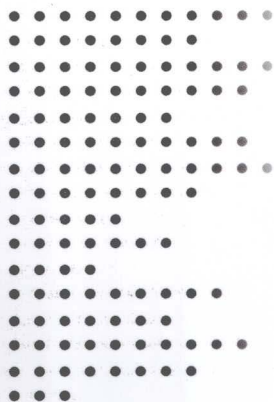




◎ 耿则勋 陈 波 王振国 王 艳 著



自适应光学图像复原 理论与方法



科学出版社
www.sciencep.com

自适应光学图像 复原理论与方法

耿则勋 陈 波 王振国 王 艳 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

自适应光学是补偿由大气湍流或其他因素造成的成像过程中波前畸变的最有前景的技术,但经过自适应光学初校正后图像中残存的高频信息抑制或混叠必须经过后处理才能得到恢复和解缠,这一后处理过程称为自适应光学图像的恢复或复原。本书是在国家“十一五”863课题和国家自然科学基金项目研究的基础上总结而成,介绍了自适应光学图像复原的数学基础、波前重构和复原图像质量评价方法,详细讨论了自适应光学图像复原的多种非线性方法,并给出了这些算法的实现过程和相应的实验结果。

本书可作为从事信息光学处理与计算的研究人员的参考书,也可供自适应光学领域的科研与工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

自适应光学图像复原理论与方法/耿则勋,陈波,王振国,王艳著.
—北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-027169-3

I. ①自… II. ①耿…②陈…③王…④王… III. ①自适应性-光学-图像处理-研究 IV. ①0436②TN911.73

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第060186号

责任编辑:韩 鹏 于宏丽 / 责任校对:朱光光

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年4月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010年4月第一次印刷 印张:13 3/4

印数:1—2 000 字数:311 000

定价:48.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

地球大气层是一种典型的随机非均匀介质，其中的热分子运动所形成的湍流结构以及其他离散混浊微粒的作用使光在其中的传播产生相位波动、折射率起伏，导致波前阵面畸变。空间目标发出的平面波射入大气后，随着光在大气中的传播，到达望远镜瞳面的就不再是平面波，从而引起望远镜焦平面上像点的能量扩散、峰值降低以及像素位置漂移，形成图像模糊和降质。除了大气湍流外，光学传输通道中的折射率不均匀、光学零件表面面形误差以及温度和应力变形等许多因素也可形成波前阵面随机起伏（即波前误差）降低了图像的分辨率。自适应光学技术（adaptive optics, AO）是补偿或减轻光学成像中波前畸变、克服大气湍流以及其他因素对成像质量影响的最有前景的方法。

自适应光学的概念是由美国天文学家 H. W. Babcock 于 1953 年提出的，但由于当时各个方面的技术条件不成熟而未能实现。直到 20 世纪 70 年代，随着自动控制技术、电子技术以及其他相关技术的发展，自适应光学才真正发展成为一种实用的光学技术。几乎所有的大中型望远镜都采用了自适应光学系统，如欧洲南方天文台 ESO（European Southern Observatory）3.6m 望远镜的自适应光学系统 ADONIS、安装于 8m 北半球双子座（Gemini）望远镜的 Hokupa'a 自适应光学系统、应用于 3.6m 加拿大-法国-夏威夷望远镜的 PUEO 自适应光学系统等。我国已于 2000 年研制成功、2004 年完成升级改造的 61 单元的地对空遥感自适应光学系统，它被安装在云南天文台 1.2m 天文望远镜上，可以实现对天文目标观测中实时波前畸变校正。

自适应光学系统利用波前探测器（wave front sensor, WFS）实时测量成像系统瞳面波前相位误差，然后将这些测量数据转换成自适应光学系统的控制信号，并对成像系统的光学特性进行实时控制，从而补偿由大气湍流引起的波前相位畸变，使焦平面上得到接近设备理论衍射极限的目标图像。但是，即使是目标中直到成像系统衍射极限的空间频率信息都已被记录在观测数据中，由于自适应光学系统自身的机械与光学原因、闭环伺服带宽、波前观测数据误差以及噪声等多种因素的影响，自适应光学对成像质量的补偿或校正仅仅是部分的、不充分的，目标的高频信息仍然受到严重的混叠（混叠到低频信息成分中）、抑制和衰减。因此，对经过自适应光学系统获取的图像必须进行基于数字技术的后处理，经解卷积或解混叠（deconvolution）与恢复和重建（restoration and reconstruction），才能使混叠的高频成分得到解缠或恢复与重建，形成增强或重建后的高分辨率（或高清晰）图像。本书主要针对我国自适应光学地基望远镜成像对后处理的迫切需求，重点叙述了自适应光学图像复原的理论与算法，同时对自适应光学波前重构和图像复原的质量评价问题也进行了探讨与分析。

近几年来，我们得到了国家 863 计划一系列项目（遥感影像中大气模糊消除算法研究，编号：2006AA12Z110）的支持，开展了天文观测图像高清晰重建相关理论模型与算法方面的研究，取得了一些有意义的结果和结论。随后，在国家自然科学基金项目

(自适应光学图像重建理论与算法研究, 编号: 60778051) 的资助下, 围绕自适应光学波前重建、单帧自适应光学图像复原、序列自适应光学图像高清晰复原以及自适应光学图像复原质量评价方法, 进行了深入的探讨和综合实验, 取得了一些新的结果。本书就是对这些工作以及相关内容的总结。

本书的完成凝结了许多人的关爱和心血。衷心感谢中国工程院姜文汉院士多年来对后辈的关爱和支持。感谢中国科学院光电技术研究所饶长辉研究员对笔者研究工作的支持和帮助。感谢解放军信息工程大学测绘学院遥感信息工程系主任姜挺教授对本书出版的关心和支持。由衷感谢解放军信息工程大学测绘学院遥感信息工程系徐青教授对项目研究、专著出版等各方面给予的关心和支持。感谢解放军信息工程大学测绘学院遥感信息工程系摄影测量教研室主任龚志辉教授对本书出版的关心。感谢桂林空军学院沈军教授、李雅瑞教授、沈田双副教授、杨贞文主任、赵西友副教授、王焕伟副主任对本书出版的关心和支持。感谢北京大学空天信息工程研究中心程承旗教授、郭仕德教授、濮国梁副研究员对本书出版的帮助和支持。科学出版社韩鹏先生对本书出版给予了大力支持并付出了艰辛的劳动。李冰、刘宏、隋雪莲、杨阳、赵振磊、王兰、宋向、陈路、王洛飞、魏晓峰等研究生协助整理了部分文稿, 在此一并表示感谢。本书写作过程中, 借鉴和参考了国内外同行的研究成果及有益经验, 引用了大量的参考文献, 谨在此表示衷心的感谢。

本书的出版得到国家 863 计划 (项目编号: 2006AA12Z110)、国家自然科学基金 (项目编号: 60778051) 和军队 “2110” 工程的资助。

我们深知, 本书所反映的研究工作进展, 还只是自适应光学图像复原的一个侧面。由于作者的学术视野、专业水平和研究深度所限, 书中内容难免挂一漏万, 不当之处敬请广大读者批评指正。

作 者
2010 年 2 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 自适应光学技术的应用需求	1
1.2 自适应光学图像复原的研究意义	2
1.3 自适应光学系统发展现状和前景	4
1.4 自适应光学图像复原技术的研究概况	10
1.5 本书主要内容及结构安排	16
第 2 章 大气湍流波前扰动及自适应光学技术	19
2.1 湍流现象	19
2.2 大气湍流描述参数	22
2.3 光学传递函数	25
2.4 自适应光学技术	28
2.5 自适应光学成像原理演示系统 CYAOIS	32
2.6 本章小结	36
第 3 章 自适应光学图像复原的数学基础	37
3.1 自适应光学图像降质原因及模型	37
3.2 图像复原中的病态特性	39
3.3 非线性成像系统和线性成像系统	42
3.4 成像模型离散公式	44
3.5 循环矩阵和分块循环矩阵的对角线化	47
3.6 本章小结	50
第 4 章 自适应光学图像复原方法及质量评价	51
4.1 图像盲复原算法	51
4.2 贝叶斯图像复原	56
4.3 小波变换图像复原	60
4.4 图像复原质量评价	61
4.5 本章小结	68
第 5 章 自适应光学图像点扩散函数重构	69
5.1 点扩散函数、光学传递函数与调制传递函数	69
5.2 图像的点扩散函数先验模型及参数表达	70
5.3 Zernike 多项式	74
5.4 面向图像复原的广义岭估计 Zernike 模式法点扩散函数重构	78
5.5 基于非抽样小波变换的大气湍流点扩散函数估计	84

5.6	本章小结	91
第6章	基于可靠支持域和改进代价函数的 ENAS-RIF 算法	92
6.1	NAS-RIF 图像复原算法原理	92
6.2	改进的 ENAS-RIF 图像复原算法	96
6.3	实验结果及分析	101
6.4	本章小结	104
第7章	多重约束非对称 IRL-IBD 算法	105
7.1	IBD 算法概述	105
7.2	RL 算法和 RL-IBD 算法	107
7.3	多重约束非对称 IRL-IBD 算法	113
7.4	实验结果及分析	117
7.5	本章小结	122
第8章	直接解卷积图像复原	123
8.1	几个概念	123
8.2	APEX 直接解卷积图像复原算法	124
8.3	实验结果	128
8.4	本章小结	130
第9章	极大似然图像盲解卷积	131
9.1	光电探测和光子成像基础理论	131
9.2	有限光子非相干成像极大似然盲解卷积算法	134
9.3	动态支持域约束极大似然盲解卷积算法	139
9.4	本章小结	144
第10章	基于总变分极小化的图像复原	145
10.1	总变分极小化原理	146
10.2	定点迭代方法与基于非周期反卷积模型的离散方案	147
10.3	多格网椭圆形偏微分方程求解法	150
10.4	基于总变分极小化的图像盲复原	152
10.5	实验结果与分析	154
10.6	本章小结	159
第11章	基于 MAP 原理的自适应光学图像多帧联合解卷积	160
11.1	基于方差统计的图像序列不良帧剔除	160
11.2	MAP 联合解卷积图像复原	165
11.3	MAPJD 算法参数自动估计	169
11.4	多帧联合解卷积图像高清晰复原算法	172
11.5	实验结果及分析	176
11.6	本章小结	181
第12章	基于二代曲波变换的自适应光学图像复原	182
12.1	第二代曲波变换	182
12.2	基于二代曲波变换的自适应光学图像去噪	189

12.3	傅里叶-曲波域正则化解卷积算法	193
12.4	ForCuRD 复原算法实验结果及分析	198
12.5	本章小结.....	201
参考文献		202
附录 常用缩写		209

第 1 章 绪 论

1.1 自适应光学技术的应用需求

大气是一种不稳定的随机介质,光波在大气中传播时,会受到分子吸收、大气气体和气溶胶散射、湍流扰动等影响。其中,吸收和散射主要使光信号能量衰减,并引起消光和偏振;而湍流造成空气折射率的随机变化会导致光波振幅和相位的随机起伏,形成光强闪烁、波面畸变和光束漂移等现象(饶瑞中,2005;张逸新等,1997)。当一束平面波射入湍流介质后,湍流引起的折射率差异使平面波内不同光线的光程产生差异;在射出湍流介质时,光波的波阵面不再是平面,而是一个随机曲面。湍流对光传播影响的本质就是改变了光波的原始波阵面,波阵面由平面畸变成随机曲面(即湍流效应),这就使目标在成像设备焦平面的图像产生严重模糊(吴健等,2005;Roggemann,1996;塔塔尔斯基,1978;Strohbehn,1978)。在地对空观测成像(周仁忠等,1996a)、天基对地遥感观测高分辨率成像(张晓芳等,2005)和高速飞行器气动光学成像(李贵春,2006)中,这都将严重影响光学系统的成像性能。

自适应光学(adaptive optics, AO)(周仁忠等,1996a)技术是克服和补偿大气湍流影响最有效的措施。自适应光学系统利用波前探测器(wave front sensor, WFS)实时测量成像系统瞳面波前误差,然后将这些测量数据转换成自适应光学系统的控制信号,并对成像系统的光学特性进行实时控制,实时校正入射光束波前变形,从而补偿由大气湍流引起的波前畸变,使物镜得到接近衍射极限的目标像(Roddier, 1999; Hardy, 1998)。自适应光学技术使光学系统能自动适应外界条件变化,始终保持良好的工作状态。

在地对空观测成像中,由于“大气湍流”这种动态干扰的影响,光学望远镜的实际分辨率远远达不到理论上所预期的光学衍射极限。一个口径达数米的大型无补偿光学望远镜,在地面通过大气层对空间及天文目标进行观察时,由于大气湍流的影响,其实际成像分辨率不会超过天文爱好者手中口径仅为0.1~0.2m的小望远镜,而且观测到的图像模糊、抖动(Tyson, 1998)。即使是类似于“哈勃”之类的太空望远镜(Korechhoff, 1990),如果没有补偿措施,那么太空低温、失重环境的影响导致镜面畸变,使所获取的目标图像模糊和降质。采用有补偿的地基自适应光学天文望远镜,可以对波前畸变进行实时补偿,从而获取目标的长曝光图像,记录目标精细结构所对应的高频信息,是克服大气湍流影响最有效的方法。自适应光学目前已经成为全世界天文台广泛使用的技术,从20世纪90年代开始,许多4m级的望远镜已装备了自适应光学系统。现在许多大望远镜也加入了这一行列(Gilmozzi, 2006),包括两架10m的Keck望远镜、8.2m的北双子座反射望远镜、8.3m的昴星团望远镜,目前正在研究的还有新一代25~100m的地基自适应光学望远镜。天文学家已取得了共识,缺少了自适应光学系统

的地基光学,天文学将失去发展空间。双子星座天文台的 Francois Rigaut 断言:“没有自适应光学系统,建造下一代巨型望远镜是毫无意义的。”(Daukantas, 2006)

在航空航天对地遥感高分辨率成像中,遥感光学仪器、摄影相机等的工作条件很恶劣,会受到不断变化的热应力和万有引力的影响,造成系统分辨率下降,这使所获取的图像产生模糊和降质。采用星载自适应光学技术,可以克服卫星温度场、重力场随机扰动对成像质量的影响,获得接近衍射极限分辨率的图像,同时可放宽对热控和姿态稳定的要求,使大口径反射镜的面形加工误差和应力支撑所带来的系统误差得到校正。KH-11、KH-12 系列侦察卫星(赵秋艳, 2001; 庞之浩等, 2000),其光学系统的相机镜头采用自适应光学成像技术,补偿重力和温度引起镜面变形造成的图像畸变,使卫星详查时地面分辨率达到 0.1m,这是当今天基成像所能达到的最高水平。我国在 1m 和更高分辨率对地观测遥感成像传感器的研制方面,也做出了详细规划。2005 年发布的国家中长期科技发展规划,把高分辨率对地观测列为重大专项,提出在未来的 15 年我国要逐步发展分辨率达 0.5~0.1m 的空间光学遥感器,要达到这种高分辨率,就必须在星载遥感器上加载微型自适应光学仪器设备。目前,中国科学院、华中科技大学(李俊, 2006)、北京理工大学(俞信等, 2000)正在开展空间光学遥感器自适应光学技术的相关理论研究。

在高速飞行器成像制导系统的光学成像中,与大气湍流性质相同的气动光学效应也严重影响光学系统的成像性能(Clark, 1995)。带有光学成像探测制导系统的高速飞行器在大气层内飞行时,其光学头罩与来流之间形成复杂的流场,湍流流场对光学成像探测系统造成热辐射和图像传输干扰,引起目标图像偏移、模糊和抖动,这种效应称为气动光学效应(李贵春, 2006)。随着各类高速飞行器对目标探测精度要求的提高,越来越多的制导系统要求采用光学成像探测技术,光学末制导过程伴随着严重的气动光学效应(洪汉玉, 2004)。飞行器速度越高,气动光学效应越严重,进而影响成像探测系统对目标的探测、精确定位与跟踪精度。如果采用小型化自适应光学器件校正气动光学效应,将有效提高飞行器制导系统光学探测的精确性,有力地推动新一代高速飞行器的发展。

自适应光学技术具有实时克服光学系统各种误差因素影响、保持系统始终工作在最佳状态的能力,使其不仅适用于望远镜和光学遥感器的高分辨率成像,而且在激光大气传输、激光加工、眼科医学、航空航天及通信领域也展现了广阔的应用前景。

1.2 自适应光学图像复原的研究意义

尽管自适应光学技术能够实时校正光束波前畸变,但是,由于自身设计、计算机处理能力、闭环伺服带宽、波前观测数据误差以及噪声等因素影响,自适应光学对大气湍流的补偿或校正仅仅是部分的、不充分的,目标的高频信息仍然受到严重的抑制和衰减(Schock, 2003; Roddier, 1999)。因此,对这些经过自适应光学初校正过的图像必须进行基于数字技术的后处理,才能获取目标的高清晰图像。目前已经发展成熟的自适应光学技术结合后处理复原算法,能够获取观测目标的高清晰图像,因此其得到了广泛应用。

图 1.1 是 Keck 望远镜观测的土卫六 Titan 图像及其高清晰复原结果 (Erik, 2007), 土卫六 Titan 是土星 Saturn 最大的卫星。图 1.1 (a) 是 Keck 望远镜在未使用自适应光学时观测到的 Titan, 基本是一块光学亮斑; 图 1.1 (b) 是 2005 年 1 月 15 日开启自适应光学时观测到的土卫六, 像质得到明显改善, 隐约可以看到在土卫六表面存在着云团; 图 1.1 (c) 是高清晰复原处理后的 Titan, 云层更加清晰、细节纹理更加丰富。比较图 1.1 (b)、图 1.1 (c) 两图可发现, 对自适应光学校正后的图像进行高清晰复原处理可以恢复出目标更多的细节特征, 进一步增强自适应光学图像的分辨率。

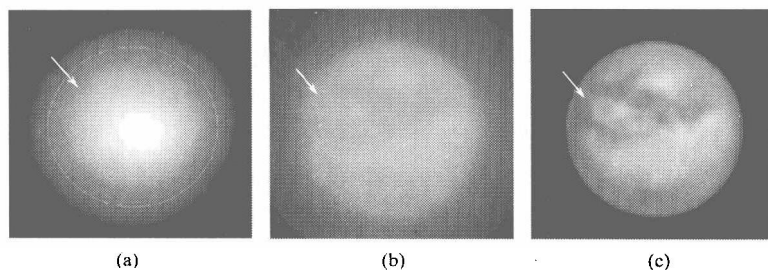


图 1.1 Keck 望远镜观测的土卫六 Titan 图像及其高清晰复原结果

图 1.2 是自适应光学天文望远镜观测到的双星图像及其高清晰复原结果 (Travis, 2006), 左边是未校正的原始图像, 衍射光斑尺寸较大, 无法分辨图像的细节; 中间图像使用了自适应光学闭环控制, 可以明显地分辨两颗星; 右边图像除了使用自适应光学闭环控制之外还利用了数字图像解卷积进行高清晰复原, 这样图像的分辨率和清晰度得到了进一步的提高。

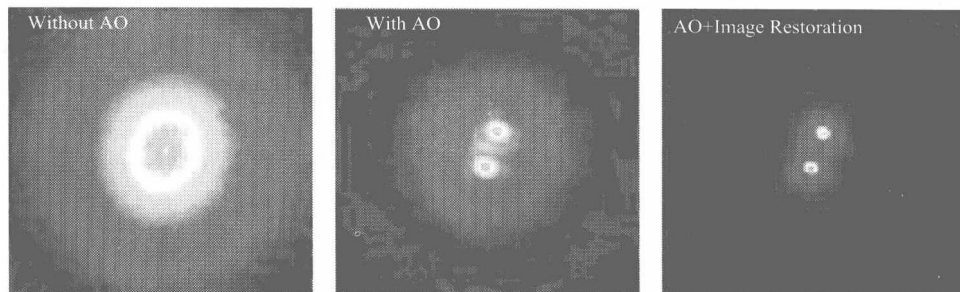


图 1.2 自适应光学天文望远镜观测的双星图像及其高清晰复原结果

自 20 世纪 90 年代自适应光学进入扩大应用阶段以来, 自适应光学图像后处理复原理论与算法得到了深入的研究。美国空军实验室 Maui 岛光学与高性能计算分部 (Air Force Maui Optical and Supercomputing Detachment of the Air Force Research Laboratory, AMOS) (2008)^① 自 1998 年以来连续支持自适应光学图像后处理复原研究项目, 每年在夏威夷 Maui 岛举行的高级光学与空间监视技术会议, 均有关于“自适应光学成像与高清晰复原”的专题研讨会。目前, 国际上有关自适应光学图像处理与恢复重建的

^① <http://www.maui.afmc.af.mil>

软件系统主要有美国国家天文台 (national optical astronomy observatories, NOAO) 的 IRAF (image reduction and analysis facility) (2008)^①、欧洲南方天文台 (European Southern Observatory, ESO) 的 MIDAS (munich image data analysis system) (Tim, 2007) 以及夏威夷大学天文研究所为 AMOS 研制的 IPPS (image processing pipeline software) (AMOS Program Office, 2004) 等。国内方面, 自适应光学系统不可或缺的图像数据处理部分, 包括基础理论模型、高清晰复原算法及相应的软件系统等还基本上为空白。

本书面向地基望远镜自适应光学成像、天基遥感自适应光学成像和高速飞行器光学探测成像中高清晰复原和后处理的问题, 结合国家自然科学基金项目“自适应光学图像重建理论与算法研究”、国家 863 计划项目等课题, 从湍流大气中的光传播现象入手, 根据光波大气湍流传输理论, 在分析大气湍流对长曝光光学传递函数和短曝光光学传递函数影响的基础上, 针对自适应光学图像波前畸变补偿不完全的问题, 利用信号处理和计算机软件的方法对自适应光学图像进行高清晰复原, 消除自适应光学系统校正的残余误差, 使其接近或达到成像系统的光学衍射极限。这可为自适应光学光电观测设备研制提供基础技术积累, 为高速飞行器成像制导系统探测图像在线高清晰复原提供技术支持, 同时也可为天基遥感观测高分辨率自适应光学图像的后处理与高清晰复原提供前期技术储备。

1.3 自适应光学系统发展现状和前景

自适应光学的发展历史可以概括为三个阶段: 20 世纪 50 年代到 70 年代为提出阶段, 20 世纪 70 年代到 80 年代末为以军事应用为主的发展阶段, 20 世纪 80 年代末至现在为扩大应用阶段。1953 年美国天文学家 H. W. Babcock 首次提出在地基天文望远镜上校正由大气湍流扰动所造成的光学波前畸变的想法 (Babcock, 1953)。虽然他的方案一直未能付诸实际, 然而这种思想却成为自适应光学的开端。事实上, 在那个年代, 大气湍流对光波波前相位扰动的机理人们尚不清楚, 另外, 那时的光电技术和计算机控制水平也很低, 不能满足自适应光学的需要。20 世纪 70 年代到 80 年代末为以自适应光学的军事应用为主的发展阶段。随着大型天文望远镜和高功率激光传输系统的发展, 对克服动态扰动的需求日益迫切, 在大气湍流理论和自适应光学基本原理相对成熟的基础上, 与光学加工技术和自动控制技术及其他支撑技术相结合, 20 世纪 70 年代初第一套自适应光学实时大气补偿系统诞生。此后, 该领域受到了高度的重视和广泛的研究。由于自适应光学在空间监测和激光能量传输方面的巨大应用潜力, 美国投入了大量的资金, 1991 年美国对其自适应光学技术所作的局部解密进一步促进了自适应光学技术的民用推广, 自适应光学技术发展进入扩大应用阶段。

1.3.1 地基自适应光学望远镜现况

很长一段时间内, 自适应光学发展的原动力主要来自于天文学和军事需要。天文学家用此克服大气扰动, 提高望远镜的角分辨率, 并使点源像更集中, 改进信噪比。军事上用于快速精密跟踪、指向, 建立高分辨率望远镜以识别目标, “星球大战”计划中利

^① <http://cfao. ucolick. org/software/index. php>

用自适应光学提高激光到达靶标的能量密度。

20 世纪 70 年代到 80 年代末为以自适应光学军事应用为主的阶段。在美国政府资金的支持下, Hardy 于 1972 年领导研制了一套实时大气补偿系统, 在 300m 水平光路上成功地对大气湍流效应进行了补偿, 经补偿后的图像分辨率接近衍射极限 (Hardy, 1991)。从 20 世纪 60 年代中期到 70 年代, Fried 和 Grennwood 等在自适应光学的大气传输和成像应用方面做了大量的理论研究 (Grennwood, 1992), 促进了自适应光学在这两方面的更进一步的应用。在 20 世纪 70 年代后期, 随着计算机技术的发展, 自适应光学技术已经可以实现。1977 年, Rockwell 公司的研究人员演示了一套红外自适应光学系统 (Hardy, 1998)。1975 年, MIT 的林肯实验室进行了高能激光的湍流和热晕补偿实验 (Grennwood, 1992)。这一系列的实验奠定了自适应光学技术实用的基础。1977 年美国公布了自适应光学技术研究的第一批综合成果 (Hardy, 1991), 建立了自适应光学技术的基本概念, 如变形镜、倾斜镜、波前探测、波前复原和控制等, 并公布了一些综合试验结果。

从 20 世纪 80 年代初到 90 年代初, 自适应光学技术步入了快速发展阶段, 从 1991 年初美国国防部解密的自适应光学技术文件来看, 其重点是在激光传输和高分辨率成像这两方面。第一台采用斜率探测器的大型自适应光学系统是 1982 年安装在 AMOS 的 1.6m 口径光学望远镜上的补偿成像系统 (Tyson, 1998)。夏威夷海拔 3000m 的 AMOS 站是美国空军监测网中的主要光学基站 (见图 1.3), 其任务是获取各国航天器的图像情报。AMOS 站装有四台地基光电深空监视系统: 一台 1982 年建成的 1.6m 望远镜上装有自适应光学系统, 用可见光和红外探测器获取高分辨率观测成像; 两台 1.2m 望远镜收集卫星红外光谱; 1997 年新装了一台口径 3.6m 的先进光电系统 (AMOS Program Office, 2004), 采用能动校正方法达到所需像质, 这台自适应光学望远镜对于恒星目标已经取得了接近 $0.7 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 波段衍射极限的分辨率, 即 $0.06''$ 。美国空军的第二台自适应光学望远镜安装在新墨西哥州星火光学靶场的菲利普实验室, 这台望远镜建于 20 世纪 80 年代, 口径 1.6m, 其自适应光学系统 (侯静, 2002) 已经更新换代了一次, 并在其上第一次试验成功利用大气对激光束的瑞利散射产生人造信标的激光导引星装置 (Foy, 1985)。1993 年美国空军菲利普实验室又建成一台口径 3.5m 的望远镜, 且于 1995 年装备了带有激光导引星的自适应光学系统, 美国空军高分辨率空间观测技术得到显著提高。

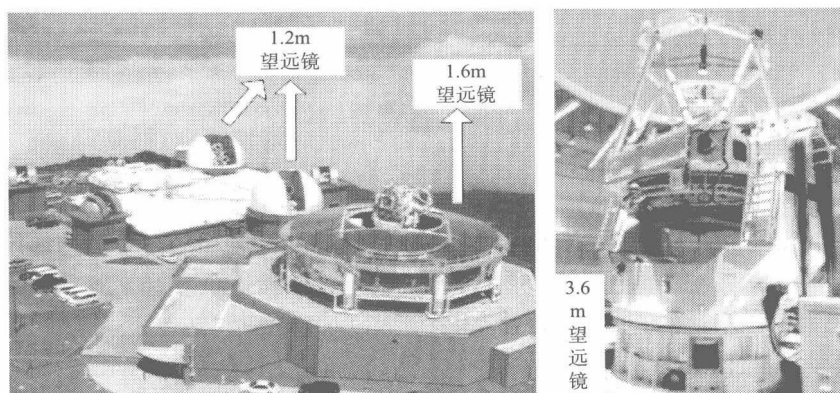


图 1.3 美国空军 AMOS 站及其地基自适应光学望远镜

以上一系列进展都是在强烈的军事应用背景下、在美国政府的支持下进行的，这种军事应用需求极大地促进了自适应光学的发展。与此相对独立的，自适应光学在天文界也获得了成功的应用。首先是欧洲南方天文台（ESO）的 COME-ON 自适应光学计划（Lena, 1994）用 H-S 传感器进行波前探测，用 19 单元连续面板变形镜进行校正，系统在可见光波段进行波前探测，在红外波段进行成像校正。1989 年该系统被装到位于法国普洛旺斯天文台的 1.5m 天文望远镜上进行实验，成功地在红外波段实现了大气校正。1990 年该系统运到南美，安装到欧洲南方天文台智利拉-西拉观测站（La-Silla observatory, LSO）的 3.6m 天文望远镜上进行实验时，改用了低噪声的 CCD 探测器，使系统的探测能力大大提高，达 11.5 星等，获得了 0.3"分辨率的星像，实验获得了圆满成功。这两次实验是自适应光学技术在天文上第一次成功应用，对世界天文界造成很大震动，被认为是天文观测技术发展的里程碑，此后的大型天文望远镜基本都采用自适应光学技术（Christoph, 2007）。最近 15 年，大口径望远镜发展迅速，表 1.1 列出了目前全球 5m 以上口径的主要自适应光学成像地基望远镜。

表 1.1 全球口径 5m 以上的主要自适应光学成像地基望远镜

口径 /m	等效 口径 /m	望远镜名称	望远镜地址	运行 时间	地区	AO 系统
2×8.4 Hexagon	11.8	Large Binocular Telescope(LBT)	Mt. Graham, Arizona	2006 年	美国	携带
11×9.4 Hexagon	10.0	Keck I	Mauna Kea, Hawaii	1993 年	美国	携带
11×9.4 Hexagon	10.0	Keck II	Mauna Kea, Hawaii	1996 年	美国	携带
11×9.4 Hexagon	10.0	Gran Telescopio Canarias(GTC)	La Palma, Canary Islands	2007 年	欧盟	在建
8.2 Hexagon	8.2	Subaru	Mauna Kea, Hawaii	1999 年	日本	携带
8.2 Hexagon	8.2	Very Large Telescope(VLT)UT1 Antu	Cerro Paranal, Chile	1998 年	欧盟	携带
8.2 Hexagon	8.2	Very Large Telescope(VLT)UT2 Kueyen	Cerro Paranal, Chile	1999 年	欧盟	携带
8.2 Hexagon	8.2	Very Large Telescope(VLT)UT3 Melipal	Cerro Paranal, Chile	2000 年	欧盟	携带
8.2 Hexagon	8.2	Very Large Telescope(VLT)UT4 Yepun	Cerro Paranal, Chile	2000 年	欧盟	携带
8.0 Hexagon	8.0	Gemini North	Mauna Kea, Hawaii	1998 年	多国	携带
8.0 Hexagon	8.0	Gemini South	Cerro Paranal, Chile	2000 年	多国	携带
6.5 Hexagon	6.5	MMT Conversion	Mt. Hopkins, Arizona	1999 年	美国	携带
5.1 Hexagon	5.1	Hale	Mt. Palomar, California	1949 年	美国	携带

资料来源：<http://lbto.org/>、<http://www.ioe.ac.cn/>、<http://cfao.ucolick.org/software/index.php>、<http://www.eso.org/>、<http://www.fas.org/irp/imint/kh-12.htm>、<http://www.gemini.edu/>、<http://www.gtc.iac.es/>、<http://www.keckobservatory.org/>、<http://www.mauui.afmc.af.mil/>、<http://www.mmt.org/>、<http://www.naoj.org/>、<http://astro.caltech.edu/observatories/palomar/>

位于美国 Hamilton 山的 LICK 天文台的望远镜装备了世界上第一个使用人造激光导星的自适应光学系统。激光导星的反射光提供了大气畸变的信息，这样观测天体时，就不会因为找不到合适的天然星体作标准而受限制了。图 1.4 左边是 LICK 望远镜及其自适应光学系统的示意图，图 1.4 右边在未开启自适应光学系统时成像一片模糊，在 LICK 望远镜开启自适应光学系统之后成像变得锐利。

位于夏威夷莫纳克亚山（Mauna Kea）山顶的 Keck 天文望远镜（Imke, 2002）是

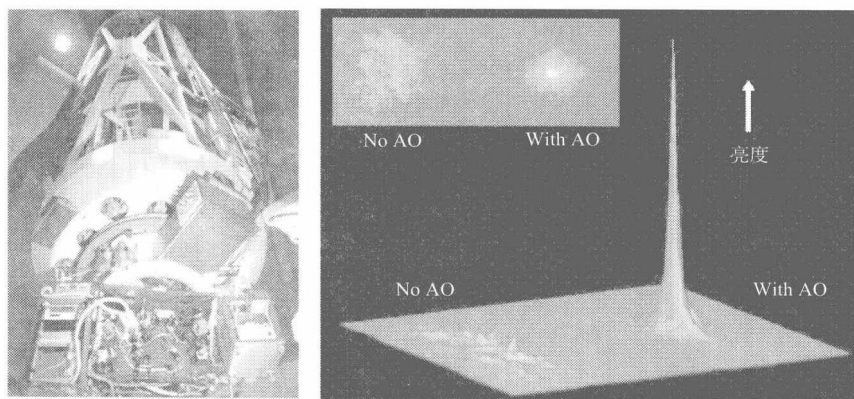


图 1.4 LICK 望远镜及其成像

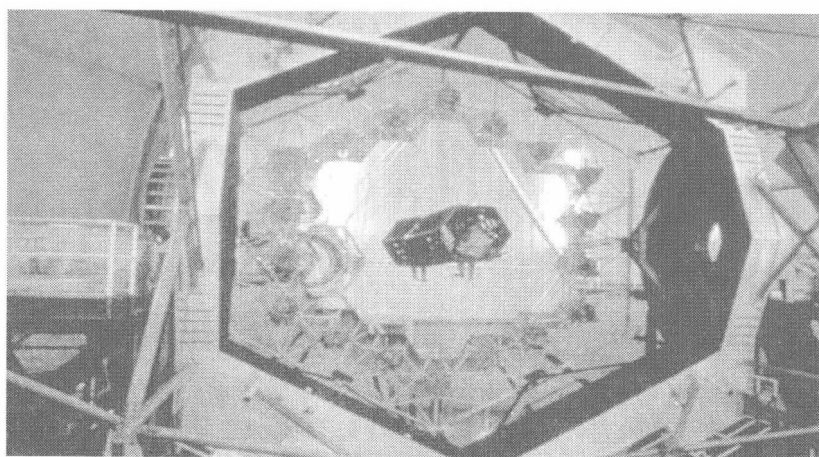


图 1.5 美国 Keck 望远镜主镜

世界上最大的光学和红外望远镜（见图 1.5），也是世界上第一个使用拼接镜面作为主反射镜的自适应光学系统。由 Keck 天文台和 LLNL 联合研制的自适应光学系统安装在 Keck 望远镜上，采用 349 通道的变形镜，低噪声高量子效率的减薄背照明 CCD 作为波前探测器件，采用 Na 激光导引星来实现 J、H、K 波段的天文观测。Keck 望远镜的核心器件是一块由 36 块六边形的小镜子组成直径 10m 的主反射镜。Keck 的分辨本领相当于可以分辨 1800 英里（1 英里 $\approx$ 1.609km）之外的汽车的两盏头灯。

欧洲方面，2004 年由欧盟的芬兰、爱尔兰、西班牙和英国联合提议，准备花 10 年时间研发、制造 40m 级别的超大型光学和红外望远镜（European extremely large telescope, EELT）（Tim, 2007）。EELT 将采用宽视场的多目标自适应光学系统（multi-object adaptive optics, MOAO）（Moretto, 2006），包含多个钠激光引导星和多层复合共轭校正等先进技术，建成后在红外波段将获得 0.05"~0.1" 的分辨率。

自适应光学地基望远镜技术上另一个巨大的进展是干涉技术的成功。ESO 位于南半球智利 Cerro Paranal 的 VLTI（very large telescope interferometer）是当今世界上最强大的光学干涉阵，它由 4 架 8.2m 的 VLT 单元自适应光学望远镜（见图 1.6 和表

1.1) 和 3 架 1.8m 的可移动望远镜组成, 最长基线达 200m, 2001 年 10 月 29 日两架 8.2m 的子望远镜, 相距 103m, 首次获得了恒星干涉条纹 (Cesarsky, 2001), 自那时起 VLT 阵有了飞速的发展。Keck 干涉阵包括两架 10m Keck I 和 II 望远镜 (见表 1.1) 和 4 架口径 1.8m 的可移动望远镜, 最长基线 140m, 2001 年 3 月 12 日 Keck I 和 II 望远镜, 相距 85m, 首次被联合组成一个干涉仪, 获得了恒星的干涉条纹。

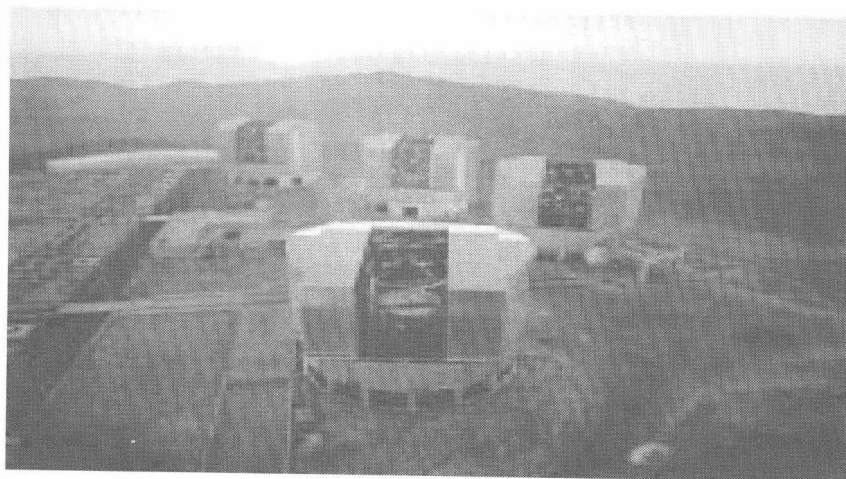


图 1.6 欧洲南方天文台 VLT 干涉阵

2000 年在美国国家科学基金 NSF 资助下, 美国专门成立了自适应光学研究中心 (center for adaptive optics, CfAO), 它从事地基望远镜、航空航天和人眼视觉领域中的自适应光学系统的基础研究, 并且承担教育任务和技术产业化的工作。CfAO 成员包括美国国内几十所高校、研究院以及多家天文观测台, CfAO 的成立为推广自适应光学技术做了很多卓有成效的工作。

1.3.2 自适应光学在空间光学遥感器上的应用

自适应光学是为了解决工程实践中碰到的具体问题而产生的。自适应光学的诞生成功解决了困扰人们几百年的、由大气湍流造成的望远镜像质下降问题, 成功解决了激光光束的有效传播问题。目前自适应光学技术不仅被运用到激光传输、空间监测等研究领域, 在空间光学遥感器中也取得了成功应用。

闻名于世的哈勃太空天文望远镜 (Hubble space telescope, HST), 就采用了自适应光学技术来校正由失重和温度变化引起的光学系统误差 (Gallagher, 1995)。HST 于 1990 年 4 月由发现号航天飞机送入轨道, 主镜口径 2.4m, 次镜口径 0.31m, 系统焦距 57.6m, 近地轨道 600km, 工作波段从紫外到近红外。为了托住两面镜子, 并使它们在同一条直线上, 在主镜背后装有 24 个制动器, 在副镜背后装有 6 个制动器, 一旦镜子变形, 则由制动器调节, 使光线重新聚焦到焦平面。HST 中装有一个精密制导传感器, 其中包括波前传感器, 它的作用就是探测出波前的变化, 由计算机控制将校正指令传递给制动器。图 1.7 为 HST 及其观测礁湖星云 (lagoon nebula) 的结果。

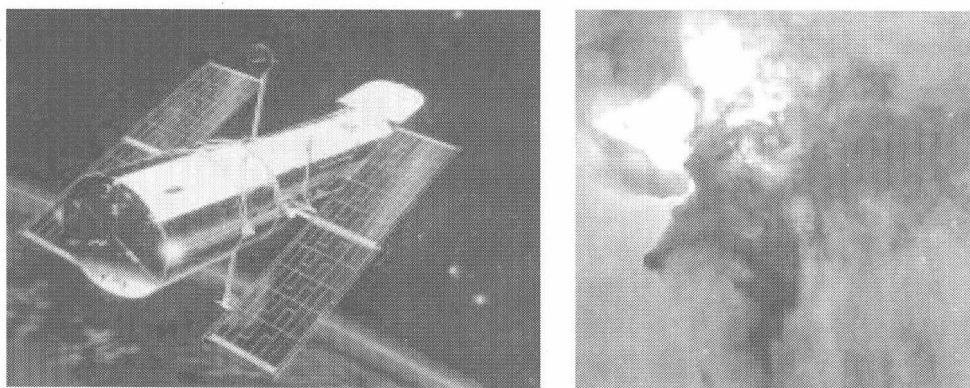


图 1.7 HST 及其观测的礁湖星云

韦伯太空望远镜 (Webb space telescope) (Claire, 2005) 是 NASA 计划在 2013 年发射升空的 HST 的未来替代太空望远镜, 如图 1.8 所示。该望远镜约 6.4m 宽的镜面, 面积是哈勃望远镜的 6 倍, 由 18 个镜面拼接而成。Lockheed-Martin 公司提出的设计方案是用 H-S 传感器对主镜变形进行探测, 并对主镜后面的 2000 个制动器发出控制信号, 实时校正由温度变化带来的误差和由指向系统引起的结构振动。

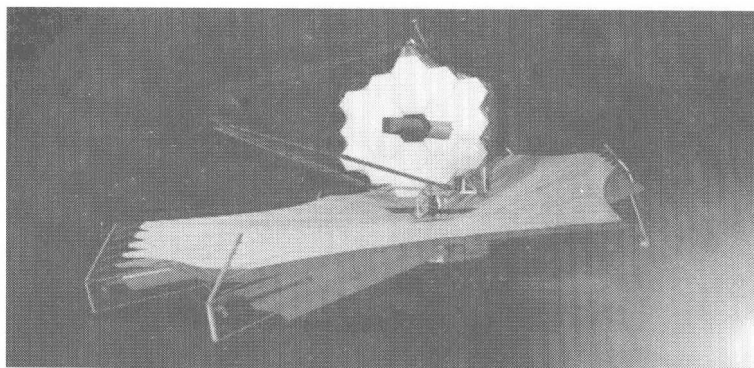


图 1.8 韦伯太空望远镜

高分辨率可见光相机是航天侦察最重要的手段之一。美国先后发展了六代高分辨率的可见光相机 (赵秋艳, 2001), 装载于侦察卫星上。KH-11 应用自适应光学使地面分辨率达到 0.15m, 接近衍射极限。其最先进的 KH-12^① 分辨率最高可达 0.1m, 焦距为 38m。它能够以与 HST 一样的方式成像, 即其光学系统的相机采用了自适应光学成像技术, 可在计算机控制下随着观测视场环境的变化灵活地改变主透镜的表面曲率, 从而有效地补偿透镜畸变造成的观测影像降质。当卫星在高轨道普查或者在低轨道详查时, 自适应光学系统能够快速改变镜头焦距。这样, 卫星在低轨道具有优越的分辨率, 在高

① KH-12 Product. KH-12 Improved Crystal Product, 2002. <http://www.fas.org/irp/imint/kh-12.htm>