

# 光干涉与综合孔径技术发展

郭 红 锋

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

## 摘 要

回顾了光干涉与综合孔径技术发展的历史和现状,分析了国际上用于天文观测的一些著名地基和空基光干涉仪的技术特点,介绍了光干涉与综合孔径技术的发展,以及在光学综合孔径技术领域所发展的光纤与集成光学等新技术,简要介绍了近年来我国开展光干涉与综合孔径技术的进展情况。针对光干涉与综合孔径技术的发展前景和国内外技术发展趋势,发出了加快发展我国光干涉与综合孔径技术的呼吁。

**关键词** 天文观测设备与观测资料 — 光干涉 — 综合孔径 — 综述 — 光纤技术 — 集成光学

**分类号** P111

## 1 引 言

用光干涉方法测量天体角直径的思想起源于法国天文学家 Fizeau<sup>[1]</sup>。1868 年 Fizeau 提出扩展源的角直径可以用干涉测量方法确定,原理是像面上干涉条纹可见度与光源的角大小以及狭缝之间距离有相应的函数关系。因此测量干涉条纹消失时两狭缝的间距,即可算出恒星的张角。这个概念后来得到美国天文学家 Michelson 和 Pease 的发展<sup>[1]</sup>。1890 年 Michelson 和 Pease 在美国 Lick 天文台的 30 cm 望远镜上安装了一个带有两个小孔的罩,利用光干涉方法首次成功地测出了木星 4 颗卫星的角直径。为了测出更小的恒星角直径,Michelson 在 Wilson 山的 2.5 m 反射望远镜上改进了他的干涉测量装置(即后来的 Michelson 恒星干涉仪原形,见图 1),并于 1921 年首次测出了太阳以外恒星(参宿四, Betelgeuse)的角直径。

由于光波长极短和没有灵敏的可校准的探测器,光干涉测量停滞了一个多世纪。二战以后,许多研究者从光学波段转向射电波段。射电波段的波长比光学波段长 100 万倍,且射电信号可以转化为电信号来处理,这使射电干涉信息的测量大大简化。同时电子技术以及计算机技术自 20 世纪 50 年代开始有了飞速的发展,这又使得射电天文学自起步起即采用了现代技术,并在 50~60 年代得到了很大发展。干涉测量技术首先在射电天文的应用上获得了巨大成功,产生了大批具有高科学价值的射电干涉观测成果。

随射电干涉而发展起来的现代计算机、激光、探测器、数据处理技术,以及现代自动控制技术、信息技术、系统工程等技术的进展,为天文学家逐步突破可见光波段上干涉测量的主要难点提供了强有力的技术手段。与此同时,在大气扰动的理论模型研究和实测方面也获得了可喜的成果。这些技术和理论研究方面的进展使得光干涉测量重新获得了技术发展的动力,从强度干涉、斑点干涉到长基线干涉,各种光学干涉方法和计划应运而生。近年来天文学家已经能够使用光干涉阵来实现高分辨率成像。同时,光干涉技术也从地面发展到空间。

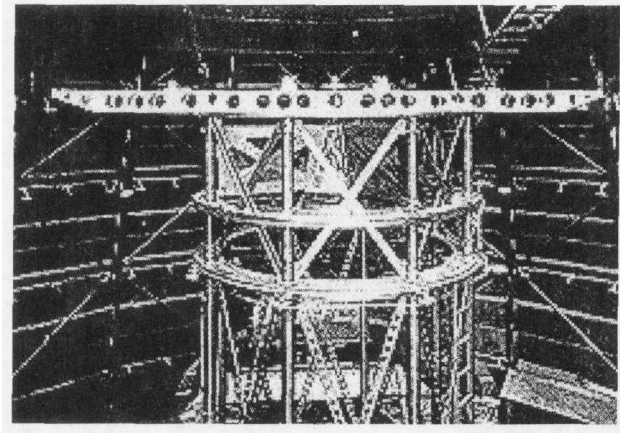


图 1 Michelson 在 Wilson 山的 2.5 m 反射望远镜上改进了他的干涉测量装置<sup>[2]</sup>

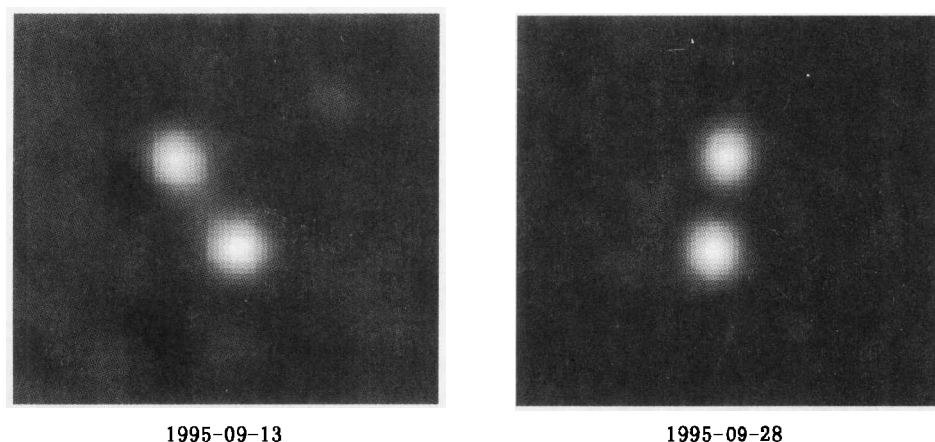
## 2 近代光干涉技术的发展

### 2.1 地基光干涉仪的发展

现代长基线 Michelson 干涉测量始于法国的 Laberyie 实验室<sup>[1]</sup>。1974 年 Laberyie 实验室首次使用两个独立的望远镜 Interferometre a Deux Telescopes (I2T) 直接观测到干涉条纹,后来又发展了 Grand Interferometre a Deux Telescopes (GI2T)<sup>[3]</sup>, 做红外和可见光探测。美国的 Mark I、Mark II、Mark III<sup>[4]</sup> 光干涉仪是一个系列计划,它们相继被研制成功,并取得了一批惊人的成果。此外,20 世纪 80~90 年代有一大批地面光学/红外干涉仪诞生,如美国的红外光学望远镜阵 Infrared-Optical Telescope Array (IOTA)<sup>[5]</sup>, 它由 2 个 0.45 m (2000 年加到 3 个) 望远镜组成 L 型阵,最长基线 38 m。美国的高角分辨率天文中心 (The Center for High Angular Resolution Astronomy, CHARA)<sup>[6]</sup> 的干涉阵,由 6 个 1 m 口径望远镜组成 Y 型阵,最长基线 350 m,分辨率 0.2 mas。这些都是著名的长基线光学/红外干涉仪阵。下面几个例子说明了光干涉技术在天文应用中已取得了重要的进展。

20 世纪 80~90 年代安装在美国 Wilson 山的 Mark III<sup>[7]</sup> 干涉仪,已经在恒星角直径测定、恒星位置测定和双星研究等方面取得了令人瞩目的成果,其观测精度或分辨率都比传统方法高 1~2 个数量级,可以和空间单口径望远镜的观测结果相媲美。同时,它也为现代空间干涉仪提供了地面样机试验。

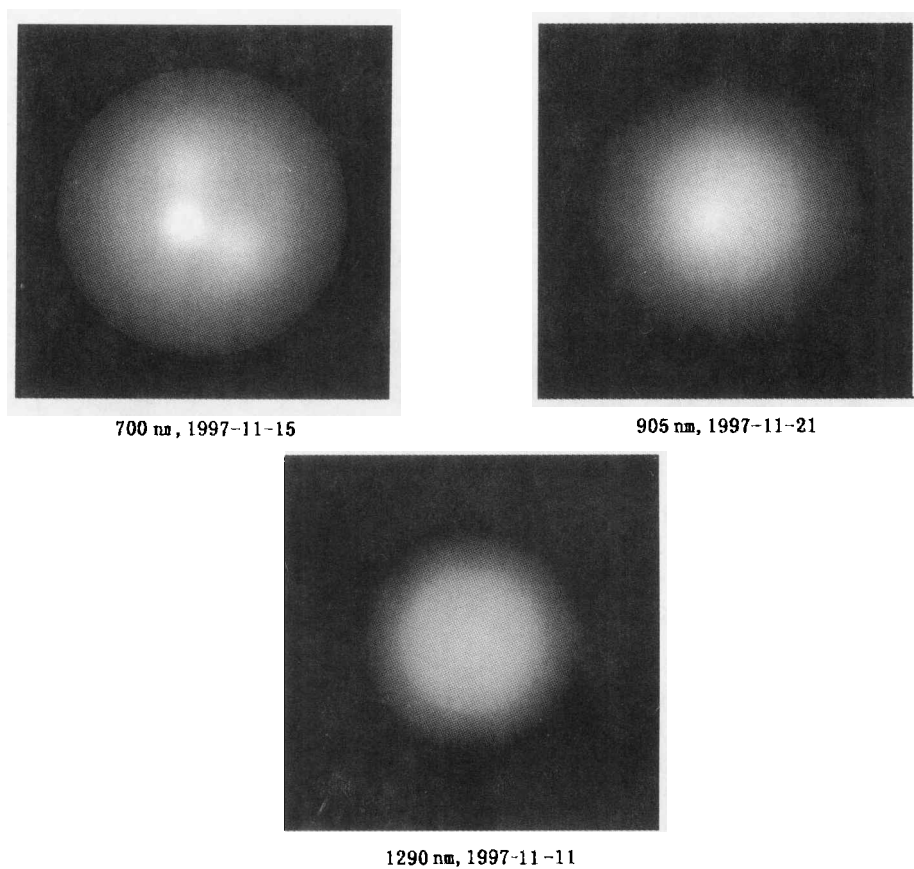
澳大利亚悉尼大学的光干涉阵 Sydney University Stellar Interferometer (SUSI)<sup>[8]</sup> 由 2 个



1995-09-13

1995-09-28

图 2 英国剑桥 COAST 综合孔径成像结果 (御夫座  $\alpha$ )<sup>[9]</sup>



700 nm, 1997-11-15

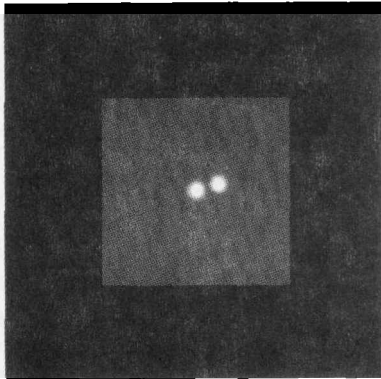
905 nm, 1997-11-21

1290 nm, 1997-11-11

图 3 英国剑桥 COAST 红外成像结果 (猎户座  $\alpha$ )<sup>[9]</sup>

0.14 m 望远镜组成, 最长基线 640 m, 是目前地面干涉仪中基线最长的光干涉阵。其科学研究目标为: 研究恒星的辐射流量、温度、半径、光度等; 双星的间距、质量; 变星的距离; 发射线星的尺寸、发射区、辐射流量、温度等; 恒星形成区; 临边昏暗; 星际消光等。目前它已使用 80 m 基线 442 nm 红端波长得到了干涉结果, 以后将逐渐扩展到最长基线, 并向蓝端发展。

英国剑桥的干涉阵 Cambridge Optical Aperture Synthesis Telescope (COAST)<sup>[9]</sup> 由 4 个 0.4 m 望远镜组成, 基线 100 m, 可进行高角分辨率 (1 mas) 成像。主要用于研究恒星表面、主序前恒星的气壳、变星、星周物质、行星状星云、密近双星等。1995 年该阵首先利用闭合相位技术获得综合孔径成像 (图 2)。目前它已发展到 5 个单元, 取得了一批可见光和红外观测结果 (图 3)。



1996-05-01, 6.3 mas, 287°

图 4 美国 NPOI 双星结果 (大熊座  $\xi$ )<sup>[11]</sup> 分辨率在  $2.2 \mu\text{m}$  (可达 5 mas), 若再增加基线长度和附加 6 个 1.8 m 的小望远镜, 可合成与 25~140 m 口径等效的大望远镜, 分辨率可进一步

美国海军天文台的干涉仪 Navy Prototype Optical Interferometer (NPOI)<sup>[10]</sup> 是一个用于成像的光干涉仪阵, 它的 6 个“定天镜” (0.35 m) 放在 Y 型阵的 3 个臂上, 最长基线 64 m, 最短基线 7 m, 具有 32 个光谱通道, 波长覆盖范围 450~850 nm, 主要用于天体测量、精确定位 (精度达到毫角秒级), 以及对双星、恒星表面等成像。目前已经在双星探测上取得了结果 (图 4)。

由美国 NASA 支持的 JPL 大口径望远镜 Keck 光干涉仪<sup>[12,13]</sup> (图 5), 实现了大口径望远镜的光干涉测量。Keck (10 m) 干涉仪具有 85 m 基线, 空间

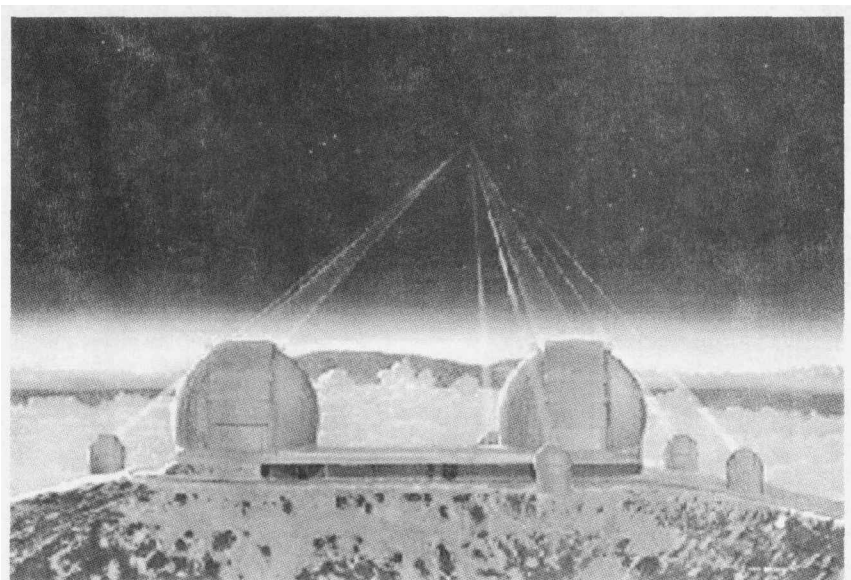


图 5 美国 Keck 干涉仪<sup>[12]</sup>

提高到 30 mas，能对地外如木星尺度的行星成像。Keck 干涉仪的科学目标是：除在恒星、星系、河外星系等天体物理、天体测量及高空间分辨率成像方面起重大作用外，还在著名的 Origins 计划（见 2.2 节）中担任寻找地外行星系统的地基探测任务。如探测星周尘埃的热发射；直接探测巨行星和褐矮星；原行星盘高分辨率成像；太阳系外行星的高精度天体测量等。此外，它的地基光干涉技术也将为空间光干涉技术提供硬件、软件和其他借鉴。

欧共体用 4 个 8 m 口径的望远镜组成了干涉阵 The Very Large Telescope Interferometer (VLTI)<sup>[14]</sup> (图 6)。为了使 VLTI 同时具有高灵敏度和高角分辨率，在 4 个 8 m 望远镜周围又加了几个可移动的 1.8 m 口径的辅助镜，最长基线可达 200 m。其研究对象为：太阳系外恒星和行星系统的结构、成份及形成机制，太阳系外行星，星团的形成和演化，恒星表面结构，星系、星族的特性及演化机制，黑洞的本质，双星演化和物质交换机制，新星、超新星的演化以及与星际介质间的相互作用等。

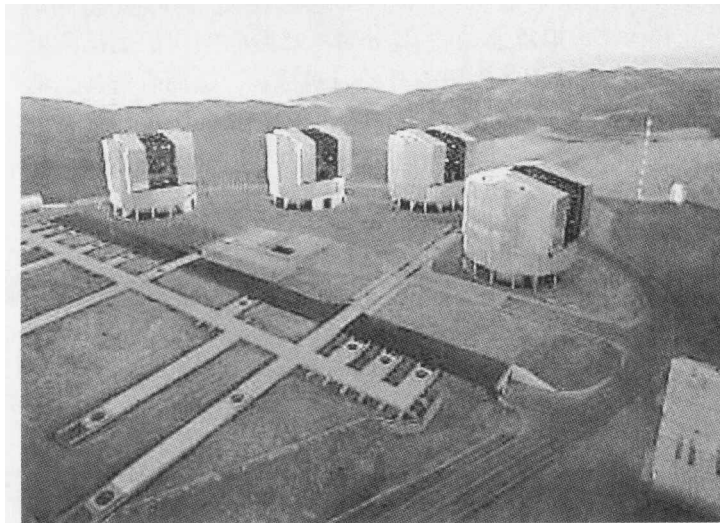


图 6 欧共体 VLTI 干涉仪<sup>[14]</sup>

光干涉仪在天体测量和综合孔径成像等方面取得的高精度测量结果，显示这种技术存在巨大的发展潜力。因此上世纪 80 年代以来各种光干涉仪计划的数量迅速增加，并由小口径向大口径、两单元向多单元、干涉测量向综合孔径成像、可见光向红外波段、地基向空基不断地发展进步。90 年代以来，国际天文界每年召集专题国际会议和各种短训班，以研讨光干涉仪的相关技术和理论问题。国际天文学联合会专门成立了长基线光干涉工作组<sup>[15]</sup>。目前光干涉仪已在天文地基观测中使用，并开始走向成熟。

## 2.2 空基光干涉仪的发展

地面光干涉测量技术已经显示出巨大潜力，但它仍受大气扰动的限制。空间因免受大气影响，可以对可见光直到远红外的连续波段进行光学观测，十分有利于光干涉测量的发展。于是几乎在地面光干涉仪实验的同时，空间光干涉仪的建议和设想也被提了出来。

20 世纪末，国际上有一系列空间光干涉仪计划，如美国的 Origins 计划<sup>[16]</sup>，它是一个以发现地外生命（太阳系外行星）为目标的庞大的持续计划。由于探测这样的目标需要极高的

分辨率, 因此这个计划的多项使命中大多数都要用到光干涉技术。每一个使命除完成预期科学目标以外, 在技术上都有承前启后的作用, 即继承前面的技术成果, 发展新的技术, 为下一个使命作技术准备。Origins 计划包括地基和空基两部分。地基使命包括 Keck 干涉仪在内的大孔径高分辨率干涉仪计划。空基使命主要包括 NASA 的一系列空间干涉仪计划。如空间干涉仪 Space Interferometry Mission (SIM) 计划<sup>[17]</sup>, SIM 是第一个空间干涉仪, 有 7 个 40 cm 子望远镜放在同一航天器平台上, 最长基线为 20 m; 新一代空间望远镜 Next Generation Space Telescope (NGST) 计划<sup>[18]</sup>, NGST 是口径 8 m 的空间展开式望远镜, 也是美国国家研究理事会 (National Research Council) 的天文和天体物理委员会向 NASA 和国家科学基金会 (National Science Foundation) 新千年最优先推荐的项目之一; Starlight 计划<sup>[19]</sup>, 该计划用相距 1 km 的两颗卫星各携带一个望远镜, 在空间实现分布式编队飞行。它也是为下一代虚拟卫星“类地行星发现者 (Terrestrial Planet Finder, TPF)”而开展的预研; 类地行星发现者 (TPF) 计划<sup>[20]</sup>, TPF 由卫星携带 4 架 3.5 m 望远镜组成, 彼此间距可在 10~1000 m 之间变化, 以创造一个大孔径的“虚拟望远镜”, 其分辨率比哈勃空间望远镜高出百倍; 行星成像仪 (PI) 计划<sup>[21]</sup>, PI 最终目的是要对太阳系外的行星成像, 进而看清其上的生命迹象。要达到这样的分辨率, 需要用多个干涉仪组成阵列, 基线长度在 6000 km 以上, 并要求各干涉仪在空中做到分布式编队飞行。其技术难度之大, 控制水平之高是可想而知的。图 7 为 Origins 计划的各项使命和时间表。

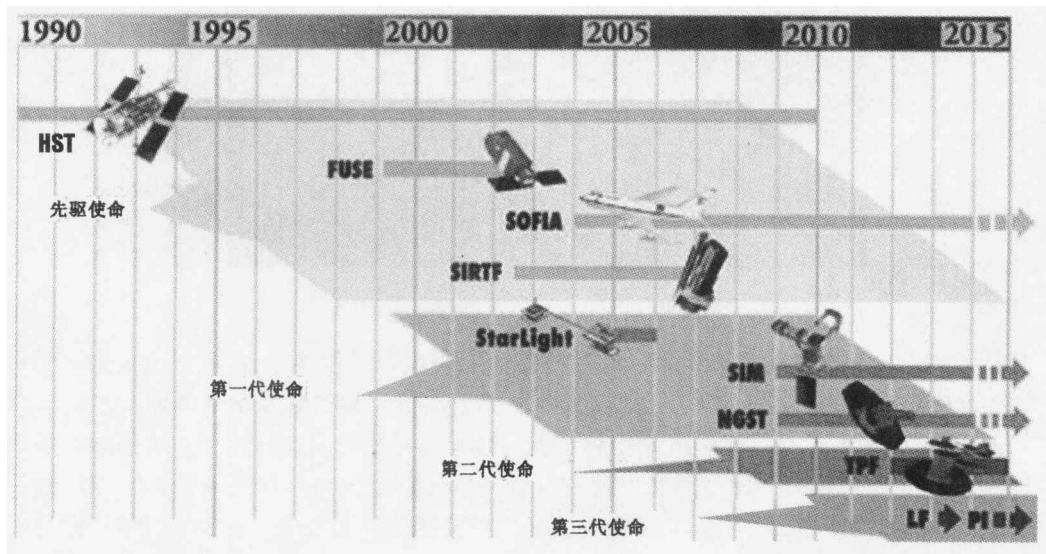


图 7 美国 Origins 计划的各项使命和时间表<sup>[22]</sup>

### 2.3 地表成像及军用光学综合孔径技术的发展

采用光学综合孔径技术可以把一组小单元镜综合成一个等效的大口径望远镜。大口径望远镜随着口径的增大其价格、重量和制造难度等方面也急剧增加, 使得这种用小望远镜组合实现大望远镜功能的光学综合孔径技术越来越受欢迎。实现这一目标有几种不同的方式: 多镜面技术、拼接镜面技术、相控阵技术、稀疏孔径阵列、展开或折叠式组合、分布式阵列等。

天文上用小孔径拼接或阵列及合成孔径技术来扩大望远镜口径、提高系统分辨本领和总效率的方法同样在其他领域得到了广泛应用。

美国空军早在 1985 年就发展了一个 Phasar 计划<sup>[23]</sup>, 建立了一个由 3 个口径为 10 cm 的子望远镜组成的相控阵列望远镜。它在小视场范围内 ( $\pm 1\mu$  rad) 用于激光束发射, 可达到衍射极限。随后美国空军又发展了新一代用于宽角度、多色成像的相控阵列望远镜, 它由 4 个口径为 20 cm 的独立望远镜固定在一起组成多用途多望远镜试验床 (Multipurpose Multiple Telescope Testbed, MMTT)<sup>[24]</sup>, 视场达到  $30'$ 。1996 年美国空军实验室开始了一项超轻型成像技术实验项目 Ultra LITE (Lightweight Imaging Technology Experiments)<sup>[25]</sup>, 其目标是研究发展空基可展开式大孔径光学成像系统的必要技术。

20 世纪 90 年代有人提出用光干涉测量方法获得高分辨率地球表面图像的想法<sup>[26]</sup>。为此, 美国麻省理工学院空间系统实验室提出采用分布式小卫星系统 (Distributed Small Satellite, DSS)<sup>[27]</sup> 携带分立望远镜, 合成一个等效的大孔径望远镜, 用以获得更高分辨率的对地可见光成像。用 DSS 实现高分辨率干涉成像是一个创新的概念, 它不仅在光学波段有极高的探索价值, 而且在微波、射电等合成孔径成像方面也有极大的发展前途。由于打破了单个系统尺度的局限, DSS 可以提供更宽的对地扫描覆盖范围, 为高分辨率、大范围的地球表面成像研究提供更强有力的手段, 因此受到各方面的高度重视。

#### 2.4 我国光学综合孔径技术发展现状

我国天文工作者从 20 世纪 60 年代开始就致力于射电波段 (米波) 综合孔径技术的研究。80 年代原北京天文台开始了米波综合孔径望远镜的研制<sup>[28]</sup>, 将 28 个 9 m 口径的天线组成综合孔径阵 (图 8), 最长基线为 1.2 km, 安装在密云射电站。该望远镜阵已投入天文观测, 取得了一定的观测成果, 并获得国家科技进步二等奖, 现在尚在工作。它为我国综合孔径技术的发展、技术队伍的培养打下了基础。

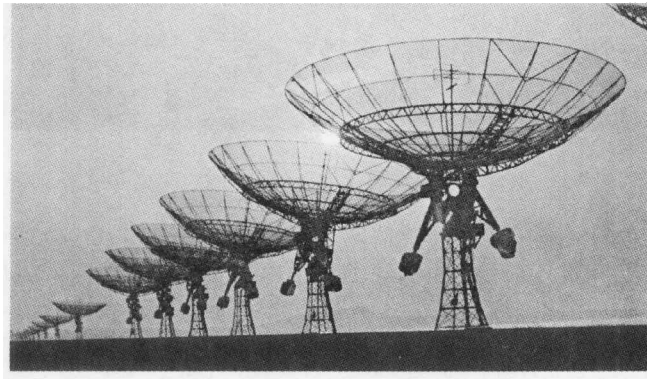


图 8 密云米波综合孔径望远镜

上世纪 80 年代我国开展了甚长基线射电干涉仪的研究 (VLBI)<sup>[28]</sup>, 目前已完成上海和乌鲁木齐两个长基线站, 各安装有口径 25 m 的天线 (图 9、图 10), 已投入正常使用, 可以在厘米波段工作, 完成了国内建网, 并在天体物理、天体测量领域与国际 VLBI 网合作观测。

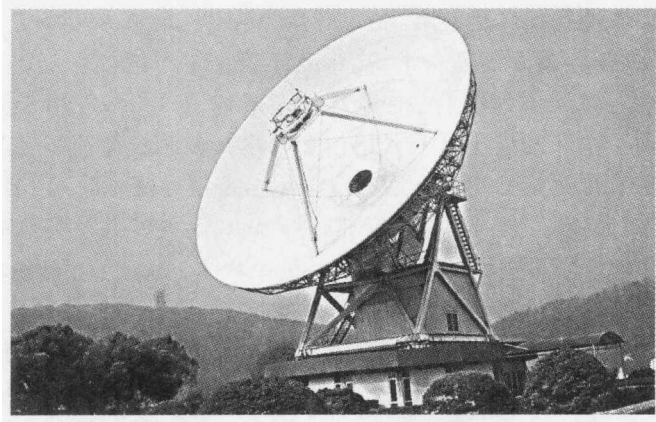


图 9 上海天文台佘山 25 m 射电望远镜



图 10 国家天文台乌鲁木齐观测站南山 25 m 射电望远镜

1989 年原南京天文仪器中心、原陕西天文台等单位合作开展光干涉研究<sup>[29]</sup>。该项目被列为中国科学院 85 期间重点项目，并组建了光学电子实验室。在深入调研的基础上，1991 年一台由两个口径为 20 cm 集光器等单元组成的恒星干涉仪实验系统被提出(图 11)<sup>[30]</sup>。1996 年初，光干涉仪样机已在实验室内获得光干涉条纹，这为我国光干涉发展打下了一定的技术基础。1996 年 6 月该项目通过了由中国科学院组织的验收。

2000 年以来由国家天文台牵头召集了全国各天文台和大学里的专门人才，重新开始了光干涉与综合孔径技术研究工作。通过大量文献调研和走出去请进来的方法，我国科研人员了解了国际上相关技术的发展状况，并针对我国技术条件和应用上的需求，开展了长基线光干涉测量和综合孔径成像，以及高精度光程测量补偿、图像重构与复原等方面的原理研究和技术分析工作。



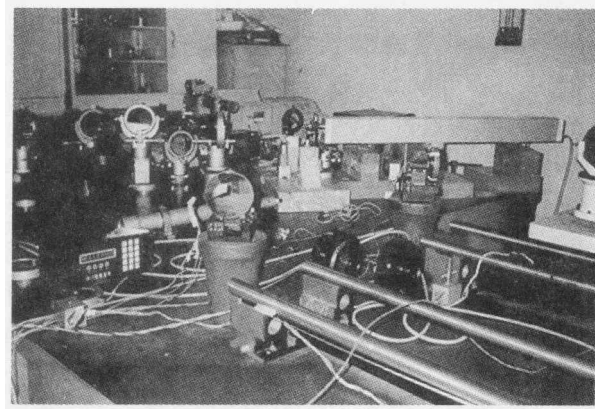


图 11 我国恒星干涉仪实验系统

### 3 新技术的研究及其应用

在光干涉仪系统中，通常用一系列光学单元来进行光束的传输、分裂与组合。利用光纤和集成光学器件来实现这些功能可使光学系统更简单、光学效率更高，整个系统做到小型化、轻

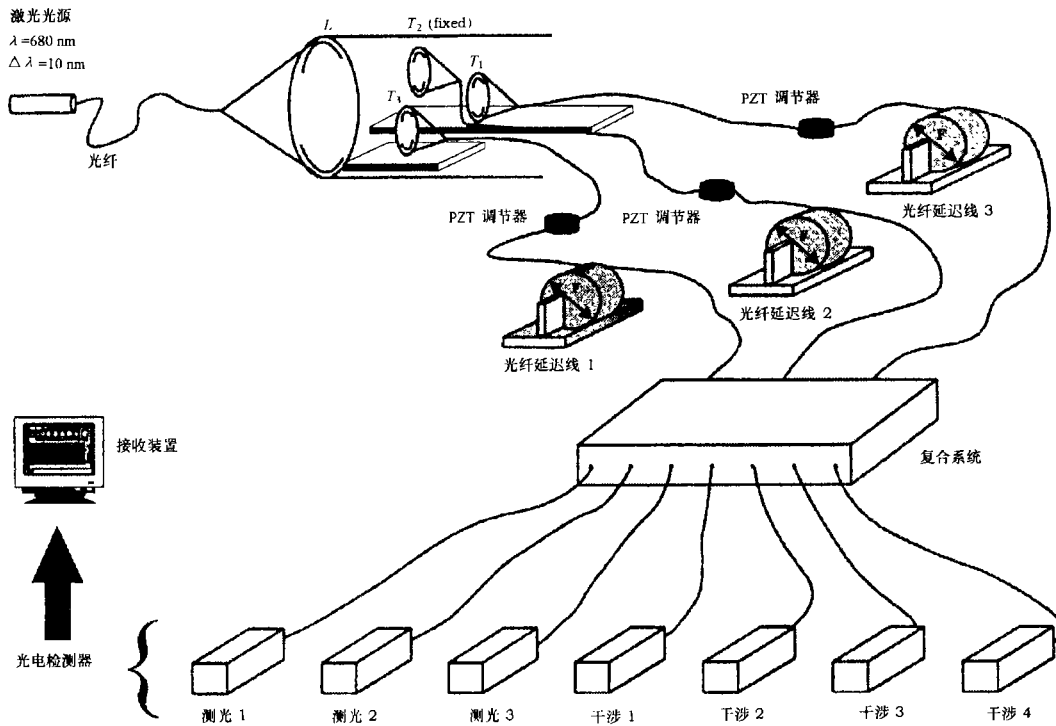


图 12 光纤模拟实验：三口径<sup>[31]</sup>

型化, 提高系统的稳定性和可靠性。

“光纤”概念的提出是受微波波导的启发, 人们希望光也能沿着一种封闭的导管(导体)来传输。这种“导体”称为光波导, 可以制成细丝、薄片以及其它形式。制成细丝的光波导称为光导纤维或光纤。利用光波导原理也可以将各种光学元器件集成起来, 制成集成光学元件, 就像电子学中的集成块那样。

目前光纤与集成光学技术的研究和应用已在光的传输与合成等方面显示出巨大的优越性, 这对光干涉测量尤其是空间光干涉测量非常重要。国际上有很多研究小组正在开展这方面的实验和研究工作。图 12 为法国科学家开展的用光纤和集成光学技术来实现光干涉测量的实验<sup>[31]</sup>。图 13 给出了采用光纤和集成光学技术为空间光干涉仪设计的实验装置<sup>[32]</sup>。

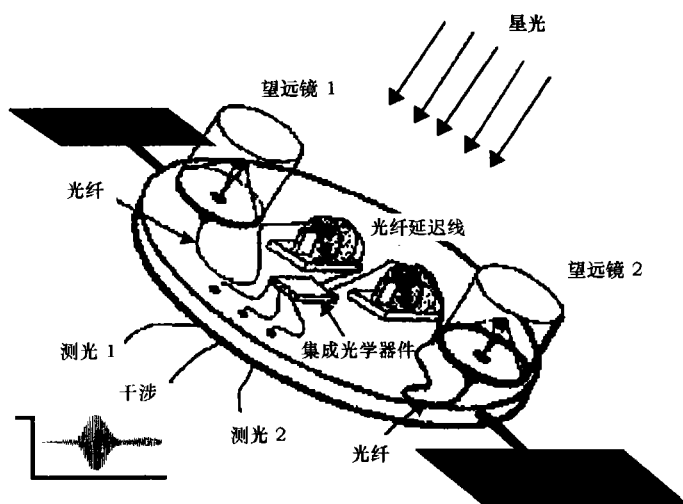


图 13 采用光纤和集成光学技术的空间光干涉测量装置示意图<sup>[32]</sup>

## 4 结 语

光干涉与综合孔径技术在高精度测量和高分辨率成像中所取得的成果, 显示了这种技术具有广阔的发展前景。因此它既是前瞻性领域, 又是一个具有挑战性的课题。国外在这方面已进行了多种理论研究和地面实验、空间实验, 投入了大量的人力物力, 取得了可喜的进步。

光干涉与综合孔径技术的发展需要多种近代新技术的支持, 如: 光学系统优化设计、高精度光学镜面加工与检测、精密机械、精密测量、轻型结构和特殊材料、通讯、干涉、集成光学和信息光学、图像处理与像复原、计算机控制、图像传输等。因此需要投入较大的人力物力。

我国光干涉与综合孔径技术起步较晚, 目前还有不少理论与技术问题有待研究。为了集中力量攻克光干涉与综合孔径技术难题, 先从基础实验做起不失为一个切实可行的方法。考虑到国外上述技术已发展 20 年以上, 我们要想快速赶上只有采取加大投资力度, 尽量采用国外现成技术和加工手段, 更要引进高级专门人才和培养年轻一代, 进行多渠道的交流与合作等方法方可实现。

致谢 近年来我国光干涉与综合孔径技术的开展得到国内外天文学家的支持和鼓励, 也得益于前期开展的恒星光干涉项目和密云米波综合孔径项目研究工作的启发。清华大学、北京工业大学、北京理工大学等的专家学者也参加了讨论, 并提供了技术文献。在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Shao M, Colavita M. *ARA&A*, 1992, 30: 457
- 2 <http://planetquest.jpl.nasa.gov/technology/michelson.html>
- 3 Stee Ph, Bonneau D, Morand F *et al.* 1996 *IAUS*.176..191S, 1996
- 4 Shao M, Colavita M M, Hines B E *et al.* *A&A*, 1988, 193: 357
- 5 <http://cfa-www.harvard.edu/cfa/oir/IOTA/>
- 6 <http://www.chara.gsu.edu/CHARA/array.html>
- 7 Simon R S, Mozurkewich D, Armstrong J T *et al.* *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1992, 24: 1152
- 8 <http://www.physics.usyd.edu.au/astron/astron.html>
- 9 <http://www.mrao.cam.ac.uk/telescopes/coast/index.html>
- 10 <http://ftp.nofs.navy.mil/projects/npoi/>
- 11 <http://ad.usno.navy.mil/npoi/>
- 12 [http://planetquest.jpl.nasa.gov/Keck/Keck\\_science.html](http://planetquest.jpl.nasa.gov/Keck/Keck_science.html)
- 13 Gerard T B, Gautam V. Science Requirements Document Revision 2.2, Pasadena CA: JPL Publ., 1998: 6~10
- 14 <http://www.eso.org/projects/vlti/>
- 15 <http://olbin.jpl.nasa.gov/iau/index.html>
- 16 <http://origins.jpl.nasa.gov/>
- 17 Danner R, Unwin S eds. SIM Space Interferometry Mission: Tracking the Measure of the Universe, NASA Rep. JPL 400-811, Pasadena CA: JPL, 1999: 103~124
- 18 Smith E P, Long K S. *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*, 2000, 207: 1
- 19 <http://origins.jpl.nasa.gov/missions/st3.html>
- 20 <http://origins.jpl.nasa.gov/missions/tpf.html>
- 21 <http://origins.jpl.nasa.gov/missions/pi.html>
- 22 <http://origins.jpl.nasa.gov/missions/sbobs.html>
- 23 Janet S F, Richard A C. *Opt. Eng.*, 1988, 27(9): 706
- 24 Christopher R, Dennis C, Raymond C *et al.* *Opt. Eng.*, 1995, 34(3): 876
- 25 Kevin D, Richard H, Robert V *et al.* *IEEE*, 1996 (0-7803-3196-6): 187
- 26 Mike P, Jesse L, Kevin D *et al.* *IEEE*, 1997 (0-7803-3741-7): 197
- 27 Edmund M C K, David W M, Raymond J S. *America Astronautic Society*, 1999, 122: 285
- 28 Wang S. *Astrophys. Space Sci.*, 1989, 160: 287
- 29 王正明, 徐家岩, 萧金宏等. *天文光干涉测量*, 北京: 科学出版社, 1996: 243
- 30 周必方, 毛伟军, 李再雄等. *天文仪器与技术*, 南京: 天仪中心期刊, 1998: 34~49
- 31 Huss G, Reynaud F, Delage L. *Opt. Commun.*, 2001, 196: 55
- 32 Huss G. *Opt. Lett.*, 2001, 26(11): 768

## Development on Techniques of the Optical Interferometry and Aperture Synthesis

Guo Hongfeng

*(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)*

### Abstract

The history and present status of the development on optical interferometry and aperture synthesis are briefly reviewed in this paper. Features of the famous astronomical interferometers in the world and the technique development, especially, the new techniques such as the fiber technique and integrated optics are introduced. The work on optical interferometry and aperture synthesis developed by Chinese astronomical community is also presented.

**Key words** astronomical facilities and observational data—optical interferometry—aperture synthesis—review—fiber technique—integrated optics