

文章编号 10042924X(2003)0420320206

天文光干涉技术

王海涛, 周必方

(中国科学院 国家天文台 南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: 望远镜技术和光干涉技术的结合是提高望远镜分辨率的方法之一。介绍了天文光干涉的原理和实现恒星光干涉主要的几个关键技术, 星光采集的定天镜系统、光程补偿的延迟线系统、光束平行性调整的星光方向矫正系统和计算机全自动控制系统, 简要介绍光学综合孔径干涉成像技术、天文光干涉的研究状况和天文光干涉技术的发展方向。

关键词: 光干涉; 光学综合孔径; 定天镜; 延迟线; 主动镜

中图分类号: TH751 文献标识码: A

Astronomical optical interference technology

WANG Hai²tao, ZHOU Bi²fang

(National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics
& Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

Abstract: Combination of optical interference technology with telescope technology is one of the ways to raise the resolution of a telescope. The astronomical optical interference theory and several key technologies to realize the star light interference fringes, i. e. the sterostat system to gather star light, the optical delay line system to compensate optical path, the active mirror system to adjust the parallelness of interference beams and the computer control system. The optical synthesis technology and the research status are briefed, and the future development of astronomical optical interferometer technology is forecast.

Key words: optical interference; optical synthesis; sterostat; optical delay line; active mirror

1 引言

天文光干涉技术是在高精度的光程补偿、光束方向平行性测控、条纹探测、跟踪和检测、计算机技术、激光测距、精密机械技术、微位移传感器技术、自动控制技术、信息与图像处理技术等现代高科技成果的基础上发展起来的, 实现并应用于高分辨率的天文观测研究的一个高新技术。

天文光干涉技术可以测量恒星角直径、双星角距等天体物理量的测量。以天文光干涉技术为

基础的光学综合孔径高分辨率成像技术则可以得到观测目标亮度的二维分布情况。应用天文光干涉技术, 天文学家不仅在地面可实现对天体目标的细微研究, 而且其衍生出的技术可以用来地对空探测空间碎片、卫星监测和普查等。

2 天文光干涉技术

最大限度地提高天文望远镜的空间分辨能力以便更好地观测天体的形状和结构细节是天文学家的梦想和天文仪器专家追求的目标。根据瑞利

判据,望远镜的分辨率为:

$$A = 1.22 K/D, \quad (1)$$

其中 D 为入瞳直径, K 观测波长, D 越大,望远镜的分辨本领也就越高。故欲提高分辨率势必增大望远镜的口径,望远镜口径不可能要做多大就做多大,一方面是技术和造价问题,另一方面是大气扰动影响望远镜的实际分辨率。望远镜的分辨率与当地的视宁度有关,一般典型的视宁度是 015d,也就是说当望远镜的口径大于 50 cm 时,它的理论分辨率是 $1.22 K/D$,但实际分辨率如不采用特殊的方法的话就不可能超过当地的视宁度。提高望远镜实际分辨率的方法有两种:使用光干涉的办法和自适应光学的办法。其中自适应光学的办法能达到的极限是单个望远镜的理论分辨率。而光干涉方面,由光干涉的理论表明,干涉条纹数与两个子孔径之间距离(基线)有关,基线越长,条纹数越多。只要能获取条纹信息就可能得到高的空间分辨率。此处基线的长度可以不受单个望远镜口径大小的限制。这种把光干涉技术与天文望远镜结合起来提高望远镜的空间分辨率的办法是高分辨率天文观测的主要方法。

天文光干涉技术的发展^[1]可以分两个阶段,第一个阶段是从 1868 年 Fizeau 提出的天文光干涉的概念到上世纪 80 年代末,主要是以两个口径为主的恒星光干涉仪。由于大气扰动原因使得测量到的干涉条纹,通过对波面处理^[2],由于从干涉条纹中提取出的相位信息不可信,故恒星光干涉仪只能测量恒星的角直径、双星的角距等天体物理量,不能得到测量天体的二维面形情况。这个阶段发展的顶峰是 MARK III^[3]的成功研制。第二个阶段是从上世纪 80 年代开始至今开展的光学综合孔径干涉成像技术^[425]的研究。由于采用了闭合相位技术使得光学综合孔径技术用于成像观测成为可能。以两个口径为主的恒星光干涉仪技术是天文光干涉技术的基石,是光学综合孔径成像的基础技术。

2.1 恒星光干涉仪的关键技术

恒星光干涉仪的原理光路图如图 1 所示。恒星光干涉仪包括:定天镜(或望远镜)、波面倾斜改正镜与导星器、大气色散补偿器、延迟线(光学补偿器)与其监测系统、光束合成器、系统准直检测器、分光器与选频器和条纹探测器等。

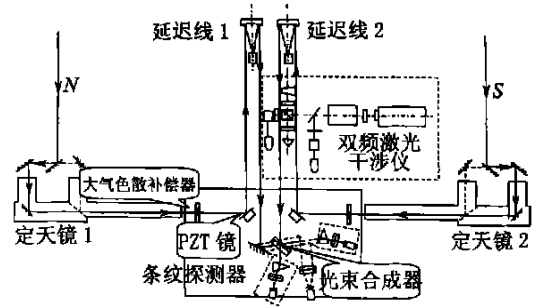


图 1 恒星光干涉仪的原理框图

Fig. 1 Sketch map of stellar interferometer

恒星光干涉仪在用于天体观测时,由于大气扰动、周围环境振动、仪器在运转中本身的振动、热膨胀等都会引起光束方向的微小偏转和光程长度在光波长量级上的变化,不管这些波动是高频的还是低频的,它们都会在三个方面造成不可忽视的条纹可见度的损失:两束光相干时不平行;光程差不为零且有高频波动;干涉光束的波前畸变。因此总括起来,研制一台恒星干涉仪必须解决以下关键技术:

- (1) 定天镜高精度同步指向和跟踪;
- (2) 光程差高精度补偿;
- (3) 用主动光学保持两束光的平行的主动镜系统^[6];
- (4) 光学器件面形精度;
- (5) 全自动控制仪器工作^[7]。

至于作为延迟线的监测系统的双频激光干涉仪以及恒星光干涉仪的结果获取装置-条纹探测器,由于涉及非常专业的领域,可以通过适当的渠道购买或委托研制。

2.1.1 恒星光干涉仪的定天镜

定天镜口径大小的确定与 r_0 (即星光在大气中传播时的横向相干长度^[8]) 有关, r_0 是波长的函数,与相干时间 S_0 有关。在可见光波段, r_0 为 10 cm 左右,这个数值应该是参加干涉的光束有效直径的大小。定天镜的功能是跟踪恒星和聚集星光,并将光束反射到光学平台上,经光程差补偿后进行干涉。由于定天镜在跟踪的过程中与接收星光光束时有夹角并且该夹角不断地变化,因此其口径大小的一般确定为集光口径的 $\sqrt{2}$ 倍左右。

对光干涉仪定天镜伺服的一个重要的要求是

电机驱动步距要尽可能地小,比如小于 $0.05d$ 。目前国产的步进电机的步距一般为 $1.5b$ 左右,要把这样的步距变成所需要的微步距,比如 $0.02d$,减速比高达 27 万倍。这样大的倍数光靠机械来实现是不可取的。一般是从调整机械减速比和细分步进电机的步距来完成。例如,电源细分成 256 等分,机械传速比可取为 1 000 就可满足步距的要求了。

定天镜伺服系统的指向精度要求也比较高,为保证两光束相干时的平行度要求,首先就要使定天镜指向精度满足要求以便使入射到主动镜上的光束位置在其有效的工作范围^[6],这个精度要求一般是 $7.5d$ 。为满足这个要求,高精度的反馈是必要的。例如于 1996 年完成恒星光干涉仪样机中使用了 18 000 刻线的编码器和 24 细分盒满足了这个要求。

2.1.2 高精度补偿的延迟线

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,因此要求恒星光干涉仪必须有光程差补偿器即延迟线,而且光程差补偿的延迟线还必须具有实时跟踪光程差变化的功能,以满足允差要求,根据理论分析和仪器误差分配,这个允差可以是观测波长的十分之一^[3]。如果观测波长是 600 nm ,那么,延迟线的补偿精度应该达到 60 nm 。在补偿光程的过程中,必须有快、慢速和微步的调整的功能,同时必须保持光束的稳定性,即不能有大的起伏。

目前延迟线的成功案例是 MARK III 的光学延迟线,它的猫眼后向反射器的延迟线小车在延迟线导轨上,这是一个三级伺服的光学延迟线如图 2 所示。它是由一个焦比为 $f/3$,大小为 20 cm 的抛物面镜和一个位于其焦平面上的小平面反射镜与 PZT 驱动杆粘在一起,PZT 驱动小平面镜可在 5 Lm 的范围内快速调节,作光程差的微补偿。整个猫眼系统悬挂在一个由滚珠轴承支撑的小车里,猫眼系统和小车之间用图 2 中所示的挠曲枢轴连接。小车和猫眼系统之间还用

一个音圈相联,它可以调节猫眼后向反射器的小车的位置,其调整范围 2 mm ,小车系统中由步进电机驱动来作延迟线中大范围的几何光程差的补偿。这样,PZT、音圈和步进电机组成了微步、慢速和快速的三级光程补偿。

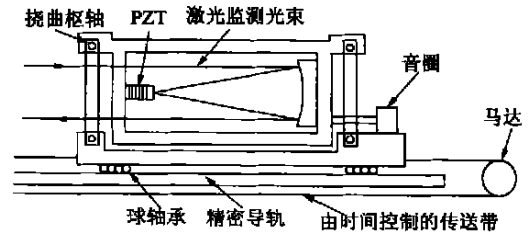


图 2 Mark III 的光学延迟线

Fig. 2 Optical delay line of Mark III

2.1.3 保持两束光的平行的主动镜系统

恒星光干涉仪中保持两束光的平行是由主动镜系统来完成的:从定天镜来的平行光中大部分的光经延迟线的调整最后到组合器,小部分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(如 $5d$)则送 PZT 进行微调。反之,则送定天镜进行方位的粗调,从而来保证入射光束的平行性的要求。

主动镜系统的一个成功案例^[6]是于 1996 年完成的恒星光干涉仪样机中的主动镜系统,工作原理见图 3,包括主动镜,8098 控制器,PZT 的高压驱动电源,光束方向传感器。星光经主动镜镜面后入射到环形镜。星光中透过环形镜的中央部分到达恒星光干涉仪光束组合器进行干涉,环形镜外环部分及后面部分为光束方向传感器,部分星光光线经环形镜外部反射并经透镜聚焦到判别星光方向的四象限棱镜组后,再由光电倍增管采集光子数,8098 控制器根据采集到的光子数归算出星光方向的误差,然后发送相应的数据到 D/A 转换器,转换后的模拟信号控制高压驱动电源,驱动 PZT 伸缩,主动镜镜面在 PZT 的作用下绕二维转轴精细微转从而精确地矫正星光方向。矫正星光方向的范围是 $7.5d$,超过这个范围,通过系统的联锁作用,由 8098 控制器控制定天镜驱动系统实现较大范围内矫正)))即粗调。

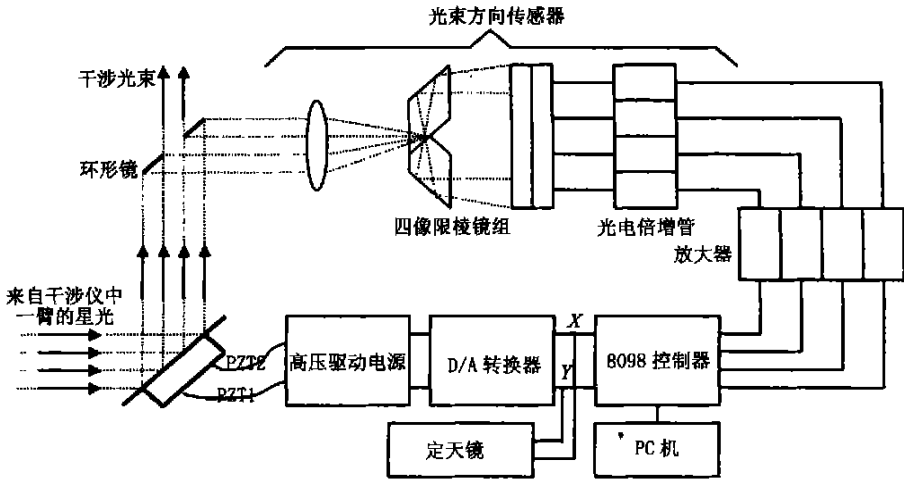


图 3 主动镜系统的原理框图

Fig. 3 Schematic of the tip-tilt mirror system

主动镜系统的执行机构))) 主动镜(含反射镜、镜室、转动支承和 PZT)、高压驱动源、D/A 转换器、8098 控制器以及定天镜驱动系统。主动镜的结构设计必须考虑摩擦和惯量的影响,除了镜面面形质量、镜室和转动支承设计考究外,还采用了频率高,位移分辨率高,便于计算机控制的压电陶瓷线性位移器(PZT)作为执行元件,同时必须对 PZT 的非线性进行校正。这样才能使作为执行机构的主动镜达到高灵敏度(高分辨率)、高校正频率和转角范围较大的要求。

2.1.4 全自动控制仪器工作

恒星光干涉仪属于光、机、电、计算机结合的大型光机电精密工程,干涉仪研制成功与否是以得到星光干涉条纹为准,它对光学、机械要求非常高的同时,电控要求尤其是实时性要求也非常高。要得到干涉条纹,延迟线必须近似等光程的调整,干涉光束平行性调整(包括星光检测和相应主动镜、定天镜的实时反馈)等这些都必须实时调整。这些调整的控制必须在 0.01 s 内,即小于大气的相干时间 S_0 。运用光干涉技术的恒星光干涉仪除了接收星光的定天镜系统之外,其它全部光学系统都必须安装在具有高稳定性能、低气流扰动、没有杂散光的良好环境中,这是一个基本封闭的光学实验室。因此在天文观测期间不允许工作人员在此封闭环境中操作,这就要求所有被控部件实现全自动化控制。

恒星光干涉仪全自动化控制的一个成功案

例^[7]是 1996 年 6 月完成的恒星光干涉仪样机,该控制系统中有十四个被控部件:即南、北定天镜的方位和高度的控制,南北延迟线的检测和控制,光频带的选择和控制在,环境监测,南北星光检测和相应主动镜的控制等。样机中,各个被控部件的工作目的和方式差异,为了控制系统的统一性、整个样机系统联调时各被控制部件的控制程序易于调试和易于总控计算机系统的控制、减少硬件开发的工作量,开发了集中断、串并口和定时器等 8098 单片机系统的通用电路板,加上必要的外围电路组成各系统自己的闭环,这样组成了一套控制子系统,达到相应控制部件实时控制的目的。

总控系统用 SCO UNIX 操作平台,用 xWin2 dows 编写了总控软件。总控计算机与各 8098 前端机通讯,控制 8098 前端机工作,并接收 8098 机发来的工作状态信息和所采集的数据。各前端机通过多用户卡与总控机相连组成一个主从式两级管理系统。

通过总控机和各前台控制器,该控制系统达到了 0.01 s 内完成各命令的传送、各控制部件实时的数据处理以及最终干涉条纹的采集。

2.2 光学综合孔径成像技术^[45]

对于基线长为 10 m、100 m 甚至更长的恒星光干涉仪来说,其观测的分辨率的量级是毫角秒乃至亚毫角秒。但是由于大气扰动的原因,从这种干涉仪得到的干涉条纹中提取出来的相位不是观测目标的真实相位,只有在三个或三个以上的

孔径组成闭环后才能把大气扰动和其它原因造成的相位抵消掉,这就是闭合相位技术。结合频率采样的 u_2v 覆盖技术和图像重构技术,光学综合孔径技术用于成像观测成为可能。

如何用小孔径系统来达到单个大孔径的分辨本领,这就是综合孔径成像的目的。一般来说,一个光学综合孔径望远镜阵(以 6 个子望远镜为例)由如图 4 所示的六个子系统组成。(1)子望远镜子系统;(2)光程补偿延迟线子系统;(3)各子望远镜光束平行性伺服子系统;(4)光束组合器子系统(含干涉条纹信息提取与数据处理技术);(5)图像重构子系统;(6)计算机控制子系统。恒星光干涉

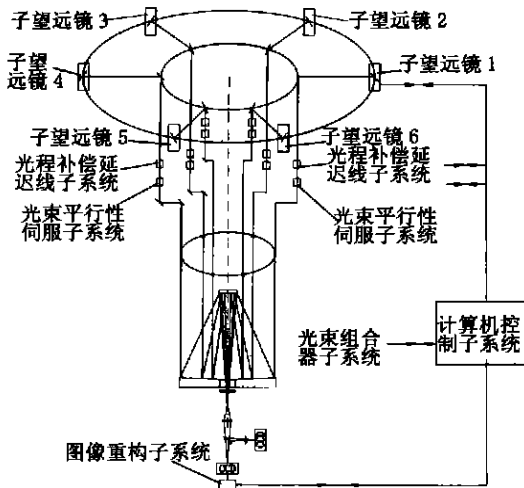


图 4 光学综合孔径望远镜阵的原理图

Fig. 4 Schematic configuration of optical synthetic telescope array

仪中所用到的定天镜、延迟线、用于光束平行性调整的主动镜系统以及计算机控制系统是研制光学综合孔径望远镜阵中的子望远镜系统、延迟线系统、光束平行性的伺服系统以及控制系统的技术基础,只是能得到干涉条纹的设备研制的关键技术。欲从一个光学综合孔径阵得到的干涉条纹中提取有效信息并得到重构的观测图像,用以消除

大气扰动影响的闭合相位技术、频域采样的 u_2v 覆盖技术和有效的图像重构技术是光学综合孔径干涉成像的三个关键技术。

3 天文光干涉技术的发展情况和展方向

以两个孔径为基础的恒星光干涉仪从概念的提出到 MARK III 的研制成功经历了 120 多年,为光学综合孔径干涉成像的研究提供了关键的基础技术的支持。目前国际上所进行的天文光干涉的研究都进行成像观测的光学综合孔径阵的研究。已经得到成图观测的望远镜干涉阵有英国的 COAST 阵,美国的 NOPI 阵等。另外,欧南台的 4 个 8 m 的望远镜和 3 个(将来要增至 8 个)口径为 1.8 m 的望远镜组成 VLTI 望远镜干涉阵和美国两个 10 m 的望远镜与 4 个 1.8 m 望远镜组成的 Keck 干涉阵都将开展成图观测。其中 VLTI 已经在 2001 年 4 月份首次得到两个大望远镜的干涉条纹,目前正在调试其它大望远镜之间的干涉。

空间光干涉技术的研究也逐步展开。法国天文学家 Labeyrie 研究了月球光干涉仪的可能性;欧洲的 Darwin^[8] 计划即在离太阳 4 个天文单位的地方或在太阳与地球之间绕太阳的 L_2 (第二拉格朗日点)放置 5 个单口径为 1.5 m 的望远镜阵;美国的类地球行星探测计划(TPF)^[9],即在 L_2 点放置 5 个直径为 3.5 m 的望远镜阵用来探测宇宙中的类地球行星从而探测外星智能生物。现在正在实施的空间光干涉项目的有 SIM 和 DS3。其中, SIM (Space Interferometer Mission) 是有两个直径为 30 cm 的集光镜,基线长为 10 m 的一个空间光干涉仪,它是 MARK III 在太空中的延续项目,主要的目的是验证空间长基线光干涉仪的可行性; DS3 (Deep Space 3) 是由三个口径为 12 cm 的自由飞行的集光器,间隔为 1 000 m,它的主要目的是研究和验证多个飞行器之间的联系,编队飞行,相互测距和控制。这两个项目的开展为实施 TPF,即空间光学综合孔径阵的干涉成像作技术准备。

参考文献:

[1] 周必方,王海涛,蒋筱如,等. 大地测量与天文地球动力学进展[M]. 武汉:湖北科技出版社,2002. 152-168.

ZHOU B F, WANG H T, JIANG X R, et al. Progress in geodesics and astrodynamics [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2002. 152-168. (in Chinese)

- [2] 鄢静舟,雷凡,周必方,等.用 Zernike 多项式进行波面拟合的几种算法[J].光学精密工程,1999,9(5):1192128.
YAN J ZH, LEI F, ZHOU B F, et al. Algorithms for wavefront fitting using zernike polynomial[J]. Optics and Precision Engineering, 1999,9(6):1192128. (in Chinese)
- [3] SHAO M. The MarkIII stellar interferometer[J]. A&A, 1988,198:3572367.
- [4] 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):4342442.
WANG H T, ZHOU B F. Optical synthesis aperture interference image technology [J]. Optics and Precision Engineering, 2002,10(5):4342442. (in Chinese)
- [5] 王海涛,周必方.光学综合孔径望远镜阵的光束组合器[J].光学学报,2002,22(9):11091115.
WANG H T, ZHOU B F. Beam combiner in optical aperture synthesis telescope array[J]. Acta Optica Sinica, 2002,22(9):11091115. (in Chinese)
- [6] 王海涛,范伟军,周必方,等.恒星光干涉仪中主动镜的研究[J].光学技术,2002,28(4):3342336.
WANG H T, FAN W J, ZHOU B F, et al. Research on the active mirror system of the stellar interferometer[J]. Optical Technique, 2002,28(4):3342336. (in Chinese)
- [7] 张秀忠,王海涛,罗秋凤,等.恒星光干涉仪样机总控系统[J].光电工程,2003,30(3):26230.
ZHANG X Z, WANG H T, LUO Q F, et al. The control system for the prototype of the stellar interferometer[J]. Optoelectronic Engineering, 2003,30(3):26230. (in Chinese)
- [8] RAINER W. Novel numerical model for dynamic simulation of optical stellar interferometers [D]. Ph D thesis, Berlin, TU2Berlin, 2000.
- [9] PENNY A J, LEGER A, MARIOTTI J M, et al. Darwin interferometer[J]. SPIE, 1998,3350:666671.
- [10] STEPHENSON R L, Jr. MILLER D W. Comparison of structurally connected and separated spacecraft architectures for the TPF[J]. SPIE, 1998,3350:672682.

作者简介:王海涛(1968 -),男,江苏溧阳人,中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所博士,副研究员,从事光电检测和光干涉技术研究。

欢迎订阅 2004 年5人工晶体学报6

刊号:ISSN 1000- 985X CN 11- 2637/07 广告经营许可证:京朝工商广字 0016 号
主办单位:中国硅酸盐学会晶体生长与材料分会
中非人工晶体研究院 刊期:双月刊 开本:大十六开
检索系统:EI、CA、英国5科学文摘6、日本5科技文献速报6、俄罗斯5文摘杂志6、5中国期刊网6、5中国学术期刊(光盘版)6
全文收录

5人工晶体学报6是由中国硅酸盐学会晶体生长与材料分会和中非人工晶体研究院联合主办、国内唯一专门刊登人工晶体材料这一高新技术研究领域成果的学术性刊物。它以论文和简报等形式报道我国在晶体材料:半导体材料、光电子材料、纳米材料、薄膜材料、超硬材料和高技术陶瓷等在理论研究、生长技术、性能、品质鉴定、原料制备,以及应用技术和加工等方面的最新科研成果,同时介绍国内外晶体材料的发展动态与学术交流活动及会议信息。刊物覆盖以上各行业的大专院校、科研院所、生产经营单位和省(市)图书馆、政府相关部门,本刊已在美、日、英、俄等国家和地区发行。

2004 年5人工晶体学报6全年定价 220 元,可直接与编辑部联系订阅。

银行汇款方式:

收款单位:中非人工晶体研究院

开户银行:北京工商行管庄分理处

帐号:1443301- 01

邮局汇款地址:

邮编:100018

北京 733 信箱5人工晶体学报6编辑部

电话:010- 65492968

传真:010- 65493320

网址:www. jtxb. cn

E- mail:bjb@jtxb. cn jtxb@risc. com. cn