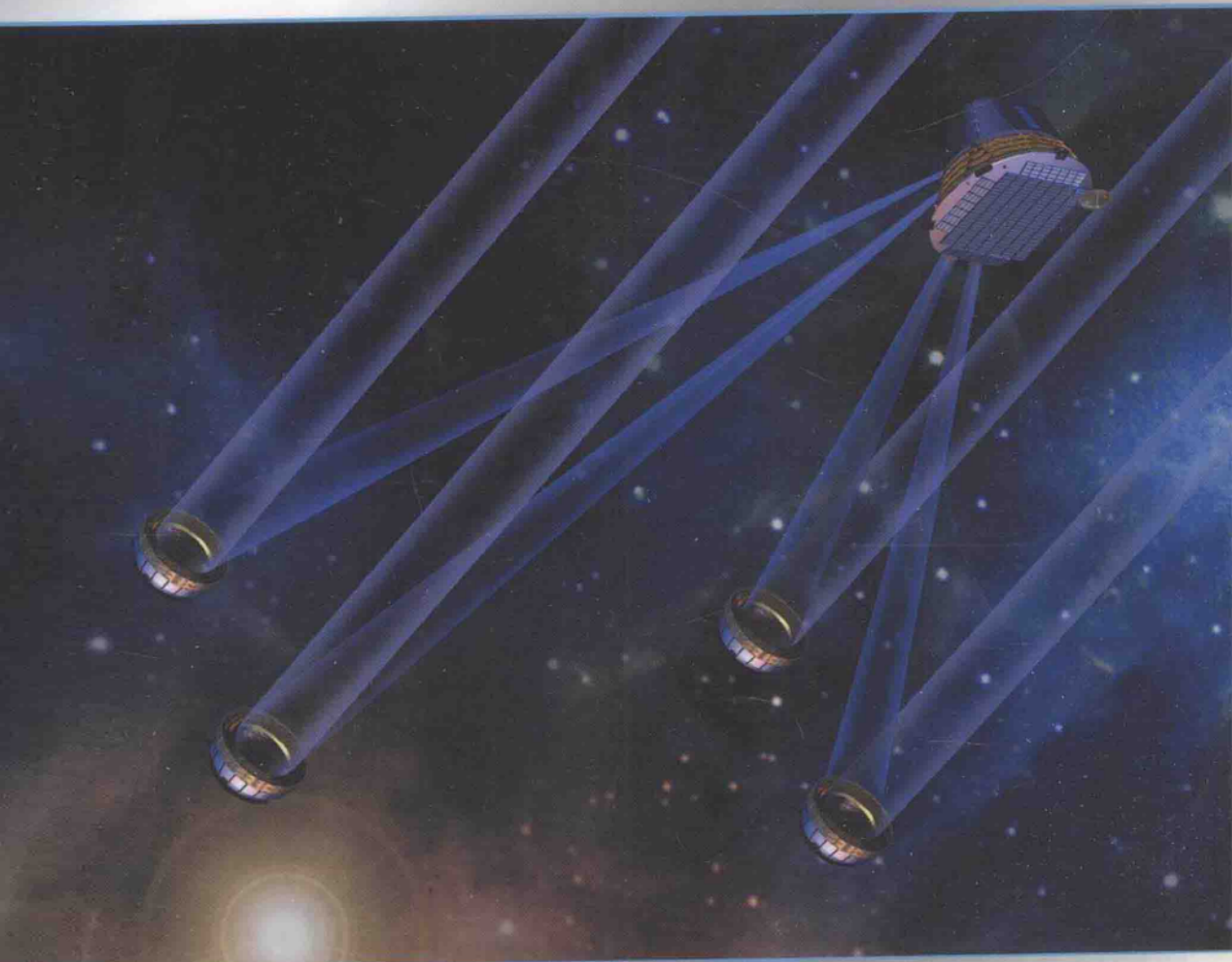


郭红锋 等著

光学综合孔径成像



光学综合孔径成像

郭红锋 等著

中国科学技术出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

光学综合孔径成像 / 郭红锋等著. —北京: 中国科学技术出版社, 2009. 3
ISBN 978-7-5046-5414-4

I. ①光... II. ①郭... III. ①光学—孔径—成象 IV. 0435.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 035542 号

本社图书贴有防伪标志, 未贴为盗版

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码: 100081

电话: 010-62173865 传真: 010-62179148

科学普及出版社发行部发行

北京永铮印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张: 10.75 字数: 300 千字

2011 年 10 月第 1 版 2011 年 10 月第 1 次印刷

定价: 38.00 元

著作者名单

郭红锋 王大勇 常 军 郑怡嘉

戴松涛 伏西洋 刘汉承 赵 博

策 划：赵 晖

责任编辑：赵 晖

责任印制：安利平

封面设计：付小鹏

内 容 提 要

本书介绍的有关光学综合孔径成像方法，是一种为突破大口径望远镜制造上的限制而采用的多个小口径望远镜综合、实现大口径望远镜高分辨率效果的先进技术。此项技术属于前瞻性研究领域，许多发达国家均投入较大力量进行研发。我国虽起步较晚，但发展高分辨率综合孔径成像技术已经纳入国家中长期发展规划，其研究和探索将对深空探测、航空航天等领域产生深远影响。书中结合作者近年来的相关研究工作，既给出了国外有关的发展概况和应用实例，又介绍了我国在这方面的研究成果和现状；既有较详尽、深入的理论分析，又有典型、实用的实验结果。

本书可供光学专业大学生、研究生以及从事光学技术研究的工程技术人员作为参考书，也可以作为该领域进一步研究的基础参考资料。

前 言

光学综合孔径成像技术通常包括光学综合孔径重构成像、多面镜系统直接成像以及由多个独立子望远镜组成的稀疏孔径直接成像等方法。本书重点论述第一种和第三种方法。其中第一章介绍了从光干涉技术到光学综合孔径技术发展的历史和现状,我国在光学综合孔径技术发展方面的研究动态等;第二章简要介绍有关光学综合孔径技术所需要的概念和理论基础;第三章和第四章分别介绍光学综合孔径重构成像和光学稀疏孔径直接成像的原理、方法、模拟分析以及现有实例等;第五章分别给出了等效孔径为 150mm 和 25m 的光学稀疏孔径直接成像系统的设计范例;第六章比较了光学综合孔径重构成像和光学稀疏孔径直接成像这两种方法,给出了各自的优缺点以及适用范围;第七章介绍了两种光学综合孔径成像方法的关键技术。

本书中涉及的例子和关键技术分析主要以空间应用为背景,其他领域的应用可以作参考。

本书在编写过程中,得到了中国科学院国家天文台、中国科学技术出版社等许多同志的大力支持,也得到了国家“863”高技术项目、国家自然科学基金项目(No. 60577029)和北京市属高等学校拔尖创新人才计划的部分资助,在此一并致谢。

由于时间仓促和经验不足,书中难免有疏漏之处,敬请广大读者提出宝贵意见。

郭红锋

2008 年 9 月于北京

序 言

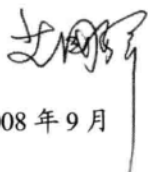
光学综合孔径技术是近年来发展起来的国际先进技术。中国科学院国家天文台自 2000 年起在国家项目和中国科学院项目支持下，组织天文界、各有关大学和研究所的科研人员进行了光干涉与综合孔径技术的预研究，并且与法国科研中心合作，开展了太阳空间观测仪器的综合孔径技术应用研究。此项技术属于前瞻性研究领域，将对深空探测、航空航天及国防科技等领域产生深远影响，各发达国家均投入较大力量进行研发。我国虽起步较晚，但发展高分辨率综合孔径成像技术已经纳入国家中长期发展规划。课题组的同志结合自己的工作写成的这本书将对此领域工作的深入开展具有很好的参考价值和促进作用。我非常高兴地看到近年来我国科技工作者在这方面所做的努力和成效。

根据光学原理，一个光学系统的有效孔径决定了系统的分辨率，反之要想提高系统的分辨率，首先要求系统的有效孔径尽可能大。对单孔径光学系统而言，孔径的提高有一定限度（如加工、安装、校准等），受到各种技术条件的限制。对于放在空间工作的系统，孔径增大更会带来一系列的困难。国际上近几十年逐步发展起来的光干涉综合孔径技术，可以利用多个小孔径组成阵列，合成一个等效的高分辨率的大口径系统，这无疑是对单个孔径光学系统局限性的重要突破，也是一个很有意义且具有技术挑战性的项目。

用多个小口径镜面，通过光干涉综合孔径技术，在空中合成一个等效的大口径、高空间分辨率的光学系统，探测目标的动态过程，其应用前景将会是很广泛的。特别值得关注的是，对地球表面区域的高分辨率成像，是近年来数字地球计划的一个重要组成部分。国外已经开展此项研究，我国有关部门对此技术的发展也给予了足够的重视。

光学综合孔径的高精度激光测量、信息压缩传输技术、像复原与图像处理等，是综合孔径技术的又一大的拓展。但是在光波长纳米量级上做到多路干涉光之间的严格同步、准直，仍然是具有挑战性的技术难题，靠目前已有的技术是不够的，不探索创新是不行的。因此，这一研究方向是非常值得去发展和开拓的，现在开展此项研究也是非常及时的。

希望在不远的将来，光学综合孔径技术会焕发出迷人的魅力，在天文观测、空间探测和航天工程等方面将得到广泛的应用和更大的发展。



2008 年 9 月

目 录

第一章 光干涉和综合孔径技术发展	(1)
1.1 光干涉技术的早期历史	(1)
1.2 近代实用光干涉与综合孔径技术发展	(2)
1.3 空间光干涉与综合孔径技术发展应用	(5)
1.4 我国光干涉与综合孔径技术发展	(9)
参考文献	(11)
第二章 基本原理	(13)
2.1 传统望远镜的成像原理	(13)
2.2 光干涉原理	(17)
2.2.1 光波场的相干性和复相干度	(17)
2.2.2 范西特-泽尼克 (Van Cittert-Zernike) 定理	(26)
2.2.3 成像作为一个干涉量度过程	(29)
2.2.4 非均匀发光面源的空间相干性	(31)
2.3 光学综合孔径成像原理	(34)
2.3.1 光干涉数据重构成像	(34)
2.3.2 光学稀疏孔径直接成像	(36)
参考文献	(38)
第三章 光学干涉数据重构成像方法	(40)
3.1 系统结构和观测目标的关系	(41)
3.2 系统的数据采集和处理	(44)
3.3 系统的视场分析	(46)
3.4 系统阵列排列和空间频率覆盖	(53)
3.4.1 综合孔径望远镜子孔径排列原则	(53)
3.4.2 直线阵的排列	(54)
3.4.3 直线阵取样过程及效果的模拟	(57)
3.4.4 圆形数组的初步结果和设想	(58)
3.5 重构成像实例	(61)
参考文献	(64)
第四章 光学稀疏孔径直接成像方法	(66)
4.1 稀疏孔径成像的直观解释	(66)
4.1.1 从物平面出发的直观解释	(66)
4.1.2 从像平面出发的直观解释	(67)

4.2	系统性能分析	(68)
4.2.1	光学传递函数	(68)
4.2.2	能量收集效率	(69)
4.2.3	成像信噪比分析	(70)
4.3	系统布阵探讨	(76)
4.4	共相叠加技术分析	(78)
4.5	图像复原及评价	(84)
4.5.1	光学稀疏孔径成像系统的图像复原算法	(84)
4.5.2	光学稀疏孔径成像系统的图像质量评价	(87)
4.5.3	光学稀疏孔径系统成像的计算机模拟及图像复原	(91)
4.6	稀疏孔径成像与单个孔径成像的比较	(93)
4.7	光学稀疏孔径直接成像实验	(100)
4.7.1	法国 Solarnet 实验系统	(100)
4.7.2	稀疏孔径阵列结构及成像实验	(105)
	参考文献	(115)
第五章	稀疏孔径直接成像系统设计范例	(118)
5.1	等效孔径 150mm 直接成像实验室演示系统	(118)
5.1.1	系统的主要构成及功能	(118)
5.1.2	系统的技术要求	(123)
5.1.3	系统的容差分析及误差分配	(124)
5.2	等效孔径 25m 直接成像系统设计	(124)
5.2.1	基本结构参数的确定	(125)
5.2.2	光学系统设计	(127)
5.2.3	系统误差分析	(132)
5.2.4	光学稀疏孔径系统成像的数值仿真	(134)
	参考文献	(141)
第六章	光学综合孔径成像方法比较分析	(143)
6.1	两种成像方法系统结构比较	(143)
6.2	两种成像方法成像原理比较	(144)
6.2.1	两种系统的共同的等效光路图	(144)
6.2.2	两种系统的点扩散函数比较	(145)
6.2.3	两种系统的光学传递函数比较	(146)
6.3	两种成像方法图像处理过程比较	(146)
6.3.1	综合孔径光干涉重构成像的图像处理过程	(146)
6.3.2	光学稀疏孔径直接成像的图像处理过程	(147)
6.4	两种成像方法技术难题比较	(148)
6.4.1	相同部分	(148)

6.4.2	不同部分	(148)
6.4.3	子孔径大小对两种系统的影响	(149)
6.5	两种成像方法优缺点及适用范围比较	(149)
6.5.1	综合孔径光干涉重构成像的优缺点	(149)
6.5.2	光学稀疏孔径直接成像方法的优缺点	(150)
6.5.3	两种系统的特点比较	(150)
	参考文献	(151)
第七章	光学综合孔径成像关键技术	(152)
7.1	综合孔径光干涉重构成像关键技术分析	(152)
7.1.1	综合孔径光干涉重构成像关键技术分类	(152)
7.1.2	高精度激光测量与检测系统分析	(152)
7.2	稀疏孔径直接成像关键技术分析	(153)
7.2.1	稀疏孔径直接成像关键技术分类	(153)
7.2.2	面阵 CCD 探测器的分辨率要求	(154)
7.3	光纤与集成光学——光干涉应用新技术	(159)
7.3.1	空间光干涉成像技术的发展趋势	(159)
7.3.2	原理	(159)
7.3.3	实验研究	(161)
	参考文献	(162)
	后记	(163)

第一章 光干涉和综合孔径技术发展

1.1 光干涉技术的早期历史

受大气扰动的影响，在地面上即使通过理想光学望远镜看到的星像（点光源）在一定程度上也是模糊的。由于光的波动性，即使在大气层之外的真空中，一个点光源经理想光学望远镜形成的像也不是一个点，而是一个衍射斑。光的衍射效应限制了望远镜对物体的分辨能力，一个望远镜所能分辨的天空中两个点的最小角距离取决于它的口径。通常我们在几米口径的望远镜中看到的恒星是一个亮点，其实恒星也是有视面的，只是因为望远镜口径的限制，我们无法分辨它的细节。要分辨恒星表面的细节或测量恒星的角直径，望远镜的口径必须大到几十米甚至上百米。用传统的方法制作如此大口径的望远镜，在技术上是困难的，无限扩大望远镜的口径是不现实的。

用光干涉的方法测量天体角直径的思想起源于法国天文学家 Fizeau^[1]。他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。已知干涉条纹消失时两狭缝的间距，可算出恒星的张角。这个概念被美国天文学家 Michelson 和 Pease 发展^[1]。1890 年他们在美国 Lick 天文台的 30cm 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四颗卫星的角直径。为了测出更小的恒星角直径，Michelson 随后在 Wilson 山的 2.5m 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，图 1.1.1），并测出了 Betelgeuse（参宿四）的角直径，这是天文学家首次测出太阳以外恒星的角直径。^[2]

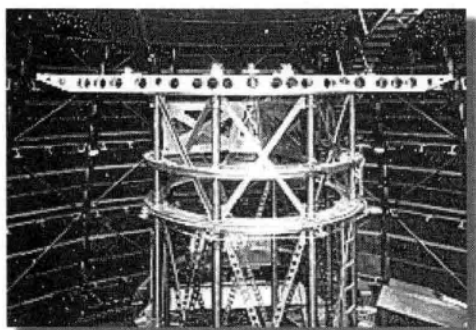


图 1.1.1 Michelson 恒星干涉仪原形

虽然 Michelson 很早就测出了恒星的角直径,但由于光的波长极短,大气抖动的频率很高,当时的技术条件还无法补偿大气对光波波前所造成的畸变和倾斜,以及仪器本身的不稳定性等因素,使得这种技术的发展在当时以及后来很长一段时间停滞不前。

1.2 近代实用光干涉与综合孔径技术发展

随着现代科学技术的发展,干涉测量技术首先在射电天文的应用上获得了巨大的成功。因为射电波段的信号可以转化为电信号处理,而电子技术以及电子计算机技术自 20 世纪 50 年代开始有了飞速的发展,这使得射电天文学自从起步即采用了这一现代技术。射电天文学家借鉴了 Fizeau 和 Michelson 的干涉测量思想,在 60 年代发展了射电综合孔径望远镜,产生了大批具有高科学价值的射电干涉观测成果。射电天文学的这一成就,激励着天文学家在解决光学干涉仪技术困难方面进行着不懈的努力和持续的探索。

现代自动控制技术、信息技术、系统工程和电子计算机的发展,为天文学家突破可见光波段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进展。技术和理论研究的进展使得光干涉测量技术重新获得了发展的动力,从强度干涉、斑点干涉,到长基线干涉,光干涉测量技术取得了不断的进步。

现代光学波段长基线 Michelson 干涉测量起始于法国的 Laberyie 实验室^[1]。1975 年 Laberyie 实验室首次使用两个独立的望远镜 Interferometre a Deux Telescopes (I2T) 做光干涉实验,直接观测到干涉条纹。随后他们又发展了 Grand Interferometre a Deux Telescopes (GI2T),做红外和可见光探测^[3]。美国的 Mark I、Mark II、Mark III^[4] 光干涉仪系列的研究,制定了一个递进的计划。它们相继研制成功并取得了一批惊人的结果,是当时最大的单口径望远镜所不能得到的。特别是安装在美国威尔逊山的 Mark III 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提高了一、二个数量级,可以和空间单口径望远镜的观测结果相媲美^[4]。

此外,20 世纪 80~90 年代有一大批地面光干涉仪诞生,如澳大利亚悉尼大学的光干涉阵 Sydney University Stellar Interferometer (SUSI)^[5] 建于 1991 年,是当时基线最长(640m)的光干涉仪。美国的光学红外干涉仪阵 IOTA^[6],由两个 0.45m 望远镜组成,基线 38m。美国的 CHARA^[7], ISI^[8] 等,都是著名的长基线光学/红外干涉仪阵计划。

天文上长基线光干涉技术通常是利用相距一定距离(基线)的两个子口径光学系统之间增强了的干涉信号获得沿基线方向的高分辨率信息,从而达到高精度测量的目的。如果每次测量时改变光干涉基线的长度和方向,把不同基线(多次)得到的光干涉信息进行综合处理,可以获取观察目标更多方向上的光学信息,如强度分布(即成像)等,人们把这种多次测量数据的综合处理称为综合孔径技术。当同时布置多个子口径光学系统(稀疏孔径),一次直接探测它们之间的光干涉输出,并经过适当综合处理得到相应目标信息时,将具有快速成像和视场大等优点,是当前综合孔径技术发展的另一种途径。

首先利用光学综合孔径阵进行长基线光干涉测量，并获得闭合相位成像结果的是英国剑桥的干涉阵（COAST）^[7]（1996）（图 1.2.1）。COAST 阵最初用 3 个望远镜单元，现在已经发展到 5 个，取得了一批可见光和红外观测结果（图 1.2.2）。

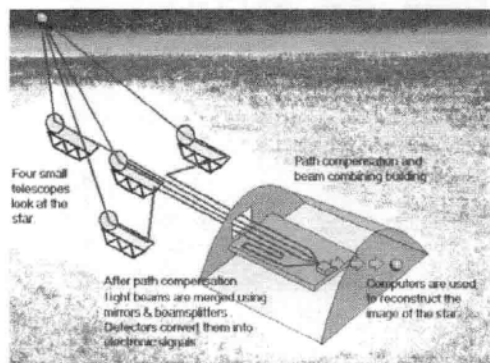


图 1.2.1 英国剑桥的 COAST 系统示意图

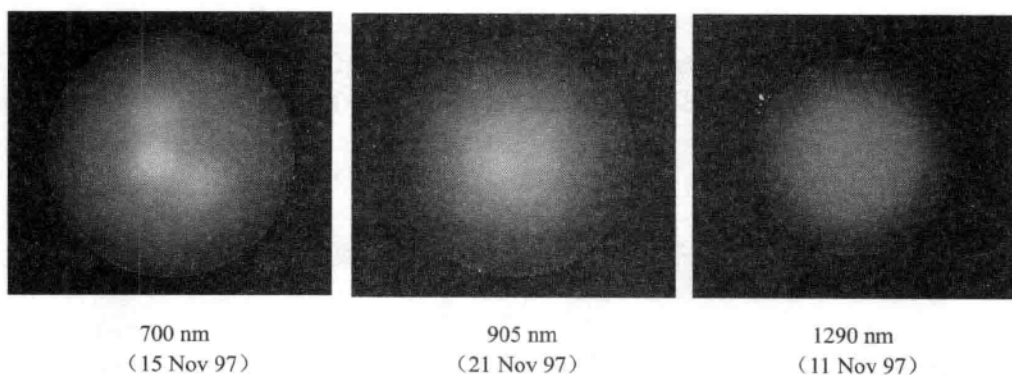


图 1.2.2 英国剑桥 COAST 最新成果（Surface imaging of Betelgeuse with COAST and the WHT）^[8]

美国海军天文台的 NPOI（图 1.2.3）是一个用于成像的光干涉仪阵，具有 32 个光谱通道，波长覆盖 450~850nm，在双星探测上已取得结果^[9]（图 1.2.4）。



图 1.2.3 美国海军天文台的 NPOI

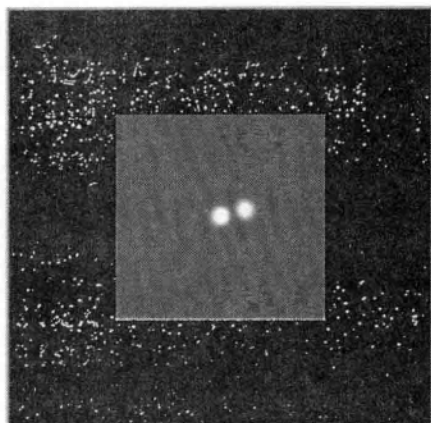


图 1.2.4 NPOI 双星结果

光干涉仪的高精度测量结果，显示了这种技术巨大的发展潜力。因此 20 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、地基向空基发展。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，研讨相关技术和理论问题。与此同时，不少光学干涉仪投入天文观测，在天体测量方面取得了重要的成果。尤其是由美国宇航局 NASA 支持的 JPL 大口径望远镜的光干涉 keck 计划^[10](图 1.2.5)，实现了大口径长基线望远镜光干涉仪。欧共体的 4 个 8m 口径望远镜干涉 (VLTI) 计划也在执行^[11] (图 1.2.6)，目前光干涉仪已在天文地基观测中使用，并开始走向成熟。

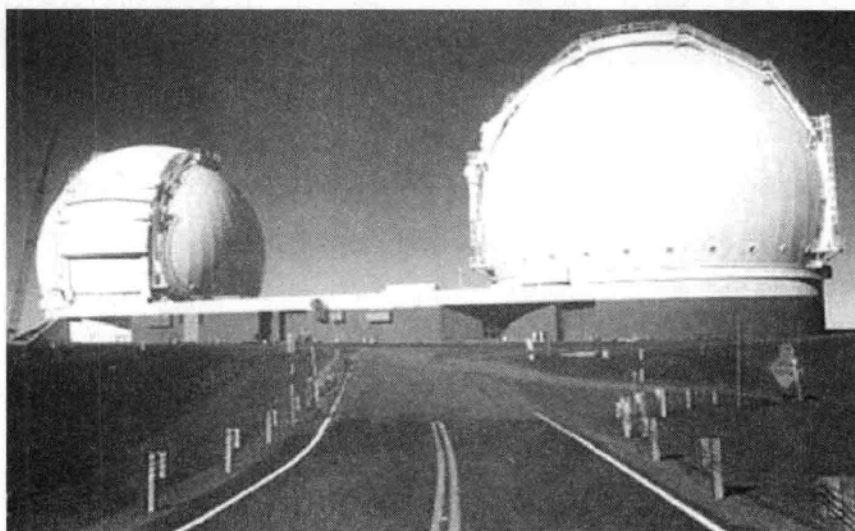


图 1.2.5 keck 干涉仪

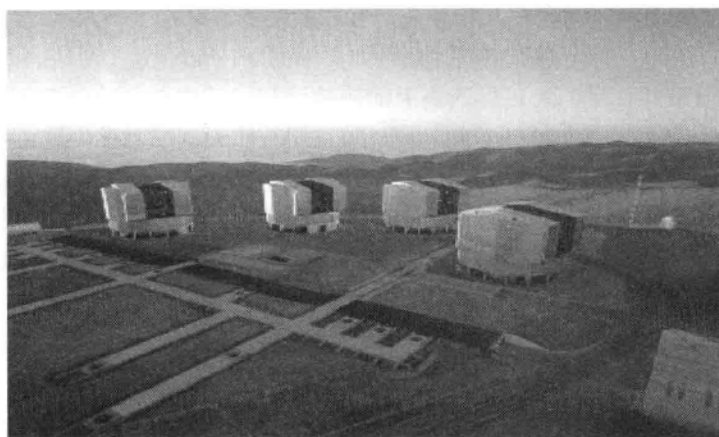


图 1.2.6 欧共体 4 个 8m 口径望远镜干涉阵 (VLTI)

稀疏孔径光学阵列系统直接成像的关键是在望远镜的整个视场中使各个独立的子孔径产生的图像或波前同位相, 并保持各个光瞳在合成时准确重叠。美国在 1985 年就建立了第一个同位相的阵列望远镜(Phasar, 图 1.2.7)^[9] 用于发射激光束武器, 但子望远镜的口径为 10cm, 数目是 3, 视场仅为 $\pm 1\mu\text{rad}$; 随后建立了用于直接成像的多用途多镜面望远镜测试床同位相望远镜阵列(Multiple Mirror Telescope Testbed, MMTT, 图 1.2.8)^[10], 由 4 个口径为 20cm 的独立望远镜组成, 全视场设计为 0.5° 。

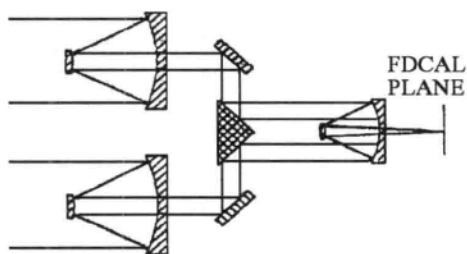


图 1.2.7 典型共相阵列望远镜

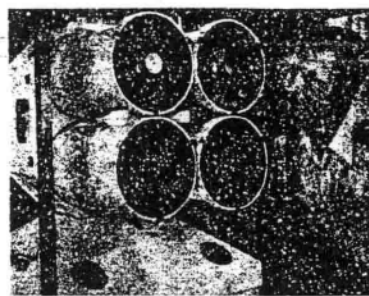


图 1.2.8 Multiple Mirror Telescope Testbed (MMTT)系统

1.3 空间光干涉与综合孔径技术发展应用

地面光干涉测量技术已经显示出它的巨大潜力和美好前景, 但受大气扰动的限制依然存在。空间因免受大气影响, 可以从可见光直到远红外的连续波段进行光学观测, 对光干涉测量的发展十分有利。于是几乎在地面光干涉仪实验的同时, 科学家也提出了空间光干涉仪的建议和月球光干涉仪的设想。由于空间没有大气的影晌, 具有相关口径大、等晕角不受限制等优点和微角秒、亚微角秒的精度及分辨率的潜力, 因此吸引着天文学家执著地

追求，并形成了地面和空间研究互相补充、互相激励的情况。

20世纪末，国际上有一系列空间计划，如美国的Origion计划（图1.3.1）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。其中包括哈勃望远镜（HST），空间光学干涉仪（SIM）由7个40cm子望远镜，放在同一航天器平台上，最长基线为20m，总投资10亿美元。NASA定于2005年实施的空间技术3计划（ST3），用相距1km的两颗卫星各携带一个望远镜编队飞行，实现光干涉与综合孔径功能。它是为了下一代虚拟卫星类地行星探索者（TPF）任务而开展的预研，TPF将发送5颗卫星升空，相距1km飞行，以创造一个虚拟望远镜，其分辨率比哈勃空间望远镜高出百倍。

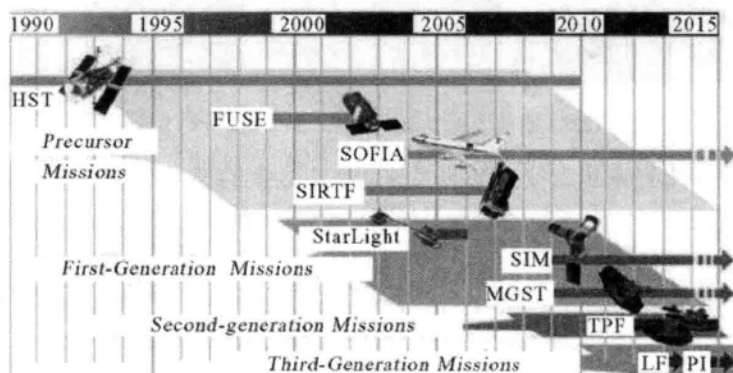


图1.3.1 美国的Origion计划阶段、时间表

光学波段用于空间对地观测，国际上20世纪80年代开始起步。90年代有人提出用光干涉测量方法获得高分辨率的地球表面图像。美国菲利普实验室一直致力于空基超轻望远镜成像技术研究，曾提出一个空间稀疏孔径干涉仪阵计划。美国麻省理工学院空间实验室提出用分布式卫星携带分立望远镜，合成一个比单个系统更大的孔径，用以获得更高分辨率的对地可见光成像系统。

从1996年开始，美国空军联合其他部门（如美国海军研究实验室、Aerospace公司、Eastman Kodak公司等）启动了超轻型成像技术实验项目（UltraLITE），^[11]最终目标是建立可展开式空间多孔径光学成像系统，至2000年已建立可展开式（多镜面）光学望远镜地面演示系统，目前此工作仍在继续。

与此同时，NASA、JPL和Lockheed Martin导弹空间部也都积极开展对地观察空间光学合成成像的研究^[12]，Lockheed Martin公司1999年开始建立由9个9cm口径独立望远镜组成的0.75m成像实验系统^[13]，2003年系统已建成。但是这些方案都还是准备在空间使用单个航天器。



图 1.3.2 多孔径斐索成像干涉仪实验系统

而美国麻省理工学院(MIT, 图 1.3.3)空间系统实验室还研究采用分布式小卫星系统(DSS)实现高分辨率干涉成像^[14/15], 设计工作已从射电波段向可见光学波段发展。MIT 已经建造了白光自适应 Golay-3 望远镜系统, 研究稀疏孔径系统在设计和建造中的技术困难^[16]。

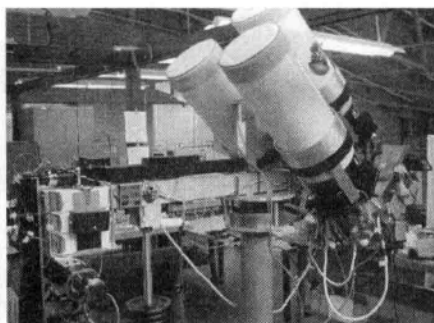


图 1.3.3 MIT 的白光自适应 Golay-3 望远镜系统

美国洛克希德·马丁(Lockheed Martin)公司、NASA、加州理工学院、JPL 实验室、California 大学和 Rochester 大学正在联合进行空间多仪器口径分布式传感系统(MIDAS)的研究^[17](图 1.3.4)。该系统的主要部分是望远镜阵列系统, 能够实现大视场、衍射受限成像, 并有两种工作模式: 在无源成像模式时, 可以在 5000km 高的轨道上进行长时间静态对地观察, 地面分辨率小于 1m, 也可以在 100km 高的轨道上运行进行超高分辨率成像, 地面分辨率达到 2cm; 而在主动遥感成像模式时, 系统利用自身的集成固体激光器完成激光雷达成像、振动测量、表面照明、激光光谱测量和空间光通信数据传输等任务。JPL 实验室研究人员还在 2004 年的国际激光、电光学及量子电子学术会议(CLEO/IQEC)上报道了高精度空间激光测量技术, 精度达 10^{-12}m , 为空间光学稀疏孔径共相叠加提供了测量保障。