

基于色散条纹传感技术的拼接镜共相方法

孟玉凰^{1,2} 徐抒岩¹ 许博谦¹

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 100049

摘要 针对拼接型望远镜共相难的问题, 提出了一种基于色散条纹传感技术的共相误差检测方法。根据色散条纹传感技术的探测原理, 给出了色散条纹传感器的光学成像模型, 并利用计算机进行模拟研究。为解决色散条纹检测技术在接近共相时失效的问题, 提出一种辅助检测方案, 即色散哈特曼检测法, 并通过仿真验证了该方法的可行性。结合两种方法, 色散条纹传感器在可见光范围内能准确检测 $\pm 60 \mu\text{m}$ 以下的活塞误差, 检测精度可达 $\lambda/10$ 。同时, 对一系列影响检测精度的因素进行了定量分析, 提出了条纹开窗、多路采集、提高波长标定精度等解决方法, 还针对算法提出新的改进方案, 降低了标定误差影响。结果表明, 该方法可以有效地完成对活塞误差的大量程、无盲区、高精度检测, 在空间和地基拼接型望远镜的粗共相标定和相位控制领域有广阔的应用前景。

关键词 成像系统; 共相检测; 色散条纹传感器; 拼接镜; 活塞误差

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0911006

Method of Segmented Mirror Co-Phasing Based on Dispersed Fringe Sensing Technology

Meng Yuhuang^{1,2} Xu Shuyan¹ Xu Boqian¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Aimed at the difficult problem of segmented telescope co-phasing, a method of co-phasing error measurement based on dispersed fringe sensing technology is proposed. According to the detecting principle of the dispersed fringe sensing technology, an optical imaging model of dispersed fringe sensor is introduced. The simulation study is carried out on the computer. An auxiliary scheme called dispersed Hartmann measurement is brought out to solve the problem that dispersed fringe sensing algorithm loses efficiency under the near co-phasing condition. Simulations are also made to verify the feasibility of this method. By combining the two methods, dispersed fringe sensor can detect piston error under the range of $\pm 60 \mu\text{m}$ in the visible waveband, and the detecting accuracy can achieve $\lambda/10$. Besides, the impacts of various factors on the detection accuracy have been analyzed in quantity. And solutions such as the fringe windowing, multi-trace and enhancing wavelength calibration accuracy are put forward to improve the dispersed fringe sensing technology performance. An advanced algorithm is also presented to make the method less sensitive to calibration errors. The results show that the proposed method can effectively detect piston error with high precision, no blind area and extremely wide range. It can be widely applied in the coarse co-phasing calibration and phasing control for space and ground based segmented mirror telescopes.

Key words imaging systems; co-phasing measurement; dispersed fringe sensor; segmented mirror; piston error

OCIS codes 110.6770; 110.1080; 010.7350; 120.4820; 120.5050

收稿日期: 2016-03-29; 收到修改稿日期: 2016-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(61205143)

作者简介: 孟玉凰(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事拼接型大口径成像系统主动光学波前传感方面的研究。

E-mail: mural521@163.com

导师简介: 徐抒岩(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间大口径光学望远镜和光学系统空间在轨组装方面的研究。E-mail: xusy@ciomp.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

为了追求更高的分辨率,空间成像光学系统的发展趋势是增大望远镜的口径^[1]。20世纪70年代,人们突破了传统的全口径光学系统设计理念,采用子孔径拼接法,在有效减小质量和造价的同时,保证了系统的成像质量,为制造大口径空间望远镜指出了新方向。迄今为止,世界上已经有许多拼接式望远镜投入使用。比如,国外的 Keck I^[2]、Keck II 望远镜^[3]、James Webb 望远镜(JWST)^[4]、南非大望远镜(SALT)^[5]和国内的大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST)^[6]。采用拼接式主镜,与单块整镜相比,面临一系列技术挑战,其中最困难也最为关键的是拼接子镜之间的共相误差检测。如果子镜之间存在活塞误差或倾斜误差,就会导致系统成像质量大幅下降^[7]。所以,要按照“由粗到精、逐步收敛”的原则,逐步实施波前探测,依次分为:粗共焦、精共焦、粗共相和精共相4个步骤,使各个子镜达到光学上的共焦共相。共焦后的活塞误差大小远远超过了精共相的测量范围,所以需要粗共相来探测大的活塞误差。

目前,国内外已提出了多种检测活塞误差的方法^[8-9]。例如,已成功应用于 Keck 望远镜的衍射法,通过采集每2个相邻子镜单元拼接区域的衍射图样,根据模板匹配来获得子镜间的活塞误差^[10];四棱锥检测法,根据4个出瞳像点上的能量差值和子镜之间活塞误差的函数关系来检测活塞误差^[11];相位差法,利用在焦面和离焦位置上同时采集的1对图像,通过图像强度分布重构波前相位,从而直接探测分离光瞳之间的活塞误差^[12];曲率传感法,通过测量子镜边缘的相位不连续性来重构子镜之间的活塞误差^[13]。

色散条纹传感技术(DFS),是美国在研制 James Webb 空间望远镜^[14]时,提出的一种新型活塞误差检测技术。最突出的特点是采用了非单色光作为光源,利用长基线干涉来消除 2π 不确定性,大大扩展了检测范围^[15]。美国国家航空和宇宙航行局(NASA)和喷气推进实验室(JPL)通过大量模拟研究验证了理论推导的结论,又在波前控制实验平台上开展验证实验,最后在 Keck 望远镜上对传感器的性能进行了全面测试,证明色散条纹传感器能够快速准确地测量从几微米到数十微米的活塞误差^[16]。相比于上述其他检测技术,具有操作方便、自动化程度高、体积小、成本低、量程大、抗干扰能力强等优点,尤其适用于空间望远镜在轨检测^[17]。国内在 DFS 方面起步较晚,在理论研究与工程化应用上与国外仍有较大差距,故该技术仍需投入大量的研究才能与国际水平接轨^[18-19]。

本文建立了光学成像模型,并对整个检测流程进行了模拟研究。针对 DFS 对波长以内活塞误差检测的局限性,提出了色散哈特曼检测法(DHS),把2者有机结合,填补了检测范围上的空缺,实现了无盲区测量。定量分析了活塞误差大小、色散方向与子镜拼缝之间夹角、条纹对比度和信号中心列提取的不确定性等因素对检测精度和算法稳定性的影响,提出了用条纹开窗的方法解决活塞误差过大导致对比度下降的问题。同时,对采集信号列的2类偏移造成的检测误差进行分析,提出了多路采集的解决方案,并改进了 DFS 算法,在不加入其他辅助校正措施的前提下,使其对微小标定误差有一定的抵抗能力。全方位验证了色散条纹检测法的可行性,完善了检测算法,扩大了检测范围,提高了检测精度,增强了抗干扰能力。在一定程度上,为 DFS 在大口径拼接型空间望远镜在轨检测中的应用提供了保证。

2 基本原理

色散条纹检测法以双孔衍射检测原理为基础,物面上是1个双半圆子镜拼接孔径,如图1所示。采用非单色光源,对于不同波长的光,当相邻子镜之间存在一定透射光程差时,会产生不同的相位差,衍射光斑能量极大值的位置对应不同的坐标偏移量^[20]。图2是当光程差间隔为 $\lambda/8$ 时的孔径衍射花样,通过棱栅的色散作用,沿着色散方向不同波长的光的衍射斑分散开,光强非相干叠加,最后在像面位置形成干涉条纹。条纹上的光强信息作为检测信号,其中包含了待测活塞误差的信息,可通过对条纹进行分析处理,计算出活塞误差值^[21]。

色散条纹传感器是利用在成像 CCD 前放置的透射棱栅作为色散元件,根据波长分散宽光束,在 CCD 上形成光谱,使光束沿着色散方向 x 随波长的不同而线性偏斜:

$$\lambda(x) = \lambda_0 + \frac{\partial \lambda}{\partial x} x = \lambda_0 + C_0 x, \quad (1)$$

式中, λ_0 是中心波长, C_0 是线性色散率倒数,取决于棱栅特性。假设由2个子镜拼接构成的孔径函数可表示为:

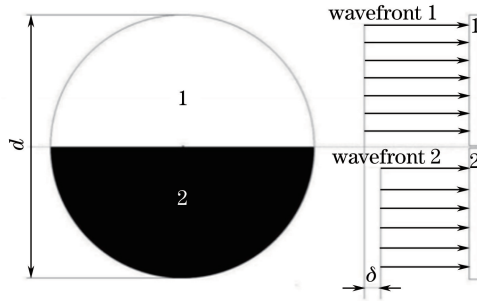


图 1 双半圆孔衍射模型

Fig. 1 Model of double hemisphere diffraction

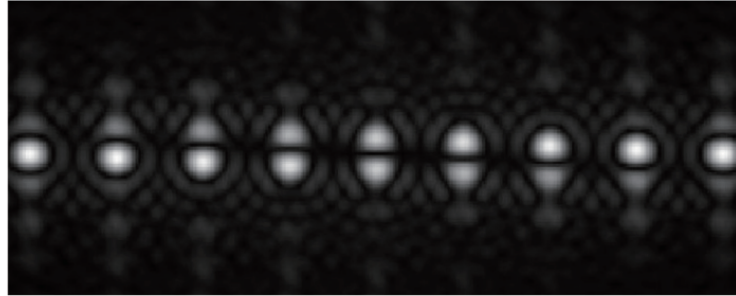


图 2 不同相位差的双半圆孔衍射花样

Fig. 2 Double hemisphere diffraction pattern with various phase differences

$$p(u, v) = m_1(\lambda Fu, \lambda Fv) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} \varphi_1\right) + m_2(\lambda Fu, \lambda Fv) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} \varphi_2\right), \quad (2)$$

式中, m_1 和 m_2 为振幅, φ_1 和 φ_2 为相对相位, F 为 F 数, λ 为波长, (u, v) 为衍射孔径所在物面的坐标。为了简化问题, 假设 2 衍射孔径面积相等, 且平分活塞误差 δ , 即 $\varphi_1 = -\delta/2, \varphi_2 = +\delta/2$ 。

令 2 个拼接子孔径在 v 方向上相距 $2v_0$, 对孔径函数 $p(u, v)$ 做傅里叶变换得到拼接孔径在单色光照射下的夫琅禾费远场光强分布^[22]如下式所示:

$$I(x, y, \lambda) = \frac{2}{(\lambda F)^2} \left| M\left(\frac{x}{\lambda F}, \frac{y}{\lambda F}\right) \right|^2 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \delta + 2\pi v_0 y\right) \right], \quad (3)$$

式中, M 是孔径函数 $m_i(u, v)$ ($i=1, 2$) 的调制传递函数。对于宽带光源, 像面上的光强分布在光谱范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ ($\lambda_1 < \lambda_2$) 内对 λ 作积分运算, 有:

$$I(x, y) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2}{(\lambda F)^2} \left| M\left(\frac{x}{\lambda F}, \frac{y}{\lambda F}\right) \right|^2 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \delta + 2\pi v_0 y\right) \right] d\lambda. \quad (4)$$

然而, (4) 式形式较复杂, 不适合用于条纹的表达和分析。考虑到函数 M 受波长 λ 的影响很小, 可作为常数处理, 则 (4) 式可以简化为:

$$I(x, y) = I_0 \left\{ 1 + \gamma \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda(x)} \delta + \varphi(y)\right] \right\}, \quad (5)$$

$I(x, y)$ 表示像面上的宽带光干涉条纹的光强分布情况, I_0 为平均光强, γ 为条纹对比度, $\varphi(y)$ 为相位常数, 取决于所选取条纹在垂直色散方向 (y 方向) 上的位置, 提取中央条纹 ($y=0$) 时, $\varphi(0)=0$ 。(5) 式表明了光强 $I(x, y)$ 与活塞误差 δ 的对应关系。利用 CCD 在像面上收集光强分布信息, 并从图像数据上提取检测信号, 再用最小二乘法拟合光强分布曲线, 就能获得活塞误差值。

3 仿真研究

为验证色散条纹检测方法对拼接镜活塞误差探测的有效性和可行性, 利用 Matlab 软件通过数值模拟的方法, 对整个检测流程进行仿真研究。首先从 DFS 基本原理出发, 建立双子镜拼接孔径模型, 通过傅里叶变

换模拟孔径的夫琅禾费远场衍射图样,再通过平移变换,模拟棱栅的色散功能,把不同波长的衍射斑色散开来,最终在像面上形成色散条纹。通过研究 DFS 条纹的特征,发现条纹随活塞误差的变化规律,从条纹上提取检测信号,根据 DFS 光强分布的(5)式,采用最小二乘法对检测信号进行拟合,求出方程中的 4 个参数 I_0 、 γ 、 δ 、 $\varphi(y)$ 。最后,把检测值与真值进行比较,验证 DFS 算法的有效性。

3.1 DFS 条纹的模拟

在仿真研究中,采用的光源波段覆盖范围为 $0.5\sim 0.75\ \mu\text{m}$,中心波长 $\lambda_0=0.625\ \mu\text{m}$ 。当存在活塞误差时,不同波长光的衍射花样发生交替变化,形成亮暗条纹。图 3 给出了当活塞分别为 ± 5 、 ± 10 、 ± 20 、 $\pm 40\ \mu\text{m}$ 时的 DFS 条纹仿真图。由(5)式可知,当像面上点 (x, y) 满足 $2\pi\delta/\lambda(x) + \varphi(y) = 2n\pi$ (n 为整数)时,条纹的光强 $I(x, y)$ 取极大值;当像面上点 (x, y) 满足 $2\pi\delta/\lambda(x) + \varphi(y) = (2n + 1)\pi$ (n 为整数)时, $I(x, y)$ 取极小值。

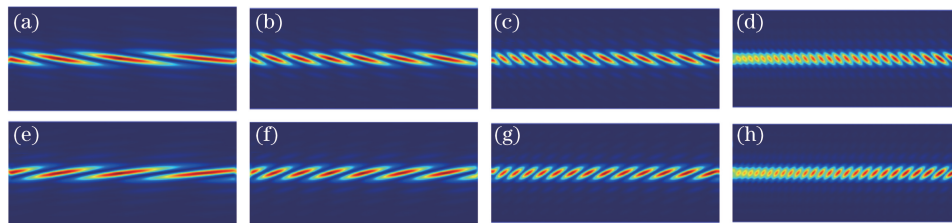


图 3 活塞误差的仿真 DFS 条纹图。(a) $5\ \mu\text{m}$; (b) $10\ \mu\text{m}$; (c) $20\ \mu\text{m}$;
(d) $40\ \mu\text{m}$; (e) $-5\ \mu\text{m}$; (f) $-10\ \mu\text{m}$; (g) $-20\ \mu\text{m}$; (h) $-40\ \mu\text{m}$

Fig. 3 Simulated DFS fringe images with different piston errors. (a) $5\ \mu\text{m}$; (b) $10\ \mu\text{m}$; (c) $20\ \mu\text{m}$;
(d) $40\ \mu\text{m}$; (e) $-5\ \mu\text{m}$; (f) $-10\ \mu\text{m}$; (g) $-20\ \mu\text{m}$; (h) $-40\ \mu\text{m}$

比较发现,活塞误差越大,条纹越密集,即条纹的空间频率越高;活塞误差的符号不同,条纹的倾斜方向相反。这与理论原理也是相符的。因此,可根据条纹的空间频率估算活塞误差值的大小,由条纹的倾斜方向判断活塞误差值的符号。

3.2 检测信号的采集与处理

为了精确检测活塞误差值,通常在条纹中心沿着色散方向提取检测信号,如图 4 所示(虚线为采样位置),得到高信噪比的数据,再根据(5)式用最小二乘法拟合数据,就能得到活塞误差的检测值。图 5 是对活塞误差为 $10\ \mu\text{m}$ 的 DFS 信号的拟合曲线,拟合计算结果为 $\delta=10.012\ \mu\text{m}$,误差为 $12\ \text{nm}$ 。

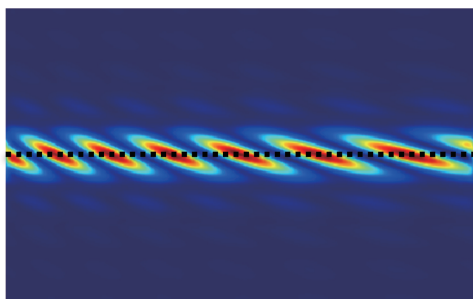


图 4 DFS 信号采集示意图

Fig. 4 Schematic of DFS signal collection

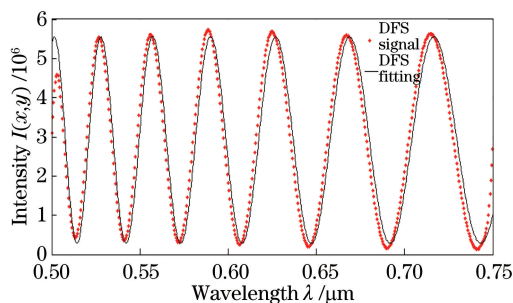


图 5 DFS 信号及其拟合曲线

Fig. 5 DFS signal and its fitting curve

拟合得到的结果只是 δ 的绝对值,还需判断 δ 的符号。从仿真条纹中发现: δ 符号不同,条纹倾斜方向相反。因此,可以在条纹中心采样位置上、下对称位置再提取 2 组信号,通过比较这 3 组信号峰值在 1 个调制周期内出现的先后顺序,判断 δ 的符号。图 6 和图 7 中的 3 条曲线分别是从小活塞误差为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $-10\ \mu\text{m}$ 的仿真条纹上提取的 3 组 DFS 信号,它们能量峰值出现的先后顺序相反。另外,若把 3 组信号计算结果的平均值作为最终检测结果,还能够减少波长标定误差对单组信号拟合精度造成的影响。

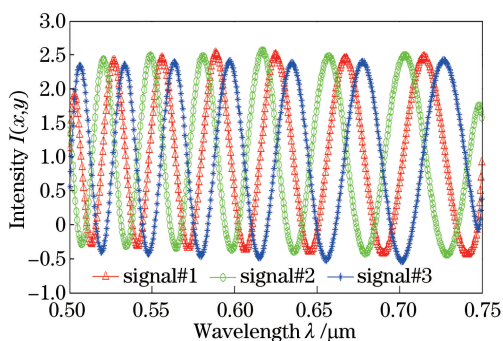


图 6 活塞误差为 10 μm 时采集的 3 组 DFS 信号

Fig. 6 Three DFS signals sampled when piston error is 10 μm

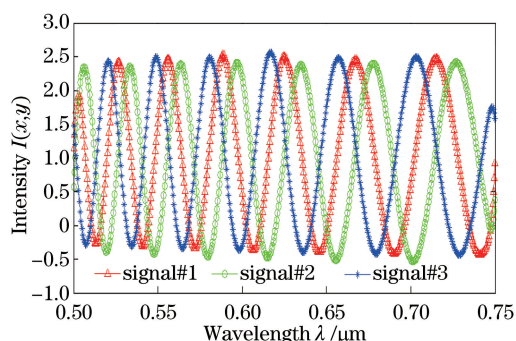


图 7 活塞误差为 -10 μm 时采集的 3 组 DFS 信号

Fig. 7 Three DFS signals sampled when piston error is -10 μm

3.3 仿真研究结果分析

表 1 是对不同活塞误差的检测结果,图 8 表示了 DFS 检测误差的分布情况,可以发现,DFS 检测误差以原点为中心呈对称分布,除原点及其附近的点外,检测误差随着活塞误差绝对值的增大而增大。这是因为条纹对比度的影响,如图 9 所示,是条纹对比度与活塞误差的关系曲线。当活塞误差等于零时,处处光强相同,呈一条均匀的亮线,对比度为零。除此之外,活塞误差绝对值越大,条纹对比度就越低,这是由于随着活塞误差的增大,DFS 条纹变密,相互之间有重叠,相邻衍射点之间卷积效应严重导致的。

表 1 不同活塞误差的检测结果

Table 1 DFS measured results of different piston errors

Nominal value / μm	Piston detected / μm	Detection error / μm
0.5	0.612	0.112
1.0	0.977	-0.023
5.0	5.008	0.008
10.0	10.012	0.012
20.0	19.985	-0.015
30.0	30.023	0.023
40.0	40.030	0.030
50.0	49.957	-0.043
60.0	60.058	0.058
70.0	70.071	0.071
80.0	79.921	-0.079
90.0	90.108	0.108
100.0	100.123	0.123

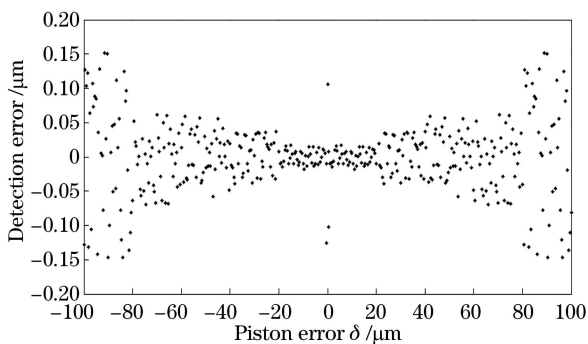


图 8 DFS 检测误差分布

Fig. 8 Distribution of DFS detection errors

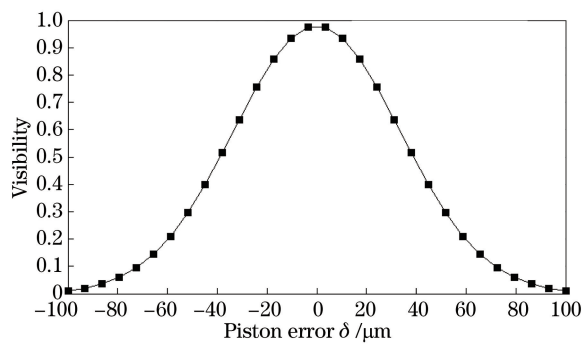


图 9 条纹对比度与活塞误差的关系

Fig. 9 Fringe visibility with respect to piston errors

4 误差分析及解决方法

4.1 活塞误差值过大

当 $|\delta| > 80 \mu\text{m}$ 时,检测误差明显增大。这是由于当活塞误差大到一定程度时,像面上的条纹过于密集,信号采样很不充分,就会造成拟合效果不理想,检测误差急剧增大。由 DFS 的检测原理可知,波长越长,谱段越宽,能检测的最大活塞误差值也越大。而由于本研究工作波段的限制,相比于国外采用的红外波段宽光谱,大大加大了检测较大活塞误差的难度。这种情况下,提出了条纹开窗的办法,如图 10 所示,即只取在长波段的部分光谱,因为长波段的条纹调制频率相对较小,仍然能够用来解算活塞误差。国外的活塞误差检测范围大致在 $\pm 40 \mu\text{m}$ 之间,而利用本方法能准确检测 $\pm 60 \mu\text{m}$ 量程的活塞误差,可达 $\lambda/10$ 的共相检测精度。即本研究在检测难度更大的情况下,实现了更大量程、更高精度。然而,虽然 DFS 条纹开窗能够增大最大可探测活塞误差值,大大提高 DFS 动态范围,但这同时也减少了 DFS 信号中的像元数,导致 DFS 信噪比降低。

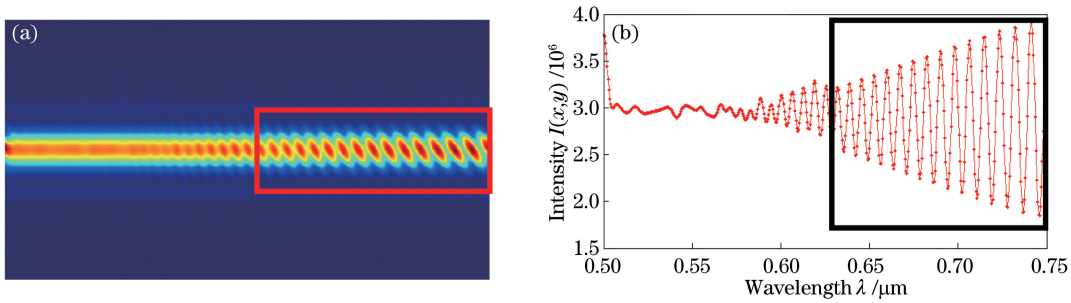


图 10 DFS 条纹开窗采集信号示意图。(a)条纹图;(b)信号图

Fig. 10 Schematic drawing of signal sampling with DFS fringe windowing. (a) Fringe image; (b) signal image

4.2 拼接子镜接近共相

当 $|\delta|$ 很小时,有效信号小于 1 个周期,调制不完善,难以保证拟合精度。这是本研究的工作重点之一,把 DFS 的检测范围扩展至精共相,实现粗共相和精共相的无缝衔接。现在,国外一般采取另建 1 套检测系统的手段,比如 Keck 望远镜采用衍射法,JWST 采用散焦图像对比法,然而,这样会增加系统的复杂度,降低自动化程度。国外还提出利用模板匹配的方法来实现较小光程差的检测。但是,模板库中包含了大量的模板,在检测实验中建库是一件非常繁琐的事情,而且模板匹配法实际上是一种数字图像互相关运算的方法,计算量也比较大。

针对这种情况,提出了两种解决方案。在光路中引入 1 个已知的光程差 L ,使得 $L + \delta$ 足够大,能够满足 DFS 探测范围要求,就可以间接地检测很小的活塞误差了。另外,由 Keck 宽带法^[23]和窄带法^[24]可知,双半圆孔径单色衍射斑能量主极大点的纵坐标相对 $\delta=0$ 的衍射斑重心坐标的平移量 dy 与 2 个半圆孔径上的入射光束之间的相位差 φ 满足线性关系。因此,可沿着垂直色散的方向在条纹上提取检测信号,根据能量主极大点所在位置坐标的偏移量 dy 计算活塞误差值,即 DHS,以此方法作为接近共相时的辅助检测方案。

偏移量 dy 与 2 个孔径上的入射光束之间的相位差 φ 满足如下关系:

$$dy = a \cdot \varphi \cdot f / (2d) \quad (|\varphi| \leq \pi), \quad (6)$$

$$dy = a \cdot (2\pi - \varphi) \cdot f / (2d) \quad (|\varphi| \geq \pi), \quad (7)$$

$$\varphi = 2\pi\delta / \lambda(x), \quad (8)$$

式中, a 是 1 个反映衍射效果的物理量, a 越大衍射效果越明显,衍射光斑面积越大,对于单色光或在很短的谱段内, a 为常数。 f 是子透镜的焦距, d 是子透镜的直径。图 11 是 $\delta=0.1 \mu\text{m}$ 的仿真 DHS 条纹,在亮线下面出现了一条暗线,正是由于活塞误差的存在,衍射斑主极大的能量向次级大上转移的结果,因为此时的活塞误差很小,所以暗线能量较弱。

在条纹 $\lambda=0.55 \mu\text{m}$ 的位置采集 DHS 信号,进行双高斯拟合,拟合曲线如图 12 所示,通过计算可得到活塞误差 $\delta=0.124 \mu\text{m}$,误差为 24 nm。若要提高检测精度和算法稳定性,可在多个波长位置(例如 $\lambda=0.55$ 、 0.58 、 0.61 、 0.64 、 0.67 、 0.7 、 $0.73 \mu\text{m}$)采集多组信号进行处理,取这些结果的平均值作为活塞误差检测值。仍



图 11 $\delta=0.1 \mu\text{m}$ 的仿真 DHS 条纹

Fig. 11 Simulation DHS fringe with piston error $\delta=0.1 \mu\text{m}$

以上述 $\delta=0.1 \mu\text{m}$ 的 DHS 条纹为例,最终检测结果为 $\delta=0.113 \mu\text{m}$,误差为 13 nm,可见提高了检测精度。

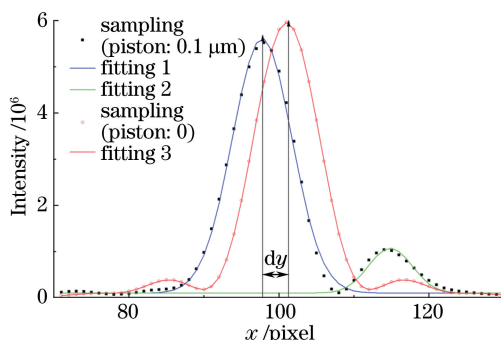


图 12 DHS 信号及拟合曲线

Fig. 12 Signal and fitting curves of DHS

4.3 色散方向与子镜拼缝不平行

色散条纹检测技术最关键的性能参数之一就是条纹对比度,在一定程度上,DFS 检测精度取决于条纹对比度。通过建模仿真发现,条纹对比度不只与被检测的活塞误差大小有关,还与棱栅色散方向和子镜拼缝之间的夹角有关。图 13 给出了不同夹角的示意图(水平虚线表示色散方向)。

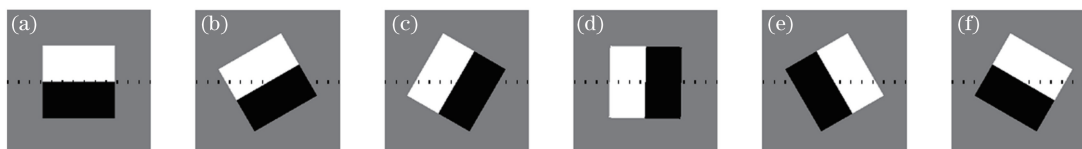


图 13 不同方向的子镜拼缝与 DFS 色散方向的夹角示例。(a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=30^\circ$;
(c) $\theta=60^\circ$; (d) $\theta=90^\circ$; (e) $\theta=-60^\circ$; (f) $\theta=-30^\circ$

Fig. 13 Examples of angles with different segment mirror orientations and DFS dispersion direction.

(a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=30^\circ$; (c) $\theta=60^\circ$; (d) $\theta=90^\circ$; (e) $\theta=-60^\circ$; (f) $\theta=-30^\circ$

由于旁瓣效应,即不同波长的拼接孔径衍射斑的旁瓣填充相邻衍射斑能量主极大和次级大之间的区域,将造成条纹对比度下降。当相邻子镜间的拼缝平行于色散方向($\theta=0^\circ$)时,条纹对比度随活塞误差变化的曲线是对称的,此时有最大的测量范围。当拼接子镜偏离最佳方向时,对比度峰值不再位于中央处,曲线也变得不对称。 $\theta>0^\circ$ 时,负的活塞误差有更高的对比度; $\theta<0^\circ$ 时,情况相反。图 14 反映了色散方向和子镜拼缝之间存在不同夹角的情况下,条纹对比度与活塞误差大小的关系。

以活塞误差 $\delta=10 \mu\text{m}$ 为例,当棱栅色散方向和子镜拼缝之间的夹角 θ 改变时,DFS 检测误差如表 2 所示。分析表中数据,一方面佐证了上述研究的正确性,另一方面也证实了色散条纹检测法对色散方向和子镜拼缝之间夹角造成的误差具有一定的抵抗能力。但当 $|\theta|\geq 60^\circ$ 时,条纹对比度严重下降,对检测结果造成较大影响。可通过分光、采用不同色散方向的棱栅、旋转棱栅角度或者利用复杂一些的几何掩膜等多种手段,来改善这种情况。

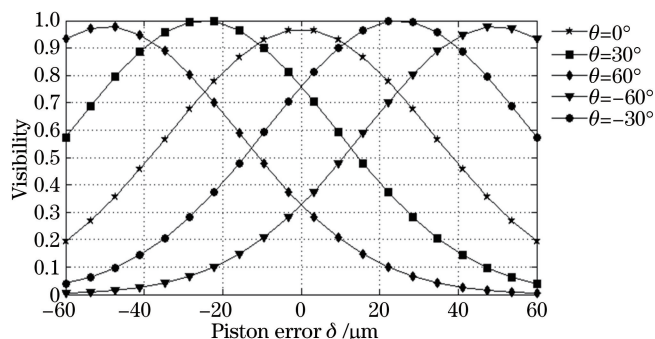


图 14 色散方向与拼缝成不同角度时,条纹对比度与活塞误差的关系曲线
 Fig. 14 Relation curve of fringe visibility and piston error when angles with dispersion direction and segmented mirror orientations

表 2 不同色散角的 DFS 检测结果

Table 2 DFS measured results with different dispersion angles

Dispersion angle / (°)	Piston detected / μm	Detection error / μm
0	10.012	0.012
10	9.986	-0.014
20	10.019	0.019
30	10.027	0.027
60	9.904	-0.096
-60	10.073	0.073
-30	10.020	0.020
-20	9.985	-0.015
-10	10.008	0.008

4.4 提取信号列位置偏差

由以上研究可知,最理想的信号在条纹沿着色散方向的中心列上,该信号包含最大信号等级,此时信噪比最大。然而,在实际提取信号时,很难完美地在探测器上找到条纹中心列,这也是 DFS 方法检测误差的主要来源之一。最佳提取位置(黑线)的偏离主要包括 2 类,如图 15 所示。

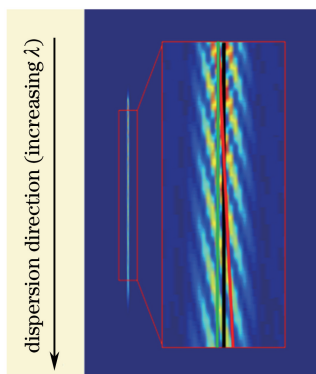


图 15 条纹提取最佳位置和偏离位置示意图

Fig. 15 Schematic drawing of the fringe nominal extraction position and perturbed extraction position

第 1 类,沿垂直于色散方向的平移(绿线),此时的信噪比相对于中心列有所下降,导致检测误差的增大。提出了多路采集的方法来解决这个问题。多路采集就是除了提取中心列信号之外,在中心列两侧再提取多条信号,只要保证信号具有足够高的信噪比。根据每条信号的光强分布得到各自的活塞误差探测值,最终的结果由上述获得的有效值取平均来确定。表 3 给出了采用单路采集方法和多路采集方法的检测结果,图 16 是采用两种方法的检测误差的对比。

表 3 单路采集和多路采集的 DFS 检测结果

Table 3 DFS measured results of single-trace and multi-trace

Nominal value / μm	Single-trace		Multi-trace	
	Piston detected / μm	Detection error / μm	Piston detected / μm	Detection error / μm
0.5	0.632	0.132	0.621	0.121
1.0	0.977	-0.023	0.981	-0.019
5.0	5.008	0.008	5.009	0.009
10.0	10.012	0.012	10.008	0.008
20.0	19.985	-0.015	20.013	0.013
30.0	30.023	0.023	30.017	0.017
40.0	40.030	0.030	40.020	0.020
50.0	49.957	-0.043	49.968	-0.032
60.0	60.058	0.058	60.029	0.029
70.0	70.071	0.071	70.042	0.042
80.0	79.921	-0.079	79.943	-0.057

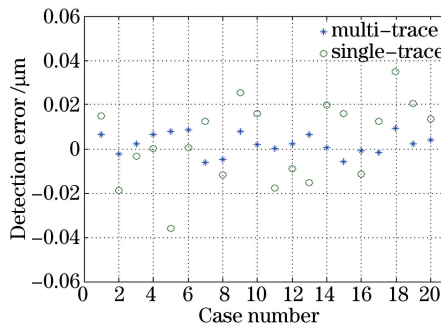


图 16 单路采集与多路采集活塞检测误差对比

Fig. 16 Contrast of piston detection errors between single-trace and multi-trace

第 2 类,当提取的信号列与中心列有一定旋转角度(红线)时,多路采集虽然有一定作用,但也不能十分有效地弥补基于此因素造成的急剧增大的误差。表 4 是在活塞误差为 $5\ \mu\text{m}$ 的情况下,提取信号列偏离中心列不同角度时,DFS 的检测活塞误差的结果。

表 4 信号列偏离中心列不同角度时的 DFS 活塞误差检测结果

Table 4 DFS measured piston error results of different angles with signal axis drifting off nominal extraction axis

Deviate angle / $^\circ$	Piston detected / μm	Detection error / μm
0	5.009	0.009
1	4.919	-0.081
2	4.837	-0.163
3	4.753	-0.247
4	4.667	-0.333
5	4.579	-0.421

由上表可知,该因素对 DFS 检测精度有很大的影响。有两种方法能有效地解决这个难题,一是提高波长标定的精度,尽可能地使条纹中心列信号采集准确;二是改进算法,减小当信号列与中心列存在一定夹角时的活塞检测误差。在对条纹进行分析处理之前,需要进行波长标定。实验中,通过在光路中插入不同透射波长的窄带滤波片,采集子孔径的单色衍射图像,计算衍射光斑重心来标定波长,所以可通过提高计算重心的算法精度来减小标定误差。波长标定误差另一个主要来源是滤波片的定位误差,若滤波片入射面与入射光不垂直,则透射光会发生平移,进而引起波长标定误差。因此,最好利用导轨定位滤波片,以减少滤波片的定位误差。

无论如何提高标定精度,都无法完全消除标定误差,使信号提取列正好处于最佳采集位置。而微小的标定误差能带来数十甚至数百纳米的检测误差,所以需要想办法降低算法对标定误差的敏感程度。当信号从

最佳采集位置,即理论中心列采集的时候,(5)式中的 $\varphi(y)=0$ 。否则,相位项 $\varphi(y)$ 在进行最小二乘拟合时是必不可少的。所提出的改进算法正是利用了这个拟合相位项的信息来提高活塞误差检测精度。

假定沿着与色散方向 x 有微小偏移的 $[x+\varepsilon]$ 列采集信号进行拟合时,拟合相位项与活塞误差的拟合残余量有如下关系:

$$\varphi(y) = 2\pi \left[\frac{\Delta}{(\lambda_0 + \varepsilon) + \frac{\partial \lambda}{\partial x}(x + \varepsilon)} \right], \quad (9)$$

此时,信号列的光强信息可描述为:

$$I(x + \varepsilon) = I_0 \left\{ 1 + \gamma \cos \left[2\pi \left[\frac{\delta - \Delta}{(\lambda_0 + \varepsilon) + \frac{\partial \lambda}{\partial x}(x + \varepsilon)} \right] + 2\pi \left[\frac{\Delta}{(\lambda_0 + \varepsilon) + \frac{\partial \lambda}{\partial x}(x + \varepsilon)} \right] \right\}, \quad (10)$$

式中, Δ 为活塞误差 δ 的拟合残余量,其余变量的物理意义与(5)式中相同。

改进后的DFS算法通过拟合出的相位项 $\varphi(y)$ 来解算残余量 Δ ,进而修正由于标定不精确导致的信号采集列相对于最佳采集中心列存在角度偏差所引起的检测误差。表5是利用改进的算法得到的活塞误差检测结果。将表5与表4对比可知,改进后的DFS算法大大放宽了对标定精度的要求,同时大幅度提高了活塞误差的检测精度,能够有效解决提取信号列偏离一定角度造成检测误差急剧增大的难题。

表5 信号列偏离中心列不同角度时改进算法DFS的活塞误差检测结果

Table 5 Advanced DFS measured piston error results of different angles with signal axis drifting off nominal extraction axis

Deviate angle / (°)	Piston detected / μm	Detection error / μm
0	5.009	0.009
1	4.974	-0.026
2	4.967	-0.033
3	4.961	-0.049
4	4.948	-0.052
5	4.936	-0.064

5 结 论

根据色散条纹检测方法的基本原理,给出了色散条纹传感器的理论知识背景,建立了光学成像模型,推导了检测信号与待测活塞误差的关系。在计算机上对色散条纹传感器的检测流程进行了模拟研究,验证了色散条纹检测方案的可行性,并提出了判断活塞误差符号的方法。针对DFS无法准确检测 λ 以内的活塞误差的问题,提出了DHS,2者检测范围互补,真正实现了无盲区测量,有效衔接了粗共相与精共相的波前传感过程。通过分析仿真结果,证明了结合两种方法,在可见光范围内能准确检测 $\pm 60 \mu\text{m}$ 量程的活塞误差,可达 $\lambda/10$ 的共相检测精度。同时,定量分析了活塞误差大小、色散方向与子镜拼缝之间夹角、条纹对比度和信号中心列提取的不确定性等因素对检测精度和算法稳定性的影响,验证了色散条纹检测法对 $\pm 30^\circ$ 以内的色散角造成的误差具有一定的抵抗能力,提出了用条纹开窗的方法解决活塞误差过大、条纹过密导致对比度下降的问题。对采集信号列相对中心列位置的2类偏移造成的检测误差进行分析,提出了多路采集和提高波长标定精度等相应的解决方法,并且针对DFS算法提出了新的改进方案,利用相位项解算活塞误差的拟合残余量,降低其对微小标定误差的敏感程度。相比于相关领域其他已有工作,完善了检测算法,大大扩展了检测范围,提高了算法的检测精度,增强了DFS的抗干扰能力和稳定性。目前,正在搭建拼接镜主动光学实验平台,从实验的角度,验证理论研究和仿真结果的正确性,实现拼接镜共相误差的检测,为日后将该技术应用大口径拼接型空间望远镜在轨检测提供理论依据和技术支持。

参 考 文 献

- 程景全. 天文望远镜原理和设计: 射电、红外、光学、X射线和 γ 射线望远镜[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002.
- Nelson J E, Gillingham P R. Overview of the performance of the W M Keck Observatory[C]. SPIE, 1994, 2199: 82-93.

- 3 Chanan G A, Nelson J, Mast T, *et al.* W M Keck telescope phasing camera system[C]. SPIE, 1994, 2198: 1139-1150.
- 4 Redding D, Basinger S, Andrew E, *et al.* Wavefront sensing and control for a next-generation space telescope[C]. SPIE, 1998, 3356: 758-772.
- 5 Stobie R, Meriing J, Buckley D. Design of the Southern African large telescope(SALT)[C]. SPIE, 2000, 4003: 355.
- 6 Su D Q, Cui X Q, Wang Y N, *et al.* Large-sky-area multiobject fiber spectroscopic telescope (LAMOST) and its key technology[C]. SPIE, 1998, 3352: 76-90.
- 7 Feenix Y P, James H B, Rene Z, *et al.* Fabrication and alignment issues for segmented mirror telescopes[J]. Appl Opt, 2004, 43(13): 2632-2642.
- 8 Dong Bing, Yu Xin. On-orbit 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.
- 9 Allan Wirth. Cophasing methods for segmented mirrors[C]. SPIE, 2000, 4003: 250-261.
- 10 Chanan G, Troy M, Ohara C. Phasing the primary mirror segments of the keck telescopes: A comparison of different techniques[C]. Proceeding of SPIE, 2002, 4003: 188-202.
- 11 Zhu Nenghong, Chen Xinyang, Zhou Dan, *et al.* Study on measuring piston error of segmented mirror using pyramid sensor[J]. Journal of Transduction Technology, 2009(3): 433-437.
朱能鸿, 陈欣扬, 周 丹, 等. 利用四棱锥传感器检测光学拼接镜的法向光程差[J]. 传感技术学报, 2009(3): 433-437.
- 12 Paxman R G, Fienup J R. Optical misalignment sensing and image reconstruction using phase diversity[J]. Opt Soc Am J A, 1988, 5: 914-923.
- 13 Chanan G, Tory M, Sirko E. Phasing the Keck telescopes with out-of-focus images in the infrare[C]. SPIE, 1998, 3352: 632-642.
- 14 Lin Xudong, Wang Jianli, Liu Xinyue, *et al.* Co-phase experiment of active optics for segmented-mirrors[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(7): 1520-1528.
林旭东, 王建立, 刘欣悦, 等. 拼接镜主动光学共相实验[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(7): 1520-1528.
- 15 Shi F, Chanan G, Ohara C, *et al.* Experimental verification of dispersed fringe sensing as a segment phasing technique using the Keck telescope[J]. Applied Optics, 2004, 43(23): 4474-4481.
- 16 Wang Shanshan, Zhu Qiudong, Cao Genrui. Cophasing methods of segmented space telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2435-2440.
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.
- 17 Zhang Xiaofang, Dong Bing, Huang Yifan, *et al.* Simulation research on wavefront sensing and correction algorithms for segmented space telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 7-11.
张晓芳, 董 冰, 黄一帆, 等. 分块式空间望远镜波前传感及控制方法的仿真研究[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 7-11.
- 18 Gong Xuefei, Cui Xiangqun, Chen Haiyuan, *et al.* Design and analysis of support system of LAMOST primary mirror [C]. SPIE, 2003, 4837: 667-674.
- 19 Zhang Yong, Cui Xiangqun, Liu Genrong, *et al.* An indoor three-mirror phasing experiment system based on a dispersed Hartmann type sensor[C]. SPIE, 2010, 7733: 773352.
- 20 Li Yan, Yuan Xiangyan, Cui Xiangqun. A study of a method of the coplanar splicing of segments into a large-aperture mirror based on the Keck method[J]. Astronomical Research & Technology, 2009, 6(2): 147-153.
李 艳, 袁祥岩, 崔向群. 基于 Keck 方法的大型拼接镜面共面方法的研究[J]. 天文研究与技术, 2009, 6(2): 147-153.
- 21 Shi F, Redding D, Bowers C, *et al.* DCATT dispersed fringe sensor: modeling and experimenting with the transmissive phase plates[C]. SPIE, 2000, 4013: 757-762.
- 22 Gaskill J D. Linear systems, Fourier Transforms, and Optics[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Press, 1978.
- 23 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.
- 24 Chanan G, Ohara C, Troy M. Phasing the mirror segments of the Keck telescopes II: the narrow-band phasing algorithm[J]. Applied Optics, 2000, 39(25): 4706-4714.