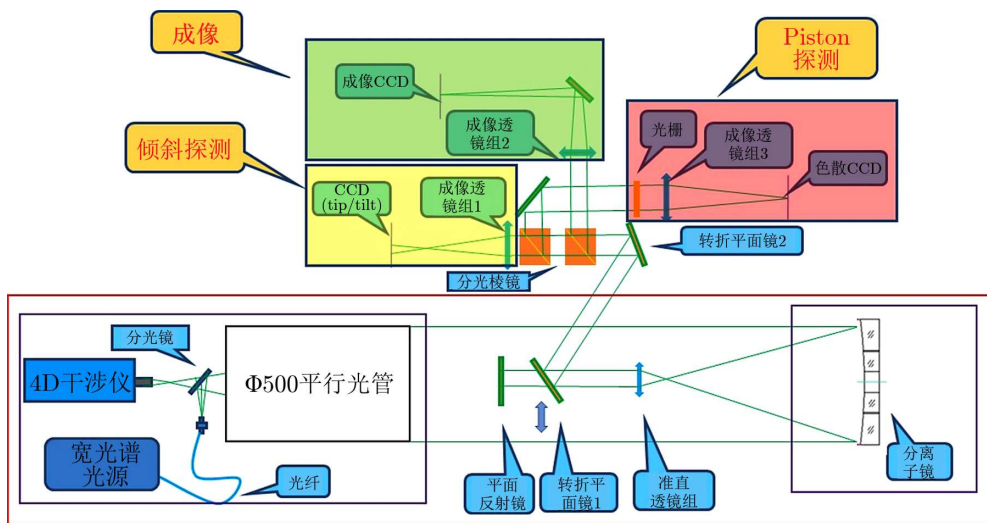


图 3 子孔径拼接实验样机光路

### 3 共相精调

经过共相粗调后，子镜之间的平移误差范围缩小到数十微米。下一步精调策略是依次对两两子镜进行共相检测和调校，并尝试采用不同的检测方法分别校正其中的平移误差项

Piston 和倾斜误差项 Tip/Tilt。

### 3.1 基于宽带光条纹对比度测量的子镜平移误差精调

短相干光源条件下的条纹像会有一个从模糊到清晰，再到模糊的过程，这实质上反映了条纹对比度从低到高，再到低的规律。条纹对比度定义为： $C = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})^{[10]}$ ，式中的  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$  分别是中央亮条纹的峰值和相邻暗区的波谷值。利用宽光谱光作为光源，在光谱光源的相干长度范围内，以步进方式改变子镜的微位移，同时记录下两子镜干涉形成条纹像的条纹对比度值；然后通过数据拟合找到对比度峰值对应的子镜位置，即为这两个子镜之间等光程位置的最佳估计。图 4 a) 和 b) 分别是步进扫描后的条纹对比度仿真和实测结果。光源中心波长取 600 nm，带宽 100 nm，扫描步长 40 nm。拟合后的测量精度 RMS 值在 80 nm 以内。

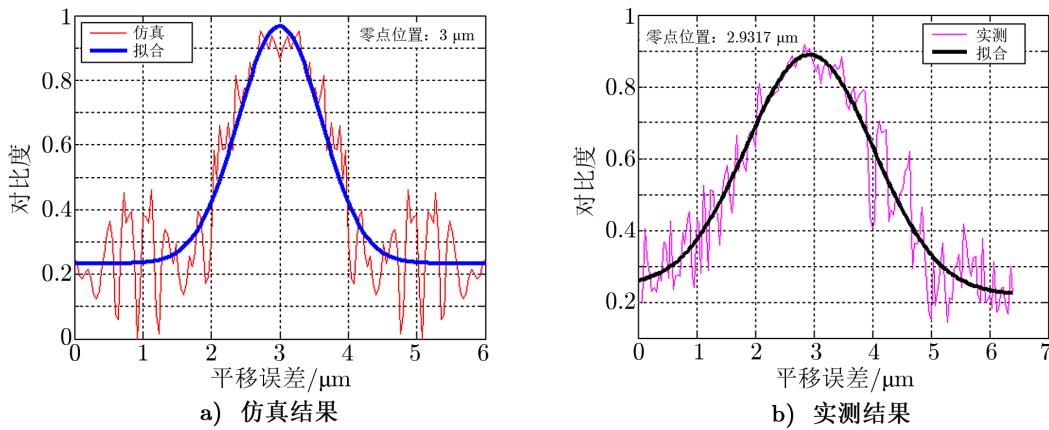


图 4 条纹对比度随子镜平移误差变化曲线

### 3.2 基于色散干涉法的子镜平移误差精调

连续光谱的宽带光源可以获得更多波长的干涉条纹信息，平移误差测量会更准确。当光程差变化时，干涉条纹的主峰峰值偏移量  $y$ 、主峰峰值和次峰峰值之间的间距  $T$  与光程差  $\delta$  之间存在如下的近似线性关系： $\delta = y \times \lambda / T^{[11]}$ 。将宽波段光形成的干涉条纹在空域上进行色散分离，分别获得不同波长的干涉条纹信息，根据条纹主峰与次峰的

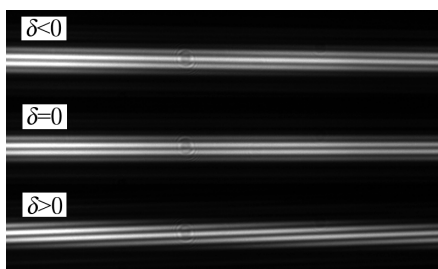


图 5 两个子镜在不同位置差时的色散条纹像

质心偏差信息来得到光程差。具体做法是准直光在离轴子镜的共同焦点处会聚，然后依次经过子镜、分光镜、光阑、透射光栅和成像透镜，在相机上形成干涉条纹。光栅的色散方向与光阑孔径的基线方向垂直。两个子镜在不同位置差时的色散条纹像如图 5 所示。由图可知，条纹方向反映出光程差的正负极性，可以比较容易判断光程差补偿方向，实施粗调。在此基础上进一步根据条纹主、次峰质心方差细调至等光程位置。目前该

方法得到的测量精度约为 20 nm。

### 3.3 子镜倾斜误差的闭环校正

常规单口径望远镜的倾斜误差检测是通过检测焦面像斑的几何偏移量来实现的, 但对于分离镜面而言, 由每个子镜形成的焦面上的像斑, 在 Tip/Tilt 校正收敛过程中, 往往相互之间会产生干扰。我们采用了离焦成像的方法, 避免了上述问题。此外, 每个子镜背后的 3 点位移促动器几何排布各不相同, 因此在进行闭环校正前需要首先进行闭环参数的标定, 确定出促动器引起的倾斜角相对于 CCD 相机靶面的投影角和比例系数。最后根据像斑的几何偏心量施加 PID 算法进行闭环校正。闭环校正后的 Tip/Tilt 残差 RMS 值约为 0.03''。

## 4 远场成像

经过上述共相误差粗调和精调后, 远场准直光经过实验样机光学系统后, 在系统焦点上得到的远场像如图 6 所示。其中图 6 a) 是仿真图像, 图 6 b) 是实际采集的图像。由图 6 a) 看出, 远场干涉像主要由 1 个中央能量主峰和周围 6 个位置对称分布的能量次峰组成。参照单口径望远镜以半高全宽 (FWHM) 作为星像质量的判据, 由仿真远场像计算出的 FWHM 约为 7.26'', 由实验远场像 (图 6 b)) 测量出的 FWHM 约为 7.87'', 两者能量分布形态以及数值都比较接近, 但也可以看出实验系统光强分布仍存在一定的不对称性, 表明系统还存在一定大小的像差, 有待进一步校正。

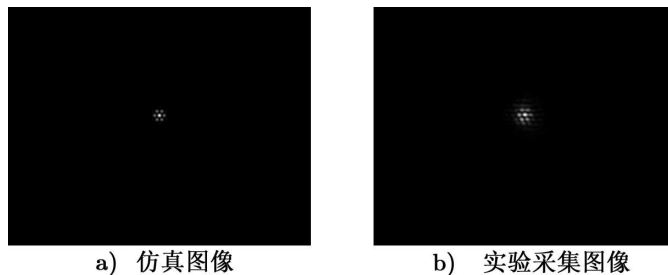


图 6 实验样机光学系统的远场像

## 5 总结

经过近两年的努力, 我们已经初步成功研制了一套由 7 块子镜组成的 500 mm 直径子孔径拼接实验样机。在第一阶段先完成了其中 4 块子镜的粗、精共相检测, 获得了清晰的远场图像, 图像的形态及 FWHM 值与理论仿真结果相近。我们计划在下一阶段完成全部子镜的共相调整, 充分检验色散干涉以及快速闭环技术来实时保持分离子镜面的精确共相, 为将来研制地面大口径斐索型光学干涉望远镜或空间光干涉望远镜项目, 探索一条日趋先进和成熟

的技术道路。

#### 参考文献:

- [1] Hill J M, Green R F, Slagle J H, et al. Proc. SPIE, 2008, 7012: 03
- [2] Johns M. Proc. SPIE, 2008, 7012: 70121B
- [3] Chanan G, Troy M, Dekens F, et al. Appl. Opt, 1998, 37(1): 140
- [4] Chanan G, Ohara C, Troy M. Appl. Opt, 2000, 39(25): 4706
- [5] Shi F, Redding D C, Lowman A E, et al. Proc. SPIE, 2003, 4850: 318
- [6] Esposito S, Pinna E, Tozzi A, et al. Proc. SPIE, 2003, 5169: 72
- [7] 张勇, 张靓, 刘根荣, 等. 光学学报, 2011, 31(1): 84
- [8] 张勇, 张靓. 中国科学院研究生院学报, 2010, 27(4): 471
- [9] Arthur V, Kjetil D, Silvio M. Appl. Opt, 2011, 50(17): 2708
- [10] 王正明. 天文光干涉. 北京: 科学出版社, 1996: 16
- [11] 颜召军, 陈欣扬, 杨朋千, 等. 物理学报, 2015, 64(14): 149501

## Progress on the Research of Segmented Sub-aperture Experiment Prototype and Co-phasing Sensing Method

CHEN Xin-yang, YAN Zhao-jun, ZHENG Li-xin,  
LI Ke-xin, ZHANG Cong-cong, ZHU Neng-hong

*(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)*

**Abstract:** Fizeau-mode optical interferometry can realize direct imaging and reach higher resolution equals to a single bigger telescope. As a kind of distinctive structure of Fizeau interferometry, segmented sub-aperture telescope has some advantages: less central obstacle and more reliable installation for instruments. Meanwhile, how to maintain co-phasing of all segmented off-axis mirrors is a huge challenge. We have designed and built a segmented sub-aperture telescope prototype with 7 small off-axis mirrors. Two co-phasing sensing method are studied and applied to this prototype. The first one is to measure fringe contrast, and the second one is to detecting dispersed fringe. Finally, we discuss the far field imaging performance of the well co-phasing telescope.

**Key words:** astronomical optical interferometry; segmented sub-aperture; co-phasing; fringe contrast; dispersed interferometry