

# 光学合成孔径成像技术及发展现状

乔彦峰<sup>1</sup>, 刘坤<sup>1,2</sup>, 段相永<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**基于干涉成像理论介绍了合成孔径成像技术原理。分别从成像过程、成像特性、视场大小、适用范围等方面对迈克尔逊型和菲索型两种合成孔径成像系统做了对比,重点介绍了这两种类型合成孔径望远镜在地基系统和天基系统上的应用、发展现状及发展趋势,指出迈克尔逊型合成孔径望远镜将会向着长基线、复杂基线结构的方向发展,而非索型合成孔径望远镜则会向着复杂孔径排列结构的方向发展,以组成等效孔径为其子孔径几倍甚至几十倍的系统。与传统光学系统相比,合成孔径系统具有分辨力高、镜面加工难度小、易折叠、重量轻等特点,是实现高分辨力光学成像的一种有效途径,幸运成像、分布发射与在轨装配、无支撑薄膜望远镜等各种新技术都可以引用到合成孔径技术中来。

**关键词:**合成孔径成像;干涉成像;望远镜

**中图分类号:**TH743 **文献标识码:**A

## Optical synthetic aperture imaging techniques and development

QIAO Yan-feng<sup>1</sup>, LIU Kun<sup>1,2</sup>, DUAN Xiang-yong<sup>1,2</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

**Abstract:** On the basis of the theory of interferometric imaging, this paper introduces the theory of optical synthetic aperture imaging technique. Then, two types of synthetic aperture imaging systems, Michelson interferometry and Fizeau interferometry, are compared in imaging processes, imaging characteristics, sizes of visual field and the scopes of application, and the present situation and developing trends of both Michelson and Fizeau synthetic aperture telescopic systems for ground-based and space-based are described. It points out that the development of the former will focus on the long and complex base line structures and the latter will emphasize the complex aperture arrangement to form an equivalent aperture that is several times or tens times that of original one. Compared to traditional optical systems, the optical synthetic aperture system is characterized by its high resolving powers, small mass and costs and easy to be folded, so it is a useful approach to higher resolving powers. Finally, it is proposed that several kinds of new techniques such as lucky imaging, launching by module and assembly in an orbit, unsupported membranes can be also introduced into the synthetic aperture imaging technique.

**Key words:** synthetic aperture imaging; interference imaging; telescope

## 1 引言

高分辨力目标成像在空间科学(包括天文学研究和空间碎片的监测)和军事应用上都有着十分重要的意义。在天文学的研究中,通过高分辨力成像,能对恒星风和密近双星物质流进行分辨,为原恒星的研究提供形状、亮度分布等信息,从而便于进一步开展天体细微结构和演化的研究,以及类星体和活动星系核等方面的探索。在军事方面,通过高分辨力成像可以实现对卫星的监测和普查;对飞行器的探测跟踪;以及对地面军事目标的勘察等。波动光学理论<sup>[1]</sup>表明,传统光学成像系统角分辨力受波长和系统孔径的限制,若要针对一定的工作波段提高系统的角分辨力,只能增大系统孔径,而在实际应用中系统加工成本和飞行器有效载荷体积等很多因素限制了系统孔径的增大。20世纪70年代提出的合成孔径干涉成像技术<sup>[2]</sup>为提高成像系统分辨力提供了新的方法。今天,光学合成孔径干涉成像技术已成为当前国际上的一个前沿研究领域,它是在现代高科技成果,如高精度的光程补偿、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基础上发展起来的,是未来大型成像系统的主要分支之一。

## 2 合成孔径望远镜成像原理

单孔径望远镜的出瞳可以看成是大量“针孔”的集合<sup>[3]</sup>,单孔径望远镜所成的像,可看成是出瞳面内的所有可能的“针孔对”在像面上产生的大量正弦干涉条纹的叠加。像强度频谱中空间频率( $\nu_u, \nu_v$ )的频率分量在出瞳上,至少有一对矢量间距为:

$$\Delta x = \lambda Z \nu_u; \Delta y = \lambda Z \nu_v, \quad (1)$$

波长为 $\lambda$ ;像到出瞳的距离为 $Z$ 的“针孔对”与之对应,因此,像的空间频率与出瞳面内的“针孔对”间距建立了对应关系,这就是光干涉成像的原理。如图1(a)所示,针孔对 $aa', bb', cc', dd'$ 在频域内分别对应不同的点。从式(1)中可以看出

长“针孔距”对应高频部分,短“针孔距”对应低频部分,“针孔距”越长,系统的分辨力越高。

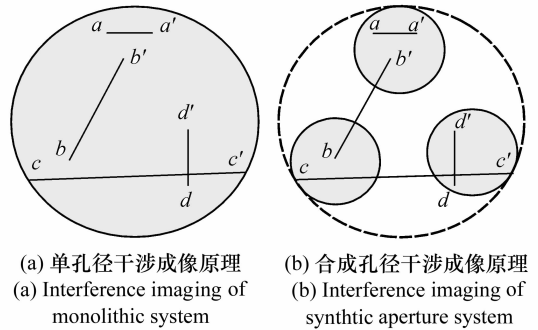


图1 单孔径干涉成像原理和合成孔径干涉成像原理  
Fig. 1 Theory of interference imaging of monolithic system and synthetic aperture system

如果把上述出瞳面上的各“针孔”视为直径有一定大小的子孔径,在像面处的成像就可称为合成孔径成像,如图1(b)所示。如何用小孔径系统来获得与单个大孔径系统等效分辨力是合成孔径成像的目的。子孔径之间的距离线段称为基线,基线越长系统所能达到的分辨力越高。

相位同步技术、U-V 覆盖技术和图像恢复技术是合成孔径的3个关键技术。来自不同子孔径的光束必须满足干涉条件才能达到提高分辨力的目的,否则与单个子孔径成像相比,只能增加通光量,并不能提高分辨力。相位同步技术就是去除或减少大气扰动、系统误差等因素的影响,保证来自不同子孔径的光束满足干涉条件。空间频率的缺失会造成像的失真,U-V 覆盖技术用于获得目标足够多的空间频率信息。合成孔径所获得像是干涉条纹或模糊的目标像,需要进行图像处理才能得到清晰的目标像,所以图像恢复技术也是合成孔径成像的关键技术之一。

根据光束组合方式的不同,合成孔径成像可以分为迈克尔逊型和非索型两种类型<sup>[4]</sup>。

### 2.1 迈克尔逊型合成孔径望远镜

迈克尔逊型合成孔径望远镜也被称作“光瞳面干涉”望远镜。如图2所示,来自不同孔径的光束经过分光镜在光瞳面发生干涉,探测器得到干涉条纹,从中测得目标的复相干度信息(包括振幅信息和相位信息)。根据“范西特-泽尼克”

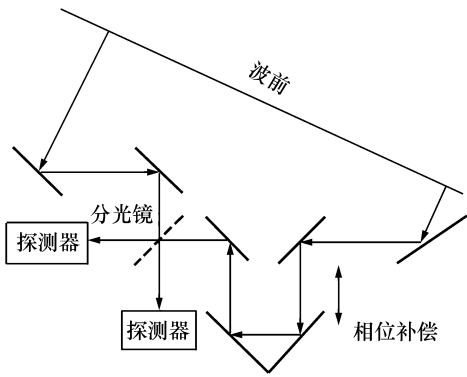


图2 迈克尔逊型(光瞳面干涉型)望远镜

Fig. 2 Michelson interferometry (Pupil-plane interferometry)

得到相应点的光强信息。一个基线(或望远镜对)只对应一个复相干度值,要进行傅里叶逆变换得到被测目标的像,必须要有足够多的基线或望远镜对,使之在空间频域内满足采样定理。因而从理论上讲,如果在望远镜平面有足够多的望远镜对或基线,并求出其复相干系数,再进行反傅里叶变换,即可得到观测目标的光强度分布。迈克尔逊型合成孔径望远镜成像过程如图3所示。

迈克尔逊型合成孔径望远镜的基线可以从几十米到几百米甚至更长,分辨力非常高,U-V覆盖需要一定的时间和空间积累。通常通过改变子孔径之间的相对位置来获得不同的空间频率。此类型望远镜用于观测位置稳定、对分辨力要求特别高的目标,一般用于天文观测。

定理<sup>[1]</sup>,对所得的复相干度做傅里叶逆变换即可

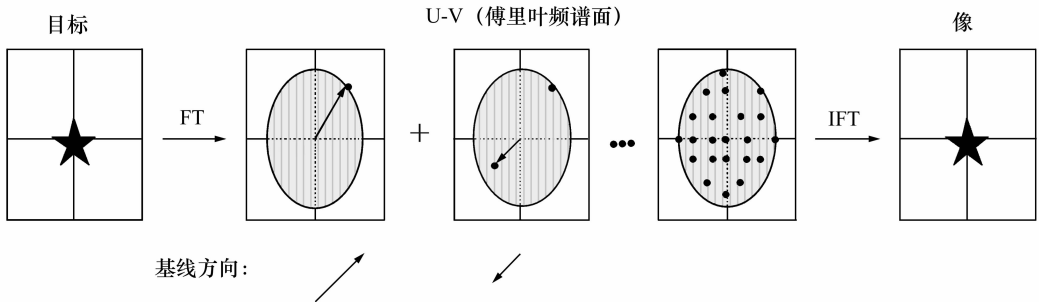


图3 迈克尔逊型合成孔径望远镜成像过程示意图

Fig. 3 Imaging process of Michelson interferometry

### 2.2 菲索型合成孔径望远镜

菲索型合成孔径望远镜也被称作“像面干涉”型望远镜,来自不同子孔径的光束成像在同

一像面,得到目标的模糊像。菲索型合成孔径望远镜有“共次镜”和“望远镜阵列”两种结构,如图4所示。“共次镜”结构中,所有子孔径共用同一

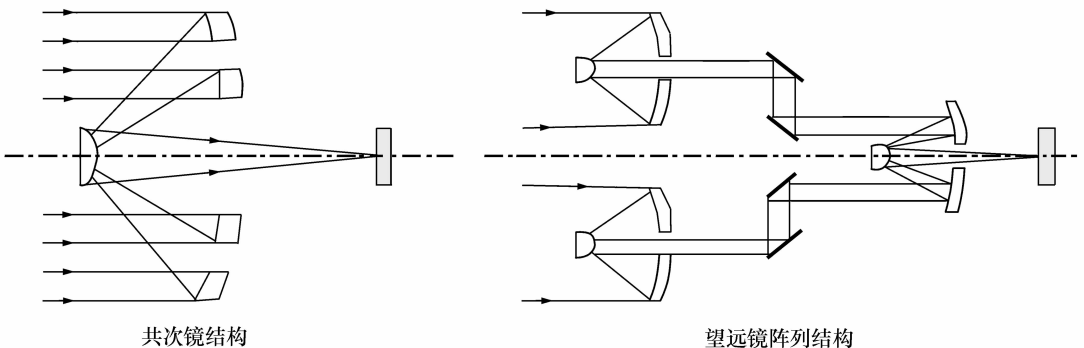


图4 菲索型(像面干涉型)合成孔径望远镜

Fig. 4 Fizeau interferometry (Image-plane interferometry)

次镜,这种结构能够减少系统的中心遮拦。后一种结构,子孔径是独立的望远镜,从子望远镜出来的光束通过光束组合器组合在一起,经成像次镜成像。菲索型合成孔径望远镜成像过程可以用傅里叶光学中线性系统成像理论来解释<sup>[5]</sup>,如图5所示。

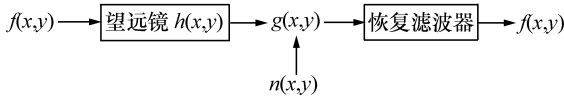


图5 菲索型合成孔径望远镜成像过程示意图

Fig. 5 Imaging process of Fizeau interferometry

望远镜成像实质上是一个图像退化过程,可以表示为:

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y) + n(x,y), \quad (2)$$

式中, $f(x,y)$ 为被测目标, $g(x,y)$ 为所成的目标模糊像, $h(x,y)$ 为系统点扩展函数, $n(x,y)$ 为噪声,“\*”表示卷积运算。造成图像模糊的两个因素是成像系统 $h(x,y)$ 的线性操作引起的模糊以及噪声,而图像恢复是在已知 $h(x,y)$ 和估计 $n(x,y)$ 的基础上,进行反向运算来得到目标的清晰像 $f'(x,y)$ 。

菲索型合成孔径望远镜的U-V覆盖是通过缩短基线长度至子孔径直径数量级和子孔径自身的频率覆盖能力实现的,不用通过长时间的积累。此类望远镜可以对运动目标进行瞬时成像,一般用于目标的探测跟踪。

迈克尔逊型和菲索型合成孔径望远镜主要特性对比如表1所示。

表1 迈克尔逊型和菲索型合成孔径望远镜特性对比

Tab. 1 Summary of Michelson interferometry vs Fizeau interferometry

迈克尔逊型(光瞳面干涉型)	菲索型(像面干涉型)
U-V 覆盖需要一定的空间和时间积累,成像周期长	U-V 覆盖瞬时完成,直接对目标成像
测量傅里叶频谱信息,经过傅里叶逆变换得到目标像	所有光束在同一像面成像,通过图像恢复得到清晰目标像
视场角小	视场角大
系统的分辨力取决于基线长度	分辨力取决于子孔径自身大小和基线长度
适用于对静止目标成像,一般用于天文观测	能够对运动目标瞬时成像,一般用于探测跟踪

### 3 合成孔径望远镜发展现状

从1868年菲索提出天文光干涉<sup>[6]</sup>的概念到上世纪80年代末,天体测量主要以两个口径的恒星光干涉仪为主。由于大气扰动等原因使得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。合成孔径用于成像是从上世纪80年代开始发展起来的。

#### 3.1 地基迈克尔逊型合成孔径望远镜

地基迈克尔逊合成孔径望远镜是目前应用最广泛的合成孔径望远镜。1996年2月,Baldwin及其同事发表了一幅用光干涉法得到的Capella双星的二维平面图,这是用干涉成像望远镜获得

的第一幅图像,是在英国剑桥光学孔径合成望远镜(COAST)上实现的<sup>[7]</sup>。接下来有一大批地基光/红外合成孔径望远镜诞生,如美国的红外光学干涉阵(IOTA)、美国的高分辨力成像阵(CHARA)、澳大利亚Sedney大学的光干涉阵(SUSI)、美国海军天文台的成像光干涉仪阵(NPOI)和由Arizona大学和一些国际研究机构合作建造的LBT。另外,美国由两个Keck(10 m)望远镜组成的干涉仪实现了大口径望远镜的光干涉,再附加6个1.8 m的小望远镜,可合成等效25~140 m口径的望远镜,分辨力可提高到 $(30 \times 10^{-3})$ ”。

VLT(Very Large Telescope array)是欧洲地基系统的旗帜,是世界上最先进的光学系统,由4个直径8.2 m的主镜和4个口径1.8 m的可移动辅镜组成<sup>[8]</sup>。第一个8.2 m主望远镜于1999年装配完成并开始工作,目前4个主镜和4个辅镜都

已开始工作。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 $<1\ \mu\text{m}$ ,通过干涉仪(VLTI)发生干涉,如图6、图7所示<sup>[9]</sup>。延迟器轨道在跨越65 m后的水平误差 $<25\ \mu\text{m}$ ,轨道定位精度为 $30\ \mu\text{m}$ ,定位误差为 $20\ \text{nm}$ ,倾斜误差 $<1.5''$ 。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。望远镜工作波长从 $300\ \text{nm}\sim 24\ \mu\text{m}$ 。8.2 m子望远镜的主镜曲率半径为 $28\ 800\ \text{mm}$ ,曲率系数为 $-1.004\ 69$ , $f/1.8$ ,RMS为 $38\ \text{nm}$ <sup>[10]</sup>。2007年初,4个主镜和辅镜全部投入使用,在天文观测中取得了重要成果。

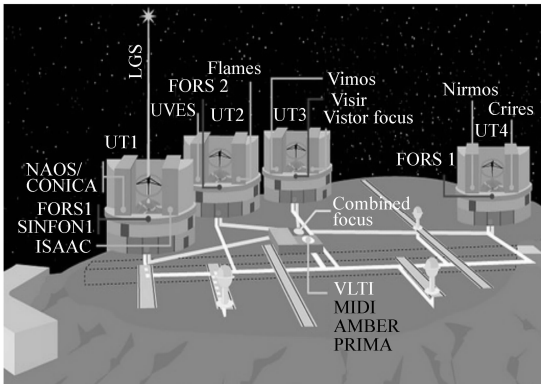


图6 VLT干涉阵列

Fig. 6 Very Large Telescope array (VLT)

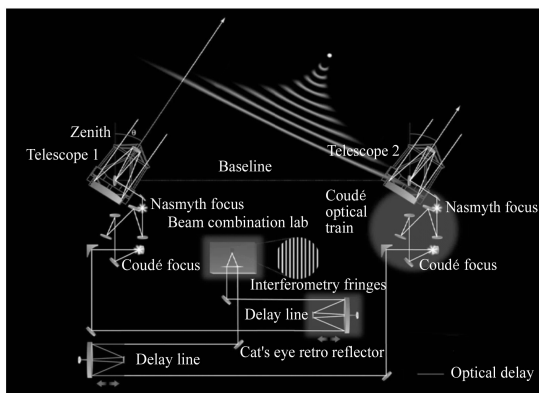


图7 VLTI 光路图

Fig. 7 Relay optics of VLTI

### 3.2 天基迈克尔逊型合成孔径望远镜

天基观测系统可以免受大气扰动影响,但系统的体积和重量受火箭运载能力的限制,合成孔径系统易于折叠,质量轻,能够很好地解决这一问题。目前由美国 NASA 正在研制的 Space Interferometer Mission (SIM)<sup>[11]</sup>和 Terrestrial Planet Finder Interferometer (TPF-I)<sup>[12]</sup>,采用的是迈克尔逊型合成孔径,预计分别于2012和2016年完成。

SIM 光学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<sup>[13]</sup>,如图8所示。科学测量干涉望远镜有两个孔径为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 $15^\circ$ ,天体测量精度为 $(4 \times 10^{-6})''$ ;在小视场工作模式下视场为 $2^\circ$ ,天体测量精度为 $(1 \times 10^{-6})''$ 。导航干涉望远镜 Guide-1 有两个孔径为30 cm的子望远镜,基线长为4.2 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 Guide-1 具有类似的光束组合器。高精度星跟踪望远镜 Guide-2 的孔径也是30 cm,用于监视整个系统的指向,以便调整飞行器的姿态。该望远镜已完成多项技术突破,并通过了科学测试,已于2008年进入望远镜研制阶段。

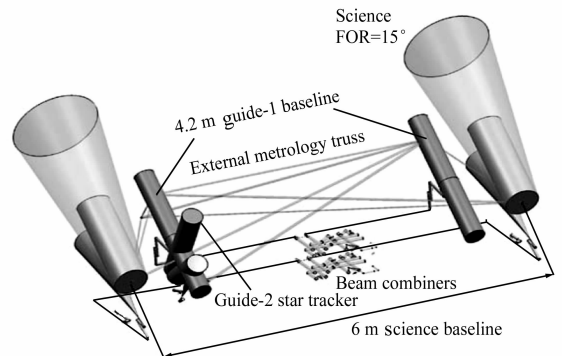


图8 SIM 光学结构

Fig. 8 SIM optical configuration

### 3.3 地基菲索型合成孔径望远镜

最早的地基菲索型合成孔径望远镜是1978年美国在 Arizona 建造的 Multiple Mirror Telescope (MMT) 成像系统<sup>[14]</sup>,如图9所示。它由6块直径

为 1.8 m 的子望远镜组成,等效孔径为 4.45 m 的望远镜,视场为 30"。但是该系统只有很小的一部分视场能够被定相,同时需要一个有经验的操作人员进行人工调整,目前已被改造成孔径为 6.5 m 的单孔径望远镜。

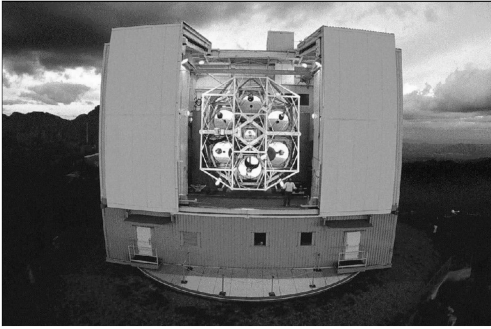


图9 MMT系统

Fig. 9 Multiple Mirror Telescope (MMT)

由美国 Steward 和 Arizona 大学联合研制的 Giant Magellan Telescope (GMT) 的光学系统采用了格里高林 (Gregorian) 系统,主镜由 7 个直径为 8.4 m 的子镜成花型排列,有效口径达 22 m,最大直径为 25.448 m,主镜焦距为 18 m (焦比  $f/0.7$ ),如图 10 所示<sup>[15]</sup>。6 个离轴子镜的曲率半径  $R = 36$  m,直径  $D = 8.4$  m,二次曲面系数  $K = -0.9983$ ,凹面椭球镜,离轴距离  $d = 8.17$  m。次



图10 GMT望远镜概念图

Fig. 10 Concept diagram of GMT

镜是凹面椭球镜,直径 3.2 m,由 7 块直径 1.1 m 的子镜组成,如图 11 所示。次镜和主镜的 7 块子镜分别互相对应的排列,形成 7 个独立口径 8.4

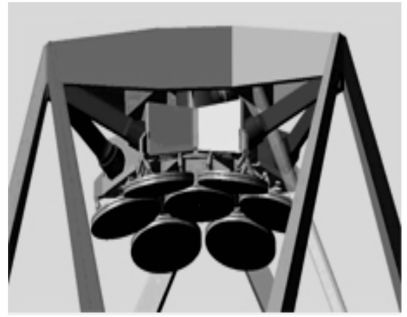


图11 GMT次镜结构

Fig. 11 Configuration of secondary mirror

m 的望远镜,由这 7 个 8.4 m 的望远镜合成一个 22 m 口径的望远镜。望远镜的总焦距为 202.745 m,相对孔径为  $f/8$ ,视场角为 24',后截距为 5.5 m。次镜本身作自适应光学的变形镜。要求望远镜成像质量在波长  $1 \mu\text{m}$  时达到 22 m 全口径的衍射极限。望远镜工作波段在 320 ~ 25 000 nm,在波长为 500 nm 时角分辨力为 0.21 ~ 0.3"。第一面主镜于 2005 年铸成,将于 2010 年初完成抛光,整个望远镜预计在 2025 年完成。

另外,主镜拼接也可以看成是紧凑型菲索型合成孔径,如美国的 Thirty Meter Telescope (TMT)<sup>[16]</sup>,预计 2018 年完成。我国国家天文台兴隆观测站的大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜 LAMOST<sup>[17]</sup>于 2004 年底开光观测,由反射施密特改正镜 MA、球面主镜 MB 和在中间的焦面构成,如图 12 所示。球面主镜及焦面固定在地基上,反射施密特改正板跟踪天体的运动,天体的光

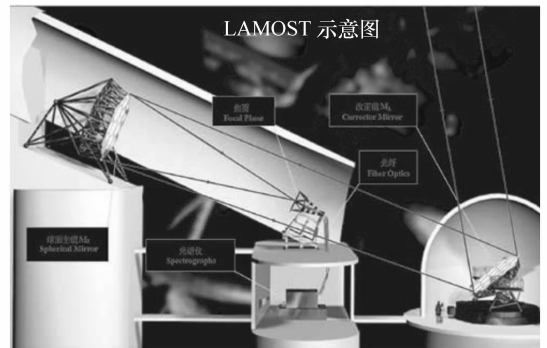


图12 LAMOST示意图

Fig. 12 LAMOST system

经 MA 反射到 MB,再经 MB 反射后成像在焦面上。焦面上放置的光纤将天体的光分别传输到光谱仪的狭缝上,通过光谱仪分光后由 CCD 探测器同时获得大量天体的光谱。

球面主镜 MB 口径为  $6.67\text{ m} \times 6.05\text{ m}$ ,反射施密特改正镜口径为  $5.72\text{ m} \times 4.40\text{ m}$ ,等效通光口径为  $3.6 \sim 4.9\text{ m}$ (与天区和跟踪位置有关), $5^\circ$  视场和  $20\text{ m}$  焦距。望远镜光轴与地平呈  $25^\circ$ ,南高北低,以适应台址纬度,扩大观测天区。反射改正镜 MA 和球面主镜 MB 都是拼接镜面,分别由 24 块和 37 块  $1.1\text{ m}$  子镜拼接而成,如图 13 所示。

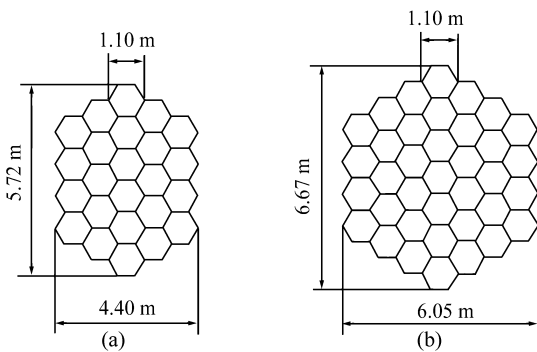


图 13 反射施密特改正镜 MA(a) 和球面主镜 MB(b)  
Fig. 13 Reflecting Schmidt corrector (MA) (a) and spherical primary mirror (MB) (b)

### 3.4 天基菲索型合成孔径望远镜

天基菲索型合成孔径望远镜不仅具备分辨力高、质量轻、易折叠等优点,而且能够瞬时成像,特别适合空对空、空对地的侦察。采用主镜拼接技术的 James Webb Space Telescope (JWST) 口径为  $6.5\text{ m}$ ,是继哈勃空间望远镜之后的下一代空间望远镜,预计 2013 年发射<sup>[18]</sup>。美国 Massachusetts 理工学院于 2002 年研制出自适应侦察 GOLAY-3 光学卫星地面样机 (MIT Adaptive Reconnaissance Golay-3 Optical Satellite, ARGOS),如图 14 所示<sup>[19]</sup>。该样机采用菲索型望远镜阵列结构,利于模块化。3 个子孔径成等边三角形排列,如图 15 所示,口径均为  $0.21\text{ m}$ ,系统等效孔径为  $0.62\text{ m}$ ,角分辨力为  $0.35''$ ,视场角为  $3'$ ,光学结构如图 16 所示<sup>[20]</sup>。系统的延迟补偿器结构如图 17 所示,该结构既可以补偿沿轴光程差又能补偿倾斜误差,系统的均方差为  $0.072\ 7\lambda$ 。ARGOS 系统的最

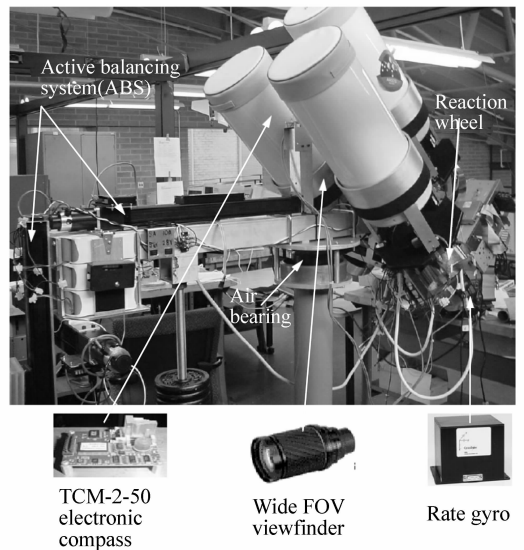


图 14 ARGOS 系统  
Fig. 14 ARGOS system

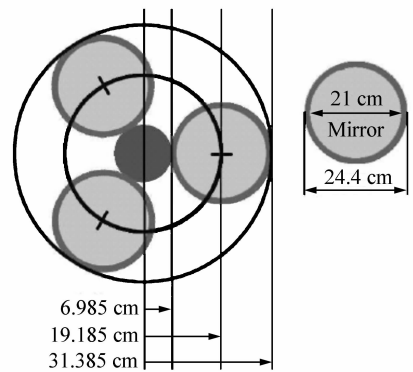


图 15 ARGOS 孔径排列结构  
Fig. 15 Array configuration of ARGOS



图 16 ARGOS 光学结构  
Fig. 16 Optical layout of ARGOS

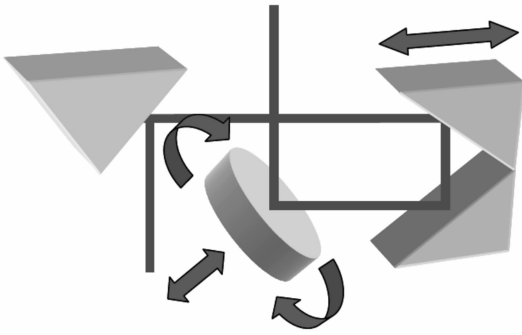


图 17 延迟器结构示意图

Fig. 17 Configuration of optical delay line

大特点是能够模拟系统在太空飞行的真实状态。

## 4 结束语

与传统的光学系统相比,合成孔径成像技术

能够获得高分辨力成像;降低了光学元件的加工难度;光学元件体积小、重量轻;系统设计和组装灵活多变,可以设计成为折叠式;有利于降低发射体积和重量,节约发射费用。随着对太空探索的深入,对空间目标例如航天器、人造卫星、空间碎片研究需求的加大,以及空对地、地对空勘测侦查的需要,合成孔径成像技术将会得到越来越广泛的应用。迈克尔逊型合成孔径望远镜将会向着长基线、复杂基线结构的方向发展。菲索型合成孔径望远镜将向着复杂孔径排列结构的方向发展,组成等效孔径为其子孔径几倍甚至几十倍的系统。随着无支撑薄膜技术、大孔径衍射望远镜技术、分步发射与在轨装配技术、负折射率透镜成像技术<sup>[21,22]</sup>及幸运成像等各种新技术的发展与成熟,这些新技术都可以引入到合成孔径成像技术中来,从而给高分辨力成像带来新的突破。

## 参考文献:

- [1] BORN M, WOLF E. *Principles of Optics(7th Edition)* [M]. UK: Cambridge University Press, 1999.
- [2] MEINEL A B. Aperture synthesis using independent telescope[J]. *Appl. Optics*, 1970, 9: 2501-2504.
- [3] 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): 434-442.  
WANG H T, ZHOU B F. Optical synthesis aperture interference image technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(5): 434-442. (in Chinese)
- [4] FAUCHERRE M, DELABRE B, DIERICKX P, et al. . Michelson versus Fizeau type beam combination: Is there a difference[J]. *SPIE*, 1990, 1237: 206-217.
- [5] GOODMAN J W(秦克诚, 等译). 傅里叶光学导论(第三版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.  
GOODMAN J W(QIN K CH, et al. Translation). *Introduction to Fourier Optics(Third Edition)* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. (in Chinese)
- [6] SHAO M, COLAVITA M, HINES B E, et al. . The Mark III stellar interferometer[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1988, 198: 357-367.
- [7] BALDWIN J E, BECKETT M G, BOYSEN R C, et al. . The first images from an optical aperture synthesis array: mapping of Capella with COAST at two epochs[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1996, 306: 13-16.
- [8] WIKIPEDIA. Very large telescope[EB/OL]. [2008-04]. [http://en.wikipedia.org/wiki/VLTI#Interferometry\\_and\\_the\\_VLTI](http://en.wikipedia.org/wiki/VLTI#Interferometry_and_the_VLTI).
- [9] KOEHLER B. VLTI Tutorial: VLTI Concept & technical aspects[EB/OL]. [2001-11-20]. [http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/telescopes/vlti/tuto/tutorial\\_bko\\_VLTI\\_Concept\\_and\\_technical\\_aspects.pdf](http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/telescopes/vlti/tuto/tutorial_bko_VLTI_Concept_and_technical_aspects.pdf).
- [10] DIERICKX P. The VLT primary mirrors: mirror production and measured performance[EB/OL]. [2009-02-21]. <http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/telescopes/ut/m1unit.html>.
- [11] ZHAO F. Summary report: SIM internal metrology beam launcher brass-board test key results[R]. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena California, 2006.
- [12] LAWSON P R, LAY O P, JOHNSTON K J, et al. . Terrestrial Planet Finder Interferometer Science Working Group Report [R]. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, 2007.
- [13] Quick technical facts[EB/OL]. [2009]. <http://planetquest.jpl.nasa.gov/SIM/quickFacts/>.



- [14] The MMT observatory[EB/OL]. [2009]. <http://www.mmt.org>.
- [15] GMT overview and project status[EB/OL]. [2008-12]. [http://www.gmto.org/GMT-ID-01433-GMT\\_Overview\\_and\\_Status.pdf](http://www.gmto.org/GMT-ID-01433-GMT_Overview_and_Status.pdf).
- [16] TMT Science Advisory Committee. Thirty Meter Telescope Detailed Science Case; 2007[R]. TMT Observatory Corporation,2007.
- [17] Gallery [EB/OL]. [2009]. <http://www.lamost.org/xoops/modules/wfchannel/index.php?pagenum=7>.
- [18] About JWST[EB/OL]. [2009]. <http://www.jwst.nasa.gov/about.html>.
- [19] CHUNG S J, MILLER D W, de WECK O L. ARGOS tested; study of multidisciplinary challenges of future spaceborne interferometric arrays[J]. *Opt. Eng.*, 2004, 43(9):2156-2167.
- [20] CHUNG S J. Design, implementation and control of a sparse aperture imaging satellite[D]. USA:Massachusetts Institute of Technology,2002.
- [21] 于前洋, 曲宏松. 实现同步轨道(GEO)高分辨力对地观测的技术途径(上)[J]. *中国光学与应用光学*, 2008, 1(1):1-12.  
YU Q Y, QU H S. Realization of high-resolution visible earth observation on geostationary earth orbit(1)[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2008, 1(1):1-12. (in Chinese)
- [22] 于前洋, 曲宏松. 实现同步轨道(GEO)高分辨力对地观测的技术途径(下)[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(1):1-9.  
YU Q Y, QU H S. Realization of high-resolution visible earth observation on geostationary earth orbit(2)[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2009, 2(1):1-9. (in Chinese)

作者简介:乔彦峰(1962—),男,吉林长春人,研究员,主要从事光电测量与控制方面的研究。

E-mail:qiaoyf@ciomp.ac.cn