

光学综合孔径望远镜中子望远镜平行性和光程差调整的研究

王海涛¹ 朱永凯¹ 蔡佳慧¹ 张雅静¹ 田贵云^{1,2}

(¹ 南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016; ² 英国纽卡斯尔大学电子计算机学院, NEWCASTLE, UK)

摘要 光干涉技术与天文望远镜技术的结合是提高天文观测分辨率的一种有效方法。采用望远镜阵代替单个大口径望远镜来集光观测,利用最大基线的概念来等效传统光学望远镜的最大口径,很大程度上解决了单个望远镜集光能力不足、角分辨率不高的问题。然而对于光干涉来说,在应用中,只有满足:两束光的相位差 δ 必须相对稳定、存在相互平行的振动分量、频率相同、两光波在相遇点所产生振动的振幅相差不悬殊和两光波在相遇点的光程差(OPD)应在相干长度之内等这些条件时才能部分相干。光学综合孔径(OAS)望远镜产生干涉条纹的前提条件是子望远镜之间必须两两相干。推导了双光束光干涉的要求,并从双光束干涉的平行性和光程差的要求出发,研究并得出光学综合孔径望远镜子望远镜的平行性和光程差的要求,结合双光束干涉的恒星光干涉仪的光束平行性和光程差的调整方案,研究并得到了光学综合孔径望远镜子望远镜的平行性和光程差调整的光学方案,并讨论了该系统的改进措施。

关键词 光学设计; 光学综合孔径; 望远镜阵; 干涉; 光程差

中图分类号 TH751 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092905.1397

Research on Sub-Telescopes' Beams Parallel and Path Difference Adjustment to the Optical Aperture Synthesis Telescope

Wang Haitao¹ Zhu Yongkai¹ Cai Jiahui¹ Zhang Yajing¹ Tian Guiyun^{1,2}

¹ School of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China
² School of Electronics, Computer Engineering, Newcastle University upon Tyne, UK

Abstract It is an effective way combining optical interference technology with astronomical telescope technology to raise the astronomical observation resolution. We use a telescope array to replace the large-diameter telescope for light-gathering observation. The maximum baseline is equivalent to the largest diameter of traditional optical telescope. To a great extent, it solves the problem of single telescope, whose light-gathering ability is not sufficient and angular resolution is not so high. In practice, only if the requirements below are fulfilled can the two beams be partly coherent: the phase difference must be relatively stabilized; it exists the component of mutual parallel oscillation; it has the same frequency; the oscillation amplitude difference of the two beams which vibrate at the meeting point is not so large and the optical path difference (OPD) of the two beams at the meeting point is less than the coherent length and so on. The sub-telescope should be mutual interference. Two parallel beams interference and OPD requirement formula are deduced. We get the requirement of the two parallel beams and the OPD based on the research on the two-beam parallel requirement and the OPD. Two indexes for the OAS telescope sub-telescope beam parallel and OPD are got combined with the OAS telescope character. The method of two beams interference parallel and OPD adjustment is introduced. The adjustment method for parallel and OPD optical system is researched which fits with the OAS telescope. The improvement for the system is discussed in the end.

Key words optical design; optical aperture synthesis (OAS); telescopes array; optical interference; optical-path difference

收稿日期: 2008-09-28; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 南京航空航天大学创新基金(Y0803-033)和国家 863-2 基金资助课题。

作者简介: 王海涛(1968—),男,博士,副教授,主要从事光学综合孔径高分辨率观测以及计算机测控技术等方面的研究。

E-mail: htwang2002@126.com

1 引 言

光干涉技术与天文望远镜技术的结合是提高望远镜分辨率的一种重要方法^[1]。光学综合孔径(OAS)技术^[2]一方面引入综合孔径的概念,用望远镜阵代替单个大口径望远镜来集光观测,利用最大基线来等效传统光学望远镜的最大口径 D ,在很大程度上解决了单个望远镜的集光能力不足,角分辨率不高的问题,另一方面引入了自适应光学的概念对大气的扰动进行实时补偿,最大限度降低其对视宁度的影响。从而不但大大提高了天体观测对微弱辐射目标的探测能力,也为天文观测提供了更多高分辨率的观测数据。

光学综合孔径望远镜产生总体干涉条纹的前提条件是子望远镜之间必须两两相干。因此本文从双光束干涉的平行性和光程差的要求出发得出光学综合孔径望远镜子望远镜的平行性和光程差的要求,结合双光束干涉的恒星光干涉仪的光束平行性和光程差的调整方案,研究了光学综合孔径望远镜子望远镜的平行性和光程差调整的光学方案,并讨论了该系统的改进措施。

2 光学综合孔径望远镜子望远镜的平行性和光程差调整的要求

2.1 双光束干涉的光程差要求

根据现代 Michelson 恒星光干涉仪原理,由一个天体发出的光波经两个分开一定距离的独立的望远镜接收,经过干涉仪两臂各自内部的光束传输系统后在光束合成器上结合在一起,并在条纹探测器 D_1 或 D_2 上形成干涉图形。设干涉仪两臂的光强度分别为 I_1 和 I_2 。在满足相干的条件下,探测器上接收的总的光能量为

$$\begin{aligned} I_{\max} &= I_0 S [1 + V \cos(2\pi s/\lambda + \alpha)] = \\ &= I_0 S (1 + V), \\ I_{\min} &= I_0 S [1 - V \cos(2\pi s/\lambda + \alpha)] = \\ &= I_0 S (1 - V), \end{aligned} \quad (1)$$

S 为光束的截面积。条纹可见度的测量值为

$$\gamma = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) = V,$$

V 并非是在实际观测中得到的条纹可见度,它仅与被测天体的亮度分布有关。在实测条件下,由于大气扰动和仪器误差,同时由于被探测的光总有一定的带宽,使实测的 γ 不等于 V , 而是

$$\gamma = \eta V,$$

而且总有 $\eta < 1$ 。 η 称为条纹可见度损失因子。大气扰

动和仪器精度对恒星光干涉条纹可见度的影响大致可以分成波前倾斜、光程差、波前畸变高次项、两光束强度不等、偏振效应、大气横向和径向色散。

用图 1 来说明前面三项的概念,图中 S_1 和 S_2 是引光用的望远镜, l 是几何光程差, l' 是大气倾斜造成的光程差。 $F_1 F'_1$ 和 $F_2 F'_2$ 是两光束的截面,受扰动的大气不仅使两望远镜上接收到的两个波前不平行(波前倾斜),而且光束截面上各点相位也不相同(波前畸变)。

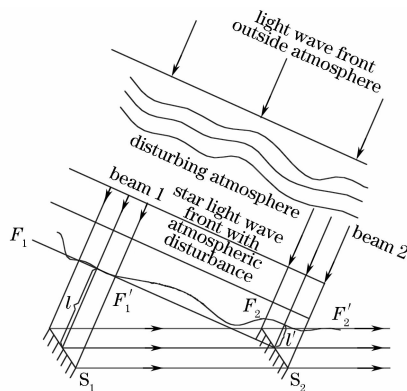


图 1 大气扰动引起的波前畸变

Fig. 1 Wave front aberration with atmospheric disturbance

在此仅以光程差的影响公式来说明程差补偿精度对条纹可见度损失的影响。一般情况下光学滤波器的光谱分布为一个高斯函数

$$I_A = I_{\max} \exp[4 \ln 2 (f - f_0)^2], \quad (2)$$

f_0 是滤波器的中心频率,探测器接收到的均匀光场的光强度是对所有频率上光能量的积分

$$\begin{aligned} I &= \int_{-\infty}^{\infty} \tau s I_{\max} \exp[4 \ln 2 (f - f_0)^2] \times \\ &[1 + V \cos(2\pi f s_0 + \alpha)] df = \\ &\tau s I_{\max} \sqrt{\frac{\pi \Delta F^2}{4 \ln 2}} \times \\ &\left[1 + V \exp\left(\frac{-\pi^2 \Delta F^2 s_0^2}{4 \ln 2}\right) \cos(2\pi f_0 s_0 + \alpha) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

式中 τ 是采样时间, ΔF 为频带宽度,方括号前的常系数是探测器上光强度变化的平均值,记为 I_0 , 由此可以看出,在一定带宽下,由光程差 S_0 引起的条纹可见度损失因子为

$$\eta_s = \exp\left(\frac{-\pi^2 \Delta F^2 s_0^2}{4 \ln 2}\right), \quad (4)$$

因此在给定 η_s 的条件下,光程差允许为

$$S_0 = \beta \lambda_0^2 / \Delta \lambda, \quad \beta = \frac{2 \sqrt{-\ln \eta_s \ln 2}}{\pi}.$$

由于大气扰动、地球自转等原因都会引起在观测

一颗星的过程中光程差发生变化,因此要求恒星干涉仪必须有光程差补偿器,而且光程差补偿器还必须具有实时跟踪光程差变化的功能,以满足允差要求。表 1 列出选用不同带宽对光程差补偿的要求。

表 1 在不同 η_s 的要求下对光程差补偿的精度允差 (μm)

Table 1 Optical path difference compensation precision tolerance to the different η_s

Visibility	Bandwidth /nm				
	0.5	2.0	10.0	100.0	500.0
99%	26.6	6.6	1.3	0.13	0.03
98%	37.7	9.4	1.9	0.19	0.04
95%	60.0	15.0	3.0	0.30	0.06
90%	86.0	21.5	4.3	0.43	0.09

在设计 Michelson 恒星光干涉仪时,总的目标是尽可能使 $\eta_s \approx 1$ 。但实际上应根据各种技术实现的可行性,把 η_s 的总指标分配到各项技术中去。

2.2 双光束干涉的倾角要求

(1)式表示在干涉场上两相干光束的波前完全平行的情况,这时的干涉条纹出现在无穷远处,整个干涉场的光束孔径上各点的光强度是相同的,此时探测器在采样间隔 τ 中接收到的光的总能量为

$$I = \int_0^{\tau} \int_S I(x, y, t) dS dt = I_{\lambda} \tau S (1 + V \cos \Phi_0), \quad (5)$$

式中 $\Phi_0 = 2\pi s_0 / \lambda + \alpha$, s_0 为在 τ 时间间隔内一个不变的光程差(此处讨论只考虑单色光)。如果由于波前倾斜使两束光在相结合时波前之间有一个微小的夹角 θ' ,则在光束截面各点处两束光的光程差不再是常数 s_0 ,而是 $(\rho \sin \theta' \rho \sin \xi + \Phi_0)$,这里 ρ 和 ξ 是光束截面上极坐标的两个分量,(5)式就变成

$$I = I_{\lambda} \tau \int_0^a \int_0^a \left[1 + V \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta' \rho \sin \xi + \Phi_0 \right) \right] \rho d\rho d\xi, \quad (6)$$

对(6)式积分,并令 $x = \frac{2\pi a \sin \theta'}{\lambda}$,则

$$I = I_{\lambda} \tau S \left[1 + \frac{2J_1(x)}{x} V \cos \Phi_0 \right], \quad (7)$$

式中 $J_1(x)$ 为 x 的一阶贝塞耳函数,其中 a 为光束截面的半径。因此波前倾斜使条纹可见度下降了 $(1 - \eta_\theta)$,

$$\eta_\theta = 2J_1(x)/x, \quad (8)$$

在限定 η_θ 的情况下,略去一阶贝塞耳函数中的高阶小量,可以得到对两束光平行度的允差 θ' :

$$\theta' = \frac{\lambda \sqrt{8(1 - \eta_\theta)}}{2\pi a} \times 206265. \quad (9)$$

考虑到大气扰动的随机性以及大气视宁单元相应的艾里斑的角半径 θ_0 ,两束平行光的误差 θ 引起条纹可见度损失的均方根值为^[3]

$$\eta = 1 - 1.8 \langle (\theta/\theta_0)^2 \rangle, \quad (10)$$

为了确保条纹可见度损失小于 5%,光束波前倾斜伺服控制必须使两束光的波前夹角小于 $0.167\theta_0$,当 $\theta_0 = 1''$ 时,两束光波前夹角应小于 $0.167''$ 。假定在任何时刻两束光的方向变化相互独立的,每束光的方向变化是应小于 $0.118''$ 。

2.3 光学综合孔径望远镜的子望远镜平行性和光程差调整的要求

用光学综合孔径望远镜对观测目标进行干涉条纹观测和图像重构,需要引入闭合相位技术^[2]来消除大气扰动和其他原因造成的相位误差,光学综合孔径望远镜得到的总体干涉条纹的前提是各子望远镜同时两两相干,因此在光程补偿和光束波面夹角的要求相对要更高,综合 2.1 节和 2.2 节中对双光束干涉的平行性和光程差的理论分析和要求,光学综合孔径望远镜的子望远镜平行性最好要达到 $0.1''$,光程差的调整达到 $\lambda/10$ 。

3 光学综合孔径望远镜的平行性和光程差的调整方案

目前地面上的恒星光干涉仪中所采用的组合器都是双光束-单组合器的方式,或瞳面式^[2],这种组合方式的优点是原理和结构简单,但是在光干涉仪阵中由于提取闭合相位,要求组成闭合的三个望远镜同时干涉^[4~6],这要比双光束为主的恒星光干涉仪^[7]更为复杂。

3.1 双光束干涉的光程差调整

图 2 是以双光束干涉为主的恒星光干涉仪的光学系统框图,在图 2 中的两条延迟线分别为粗调和细调延迟线,来调整两个望远镜采集光的光程。每条延迟线上都有一个如图 3 所示的小车猫眼反射系统。恒星光干涉仪工作时,延迟线的调整方式是:如图 2 中先测量好光线从望远镜 1 经延迟线 1 和光路中其他光学元件后到光束合成器的内光程 L_1 和望远镜 2 延迟线 2 和光路中其他光学元件到光束合成器的内光程 L_2 ,再根据时角 ξ 和基线的长度 L ,可以算出外光程差为 $L \sin \xi$,事先将两延迟线上的小车调整到一个位置使得内外光程差的和为零,即 $L_2 - L_1 + L \sin \xi = 0$ 。此时,再用小车上猫眼的 PZT 来回作微米级别的扫动,在组合器上看是否有干涉

条纹。如有干涉条纹,说明干涉仪已经处于等光程或干涉状态,记录干涉条纹并处理。在等光程的扫描跟踪过程中,由于时角 ξ 随观测时间的变化而变

化,必须将这个变化量随时送往延迟线,控制小车运动保持等光程。这里还涉及到光束方向的平行性测量和校正的问题。

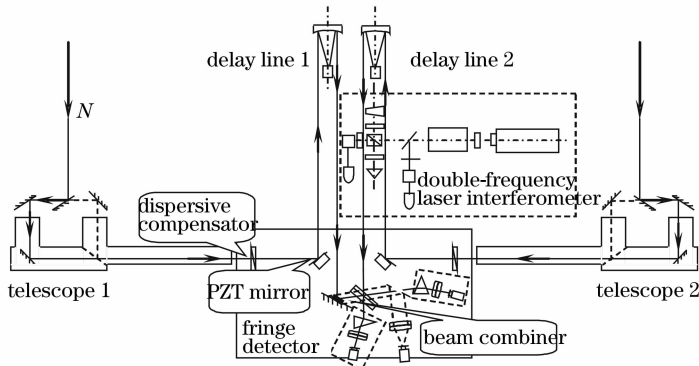


图 2 双光束光干涉仪的光路图

Fig. 2 Optical layout for the two-beam interferometer

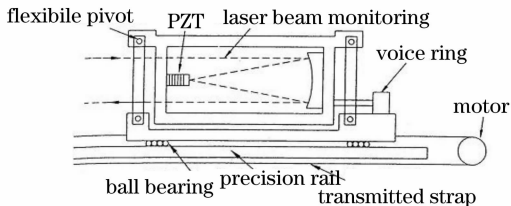


图 3 光学延迟线系统

Fig. 3 Beam delay line system

3.2 双光束干涉的平行性伺服系统

光束平行性伺服系统^[8]如图 4 所示。从望远镜来的平行光经主动镜反射后到环形镜,透过的光经延迟线的调整最后到组合器,反射部分的光经光束方向传感系统来判断光束的平行性,计算出偏差值,若偏差值小于一个阈值则送 PZT 进行微调。反之,则送望远镜进行方位粗调,从而来保证入射光束平行性的要求。

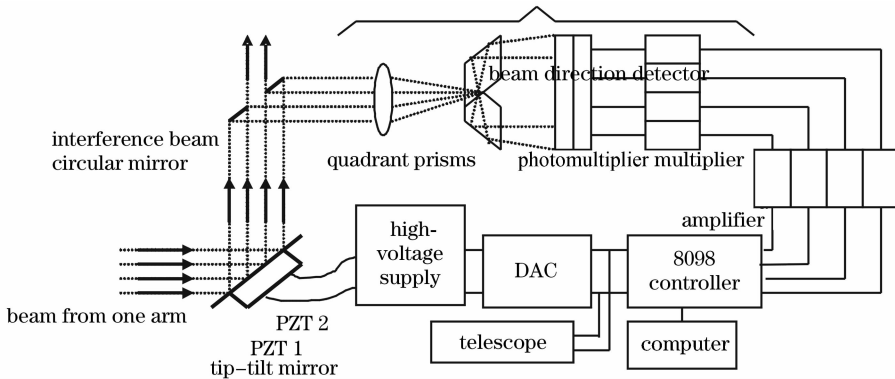


图 4 主动镜系统的原理图

Fig. 4 Principle of the tip-tilt mirror system

3.3 光学综合孔径阵的光束平行性和光程差的调整

随着天文光干涉技术的日益成熟,现代天文光干涉技术的研究已经从原先的恒星角直径等物理量的测量进入了天文目标的二维亮度分布的光学综合孔径技术^[2,4]的研究,光路也比原先的恒星光干涉仪要复杂得多。如首次得到光学综合孔径干涉成像的英国 COAST 阵,它的光束干涉的组合如图 5 所示(采用了 3 个组合器)。这种组合器的原理和结构

简单,但是,其缺点就是时间长。如,COAST 得到的第一幅 Capella 双星图,用三台望远镜整整一个晚上的观测时间才得到 30 个干涉条纹的模和 10 个闭合相位^[9]。如果在时间要求高的场合,如光学综合孔径望远镜观测快速运动的物体(行星或卫星),或要求结构紧凑,不允许那么多组合器的场合(如美国的 TPF 计划和欧洲的 DARWIN 计划^[1])。这就迫使本文考虑新的方案,即多光束单组合器的组合

器的光学方案。

光学综合孔径阵的结构^[4]如图 5 所示,这里结合本课题 863 项目光学综合孔径技术的研究,重点考虑多光束单组合器的方案(以最简单的三束光为例)的光学实现,也就是图 6 中如何结合延迟线系统和光束平行性系统,在组合器上得到干涉条纹。

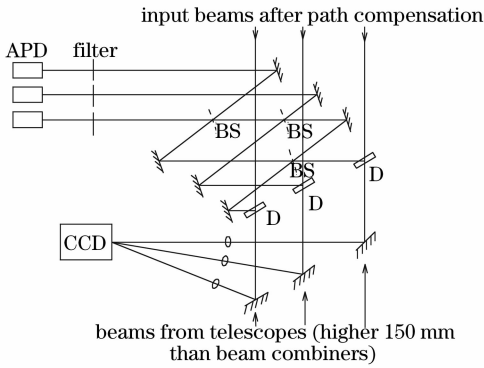


图 5 COAST 的光路图

Fig. 5 COAST optical arrangement

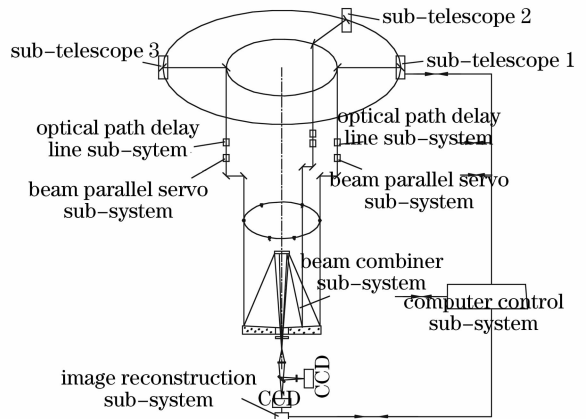


图 6 光学综合孔径望远镜阵结构组成的原理图

Fig. 6 Schematic configuration of optical synthetic aperture telescope array

3.4 光学综合孔径阵的光束平行性和光程差的调整的实现

综合上面分析,光学综合孔径阵的子望远镜的光束平行性和光程差的调整的实现如图 7 所示。

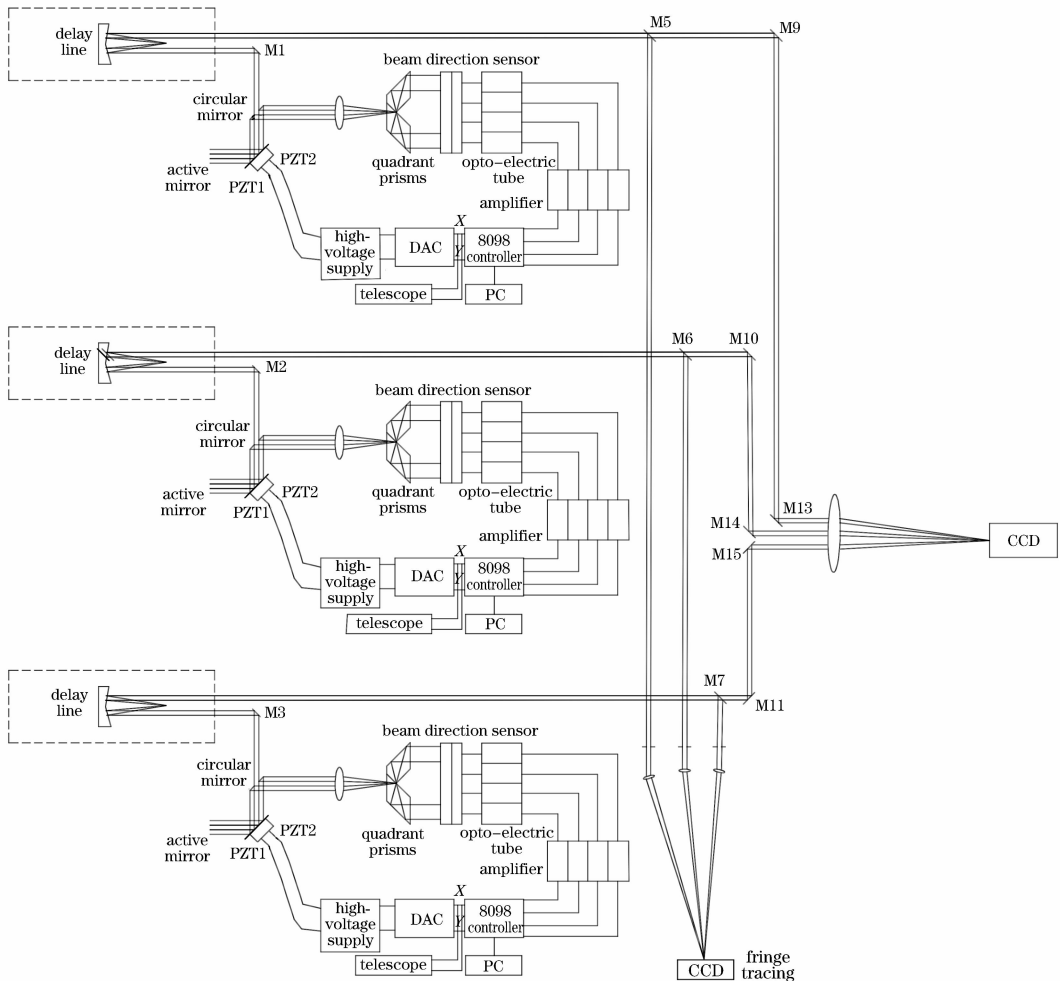


图 7 图 6 光学综合孔径望远镜阵中光束平行性及光程差调整的原理图

Fig. 7 Optical layout for optical aperture synthesis telescope parallelism and path difference adjustment

图 7 工作原理实际上与双光束干涉延迟线的工作原理一样,每台小望远镜的光束方向平行性必须通过主动镜系统来进行反馈和调整^[6],调整后的平行光束送猫眼后向反射的小车延迟线系统对光程进行补偿,由条纹跟踪器对每两组光束的干涉情况进行监视。如首先对光束 B1 和 B2 进行监视,按 2.1 节的工作原理一样,当 B1 和 B2 产生干涉条纹时,说明这两束光的方向和光程差已经满足干涉条件了。此时,在保持对 B1 和 B2 的方向、光程差的检测和调整的同时切换快门,对 B1 和 B3 进行同样的工作,当它们得到干涉条纹时,认为 B1, B2 和 B3 三者满足干涉条件了,此时在象面处的 CCD 得到的像就是三个小望远镜三条基线的三组干涉花样的合成条纹。这个条纹可以送后续的条纹信息提取,并作图像重构。

3.5 光学综合孔径阵的光束平行性和光程差的调整系统的一些改进措施

图 7 设计的光学系统存在着很多问题,如光束平行性调整的四象限器组成的光束方向传感器系统是非常复杂的光学元件和机械结构、电路设计的组合。尤其是四象限棱镜的磨制要求非常高。此处可以考虑用与四根光纤耦合的四个光电二极管放在四个象限处来替代原来的四象限棱镜系统。再者,用图 3 所示的光学延迟线的优点是光程补偿的量,光程补偿速度也快,但是缺点就是体积大,机械结构复杂,在运行过程中有震动的引入。实际上在光干涉仪的研制中已经有人考虑用光纤引光和光纤研制延迟线^[8],这样就可以达到在整个望远镜中减小体积、提高补偿效率的目的。

参 考 文 献

1 Wang Haitao, Zhou Bifang. Astronomical optical interference technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **11**(4):

320~325

王海涛,周必方. 天文光干涉技术[J]. *光学精密工程*, 2002, **11**(4): 320~325

2 Wang Haitao, Zhou Bifang. Optical synthesis aperture interference image technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(5): 433~442

王海涛,周必方. 光学综合孔径干涉成像技术[J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(5): 433~442

3 T. T. Brummelaar. Taking the twinkle out of the stars: an adaptive wavefront tilt correction solver and preliminary seeing study for SUSI[D]. Sydney University, 1994

4 Wang Haitao, Zhou Bifang. Beam combiner in optical aperture synthesis telescope array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1109~1115

王海涛,周必方. 光学综合孔径望远镜中的组合器[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1109~1115

5 Wu Quanying, Qian Lin, Shen Weimin. Research on pupil configuration of dual three sub-apertures sparse-aperture system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 187~192

吴泉英,钱霖,沈为民. 复合三子镜衡疏孔径光瞳结构的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 187~192

6 Long Weijun, Wang Zhile, Zhou Yanping. Imaging analysis and computer simulation of optical synthetic aperture telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1109~1114

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): 1109~1114

7 Zhou Bifang, Wang Haitao, Jiang Xiaoru *et al.*. Manufacturing Prototype of Stellar Interferometer and the New Application of the Research on Stellar Interferometry in China[M]. *Progress in Geodesics and Astrodynamics*, Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2002. 159~168

周必方,王海涛,蒋筱如. 中国恒星光干涉仪样机的研制以及新应用[M]. *大地测量与天文地球动力学进展*, 武汉: 湖北科技出版社, 2002. 159~168

8 Wang Haitao, Fan Weijun, Zhou Bifang *et al.*. Research on the active mirror system of the stellar interferometer [J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(4): 334~336

王海涛,范伟军,周必方等. 恒星光干涉仪的主动镜的研究[J]. *光学技术*, 2002, **28**(4): 334~336

9 J. E. Baldwin, M. G. Beckett, R. C. Boysen *et al.*. The first images from an optical aperture synthesis array: mapping of Capella with COAST at two epochs[J]. *A&A*, 1996, **306**: 13~16

10 Coude de Foresto, S. Ridgway. FLOUR: a stellar interferometer using single-mode infrared fibers. Selected papers on long baseline interferometry[C]. *SPIE Milestone Series*, 1997. MS 139: 402~411