

文章编号: 0253-2239(2009)09-2435-06

空间拼接主镜望远镜共相位检测方法

王姗姗 朱秋东 曹根瑞

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 总结了常用的共相位检测方法,分析了各种方法的特点及其用于空间望远镜在轨检测的适用性。提出了一种新的基于色散瑞利干涉原理的共相位误差检测方法和相应的干涉条纹数据处理方法——二维色散条纹分析法。介绍了色散瑞利干涉法的基本原理,给出了其检测拼接主镜望远镜共相位误差的光路图。为验证所提出的方法,搭建了一套色散瑞利干涉仪检测共相位误差的实验验证装置。初步的实验结果表明所搭建的色散瑞利干涉实验装置的量程可达到 200 μm ,多次测量值的均方根误差(重复性)优于 2 nm,共相位误差 $\delta \leq 1 \mu\text{m}$ 时,测量精度为 6.56 nm,可以满足空基分块主镜望远镜在轨共相位检测的要求。

关键词 测量;共相位检测;色散瑞利干涉;拼接镜面

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092909.2435

Cophasing Methods of Segmented Space Telescope

Wang Shanshan Zhu Qiudong Cao Genrui

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Most of the common-used methods for cophasing are summarized and their applicabilities for using in space are discussed. A novel method which is based on dispersed Rayleigh interferometry (DRI) is proposed with data processing algorithm. The basic theory of DRI is introduced and the configuration to measure cophasing error of segmented primary mirror is given. An experimental system to validate the DRI algorithm is established, preliminary results indicate that the measurement range reaches 200 μm , repeatability is better than 2 nm, and accuracy is 6.56 nm with the range of $\delta \leq 1 \mu\text{m}$, which meet the requirements of cophasing the primary mirror in the orbit.

Key words measurement; cophasing; dispersed Rayleigh interferometry; segmented mirrors

1 引 言

波长一定时,望远镜的分辨能力随主镜口径的增大而增加。随着人类对空间探测需求的不断提升,各科技强国相继提出建造超大口径望远镜的计划。但以现有技术水平,建造口径达十米甚至几十米的单一主镜望远镜,无论从镜面材料制备、加工检测、支撑结构还是造价等方面都会遇到巨大的困难。“拼接主镜”构想的提出为建造超大口径望远镜开辟了一条新的途径。1991年建成的拼接主镜望远镜 KECK I,口径接近 10 m,在红外波段达到了衍射受限的成像质量,成功地验证了“拼接主镜”的构想。此后建造和研究筹建的大型天文望远镜便大多采用

了这种拼接主镜的结构,如美国后来的 KECK II、9.2 m 的 HET、30 m 的 CELT,欧洲南方天文台的 40 m EELT,中国的 4 m LAMOST、30~100 m CFGT 等。受到地球大气的影 响,地基望远镜的分辨本领并不随口径的增大而线性提高。自适应光学技术虽然能一定程度地减小大气湍流的影响,但依现在的水平,仍然不能使 10 m 以上的超大口径光学望远镜达到或接近衍射受限的成像质量。因此,在太空中架设拼接主镜超大口径望远镜有着诱人的发展前景,是进一步提高人类空间探测能力的可行途径。美国拟用于取代哈勃望远镜的下一代空间望远镜 JWST 采用的就是拼接主镜结构^[1]。

收稿日期: 2008-11-03; 收到修改稿日期: 2009-01-04

作者简介: 王姗姗(1982—),女,博士研究生,主要从事光学干涉测量、自适应光学等方面的研究。

E-mail: lilunwuli5@bit.edu.cn

导师简介: 朱秋东(1959—),男,副教授,主要从事光学干涉测量、立体显示等方面的研究。E-mail: zqd@bit.edu.cn(通信联系人)

拼接主镜既实现了大口径系统的光学性能,又降低了镜子的重量、加工成本和周期,并且可以折叠起来发射降低发射体积,但只有当各子镜均严格共相位(误差小于几分之一甚至几十分之一波长)时,才能达到与相同口径的单镜面主镜系统相当的成像质量。拼接主镜的校正应包括对每块子镜 tip-tilt 误差的校正(alignment)和 piston 误差的校正(cophasing)两个方面。通过探测子镜远场衍射光斑的位置检测 tip-tilt 误差的技术在 S-H 传感器等应用中已十分成熟,本文不再讨论。各子镜间 piston 误差的检测,即共相位检测,是引入拼接主镜后出现的新问题,也是拼接主镜望远镜得以实际应用的核心技术问题之一。从 20 世纪 90 年代末至今,全世界范围内掀起了研究共相位检测技术的高潮,提出了多种共相位误差的检测方法。1994 年起,我国也开始了对分块主镜望远镜的成像理论、检测和校正方法的研究^[2~4]。

2 常用的共相位误差检测方法

常用的共相位误差检测方法主要分为电学检测法和光学检测法两大类。电学方法主要包括电容式、电感式和光纤式三种边缘位移传感器^[5]。其中电容式位移传感器发展最为成熟,测量范围一般有十几微米,灵敏度可高达到 1~2 nm;电感式位移传感器体积小,重量轻,测量范围通常可达到几百微米,但分辨率较低,只有 20 nm 左右;光纤传感器具有灵敏度高,抗电磁干扰等优点,但由于其对光源稳定性要求极高,目前尚处于发展阶段。电学边缘传感器已在 KECK、HET 等大型天文望远镜上得到了成功的应用。由于电学边缘传感器只能测量相邻子镜间的相对位移,不能直接测量相邻两子镜镜面沿光轴方向的绝对距离,故需要用光学的方法标定相邻子镜共相位的位置(绝对零位)。因此,电学边缘传感器通常用于光学共相位精调整后的闭环控制。1998 年中科院南京天文光学技术研究所苏定强院士的领导下建成了室内拼接主动光学实验系统,成功地用电容传感器实现了共相位的闭环控制^[2]。但对于空间拼接主镜望远镜而言,折叠、发射和再展开的过程会使相邻子镜间的间隔、边缘传感器与子镜的相对位置等因素发生变化,从而影响其绝对零位,使拼接子镜的复位精度不能满足苛刻的共相位要求。因此,必需研究能够进行绝对距离测量的在轨光学共相位检测方法。

拼接子镜沿着法线方向的位置误差造成相邻的

子镜边缘处形成微小的台阶,经不同子镜反射的子光路间光程不同,致使各子波等相位面不重合,其沿光轴方向的距离即为共相位误差(本文中其相位误差定义为波前误差,是主镜表面处台阶高度的 2 倍)。因此,光学共相位误差的检测方法也分为直接在主镜处检测相邻拼接子镜形成的台阶差和在主镜与次镜(有的还有三镜和变形镜)组成的光学系统之后,出瞳面的共轭面上检测各子波面之间的光程差两种。

2.1 测量拼接子镜边缘处的台阶高度

泰曼格林干涉仪、菲索干涉仪等常用于光学元件面形检测的干涉仪都可以和主镜直接构成自准光路,得到相邻两子镜与分别参考镜形成的干涉条纹。这两组条纹间的错位量与共相位误差的大小成正比。中科院成都光电所的宋贺仑等^[6]利用白光和单色光源切换的泰曼格林干涉仪对拼接子镜边缘台阶高度进行检测,测量范围达到了 50 μm ,不确定度为 6 nm。

光学轮廓仪采用相干光程很短的白光作为光源(VSI 工作模式),当参考反射镜与被测镜等光程时白光干涉条纹的对比度最大。随着光程差的增加,干涉条纹对比度逐渐下降。因此,白光干涉条纹相当于一个光探针,通过寻找干涉条纹的对比度最大的位置即可定位被测面^[7]。镜头沿垂直于被测面的方向进行扫描时,白光探针将分别定位在相邻的两块拼接子镜上,两次定位之间走过的距离即为边缘台阶高度,进而可计算出两子镜间的共相位误差。它的测量精度为 0.5%,量程可达 1 mm 以上。

通过直接测量拼接子镜边缘台阶高度检测共相位误差的方法相对比较成熟,在地基拼接主镜望远镜装调过程中也得到了成功的应用。该方法测量精度高,量程大,且有商品化的仪器出售。但这种方式中,测量仪器往往比较复杂,体积大,有的还需要进行机械扫描,并且与主镜直接构成自准光路会遮挡望远镜的成像光路。因此直接测量拼接子镜边缘台阶高度的方法不能在望远镜的工作状态下进行测量,故不适合用于空基拼接主镜望远镜的在轨检测。

2.2 测量子光路间光程差

为了能够在望远镜的工作状态下直接检测各拼接子镜之间的共相位误差,近年提出了多种基于无穷远信标的,在望远镜成像系统之后检测各子光路间光程差的方法。按照信号采集的位置不同,可以分成瞳面检测、近离焦面检测和焦面检测三种。

通过出瞳面或其共轭面的光强分布检测共相位误差的方法目前主要是金字塔波前传感器(Pyramid Sensor)法,欧洲南方天文台(ESO)在这方面做了大量

的理论分析和实验^[8]。共相位误差很小时,金字塔波前传感器的信号与 $\sin(2\pi\delta/\lambda)$ 成正比,通过探测垂直于拼接子镜边缘方向的 PS 信号,即可求得共相位误差 δ 。该方法的精度很高,在 William Herschel Telescope 上进行的实验中,piston 的测量精度达到了 5.7 nm,但量程仅为一个波长。

近离焦面检测法主要包括曲率传感法(Curvature Sensing)和相位恢复法(Phase Retrieval,或相位变更法 Phase Diversity)两种。Gray 等^[9]在曲率传感法方面做了大量的工作,他们指出,共相位误差在 $\lambda/8$ 以内时各拼接子镜对应区域焦前焦后光强分布的差异(信号)与共相位误差之间存在良好的线性关系。利用信号与样板图样之间的相关性,即可求得各拼接子镜的共相位误差。曲率传感法在 KECK 望远镜上的测量范围为 $0.4 \mu\text{m}$,测量精度为 40 nm。相位恢复法是通过焦面和多个近离焦面的光强分布信息利用最优化方法迭代求得出瞳面上的波像差的方法^[10,11]。Jet Propulsion Laboratory 在 WCT-2 上进行的实验结果表明,相位恢复法的波前共相位误差测量精度优于 15 nm(使用 PSF magnifier),测量范围为 $\pm\lambda/2$ (使用两个波长测量约可扩大 1 倍)。近离焦面检测法的精度都很高,但测量范围都很小,一般都在一个波长以内。近离焦面检测法需要多个离焦面和焦面的光强分布,因此需要利用分光使用多个相机接收不同离焦面和焦面上的图像或多次精确地移动探测器。

通过焦面光强分布探测共相位误差是目前最为主流的方法,其中又以美国加州大学的 Gary Chanan 等针对 KECK 望远镜提出的宽带(BSH)、窄带(NSH)夏克-哈特曼法和美国加州理工大学 JPL 实验室的 Fang Shi 等针对下一代空间望远镜 JWST 提出的色散条纹法(DFS)最为引人注目。

1) 宽带夏克-哈特曼法(BSH)^[12]

1998 年 Gary Chanan 提出了 Broadband Shack-Hartmann(BSH)法,该方法是传统的夏克-哈特曼波前传感器在物理光学领域的拓展应用。与 S-H 传感器相同,BSH 探测宽带光源经两子孔径衍射-干涉后在焦面形成的光强分布,但所关心的不再是像斑的质心,而是像斑与“样板图像”之间的相关系数。

若光源的相干长度为 L ,为标定零共相位对应可调子镜的位置,令可调镜在以当前位置为中心, $\pm L$ 的范围内,以 $L/5$ 为步长移动,得到 1 组 11 张衍射光斑图样,如图 1 所示分别计算这 11 张光斑与样板图样间的相关系数,并做高斯曲线拟合,即可得到如图 2^[12] 所示的曲线,其中中心波长 891 nm,带宽

10 nm,曲线峰值位置即为边缘台阶高度 Δ (Δ 为共相位误差 δ 的 0.5 倍)。

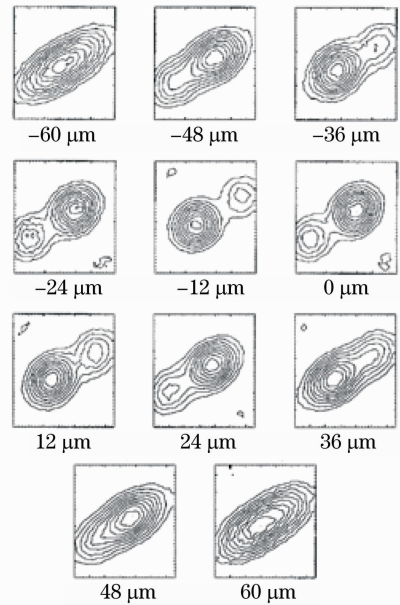


图 1 宽带夏克-哈特曼法衍射光斑图样

Fig. 1 Typical BSH sequence of CCD subimages

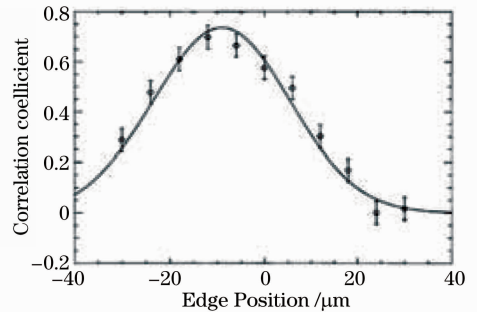


图 2 拼接子镜边缘位置与相关系数的关系曲线

Fig. 2 Typical curves of Correlation coefficient versus edge position

宽带夏克-哈特曼法(BSH)中,不同带宽滤光片的相干长度不同,对应共相位误差测量的量程和精度也不相同,当带宽 $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 10 \text{ nm}$ 时,波前测量范围为可达 $\pm 60 \mu\text{m}$,精度为 $2 \mu\text{m}$;当带宽增加到 $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 200 \text{ nm}$ 时,测量范围仅为 $\pm 2 \mu\text{m}$,精度为 60 nm。根据不同测量范围和精度的要求,可选择不同带宽的滤光片。为标定零共相位的位置,可调镜需进行高精度扫描。采集到的图像与样板图像进行相关运算,计算量很大,并且对于一些成像质量要求较高的情况,60 nm 的共相位误差测量精度也稍显不足。

2) 窄带夏克-哈特曼法(NSH)^[13]

为提高测量精度,简化操作与运算,2000 年 Gary Chanan 等又提出了 Narrow Shack-Hartmann (NSH)

法。当光源的带宽窄到可视为单色或准单色时,光斑光强分布与共相位误差 Δ 之间的关系可简化为 $I(\mathbf{K};\Delta) = [\cos\Delta\hat{f}(\mathbf{K};0) + \sin\Delta\hat{f}(\mathbf{K};\pi, 2)]^2$, (1) 式中 $\hat{f}(\mathbf{K};\Delta)$ 为光瞳函数的傅里叶变换, \mathbf{K} 为焦面上坐标位置向量。

将采集到的光斑分别与图 3^[13] 中的 11 个样板图样做相关运算,共相位误差值即位于相关系数最高的两个样板对应的光程差之间。通过对相关系数进行插值可以得到更精确的共相位误差值。该方法测量时间短,仅需一次曝光,且不需要移动探测器,测量精度高达 12 nm。但由于 2π 不定性问题,其测量范围很小,仅为 ± 200 nm。

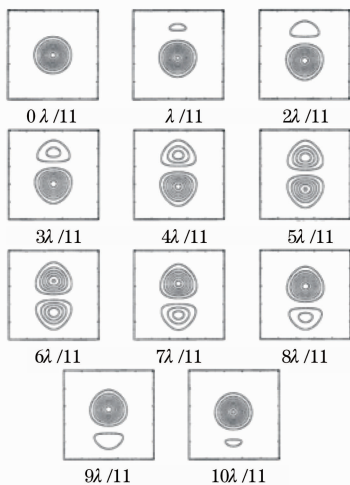


图 3 不同共相位误差状态下窄带夏克-哈特曼法的样板图样
Fig. 3 NSH templates with different piston errors

3) 色散条纹法 (DFS)^[1,14]

对于空基望远镜的共相位检测,希望能有一种简单便捷的方法同时满足大量程和高精度的检测要求。在下一代空间望远镜 JWST 计划的推动下,1998 年加州理工大学 JPL 实验室的 Fang Shi 等在检测光路中引入色散原件——棱栅 (grism, 一种棱镜和光栅复合而成的色散原件),提出了色散条纹法 (Dispersed fringe sensing, DFS)。

设色散方向为 x , grism 的色散函数为 $D(x)$, 则焦平面上的光强分布 $I(x, y)$ 为

$$I(x, y) = I_0 \left\{ 1 + \gamma \cdot \cos \left[2\pi \cdot \frac{\delta}{D(x)} + \varphi_0(y) \right] \right\}, \quad (2)$$

其中 γ 为条纹对比度, $\varphi_0(y)$ 为与 y 有关的常数初相位, δ 为波前共相位误差。若色散原件的色散函数 $D(x)$ 满足与波长 λ 成反比的关系,即 $D(x) = C_0/\lambda$, 则色散条纹沿 x 方向成余弦规律变化,探测色散条纹的周期,即可得到共相位误差 δ 。但实际采用的

色散元件棱栅的色散函数无法满足这种要求,它的色散函数近似与波长成正比,即 $D(x) = \lambda_0 + C_0 \cdot \lambda$, 此时不同波长处色散条纹的周期不再相同,只能通过最小二乘法对某一行的光强信号进行拟合,得到 I_0 , γ , $\varphi_0(y)$ 和共相位误差 δ 这四个参数。仿真计算和在 WCT 上实验的结果表明该方法的测量范围大,可接近波动焦深的大小,测量精度优于 $0.1 \mu\text{m}$ ^[14]。操作方便,仅需一次曝光,且计算量小于前述的 BHS 和 NHS,适合于空基望远镜在轨检测使用。但该方法由于需要对色散方向的光强分布进行准余弦拟合,而当共相位误差较小时,条纹不足半个周期,极大值和极小值不能同时出现,拟合的精度会受到明显影响,该方法失效。

针对 DFS 方法在小共相位误差时失效和精度仍不能满足精共相位精测需要这两个问题,提出了一种新的共相位误差检测方法——色散瑞利干涉法。

3 色散瑞利干涉法 (DRI)

色散瑞利干涉法 (Dispersed Rayleigh interferometry) 是用色散瑞利干涉仪^[15]检测两平行光路间光程差的方法,其用于检测拼接子镜共相位误差的光路如图 4 所示,中心镜为参考基准固定不动,边缘的拼接子镜为可调镜。

无穷远点目标 (自然星) 发出的光波入射到望远镜上,经过拼接主镜反射后,不同拼接子镜反射的子光束携带了主镜的共相位误差信息。色散瑞利干涉仪检测光路位于望远镜系统的卡塞格林焦点之后。准直透镜将各子光束准直为平行光。光阑位于望远镜出瞳的共轭面上,两采样孔中心距 c 。设两孔中心连线方向为基线方向,色散棱镜将入射光波沿垂直于基线的方向进行色散。经过聚焦透镜后,不同波长光线的焦点位置沿 x 方向展开,列坐标与波长的对应关系为 $x(\lambda)$ 。CCD 靶面上形成的色散瑞利干涉条纹 (DRIP),如图 5(b) 所示,其光强分布表示为

$$I(x, y) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} 2S(\lambda) B^2 \left[\frac{x - x(\lambda)}{\lambda f}, \frac{y}{\lambda f} \right] \cdot \left\{ 1 + \cos \left[2\pi \left(\frac{\delta}{\lambda} + cy \right) \right] \right\} d\lambda, \quad (3)$$

其中 x, y 为焦面坐标系, f 为聚焦透镜焦距, δ 为两束光之间的光程差, $B[x/(\lambda f), y/(\lambda f)]$ 为光阑上开孔形状的傅里叶变换。在色散较大时,色散瑞利干涉条纹的每一列都可视为相应波长的准单色瑞利干涉条纹,其光强分布是受采样孔径的点扩散函数

$2B^2[x/(\lambda f), y/(\lambda f)]$ 调幅的余弦条纹, 如图 5(a) 所示。当两光束间的光程差为零时, 干涉条纹位于包络正中间; 随着光程差的增大, 干涉条纹主峰的位置

在 y 方向上发生平移, 移动量 y_0 与光程差成正比。通过测定瑞利干涉条纹的主峰位置即可确定两光路之间的光程差。

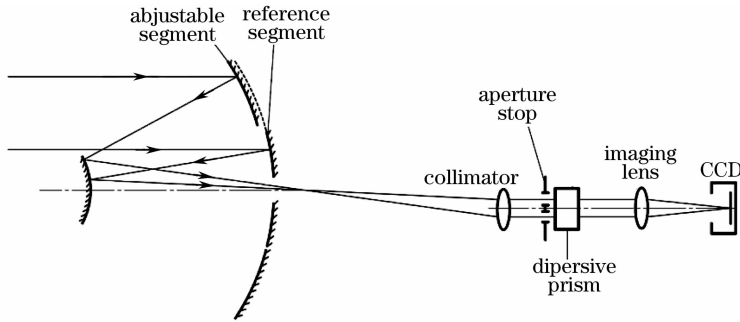


图 4 色散瑞利干涉仪检测拼接子镜共相位误差光路

Fig. 4 Configuration of cophasing segmented mirrors using DRI



图 5 仿真计算的色散瑞利干涉条纹及其一维光强分布 (a) 列方向光强分布; (b) 色散瑞利干涉条纹理论光强分布

Fig. 5 Theoretical DRIP and intensity distribution along y axis (a) Intensity distribution of DRIP; (b) Intensity distribution along y axis

当光程差超出 $(-\lambda/2, \lambda/2]$ 范围时, 准单色瑞利干涉条纹的光强分布将周期性变化, 即存在 2π 不定性问题, 用单一波长的信息只能测量共相位误差中不足一个波长的部分 δ_d 。

$$\delta = \delta_i + \delta_d, \quad (4)$$

式中 δ_i 为共相位误差的整数部分, $\delta_i = 2k\lambda$, k 为干涉级次, 为整数; δ_d 为共相位误差的小数部分, $\delta_d \in (-\lambda/2, \lambda/2]$ 。

针对色散瑞利干涉条纹, 提出了一种二维色散条纹处理方法, 如图 6 所示。先由相隔较远两个波长 λ_1, λ_2 的小数共相位误差粗略求出各个波长的干涉级次, 而后利用每个波长的干涉级次 k 和小数共相位误差 δ_d 计算共相位误差 δ , 最后对各个波长的计算值取平均得到精确的共相位误差的测量值。

为验证提出的色散瑞利干涉原理和二维色散条纹处理方法, 搭建了一套色散瑞利干涉法检测拼接子镜共相位误差的实验装置。该装置用透射式相位板的旋转产生光程差, 模拟拼接主镜产生的共相位误差。聚焦透镜 $f=180$ mm, 波段范围为 $500\sim 650$ nm, CCD 像元数为 1280×1024 。装置照片及采集到的色散瑞利干涉条纹如图 6 所示。

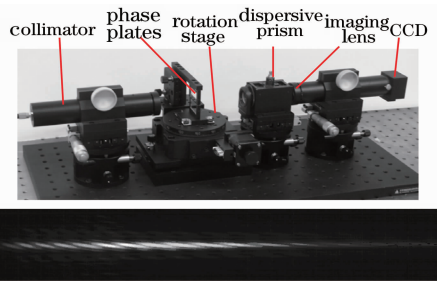


图 6 色散瑞利干涉法检测拼接子镜共相位误差的实验装置照片及色散瑞利干涉条纹

Fig. 6 Photograph of cophasing experiment breadboard using DRI and typical DRIP with large piston error

初步的实验结果表明所搭建的色散瑞利干涉实验装置的量程可达到 $200\ \mu\text{m}$, 多次测量值的均方根误差 (RMS) 优于 $2\ \text{nm}$, 共相位误差 $\delta \leq 1\ \mu\text{m}$ 时, 测量精度为 $6.56\ \text{nm}$ 。

4 各种共相位检测方法的比较

在轨共相位检测技术是下一代大口径空间望远镜的核心技术之一。与在地面进行共相位检测相比, 空基望远镜在轨共相位检测有许多苛刻的要求, 如: 空间的超低温与真空等环境要求尽量避免零部

件的移动和转动;测量周期要短;为保证在空间粒子辐射条件下计算的可靠性,要求数据处理不能过于复杂;飞行器有效载荷决定了检测装置要体积小,重量轻,最好只使用一种方法就能完成测量,而无需分为粗、精测两段;主镜在轨展开后的定位精度大约为

几十微米^[1],因此,该方法的测量范围至少也应达到几十微米,测量精度为几十分之一波长的水平。按照上述的要求,我们对前述的各种通过子波光程差检测共相位的方法进行了比较,如表 1 所示。

表 1 各种通过光程差测量拼接主镜共相位误差的方法比较

Table 1 Comparison of cophasing methods based on OPD measurement

	Capture range	Accuracy	Data processing	Moving element
Pyramid sensor	1λ	5.7 nm	Simple	Without
Curvature sensing	$0.4\ \mu\text{m}$	40 nm	Average	Detector Detector
Phase retrieval (phase diversity)	$\pm\lambda/2$	15 nm	Complex	(or several detectors to avoid moving)
Broadband Shack-Hartmann	$\pm 60\ \mu\text{m}^{\text{①}}$	$2\ \mu\text{m}$	Complex	Segments scanning
Narrowband Shack-Hartmann	$\pm 200\ \text{nm}$	12 nm	Average	Without
Dispersed Fringe Sensing	1DOV ^②	100 nm	Average	Without
Dispersed Rayleigh interferometry	$\pm 200\ \mu\text{m}$	$6.56\ \text{nm}^{\text{③}}$	Simple	Without

notation: ①. central wavelength: 891 nm; bandwidth: 10 nm; ②. $1\ \text{DOV} \approx \pm 50\ \mu\text{m}$; ③. $\delta \leq 1\ \mu\text{m}$ 。

5 结 论

文中提出的色散瑞利干涉法在测量范围、精度(重复性)等方面都符合拼接主镜望远镜在轨展开后共相位检测的要求,有望实现共相位误差粗测与精测的统一。该方法仅在望远镜成像光路后加入色散原件和探测器,测量装置体积小,重量轻,没有运动的零部件;仅需一次曝光即可测得共相位误差,测量周期短,数据计算量小,各方面的性能都符合空间使用的要求。有望实际应用于空间拼接主镜望远镜使用的在轨共相位误差检测。

参 考 文 献

- David Redding, Scott Basinger, Andrew E. Lowman *et al.*. Wavefront sensing and control for a next generation space telescope [C]. *SPIE*, 1998, **3356**: 758~772
- Dingqiang Su, Weiyao Zou, Zhenchao Zhang *et al.*. Experiment system of segmented-mirror active optics [C]. *SPIE*, 2000, **4003**: 417~425
- Long Weijun, Wang Zhile, Zhou Yanping, Imaging analysis and computer simulation of optical synthetic aperture telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1009~1014
龙伟军,王治乐,周彦平. 光学综合孔径望远镜成像分析及计算机仿真[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1009~1014
- Dong Bing, Yu Xin. Onorbit position error correction of segmented primary mirror of High-resolution space telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 55~59
董冰,俞信. 高分辨率空间望远镜分块主镜位置误差的在轨校正[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 55~59
- Xu Lei. Electronical Methods of cophasing in synthetic aperture system [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008.

- 徐雷. 合成孔径成像中的共相位误差电学检测方法的研究[D]. 北京:北京理工大学, 2008.
- Helun Song, Hao Xian, Wenhan Jiang *et al.*. Design of a white-light interferometric measuring system for Cophasing the primary mirror segments of the next generation of groundbased telescope [C]. *SPIE*, 2007, **6721**: 67210D
- Akira Hirabayashi, Hidemitsu Ogawa, Katsuichi Kitagawa. Fast surface profiler by white-light interferometry by use of a new algorithm based on sampling theory [J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(23): 4876~4883
- S. Esposito, E. Pinna, A. Tozzi *et al.*. Co-Phasing of segmented mirrors using the pyramid sensor [C]. *SPIE*, 2003, **5169**: 72~78
- Gary Chanan, Mitchell Troy, Edwin Sirko. Phase discontinuity sensing: a method for phasing segmented mirrors in the infrared [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(4): 704~713
- Catherine M. Ohara, David C. Redding, Fang Shi *et al.*. PSF monitoring and in-focus wavefront control for NGST [C]. *SPIE*, 2003, **4850**: 416~427
- Richard L. Kendrick, D. S. Acton, A. L. Duncan. Phase-diversity wave-front sensor for imaging systems [J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(27): 6533~6546
- Gary Chanan, Mitchell Troy, Frank Dekens *et al.*. Phasing the mirror segments of the Keck telescopes: the broadband phasing algorithm [J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(1): 140~155
- Gary Chanan, Catherine Ohara, Mitchell Troy. Phasing the mirror segments of the Keck telescopes II: the narrow-band phasing algorithm [J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(25): 4706~4714
- Fang Shi, David C. Redding, Andrew E. Lowman *et al.*. Segmented mirror coarse phasing with a dispersed fringe sensor: experiment on NGST's wavefront control testbed [C]. *SPIE*, 2003, **4850**: 318~328
- Shanshan Wang, Quidong Zhu, Genrui Cao. Dispersed Rayleigh interferometer [C]. *SPIE*, 2009, **7283**: 72833G