

# 大口径光学合成孔径成像技术发展现状

周程灏<sup>1</sup>, 王治乐<sup>1\*</sup>, 朱峰<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 简明介绍了光学合成孔径的两种成像方式和光学波段合成孔径的发展概况。全面介绍镜面拼接、稀疏孔径和位相阵列3种合成孔径结构系统国内外发展现状。归纳出了目前光学合成孔径技术在天基和地基观测系统的发展趋势及技术难题。与传统单一口径的光学系统相比,光学合成孔径系统具有更高的分辨率、镜面加工难度低、易折叠、重量轻等特点,是实现高分辨率光学成像系统的一种重要且有效途径。

**关键词:** 合成孔径成像; 镜面拼接; 稀疏孔径; 阵列望远镜

中图分类号: O436 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20171001.0025

## Review on optical synthetic aperture imaging technique

ZHOU Cheng-hao<sup>1</sup>, WANG Zhi-le<sup>1\*</sup>, ZHU Feng<sup>2</sup>

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of technology, Harbin 150001, China;

2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

\* Corresponding author, E-mail: wangzhile@hit.edu.cn

**Abstract:** Two imaging modes and development of optical synthetic aperture are presented briefly in this paper. The current development situation of three kinds of optical synthetic aperture: segmented mirror, sparse aperture and phased array are introduced comprehensively. This paper also summarized the development trend of ground-based and space-based optical synthetic aperture system and the technical problems. Comparing with traditional single aperture optical system, optical synthetic aperture system has higher resolution, low processing difficulty of mirror, easy folding, light weight, and some other characteristics. So it is an important and effective way to realize high resolution optical imaging system.

**Key words:** synthetic aperture; segmented mirror; sparse aperture; phased array

## 1 引言

高分辨率成像系统在空间科学和军事应用方面都有着十分重要的意义。由于存在衍射极限,光学系统的极限角分辨率受制于光波波长和光学系统的孔径。随着对光学系统分辨能力要求不断提高,这就要求对于在一定波段下工作的光学系统,不断加大其系统孔径。但实际应用中由于种种因素的限制(例如制造材料、制造技术、机械结构、发射体积和重量等等),使得单孔径系统孔径的增加变得极为困难。光学合成孔径成像技术为提高成像系统分辨率提供了新的方法。

所谓光学合成孔径,就是通过一系列易于制造的小孔径系统组合拼接成大孔径光学系统以实现大孔径系统的高分辨率要求。根据光学成像理论可知光学系统成像必须满足几何光学的等光程条件和物理光学的同相位条件<sup>[1]</sup>。由于合成孔径成像系统的面型精度、控制精度和结构设计,要使位相精度在十分之一波长内,并且光学波段的波长较小,因此,在光学波段的合成孔径发展较为缓慢。直到最近十几年内,随着加工和控制技术的发展,光学波段的合成孔径才有了较快的发展。目前以美国为代表的世界各科技大国都将合成孔径作为各自的实现高分辨成像系统的主要研究对象之一,并已取得许多突破性进展。

## 2 光学合成孔径的发展历史

光学合成孔径技术的发展大致可以分为 3 个阶段:思想的起源、理论研究和系统研制试验。光学合成孔径成像的起源很早,可以追溯到 1896 年斐索提出在望远镜物镜前放置两个小孔通过干涉测量星体直径的思想。但是由于时代技术条件的限制,其思想并没有得到很好的实践。20 世纪 70 年代,美国 Meinel 在 AO 发表文章《Aperture Synthetic Using Independent Telescopes》,拉开了现代光学合成孔径技术理论研究的序幕。在随后的 20 年里,美国科研人员进行了大量的理论研究并且研制了实验样机。20 世纪 90 年代,世界各国

相继研制了大量地基合成孔径望远镜并投入使用,为光学合成孔径的研究积累了大量的技术资料。进入新世纪后,2001 年,法国的 Rousset 等人在 *Astronomical techniques* 上发表《Imaging with multi-aperture optical telescope and an application》探讨了合成孔径技术对地观测的可能性。在随后的几年里美国的多家研究机构相继研制了天基合成孔径系统的试验样机。

目前,光学合成孔径技术已经成为当前国际上的一个前沿研究领域,美国、俄罗斯、法国、德国以及中国都十分重视光学合成孔径技术的研究。

## 3 光学合成孔径结构

合成孔径的镜面结构有 3 种形式:镜面拼接(如 JWST)、稀疏孔径(如 GMT)和位相阵列(如 VLT)系统。光学系统的结构可以分为迈克尔逊型和斐索型<sup>[2-3]</sup>。目前的研究往往是将各类结构单独研究,不利于光学合成孔径系统的仿真建模。无论哪种结构,都可以看作是单一口径的光学系统的镜片进行逐步离散变化形成。

各类系统的结构都可以看作是镜面拼接,稀疏孔径再到位相阵列望远镜其实质就是主镜和次镜由空间连续变化为空间离散的过程,在变化的过程中,为了方便空间结构设计和光学系统像差校正,再对本来位于同一面型上的主次镜进行面型变化和主次镜之间结构变化。光学系统成像要求采样得到的点光源发出的球面波波面必须保证在同一个等相面上,也就是同相位条件(等光程条件)。实际光学系统,能引起波像差的因素可以分为 4 类:光学系统设计像差(系统波相差),镜面加工误差(如镜面粗糙度误差,折射率误差等),装调误差(活塞误差,倾斜误差等)和使用环境的影响(重力,温度和震动等)。(1)迈克尔逊型和斐索型结构相比各有优劣:迈克尔逊型结构可以充分利用现有的望远镜系统设计,并且可实现较大视场,但如果主镜为非球面或更复杂的高次曲面,加工若干个离轴子镜相对困难且成本较高,目前美国的 Itek 公司和 Perkins Elmer 公司的数控抛光机可以实现其加工,并且可保证其高精

度的面型控制。但迈克尔逊型结构的子镜匹配误差难以保证,增大了系统的实现难度。(2)斐索型结构中,由于每个子系统各自独立,可减少大口径系统的像差的影响,但由于每个子系统各自的焦点仅对一个物点重合,其他物点都会产生离焦和错位,因此不容易实现大视场系统。

### 4 光学合成孔径成像原理

光学合成孔径系统的成像方式有两类:直接成像和干涉成像<sup>[4-5]</sup>。直接成像和单孔径成像的方式相同。干涉成像根据范西特-泽尼克定理(Van Cittert-Zernike theorem),利用干涉图样测量目标源的复相干度谱,然后利用傅里叶逆变换得到光源的大小和强度分布,实现对目标的间接成像。图1分别示意了单一孔径、光学合成孔径直接成像和间接干涉成像的原理。图中只画出了一

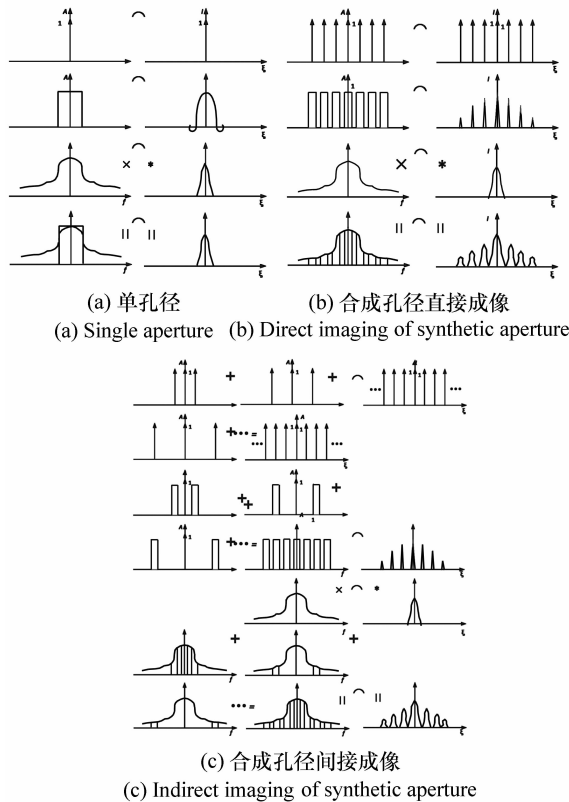


图1 单孔径、合成孔径直接成像与间接成像示意图  
Fig.1 Imaging diagram of single aperture and synthetic aperture system

维图形,二维情况可由一维类推。图中左列表示频域图形,右列表示空域图形。 $\wedge$ 表示傅里叶变换, $*$ 表示卷积, $\times$ 表示乘法。从其原理示意图可以看出单一孔径成像时,同时获得物体的不同空间频率信息,但受到截止频率的限制,高于截止频率的信息丢失。光学合成孔径直接成像时,同样是同时获得物体的不同空间频率信息,但是由于孔径的扩大,其获得的空间频率要多于单一孔径,即其截止频率一般大于单一孔径时的截止频率。间接成像需要通过改变孔径之间的距离获取不同空间频率的图像。因此,需要应用范西特-泽尼克定理将不同的空间频率图像合成为一幅图像。间接成像不能实现实时成像。

### 5 国内外发展现状

合成孔径按其技术实现方式可以分为镜面拼接(segmented mirror)、稀疏孔径(sparse aperture)和位相阵列系统(phased array)。从光路的结构

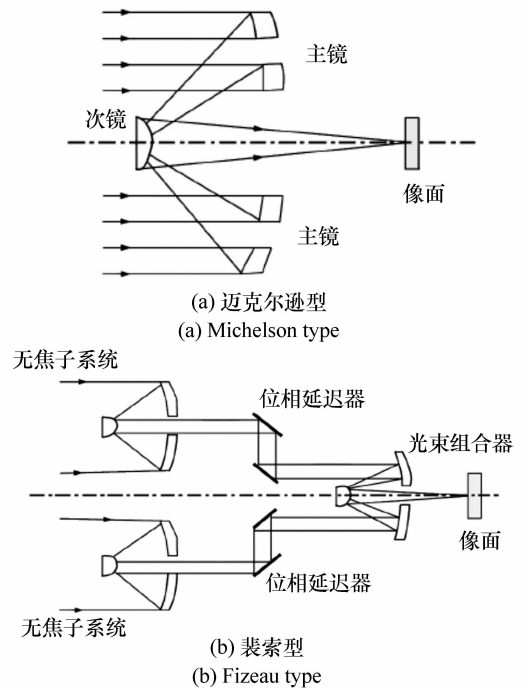


图2 迈克尔逊型和斐索型合成孔径成像系统示意图  
Fig.2 Schematic diagram of two types of synthetic aperture: (a) Michelson type, (b) Fizeau type

形式又分为迈克尔逊型和斐索型,其结构形式如图 2 所示。一般稀疏孔径系统采用迈克尔逊型结构,相位阵列系统采用的是斐索型结构。从应用平台考虑可以分为地基系统和天基系统。

### 5.1 镜面拼接

镜面拼接技术是用多片子镜片紧密拼接合成大口径镜面,是光学合成孔径技术中发展较快、技术成熟的方式,目前在地基系统中已被广泛应用,天基系统也有美国 NASA 计划发射的詹姆斯韦伯太空望远镜(JSWT)。

在地基系统中,美国的 Keck I 和 Keck II 望远镜的主镜采用了镜面拼接技术如图 3 所示,该望远镜系统已于 1993 年和 1996 年分别投入使用。Keck 望远系统的主镜镜面是由 36 块对角距离为 1.8 m 的六边形镜面拼接而成,等效口径为 10 m。其成像原理既可以用单个望远镜等光程成像,也可以两个望远镜同时使用组成基线 140 m 的望远镜阵列干涉成像。Keck 望远系统主镜采用了轻量化技术和自适应光学技术<sup>[6-7]</sup>。

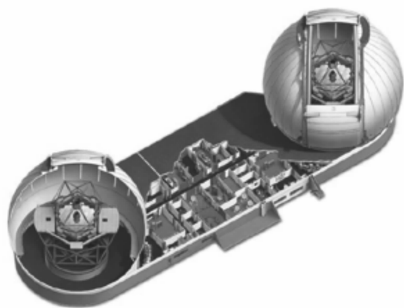


图 3 Keck 望远镜

Fig. 3 Keck telescope

美国加州理工大学(CIT)和加州大学(UC)联合中国科学院、加拿大、日本和印度的研究机构计划研制的下一代地基天文望远镜也计划采用镜面拼接技术如图 4 所示,该望远镜命名为 Thirty Meter Telescope(TMT)。TMT 计划建造在美国夏威夷的 Mauna Kea,于 2013 年 4 月由当地政府部门 BLNR 批准建设。TMT 采用反射式结构,主镜由 492 块对角距离为 1.4 m 的六边形镜面拼接而成,等效口径为 30 m,集光面积为 655 m<sup>2</sup>,次镜直径为 3 m。TMT 焦距为 450 m,有效视场为 20 弧分,工作波段为 0.31 ~ 28 μm。该望远镜同样采

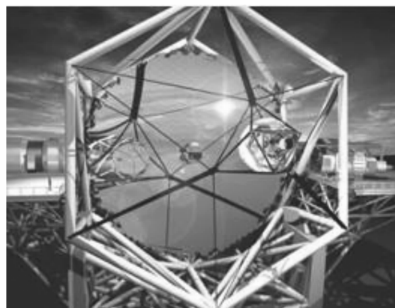


图 4 TMT 设计图

Fig. 4 Design diagram of TMT

用自适应技术,计划于 2021 年投入使用。科学家可通过它看到距地球大约 130 亿光年远的地方<sup>[8]</sup>。

加纳利大望远镜(The Great Canary Telescope,GCT)(如图 5 所示)位于大加纳利群岛拉帕尔马(La Palma)岛的一座山上,由西班牙、美国和墨西哥共同耗资 1.8 亿美元建造,号称世界最大的望远镜,集光区域面积为 78.54 m<sup>2</sup>,等效口径为 10.4 m(34.3 英尺),焦距为 169.9 m,视场为 20 弧分。这一望远镜由 36 个小镜片组成,能够捕捉可见光和红外线。10.4 m 的物镜一直处于启用状态,是世界上最大的宇宙观测点之一。和 Keck 类似,加纳利大望远镜也采用一些光学补偿方法抵消地球大气对到达地球的宇宙射线的影响。加纳利大望远镜包括几个转镜,每个转镜每秒改变形状 1 000 多次<sup>[9]</sup>。



图 5 GCT 望远镜

Fig. 5 GCT telescope

霍比-埃伯利望远镜(Hobby-Eberly Telescope,HET)位于美国德克萨斯州的麦克唐纳天

文台(如图6所示),是美国的德州大学奥斯汀分校、宾夕法尼亚州立大学、斯坦福大学、德国的慕尼黑大学、哥廷根大学联合研制的,由麦克唐纳天文台管理和操作,主体部分造价是1 350 万美元。其主镜为 $11.1\text{ m}\times 9.8\text{ m}$ 的六边形球面,由91块六边形的子镜拼接而成,每个子镜面直径为 $1\text{ m}$ ,厚为 $5\text{ cm}$ ,用零膨胀微晶玻璃制成,其等效口径为 $9.2\text{ m}$ ,焦距为 $13.08\text{ m}$ ,集光面积为 $77.6\text{ m}^2$ 。为了矫正重力造成的形变,望远镜采用了主动光学技术,每个子镜面下装有3个促动器,镜面下方共有273个促动器<sup>[10]</sup>。



图6 HET望远镜

Fig. 6 HET telescope

南非大望远镜(Southern African Large Telescope, SALT)(如图7所示)位于开普敦,由西班牙、美国和墨西哥共同耗资1.8亿美元建造,该望远镜原本打算复制美国的HET望远镜,但在建设

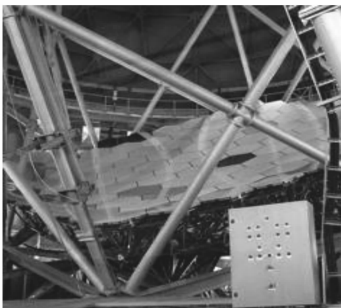
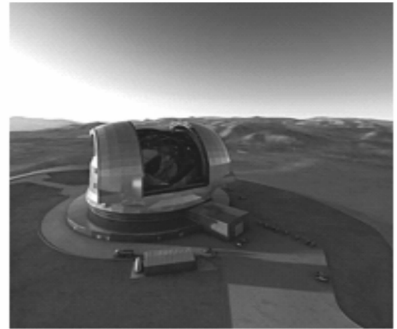


图7 SALT望远镜

Fig. 7 SALT telescope

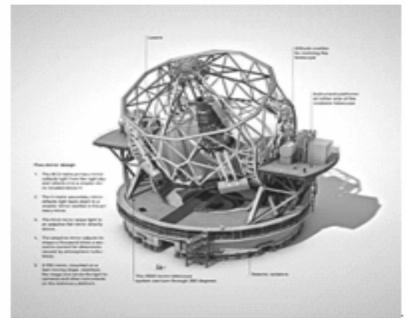
过程中在HET基础上进行了重新设计以提高视场和有效集光区域面积。其主镜是六边形球面镜,由91个对角长度为 $1.2\text{ m}$ 的六边形低膨胀玻璃子镜组成,实际口径为 $11.1\text{ m}\times 9.8\text{ m}$ <sup>[11]</sup>。

目前在新一代地基系统中欧洲南方天文台正在建造口径更大的地基天文望远镜Euro-Extremely Large Telescope(E-ELT),如图8所示。该望远镜主镜直径达到了 $39\text{ m}$ ,主镜由798个对角 $1.45\text{ m}$ , $55\text{ mm}$ 厚的长度正六边形组成,集光面积达到 $978\text{ m}^2$ 。次镜直径 $4.2\text{ m}$ ,采用自适应光学技术,次镜上安装了超过6 000个驱动器,用以校正大气扰动<sup>[12]</sup>。



(a) E-ELT 外观图

(a) Appearance diagram of E-ELT



(b) E-ELT 结构图

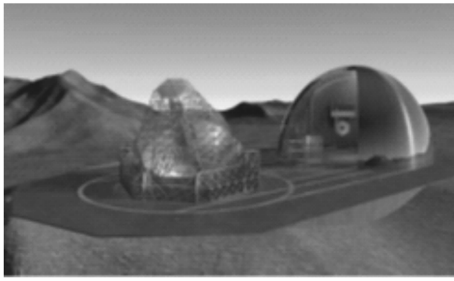
(b) Structure diagram of E-ELT

图8 E-ELT望远镜

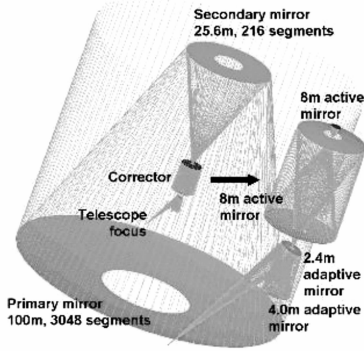
Fig. 8 E-ELT telescope

在研制 $40\text{ m}$ 级的地基天文望远镜的同时欧洲南方天文台也开展了 $100\text{ m}$ 级的天文望远镜Overwhelmingly Large Telescope(OWL)的预研工作,如图9所示。计划中望远镜主镜由3 048块对角长度 $1.6\text{ m}$ 正六边形组成,直径 $100\text{ m}$ 。次镜由216块对角长度 $1.6\text{ m}$ 正六边形,直径 $25.6\text{ m}$ 。同时该望远镜还计划采用多个自适应和主动光学补偿镜用于补偿各类扰动<sup>[13-14]</sup>。

在天基系统中,美国NASA詹姆斯韦伯望远镜(JWST)如图10所示,采用的也是镜面拼接技术。其设计要求的口径是哈勃的 $3\sim 4$ 倍,造价是



(a) OWL 外观图  
(a) Appearance diagram of OWL



(b) OWL 结构图  
(b) Structure diagram of OWL

图 9 OWL 设计图及光路图

Fig. 9 Design and optical path diagrams of OWL telescope

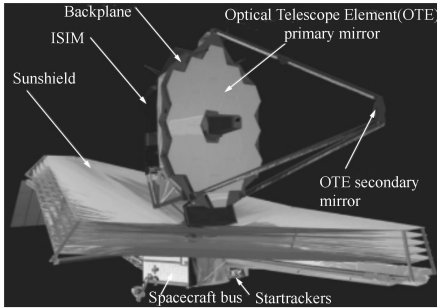


图 10 JWST 太空望远镜  
Fig. 10 JWST telescope

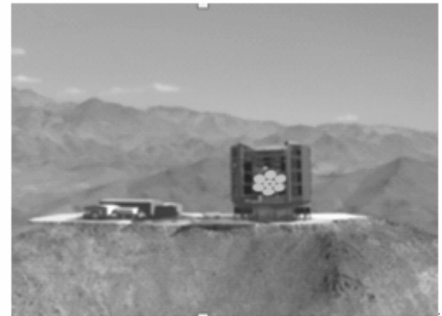
哈勃的 1/4 ~ 1/5。JWST 的主镜由 18 块对角距离为 1.5 m 的六边形镜面拼接而成,等效口径为 6.5 m(哈勃口径为 2.4 m)。该望远镜原计划 2011 年升空替代哈勃望远镜(HST),但因经费问题发射推迟到 2018 年。其主镜采用轻量化技术,折叠发射,在轨展开,重量小于 400 kG。其成像原理采用等光程成像。目前该望远镜正在进行一

系列地面相关测试<sup>[15]</sup>。

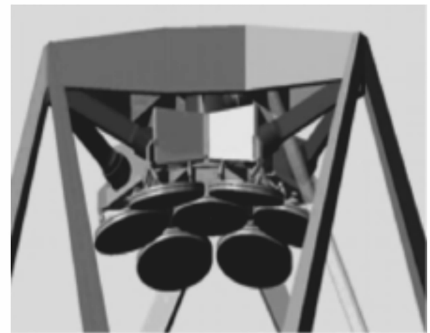
### 5.2 稀疏孔径

稀疏孔径是指由多个小口径子镜,按照一定形式排列(如 Golay 型和 Cornwell 型排列方式)等效成大口径主镜。

在地基系统中,美国的芝加哥大学(UoC)哈佛大学(HU)以及亚利桑那(UoA)等大学计划研制的大型地基天文望远镜 Giant Magellan Telescope(GMT)如图 11 所示,计划采用稀疏孔径光



(a) GMT 外观图  
(a) Appearance diagram of GMT



(b) GMT 结构图  
(b) Structure diagram of GMT

图 11 GMT 太空望远镜  
Fig. 11 GMT telescope

学系统。该望远镜采用格里高利结构,主镜由 7 个口径为 8.4 m 的反射镜组成,其中一块位于光轴中心,其余在其周围对称排列,等效口径为 24.5 m,集光面积 368 m<sup>2</sup>,主镜制成蜂巢状以减轻主镜质量,方便控制主镜温度。次镜由 7 个直径 1.1 m 的凹面椭球镜组成,等效口径为 3.2 m,次镜自身作为自适应技术的变形镜。望远镜工作波段为 0.32 ~ 25 μm,在波长 0.5 μm 时角分辨率为 0.21 ~ 0.13"。该望远镜预计在 2025 年投入使

用,目前第三块主镜子镜已开始制造,第四块主镜计划于 2014 年开始建造<sup>[16]</sup>。

在天基系统中美国空军研究实验室(AFRL)设计了 Deployable Optical Telescope (DOT) 如图 12 所示,并建立了实验平台。该光学系统采用迈克尔逊型结构,主镜由 3 个口径为 0.6 m 的子孔径组成,子孔径采用 Golay-3 型排列方式。主镜和次镜均可发射时折叠,在轨精密展开。目前该系统正在进行地面位相控制和紧密调节等试验<sup>[17]</sup>。



图 12 GMT 太空望远镜

Fig. 12 GMT telescope

为了使地球同步轨道近地点地面分辨率达到 2 m,ESA 提出了一种光学稀疏孔径概念,如图 13 所示。ESA 定义图像品质 (Image Quality) 为  $MTF \times SNR$ ,其提出的光学稀疏孔径光学系统图像品质为 4 ( $MTF \times SNR = 4$ ),系统主镜直径须要达到 7 m,通过在直径 5 m 的圆周上分布 6 个直径为 2 m 的子镜实现,其焦距为 108 m,视场角为  $0.1^\circ$ 。其卫星发射质量为 8 662 kg,在轨道展开机构尺寸为  $10 \text{ m} \times 14.3 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ <sup>[18]</sup>。

### 5.3 位相阵列

位相阵列由多个子望远镜组成,每个子望远镜的  $F$  数都比较小,系统整体视场较小。位相阵列是开始研究试验最早的技术方案,早在 1978 年,美国的亚利桑那大学就建立了 Multiple Mirror Telescope (MMT) 阵列望远镜,但由于当时的技术限制,分辨率提高并不明显。1988 年,美国空军实验室 (AFRL) 又研制了 Multipurpose Multiple Telescope Test bed (MMTT) 试验系统,用于实验室研究,如图 14 所示<sup>[19]</sup>。

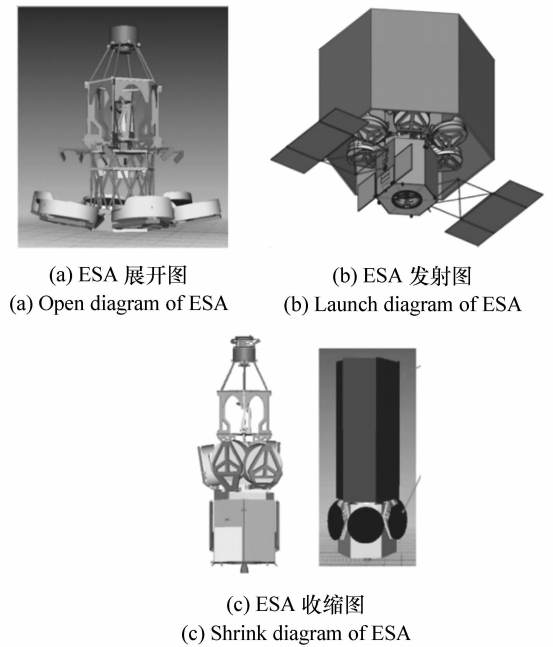
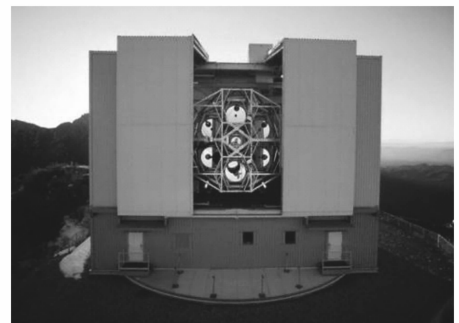
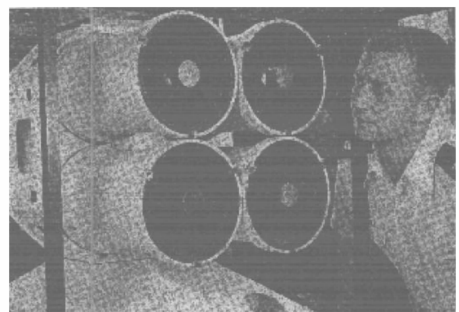


图 13 ESA 光学稀疏孔径设计图

Fig. 13 Design diagram of ESA sparse aperture system



(a) MMT 图  
(a) Diagram of MMT



(b) MMTT 图  
(b) Diagram of MMTT

图 14 MMT 与 MMTT 望远镜

Fig. 14 MMT and MMTT telescope

目前位相阵列结构比较成熟,在地基系统中的应用较为广泛,其中最具代表性的是美国亚利桑那大学联合德国、意大利的研究机构在 2004 年合作研制完成的 Large Binocular Telescope(LBT),如图 15 所示。目前该望远镜已经投入使用。LBT 光路采用斐索型结构,两片口径为 8.4 m 的反射镜作为主镜,等效口径相当于 11.8 m 的单片反射镜,分辨率相当于 22.65 m 的单片望远镜,视场为  $10.5 \times 10.5 \text{ s}^2$ ,成像原理采用干涉成像。该望远镜采用了自适应光学技术<sup>[20]</sup>。

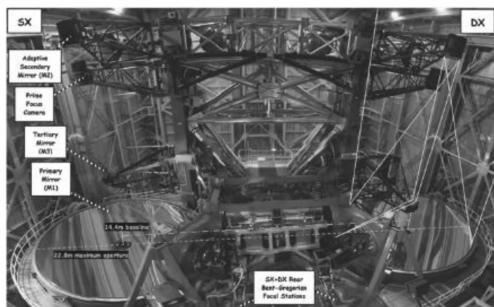


图 15 LBT 望远镜

Fig. 15 LBT telescope

Very Large Telescope(VLT)由 4 个直径 8.2 m 的主镜和 4 个口径 1.8 m 的可移动的辅镜组成,如图 16 所示。这些望远镜可以单独工作也可以 2 个或 3 个一起工作,形成一个巨大的干涉阵列,来自不同望远镜的光束经地下隧道组合在一起,保证了不同光束之间的光程差小于  $1 \mu\text{m}$ 。基线可以达到 200 m,角分辨力为  $0.001''$ ,为单个望远镜独立工作时的 25 倍。工作波长从  $300 \text{ nm} \sim 24 \mu\text{m}$ 。8.2 m 子望远镜的主镜曲率半径为 28 800 mm,曲率系数为  $-1.004 69$ , $f/1.8$ ,RMS 为  $38 \text{ nm}$ <sup>[21]</sup>。

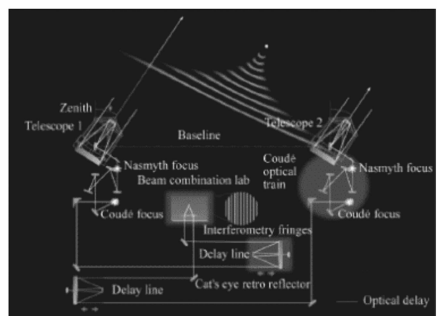
地基位相阵列望远系统的应用还有很多,如采用干涉成像英国剑桥的 Cambridge Optical Aperture Synthesis Telescope(COAST)。

天基位相阵列望远系统目前还没有实际应用,美国有多家研究机构在进行相关的地面研究。美国麻省理工学院(MIT)在美国国家侦察局的支持下设计研制了 Adaptive Reconnaissance Golay-3 Optical Satellite( ARGOS)系统,如图 17 所示,该样机采用斐索型结构,孔径排列方式采用 Golay-3



(a) VLT 外观图

(a) Appearance diagram of VLT



(b) VLT 光路图

(b) Light path diagram of VLT

图 16 VLT 及其光路图

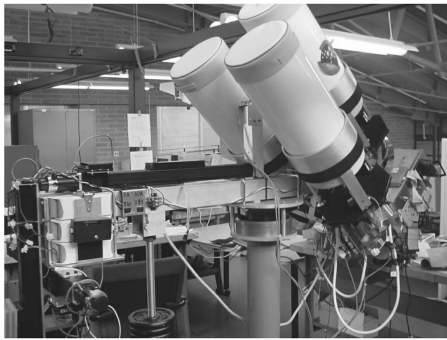
Fig. 16 VLT telescope

型,每个子孔径口径  $0.21 \text{ m}$ ,等效口径为  $0.62 \text{ m}$ ,作波段  $400 \sim 700 \text{ nm}$ ,视场为  $3 \times 3$  分弧<sup>2</sup>,样机的主要目的是研究系统孔径结构,相位差控制和该结构天基运用的可靠性<sup>[22]</sup>。

美国洛克希德马丁公司的 Advanced Technology Center(ATC)提出并研制了一系列位相阵列望远镜系统,用于位相阵列望远系统天基遥感应用的研究。该系列主要测试样机包括:Radial Telescope Array Testbed(9 个子镜,口径  $0.1 \text{ m}$ ,等效口径  $0.65 \text{ m}$ )、STAR-9 Distributed Aperture Testbed(9 个子镜,口径  $0.125 \text{ m}$ ,等效口径  $0.61 \text{ m}$ )和 MIDAS Concept(9 个子镜,口径  $0.35 \text{ m}$ ,等效口径  $1.5 \text{ m}$ )。3 种样机分别对 Y 型、Golay-9 型和 Cornwell 型孔径排列方式进行研究,如图 18 所示<sup>[23]</sup>。

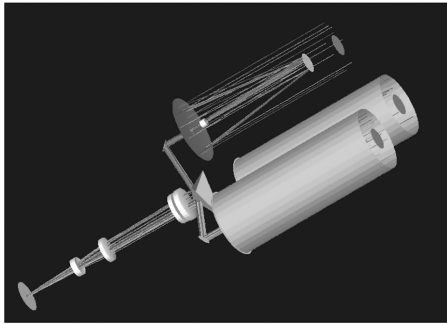
20 世纪初,美国 NASA 也开展了天基望远阵列系统的研究,设计论证了 Space Interferometer Mission(SIM)(如图 19 所示)和 Terrestrial Planet Finder Interferometer(TPF-I)两套系统。SIM 光学





(a) ARGOS 外观图

(a) Appearance diagram of ARGOS



(b) ARGOS 光路图

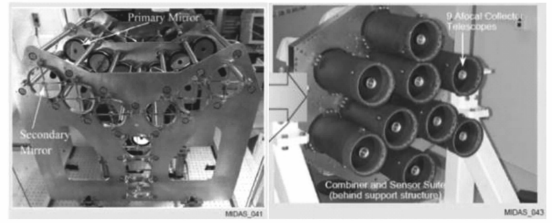
(b) Light path diagram of ARGOS

图 17 ARGOS 样机与结构图

Fig. 17 Prototype and structure diagram of ARGOS telescope

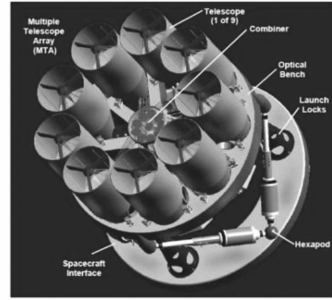
系统由科学测量干涉望远镜 (Science Interferometer)、导航干涉望远镜 Guide-1 (Guide Interferometer) 和高精度星跟踪望远镜 Guide-2 (High-accuracy Guide Star-tracking Telescope) 3 部分组成。科学测量干涉望远镜有两个口径为 50 cm 的子望远镜,基线长为 6 m,分为大视场和小视场两种工作模式。在大视场工作模式下视场为 15°,天体测量精度为 $(4 \times 10^{-6})''$ ;在小视场工作模式下视场为 2°,天体测量精度为 $(1 \times 10^{-6})''$ 。导航干涉望远镜 Guide21 有两个口径为 30 cm 的子望远镜,基线长为 412 m,视场范围很小只有几秒,用来补偿指向误差。科学测量干涉望远镜和 Guide2-1 具有类似的光束组合器。高精度星跟踪望远镜 Guide2-2 的口径也是 30 cm,用于监视整个系统的指向,以便调整飞行器的姿态<sup>[24]</sup>。

NASA 设计的另一套系统 TPF-I,如图 20 所示,中文名红外线天文干涉仪,采用是多个小型望



(a) Radial 图  
(a) Diagram of Radial

(b) STAR-9 图  
(b) Diagram of STAR-9



(c) MIDAS 图

(c) Diagram of MIDAS

图 18 洛-马公司样机

Fig. 18 Prototype of L-M telescope

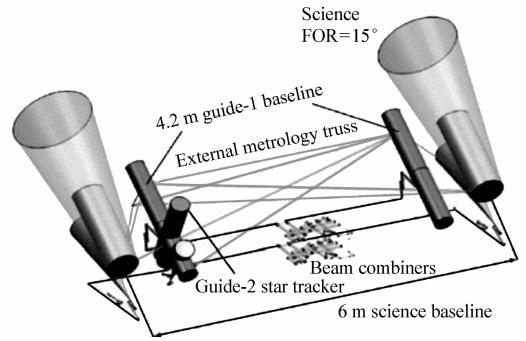


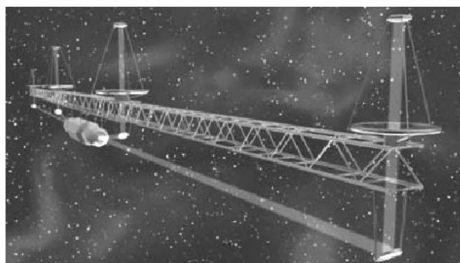
图 19 SIM 光学样图

Fig. 19 Optical sample of SIM telescope

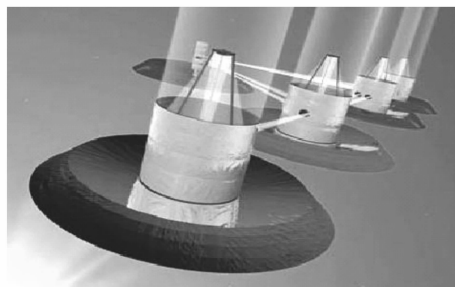
望远镜固定在一个结构上或分散在不同的太空探测器上并在太空中以特定形状排列,等效大口径的望远镜以大幅增加观测能力。NASA 论证了多种方案,并且进行了概念研究<sup>[25]</sup>。

目前 SIM 和 TPF-I 两项计划由于技术难度和经费等原因,都已处于暂定推迟状态。

欧洲航空局 ESA 同样提出了其天基望远镜阵列观测计划 DARWIN,用于观测太阳系外类地行星。该项目在 07 年时完成了理论研究和设计,目前该望远镜有多种设计方案,尚未开始实际制造。



(a) TPF-I 概念图 1  
(a) Concept diagram 1 of TPF-I



(b) TPF-I 概念图 2  
(b) Concept diagram 2 of TPF-I



(c) TPF-I 概念图 3  
(c) Concept diagram 3 of TPF-I

图 20 TPF-I 概念图

Fig. 20 Concept diagram of TPF-I telescope

达尔文阵列望远镜最新设计计划采用 6 个飞行器携带口径 1.5 m 的子望远镜,排列成正六边形,中心位置放置合束器,组成位相阵列望远镜在红外波段进行干涉成像。由于天基合成孔径技术难度较大,目前该项目仍旧在进行大量相关技术的研究和论证<sup>[25]</sup>。

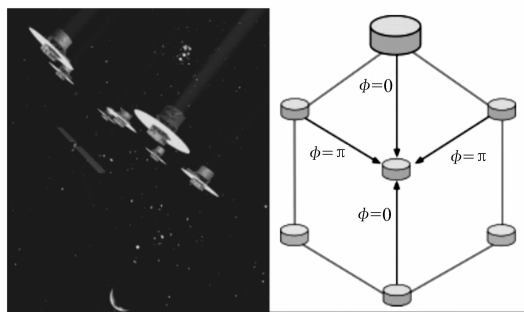
法国空军国家研究局采用 3 个子望远镜系统阵列合成望远系统的概念设计。各子望远镜系统运用独特的机构进行支撑和指向,光束在焦平面成像。俄罗斯国防委员会先进防御计划局研制也开展了合成孔径光学系统的研制<sup>[26-28]</sup>。

#### 5.4 国内发展现状

国内合成孔径的发展与国外差距较大,目前国内主要研究的机构有哈尔滨工业大学空间光学



(a) Darwin 概念图  
(a) Concept diagram of Darwin



(b) Darwin 结构图 1  
(b) Structure diagram of Darwin

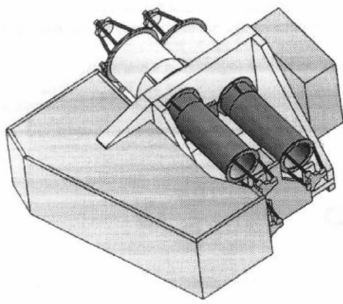
图 21 Darwin 概念图

Fig. 21 Concept diagram of Darwin telescope

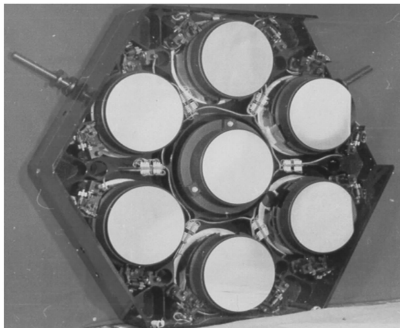
工程研究中心、北京理工大学、北京航空航天大学、苏州大学、国家天文台和航天科技集团 508 所等机构。其中哈尔滨工业大学是国内最早开展合成孔径相关理论研究的单位,并且研制了原理样机用于系统测试。

国家天文台于 2009 年投入使用的“大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜”(LAMOST)(使用后命名为郭守敬望远镜)是我国技术人员自主研发的世界先进水平大视场大口径望远镜。该望远镜由施密特校正镜 Ma(24 块 1.1 m 子镜拼接组成 5.72 m × 4.40 m)和主镜 Mb(37 块 1.1 m 子镜拼接组成 6.67 m × 6.05 m)组成,并且采用了主动光学技术和自适应光学技术<sup>[29]</sup>。

国家天文台在研制成功了 LAMOST 之后,也开展了 30 ~ 100 m 级的地基镜面拼接望远镜的预研工作。南京天文光学技术研究所的苏定强院士和崔向群首席研究员带领 30 ~ 100 m 望远镜研究小组,几乎与世界同步,开展了中国的 30 ~ 100 m 地面光学/红外望远镜方案 CFGT 的研究,提出中



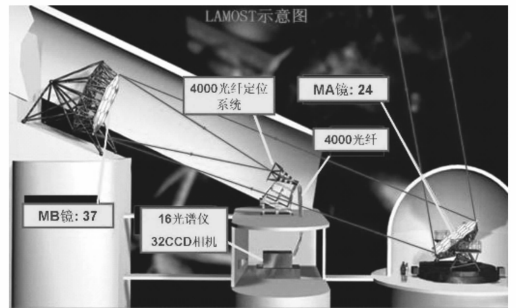
(a) 法国望远镜系统图  
(a) System diagram of France telescope



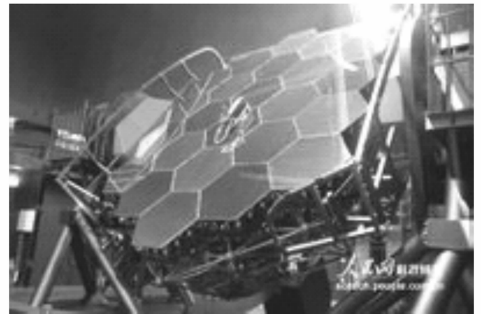
(b) 俄罗斯望远镜系统图  
(b) System diagram of Russia telescope

图 22 法国与俄罗斯望远镜的系统图

Fig. 22 System diagrams of synthetic aperture of France and Russia



(a) GMT 结构图  
(a) Structure diagram of GMT



(b) LAMOST 主镜图  
(b) Primary mirror diagram of LAMOST

图 23 LAMOST 结构图及主镜

Fig. 23 Structure diagram and primary mirror of LAMOST telescope

星仪式快焦比、短镜筒、小副镜的 30 ~ 100 m 望远镜的方案。

在天基系统中,哈尔滨工业大学承担了课题“合成孔径光学成像技术及其应用”并研制了原理样机。航天科技集团五院 508 所、苏州大学和北京理工大学承担了课题“甚高分辨率空间遥感器的研究”,中国科学院西安光机所承担了国家自然科学基金“光学虚拟合成孔径技术研究”以及高分辨成像技术专项子课题的研究。此外,北京工业大学、解放军信息工程大学、中国科学院西安光机所和长春光机所也开展了对光学合成孔径成像技术的研究。

北京工业大学的周智伟等人对图像复原和对共相误差对光学多孔径成像系统影响进行了分析和研究<sup>[30]</sup>。

解放军信息工程大学的魏小峰等人同样对光瞳优化、活塞误差探测和图像复原进行了分析和研究<sup>[31]</sup>。

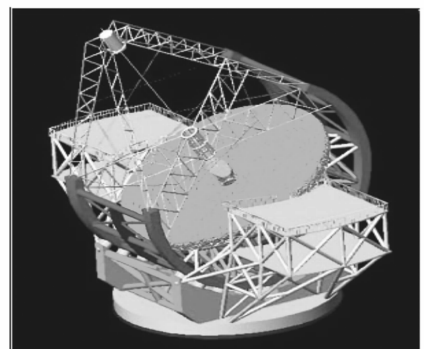


图 24 CFGT 设计方案

Fig. 24 Design scheme of CFGT telescope

中国科学院西安光机所的梁士通和易红伟等人对光瞳优化、系统设计等技术进行了深入研究<sup>[32]</sup>。

中国科学院长春光机所王忠生、张学军和段相永等人也对合成孔径成像技术展开了深入研究<sup>[33]</sup>。

中国科学院光电技术研究所自适应光学重点



图 25 哈工大原理样机

Fig. 25 Prototype of HIT telescope

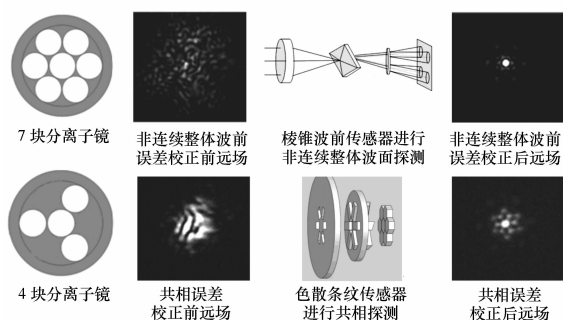


图 26 光电研究所实验结果

Fig. 26 Experimental result from IOE

实验室研究团队在分离镜面光学合成孔径领域开展技术研究,利用棱锥波前传感器和变形镜成功实现了 7 块子镜的非连续整体波前误差精确探测与校正,利用色散条纹传感器与共相镜成功实现了 4 块子镜的共相误差精确探测与校正,这标志着我国在分离镜面光学合成孔径关键技术研究上取得了重要进展<sup>[34]</sup>。

## 6 发展趋势及关键技术分析

通过对光学合成孔径成像技术发展现状和使用要求的总结,可以看出光学合成孔径的发展趋势和下一步研究重点:

(1)天基系统的发展方向是在增加光学系统口径的同时,减下系统的发射体积和重量。但是由于光学波段的合成孔径对共位相精度要求极高,位相检测相对困难,目前各国的天基合成孔径光学系统大多处于原理概念研究和样机试验阶段。目前限制天基合成孔径技术发展的相关技术

主要有轻量化低温主镜技术、精密展开控制技术。在下一步的研究中,共相位的测量与补偿将是研究的重点。

(2)地基系统为提高系统分辨率,必须延长望远镜阵列的基线长度,以提高等效口径。望远镜阵列基线的延长虽能提高分辨率,但是由于集光面积的不足,导致观测距离不足,以及对亮度较暗的星体观测能力欠佳等问题。目前,地基系统的发展方向多是采用镜面拼接技术以实现大口径望远镜的观测要求。

(3)在图像处理方面,由于合成孔径光学系统的集光能力下降,导致了系统传递函数的下降(尤其是中频部分)和信噪比的下降,因此为改善像质需要对图像进行相应的滤波处理和图像增强处理,以提高图像质量。由于共相位精度要求较高,较差的共相位精度会给系统引入额外的像差,通过空间变化图像复原方法矫正光学系统像差也将成为下一步的主要研究内容。

(4)在地基系统中,由于大气扰动的影响,镜面的自重和镜面使用环境对光学系统的影响,需要应用补偿精度更高、预算速度更快的自适应光学技术和主动光学技术对产生的动态误差进行校正。在天基系统中,需要研制更精密的位相测量和控制机构对不同子孔径的相位进行紧密调节以保证成像时的等相位条件。

(5)在通信和传输方面,在视场不变的前提下,提高了光学系统的分辨率意味着提高了视场内信息的容量,因此,在通信方面需要研究相应的数据压缩方法和数据传输方法。

## 7 结束语

与单一口径光学系统相比,光学合成孔径技术能够在获得极高分辨率,又能降低加工难度,有利于降低发射体积和重量,节约发射成本,但由于合成孔径的共相位要求的严格,对系统的装调、加工和控制精度提出了更高的要求,目前天基合成孔径系统还处于实验室阶段。

虽然目前光学合成孔径系统蓬勃发展,但是仍有两个重要不足:

(1)目前,光学合成孔径的共相位要求仍是制约光学合成孔径应用的主要问题,如何时刻保证光学合成孔径的波像差 PV 值在  $\lambda/4$ , RMS 值在  $\lambda/10$  是目前研究的重中之重。目前的方法只是处于实验室研究阶段,还不够完善,难以运用到实际中。

(2)随着孔径的增大,光学系统视场内的像

差难以校正,光学合成孔径自身中频下降,如何在增加系统重量的情况下通过图像处理的方法校正像差和中频下降将成为新的挑战。

为了提高成像系统的分辨率,光学合成孔径成像技术随着各项技术的发展,将成为未来高分辨成像系统的主要发展方向。

## 参考文献:

- [1] BORN M E. Wolf principles of optics[J]. *Pergamon Press*,1980,6:188-189.
- [2] ROUSSET G,MUGNIER L M,CASSAING F,*et al.* Imaging with multi-aperture optical telescopes and an application[J]. *Comptes Rendus de l'Acad mie des Sciences-Series IV-Physics*,2001,2(1):17-25.
- [3] MERMELSTEIN M. Optical synthetic aperture array:US,6548820 B1[P]. 2003-04-15.
- [4] CASSAING F,SORRENTE B,FLEURY B,*et al.* . Optical design of a Michelson wide-field multiple-aperture telescope [J]. *SPIE*,2004,5249:220-229.
- [5] KNIGHT J S,LIGHTSEY P,BARTO A. Predicted JWST imaging performance[J]. *SPIE*,2012,8442:84422G.
- [6] CHANAN G,OHARA C,TROY M. Phasing the mirror segments of the Keck telescopes II: the narrow-band phasing algorithm[J]. *Applied Optics*,2000,39(25):4706-4714.
- [7] CHANAN G,TROY M,DEKENS F,*et al.* . Phasing the mirror segments of the Keck telescopes:the broadband phasing algorithm[J]. *Applied Optics*,1998,37(1):140-155.
- [8] MACINTOSH B,TROY M,DOYON R,*et al.* . Extreme adaptive optics for the Thirty Meter Telescope[J]. *SPIE*,2006,6272:62720N-15.
- [9] BROWN A M,ARMSTRONG T,CHADWICK P M,*et al.* . Flasher and muon-based calibration of the GCT telescopes proposed for the cherenkov telescope array[J]. *Research in Astronomy & Astrophysics*,2015,15(8):1095-1124.
- [10] HORNSCHEMEIER A E,BRANDT W N,GARMIRE G P,*et al.* . The Chandra Deep Survey of the Hubble Deep Field-North Area[J]. *The Astrophysical J.* ,2001,554(2):742.
- [11] BUCKLEY D A H,BARNES S I,BURGH E B,*et al.* . Commissioning of the Southern African Large Telescopes(SALT) first-generation instruments[J]. *SPIE*,2008,7014:701407-15.
- [12] GILMOZZI R,SPYROMILIO J. The european extremely large telescope(E-ELT)[J]. *The Messenger*,2007,127(11):3.
- [13] DIERICKX P,GILMOZZI R. Progress of the OWL 100-m telescope conceptual design[C]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, Munich, Germany,2000:290-299.*
- [14] LENZEN R,BRANDL B,BRANDNER W. The science case for exoplanets and star formation using mid-IR instrumentation at the OWL telescope[C]. *The Scientific Requirements for Extremely Large Telescopes*,2005,1(232):329-333.
- [15] LAJOIE C P,SOUMMER R,PUEYO L,*et al.* . Planning and developing JWST CORONAGRAPHS OPERations[J]. *Iau General Assembly*,2015:22.
- [16] JOHNS M,ANGEL J R P,SHECTMAN S,*et al.* . Status of the giant magellan telescope(GMT) project[J]. *SPIE*,2004,5489:441-453.
- [17] RUTTEN R J,HAMMERSCHLAG R H,BETTONVIL F C M,*et al.* . DOT tomography of the solar atmosphere-I. Telescope summary and program definition[J]. *Astronomy & Astrophysics*,2004,413(3):1183-1189.
- [18] 朱仁璋,丛云天,王鸿芳,等.全球高分光学量概述(二):欧洲[J]. *航天器工程*,2016,25(1):95-118.
- [19] BECKERS J M,ULICH B L,WILLIAMS J T. Performance of The Multiple Mirror Telescope(MMT) I. MMT-the first of the advanced technology telescopes[C]. *1982 Astronomy Conferences. International Society for Optics and Photonics, Muich, Germany,1982:2-8.*

- [20] HILL J M, ASHBY D S, BRYNNEL J G, *et al.*. The large binocular telescope; binocular all the time[J]. *SPIE*, 2014, 9145: 914502.
- [21] BONANOS A Z, STANEK K A. Reanalysis of very large telescope data for M83 with image subtraction-nicefold increase in number of cepheids[J]. *Astrophysical J.*, 2003, 591(2): L111-L114
- [22] CHUNG S J, MILLER D W, WECK O L D. ARGOS testbed; study of multidisciplinary challenges of future spaceborne interferometric arrays[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(43): 2156-2167.
- [23] PITMAN J T, DUNCAN A, STUBBS D, *et al.* Remote sensing space science enabled by the multiple instrument distributed aperture sensor(MIDAS) concept[J]. *SPIE*, 2004, 5555: 301-310.
- [24] FRINK S, QUIRRENBACH A, FISCHER D, *et al.*. A strategy for identifying the grid stars for the Space Interferometry Mission(SIM)[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2001, 113(780): 173-187.
- [25] KALTENEGGER L, FRIDLUND M. Characteristics of proposed 3 and 4 telescope configurations for Darwin and TPF-I [J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2005, 1(C200): 255-258.
- [26] HILL J M. The large binocular telescope[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(16): D115-D122.
- [27] TRAUB W A. Combining beams from separated telescopes[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(4): 528-532.
- [28] MATHER J, STOCKMAN H S, GREENBEL T. Next generation space telescope[J]. *SPIE*, 2000, 4013: 2~16
- [29] LEVOY M, CHEN B, VAISH V, *et al.*. Synthetic aperture confocal imaging[J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2004, 23(3): 825-834.
- [30] ZHAO Y. Large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2011(3): 231-232.
- [31] ZHOU Z, WANG D, WANG Y. Effect of noise on the performance of image restoration in an optical sparse aperture system[J]. *J. Optics*, 2011, 13(7): 075502.
- [32] 魏小峰, 耿则勋, 宋向. 光学合成孔径复原图像的振铃探测与消除[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11): 3091-3099.  
WEI X F, GENG Z X, SONG X. Detection and removal of ringing artifact for optical synthetic aperture restoration image [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2014, 22(11): 3091-3099. (in Chinese)
- [33] 刘政, 王胜千, 饶长辉. 一种基于远场图像的稀疏光学合成孔径系统共相探测新方法的仿真研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(3): 0390501.  
LIU ZH, WANG SH Q, RAO CH H, *et al.*. Analysis of an Co-phasing detecting method based on far-field images of sparse-optical-synthetic-aperture system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(3): 0390501. (in Chinese)
- [34] 中国科学院光电技术研究所. 光电所在分离镜面光学合成孔径关键技术研究上取得重要进展[EB/OL]. [2016-03-29].

#### 作者简介:



周程灏(1989—),男,河南洛阳人,博士研究生,主要从事图像复原和光学合成孔径方面的研究。E-mail: jokerzch@163.com



王治乐(1975—),男,河南偃师市,博士,教授,主要从事光学合成孔径成像技术、光学图像处理技术和光电系统半实物仿真技术方面的研究。E-mail: wangzhile@hit.edu.cn