0254-6124/2024/44(2)-0356-12 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Xiaoyong, ZHANG Jiafu, LI Ling, GUO Chongling. Space-based Distributed Optical Synthetic Aperture Techniques (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(2): 356–367. DOI:10.11728/cjss2024.02.yg06

天基分布式光学合成孔径技术

王小勇 张家福 李 凌 郭崇岭

(北京空间机电研究所 北京 100094)

摘 要 宜居带行星探测研究是近年系外行星研究的热点领域之一, 探测太阳系附近的宜居行星对研究生命起源等具有重要意义, 成为系外行星探测的重要内容. 天基分布式合成孔径技术作为系外宜居行星探测的重要手段, 已经成为目前前沿光学技术研究的热点方向, 但是仍有诸多技术问题需解决. 本文从宜居行星搜寻计划的需求出发, 根据以迈克尔逊干涉成像为基础的天基分布式合成孔径系统技术原理, 介绍了国内外典型分布式合成孔径系统的技术发展, 重点分析了实现天基分布式干涉成像所需采用的控制系统和技术, 并阐述了解决高精度空间测距、高精度时间同步、多层级位相同步等关键问题的技术要点. 为未来大型柔性可重构空间望远系统的建造提供了参考.

关键词 宜居行星, 分布式, 合成孔径, 干涉成像

中图分类号 P171.3

Space-based Distributed Optical Synthetic Aperture Techniques

WANG Xiaoyong ZHANG Jiafu LI Ling GUO Chongling

(*Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing* 100094)

Abstract The exploration and study of habitable zone planets is one of the hot research fields of exoplanets in recent years. The exploration of habitable planets near the solar system is of great significance to the study of the origin of life and has become the main theme of exoplanet exploration. As an important means of detecting exohabitable planets, space-based distributed synthetic aperture technology has become a hot spot in the research of advanced optical technology. In this paper, the technical principle of space-based distributed optical synthetic aperture system based on Michelson interferometric imaging is discussed in detail, and the development of typical distributed synthetic aperture systems at home and abroad is introduced. The technical challenges involved are demonstrated.

Key words Habitable planet, Distributed, Synthetic aperture, Interference imaging

0 引言

近年来, 国内外对于太阳系和系外行星的研究不断深入, 发现并探索系外宜居行星, 寻找人类在宇宙中是否孤独、另一个地球是否存在等重要科学问题的最终解答逐渐成为可能[1], 系外行星探测已经成为天

2024-02-01 收到原稿, 2024-03-05 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

文学、空间探索前沿研究的重要方向. 然而系外行星距离远, 且宿主恒星辐射远高于行星数个数量级, 这无疑都增加了系外行星探测的难度.

随着天基天文观测技术的不断发展, 系外行星探测精度和效率有了明显提升, 并牵引了一系列系外行星探测项目, 系外行星探测也形成了以直接成像法和间接探测法为主的探测方式[2], 呈现出从间接到直接、从搜寻到刻画的发展趋势. 间接探测法高效、易行, 但无法直接探测生命存在的信号[3]. 相比于间接探测法, 直接成像法能够获取更加丰富、更加准确的系外行星特征, 直接探测大气中与生命过程有关的气体成分, 目前通过直接成像法获取的系外行星数量已达 69 颗[4].

系外行星直接成像探测、宜居性刻画等需求的实现, 需要研制更高性能的空间望远镜, 要求不断增加光学系统孔径. 然而由于光学材料、光学加工能力、火箭运载能力等诸多因素的限制, 使得单孔径系统口径的增加变得极为困难. 分布式合成孔径技术则另辟蹊径, 化整为零, 将大口径光学元件拆分为多个离散孔径元件, 利用多孔径干涉技术实现波前重建, 实现近乎一致成像波前的等效大口径成像系统, 为提高望远镜成像系统分辨率提供了新的方法.

早在 1978 年, 美国斯坦福大学首次提出了用于直接成像法的消零干涉测量法[5], 且先后被美国航空航天局 (NASA) 和欧洲航天局 (ESA) 采纳, 并迅速启动了以分布式合成孔径系统进行直接成像的地球行星发现者干涉仪 (TPFI)[6] 和 达尔文 (Darwin) 任务[7,8]. 但是当时技术水平和对系外行星的知识不足以证明付出巨大的财务成本是否值得, 因此 TPFI 和达尔文任务被先后取消. 而随着开普勒天文望远镜发射成功[9], 系外行星发现数量提高了一个量级, 大大扩充了系外行星的研究样本. 基于此, 有研究模拟了 TPFI 和 Darwin 任务概念的延续任务, 即系外行星大型干涉仪 (Large Interferometer For Exoplanets, LIFE) 的回报率[10,11]. 结果表明, 1 年内可实现 300 颗系外行星的观测, 使得分布式合成孔径系统再次受到瞩目. 近年来, 美国也提出了空间多星编队干涉成像探测的构想, 按照规划预计 2035 年实施.

中国经过多年的反复论证, 提出开展宜居行星搜寻计划 (即觅音计划) 的建议. 觅音计划主要科学目标之一是发现和认证系外宜居行星并刻画其宜居性, 通过直接成像法结合光谱测量, 进一步探索行星的温度、压力、大气结构以及气体成分等多种信息, 进行大气光谱刻画. 觅音计划将一组空间望远镜发射并部署至日地 L2 轨道, 组成空间分布式合成孔径干涉仪, 实现 0.01 空间分辨率, 从而发现太阳系近邻的宜居行星, 开启高分辨率天文观测的新纪元.

在技术层面, 觅音计划需要实现分布式合成孔径光干涉成像系统技术, 解决高分辨率、高灵敏度、高对比度的探测难题, 突破分布式平台编队轨道设计与仿真控制技术、超高速长距离的星间位姿高精度测量技术、高灵敏高稳定深低温空间探测技术、多层级高精度位相同步测量与控制技术等关键技术群.

需要注意的是分布式合成孔径一般相距数百米, 要求位相同步精度达到几十纳米量级. 分布式合成孔径技术需要解决高精度的光程补偿、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技术难题[12], 实现卫星平台之间的通信, 并稳定保持位相同步[13].

本文从分布式空间光干涉原理出发, 根据以迈克尔逊干涉为基础的天基分布式合成孔径技术, 分析了国外典型地基与天基分布式合成孔径系统的特点, 重点分析了为实现干涉成像所采用的控制系统和技术, 以及目前国内进行的前期研究成果. 论证了当前天基分布式合成孔径技术所面临的技术问题, 并提出了天基分布式合成孔径技术的应用前景.

1 分布式光干涉探测技术原理

光学合成孔径成像技术在广义上一般可以分为两大类, 即以迈克尔逊干涉为基础的重构成像和以斐索干涉为基础的即时成像, 如图 1 所示. 斐索型光学合成孔径成像系统是像面干涉类型, 可以直接成像出图, 但是其基线相对较短, 一般难以超过百米级. 如果想要继续提高空间分辨率,则需继续增大基线长度, 即采用迈克尔逊型光学合成孔径成像系统, 此类成像系统为瞳面干涉类型, 只能观测到干涉条纹, 必须通过光场传输理论解译才能间接获取图像.

觅音计划空间望远镜间相距达百米量级, 因此需要采用迈克尔逊型分布式合成孔径成像技术. 迈克尔逊型分布式合成孔径成像系统由按照一定空间排布

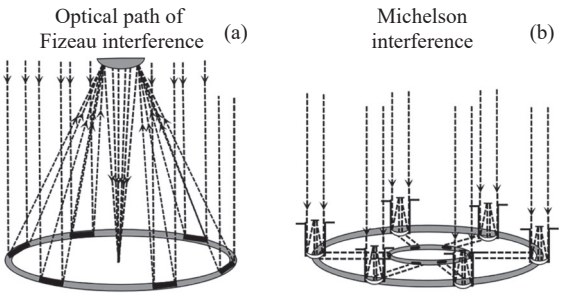


图 1 光学合成孔径技术

Fig. 1 Optical synthetic aperture techniques

的子孔径系统构成, 即空间望远镜充当集光器, 将光线引入合光器进行干涉成像. 但实现迈克尔逊干涉需要保证子孔径之间等光程精度优于几十纳米, 即保持位相同步, 其工作流程如图 2 所示.

因此, 为了测量和补偿天体运动和大气扰动引起的子孔径之间的光程差, 迈克尔逊型分布式合成孔径成像系统在每个子孔径成像光路中引入光学延迟线, 并采用位相测量技术进行同步监测. 以迈克尔逊干涉为基本原理, 对目标开展重构成像. 根据空间光干涉的重要原理, 从图 3 [13,14] 可以看出, 不同基线的复相干度和目标光源强度分布可通过傅里叶变换联系起来.

图 3 中入射角α'的扩展光源强度分布如下[15]:

$$I(\alpha) = I_0[1 + |\mu(B)|\cos\phi(B) - k\alpha \cdot B].$$

式中, I_0为光源强度积分, $I_0 = \int I(\alpha')\,\mathrm{d}\alpha'$; $\mu(B)$为复相干度函数; $\phi(B)$为相位; k为波数; α为衍射角; B为基线长度.

根据范西特–泽尼克定理, 当目标本身的线度以及观测区域的线度都远远小于二者之间的距离时, 观测区域上的复相干度正比于目标强度分布的归一化傅里叶变换, 即

$$\mu(B) = \frac{\int I(\alpha')\,\mathrm{e}^{-\mathrm{i}k\alpha'\cdot B}\mathrm{d}\alpha'}{I_0}.$$

分布式合成孔径成像系统的每条基线与像面上的一组干涉条纹相对应, 利用范西特–泽尼克定理可以提取目标源的振幅和相位. 归一化的目标傅里叶频谱为 uv 谱, 每条基线与一个 uv 分量相对应. 分布式合成孔径系统光瞳相距较远, 一般情况下, 出瞳基线通常比入瞳基线短得多, 因此入瞳和出瞳的光学传函是不同的. 通过旋转孔径阵列或改变子孔径的相对位置, 即可变换基线的方向和长度, 实现不同 uv 分量的探测; 当 uv 谱的采样数量达到图像重构的要求时, 再利用傅里叶逆变换即可实现目标的二维图像重构[16].

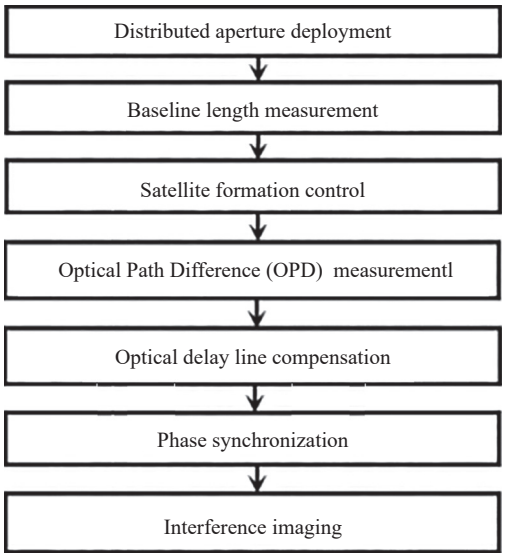


图 2 分布式合成孔径系统工作流程

Fig. 2 Process of distributed optical synthetic aperture system

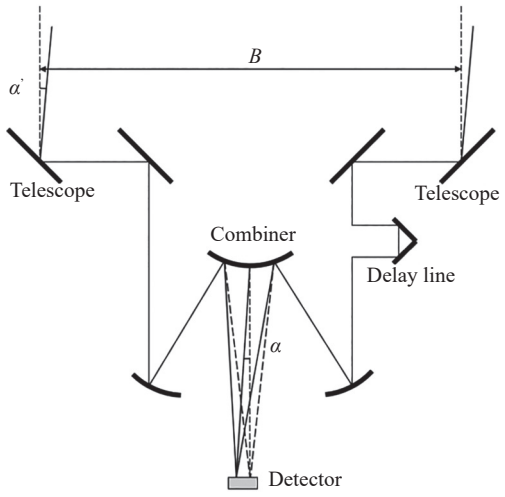


图 3 分布式合成孔径成像原理

Fig. 3 Principle of distributed synthetic aperture imaging

2 分布式合成孔径技术的发展

分布式合成孔径技术可以突破现有地面加工、测试、装调以及运载包络制约, 使超大口径或拼接式空间望远镜能够实现衍射极限成像, 已经成为系外行星

探测最有竞争力的体制. 目前国内外在该领域正在进行技术竞争, 但分布式合成孔径系统仍主要应用在地基望远镜系统中, 暂无空间应用的分布式合成孔径系统. NASA 和 ESA 率先各自开展了概念研究, 即 TPFI 和 DARWIN 任务. 随后欧美联合起来开展了 LIFE 计划, 对 TPFI 和 DARWIN 任务的技术积累进行了梳理, 深入研究了关键指标、系统构型.

2.1 国外研究进展

2.1.1 地基分布式合成孔径系统

2.1.1.1 大型双筒望远镜干涉仪

大型双筒望远镜干涉仪 (Large Binocular Telescope Interferometer, LBTI)[18,19] 由 2 个 8.4 m 的望远镜组成, 等效口径 11.8 m, 采用消零干涉测量技术, 其关键计划是“猎寻地球行星系统的可观测特征” (HOSTS)[20]. LBTI 项目由 NASA 资助, 这些行星可能是未来直接搜索类地行星的目标. 作为消零干涉测量模式的补充, LBTI 还考虑到了斐索成像[21], 利用双目望远镜的全部 22.7 m 基线在大视野范围内进行高空间分辨率观测.

LBTI 采用光学延迟线实现相位调制, 并通过色散条纹追踪技术获取实时位相, 将各支路位相约束至成像要求[22]. LBTI 合光器的左反射镜通过压电传感器 (PZT) 进行快速路径长度校正 (Fast Pathlength Correction, FPC), 行程 70 μm, 可实现 140 μm 的光程差 (Optical Path Difference, OPD) 校正, 如图 4 所示. 右侧反射镜通过步进电机驱动的平移台进行慢速路径长度校正, 行程 40 mm. 仪器运行时, 使用 SPC 扫描和获取干涉条纹, FPC 提供大气校正机制. 在 LBTI 一个典型运行过程中, 主要控制回路用于波前校正, 并将相位光束传送到最终组合焦平面. 每台望远镜的尖端/倾斜和高阶模式的累积误差被发送到望远镜指向系统进行校正, 而光程差 (OPD) 误差的累积则由合束器慢路径长度校正器 (Slow Pathlength Correction, SPC) 进行补偿.

2.1.1.2 凯克干涉仪

凯克干涉仪 (Keck Interferometer, KI) 由美国喷气推进实验室 (JPL)、凯克天文台 (W. M. Keck) 和 NASA 太阳系外行星科学研究所共同建造[23], 其光路系统如图 5 所示. KI 可以通过两个望远镜系统实现基线 140 m 的空间光干涉成像, 而单个望远镜则采用分块镜拼接技术[24].

KI 通过自位相参考 (Self Phase Referencing, SPR)、双场位相参考 (Dual Field Phase Referencing, DFPR) 以及天体测量模式 (ASTrometry modes, AST) 三步进行位相同步控制, 三种体系的具体结构如图 6 所示. 在自位相参考模式下, 使用附近的引导星来稳定干涉仪的位相[25]. 双场位相参考模式可以认为是自位相参考模式的改进, 以自位相参考来跟踪明亮的主参考. 现有的纵向计量系统负责消除主次光学系统之间的位相差, 并限制光学系统 Piston 误差引

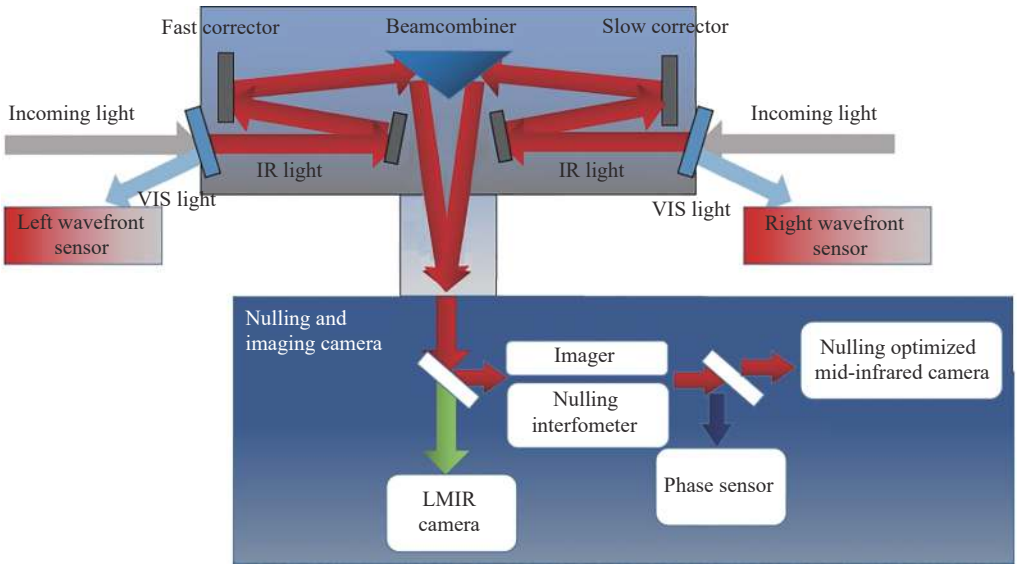


图 4 LBTI 组件

Fig. 4 Components of the LBTI

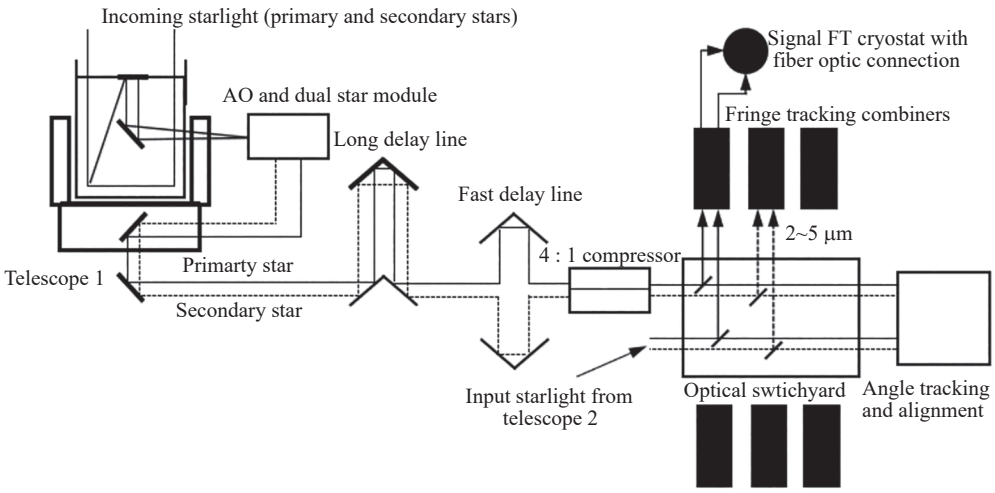


图 5 Keck 单光路路径

Fig. 5 Keck single optical path diagram

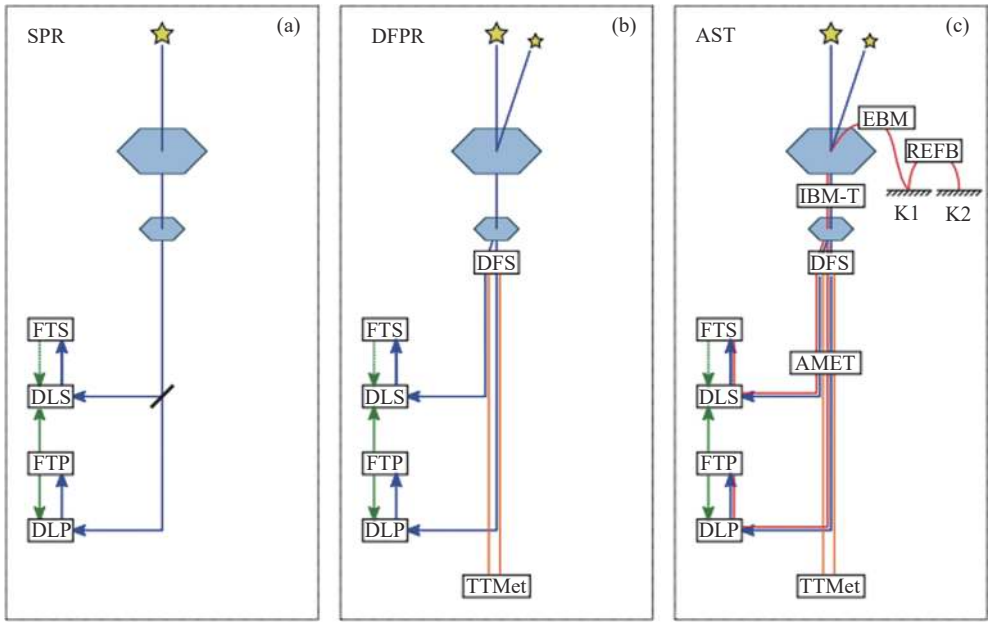


图 6 SPR, DFPR, AST 的体系结构

Fig. 6 Architectures of SPR, DFPR, AST

起的对比度损失的影响. 为了使双场位相参考模式能够进行窄角天体测量, KI 增加了计量系统, 进行窄角测距所涉及的整个差分 OPD 测量. 采用外部探测器和内部探测器分别监视基线之间的相对误差和集光器出光到合光器干涉之间的相对误差.

2.1.1.3 甚大望远镜干涉仪

甚大望远镜干涉仪 (Very Large Telescope Interferometer, VLTI) 是由 4 个 8 m 望远镜 (UT) 和 4 个 1.8 m 辅助望远镜 (AT) 的全部或部分组成的干涉仪, 搭载于欧洲南方天文台建造的甚大望远镜 (Very Large Telescope, VLT), 如图 7 所示. 两个 AT 的最长基线为 200 m, 两个 UT 的最长基线为 130 m, 可以达到 1 mas 的分辨率[26].

VLTI 进行干涉测量的第二代仪器主要为新型万有引力设备 (General Relativity Analysis via VLT InTerferometrY, GRAVITY)[27], 如图 8 所示. GRAVITY 配置了 4 个 (J+)H+K 波段红外波前传感器. 为校正大气湍流, VLTI 通过近红外波前传感器对光

学参考星成像, 利用其信号实现变形镜的补偿控制, 但是此时仍存在额外的高频倾斜和光瞳误差, 因此 VLTI 采用了激光引导系统对其进行校正. 激光束在星分离器处发射, 并沿着光路覆盖 VLTI 的合光成像系统. 此外, VLTI 采用 H 波段测量和校正视场与光瞳的低频漂移 (例如由于延迟线运动), 最终得到未受干扰且经过误差校正的干涉成像光束[28].

2.1.2 天基分布式合成孔径系统

自 20 世纪末的十几年中, ESA 完成了对达尔文计划可行性的设计, 并于 2010 年正式提出[29]. 达尔文计划前后设计了多种构型, 包括六航天器构型、五航天器构型等, 最后确定一种 X 型构型如图 9 所示, 最终采用了与 NASA 的 TPF 趋同的设计[30].

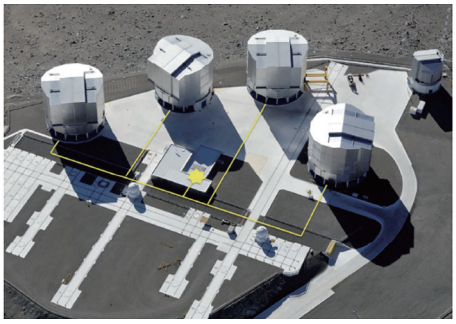


图 7 甚大望远镜干涉仪的组成

Fig. 7 Constitute of Very Large Telescope Interferometer (VLTI)

达尔文计划干涉仪的干涉测量基线可以在 50～500 m 之间变化, 以提供不同目标探测所需的角度分辨率, 如图 10 所示. 达尔文计划要求望远镜光束之间的光程差必须保持在工作波长的 1‰以下, 位相同步精度优于 20 nm, 以实现完美的消零. 达尔文计划在 VLTI 建立了一个欧洲地基消零干涉测量实验室 (Ground based European Nulling Interferometry Experiment, GENIE), 用于验证其消零干涉测量技术, 包括光度测量和振幅控制、偏振匹配、移相、光束组合和内部调制、空间滤波、光谱成像探测、电子学和低温光学等内容, 用以证明可以在宽广的中红外波段实现消零干涉测量, 作为达尔文计划下一阶段的先导[31,32].

2002 年 5 月 NASA 选择了两个类地行星探测器 (Terrestrial Planet Finder, TPF) 任务进一步开展行星探测研究和技术开发, 该任务还包括对新发现行星的表面和大气进行表征, 以及寻找生命的化学特征[33]. 其中类地行星探测器干涉仪 (TPF-I) 最初计划采用共机架的阵列望远镜或编队飞行的分布式合成孔径系统. 在 TPF-I 和 Darwin 体系结构发展过程中, 开始都是采用 Bracewell 所提出的消零干涉模式, 但

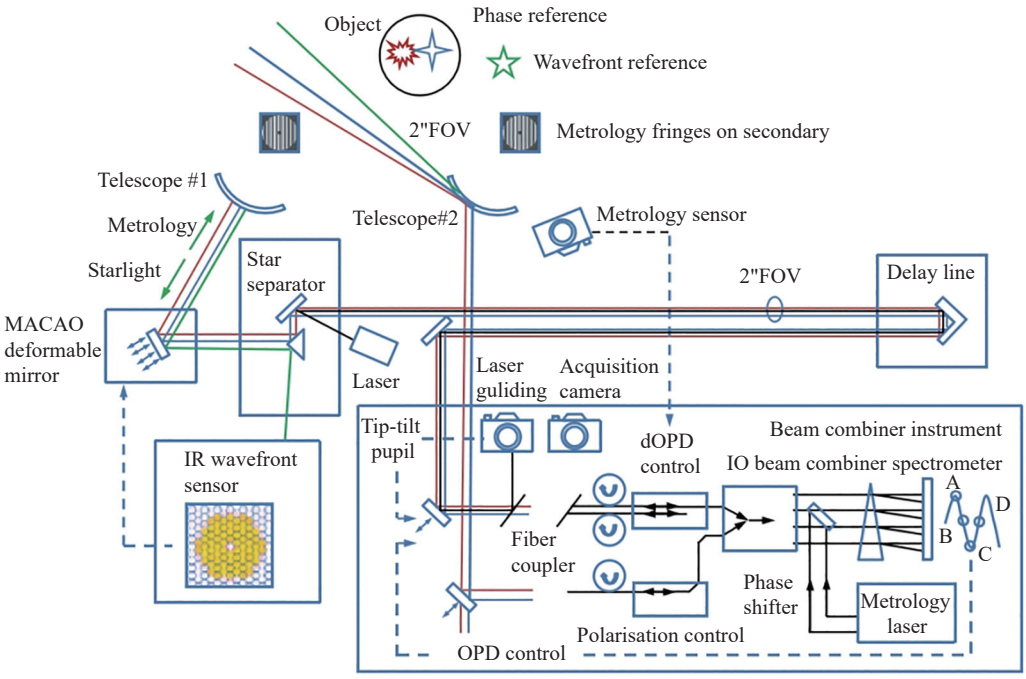


图 8 VLTI 的 Gravity 运行

Fig. 8 Operation diagram of VLTI Gravity

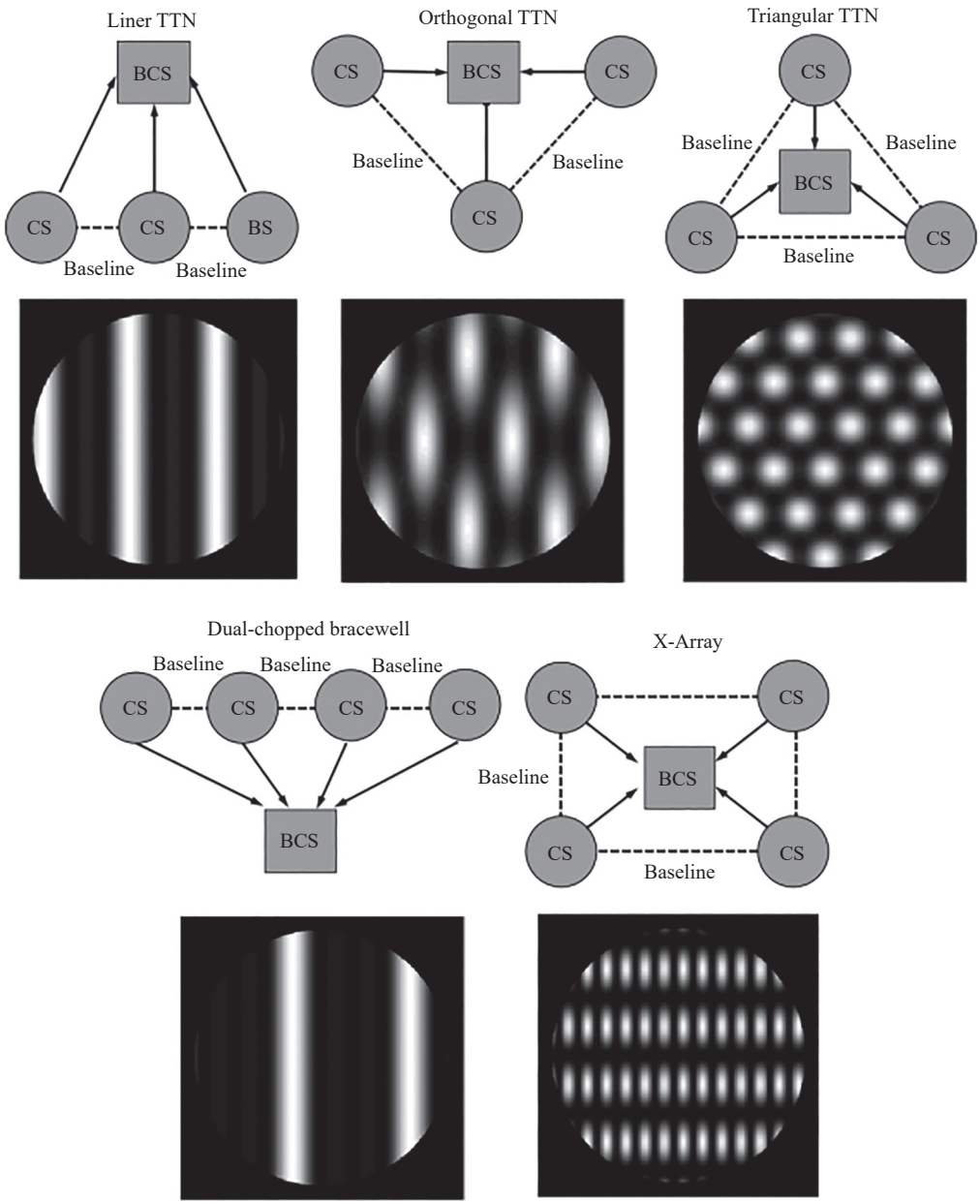


图 9 达尔文三台和四台望远镜编队的孔径配置和角度接收特性

Fig. 9 Aperture configurations and angular receive characteristics for three and four telescope formations

最终均形成了 X 型阵列, 消零和成像基线的解耦技术使 X 阵列比其他配置形式更灵活, 编队飞行干涉仪 (FFI) 也采用了此种阵列结构[34].

编队飞行干涉仪 (FFI)X 阵列几何结构如图 11 所示, 所有航天器都位于与入射星光方向垂直的平面上, 光束通过集光器传输至合光相机. 消零基线 (π 相位差) 沿着阵列的短维度, 成像基线形成长边和对角线, 相位被反转以在两个斩波状态之间切换. 集光相机均采用相同的三镜设计, 并在集光相机主镜安装恒星指向系统和内校准、计量系统, 并在光路中采用可变形反射镜进行波前校正.

系外行星大型干涉仪 (Large Interferometer For Exoplanets, LIFE) 项目于 2018 年正式启动, 其是 ESA 的 DARWIN 和 NASA 的 TPF-I 概念的延续, 目标在于整合空间任务开发科学与技术、确定路线图, 并发射大型天基红外消零干涉仪[8], LIFE 的构想如图 12 所示. LIFE 讨论了集光相机口径为 1, 2, 3.5 m 的情况, 先后分析论证了不同的卫星阵列架构,

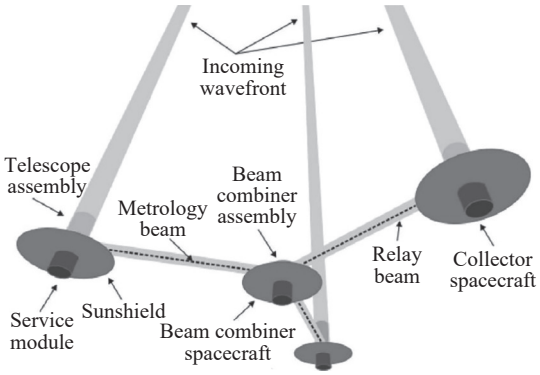


图 10 DARWIN 干涉仪配置

Fig. 10 DARWIN interferometer configuration

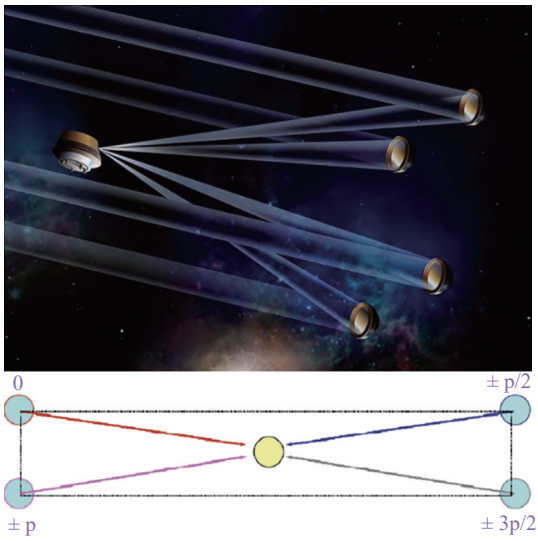


图 11 FFI 的 X 型阵列

Fig. 11 X-array of FFI

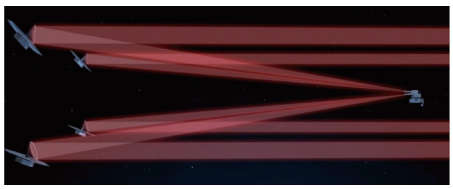


图 12 LIFE 构想

Fig. 12 Ideogram of LIFE

最终确定 5+1 卫星阵列形式的消零干涉效果最佳, 且当其中一颗卫星发生故障以后, 则可采用 4+1 的架构继续运行[35].

LIFE 是一种天基调零干涉仪, Kepler, TESS, Darwin, TPF-I 等任务取得的技术和数据积累对其有重要的参考意义. LIFE 研究人员在 Darwin 低温干涉试验基础上进行了调零干涉低温试验 (NICE), 旨在将所有任务需求合并到一个单一的测试平台中, 以实现低温条件下的所有要求[36].

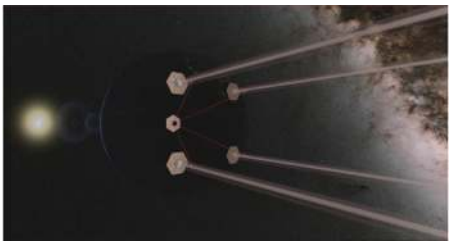


图 13 觅音计划设想

Fig. 13 Ideogram of MEAYIN mission

2.2 中国研究进展

中国计划在 2030 年前后实施觅音计划, 对太阳系外是否有适宜人类居住的行星进行探测[37]. 觅音计划拟采用分布式空间光学干涉阵列望远镜, 设想如图 13 所示. 觅音计划望远镜通过 4+1 的 X 阵列架构实现分布式合成孔径干涉成像, 集光器和合束器通过高精度编队与位相控制组成百米级基线干涉阵列, 具有恒星干涉仪、系外行星消零干涉仪等工作模式.

在分布式合成孔径体制的超大口径望远镜方面, 国内的研究能力和创新能力相比于国外有着不小的差距. 中国的研究主要集中在理论研究及仿真分析等方面, 距离望远镜实际应用还有一定的差距. 中国科学院国家天文台、北京空间机电研究所、中国科学院光电技术研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、西安工业大学、中国科学院西安光学精密机械研究所、哈尔滨工业大学等机构均开展了相关研究并取得一定成果.

中国科学院国家天文台于 2018 年建造了一个具有三个子孔径的斐索成像干涉仪试验台 (FIIT), 如图 14 所示. 拟安装在具有编队飞行配置的分布式小卫星星座上, 用于高分辨率天文观测[37]. 在计划中该星座由三颗小卫星 (每颗都有一个次望远镜) 和一颗中心卫星 (合光望远镜) 组成, 可以在固定模式下飞行, 并使用飞秒激光测距仪来测量相对位置, 借助卫星姿态控制系统 (ACS) 以闭环方式保持固定模式, 编队飞行的误差目标预计为: 倾斜误差–0.01°, 平移误差–70 μm. FIIT 的位相测量通过 DFS 检测模块、光程补偿模块、计算和控制单元以及数字信号处理器实现位相同步控制[38].

中国科学院光电技术研究院近年来也进行了合

成孔径相关技术的研究, 从 2017 年开始陆续公开报道研制了相控望远镜阵列并攻克了相关关键技术[39–42]. 开发了以像质评价函数为目标控制变量, 利用基于随机并行梯度下降 (SPGD) 算法的闭环位相同步算法, 并在激光、白光点光源以及面目标情况下开展了实验. 实验平台的光学结构如图 15 所示.

北京空间机电研究所长期开展光学合成孔径技术研究, 在理论基础、关键技术、试验验证等方面均开展了深入研究, 在 2019 年搭建了六孔径合成孔径光学探测系统样机, 其组成如图 16 所示. 该样机可闭环追踪经不同镜面反射的信标光所形成的色散干涉条纹, 能够实现实时对镜间相位误差的校正控制, 保证了对观测目标的高分辨率探测.

北京空间机电研究所近年来已掌握分布式光学干涉系统的相关成像理论、设计方法与位相控制方法, 目前正在研制三孔径分布式样机, 其外观结构如图 17 所示. 该三孔径分布式样机的子孔径 150 mm, 合成孔径等效孔径 450 mm, 集光相机采用无焦光学系统, 合光相机采用三反光学系统, 合成孔径系统焦距 4600 mm.

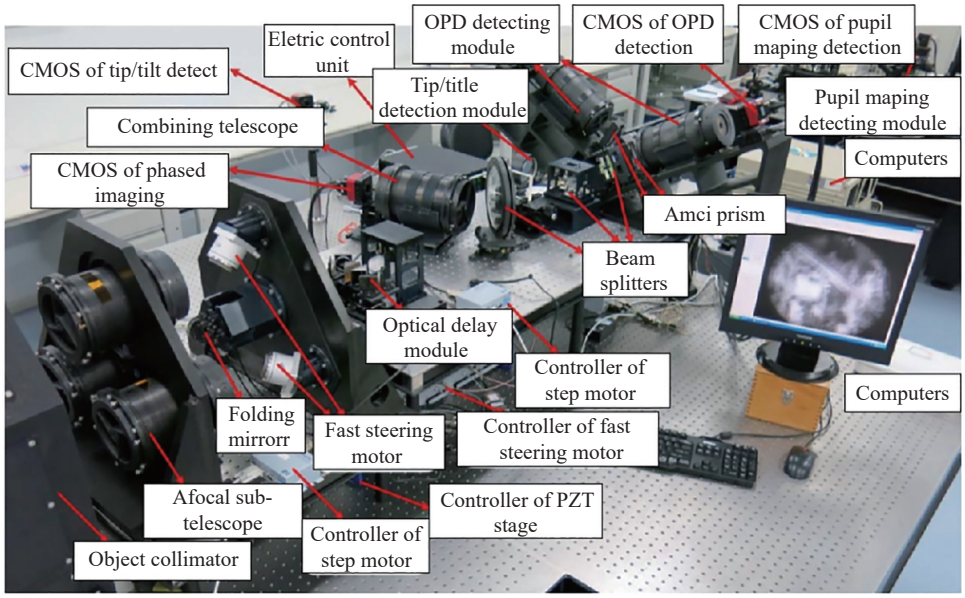


图 14 FIIT 试验台整体布局

Fig. 14 Overall layout of the FIIT testbed

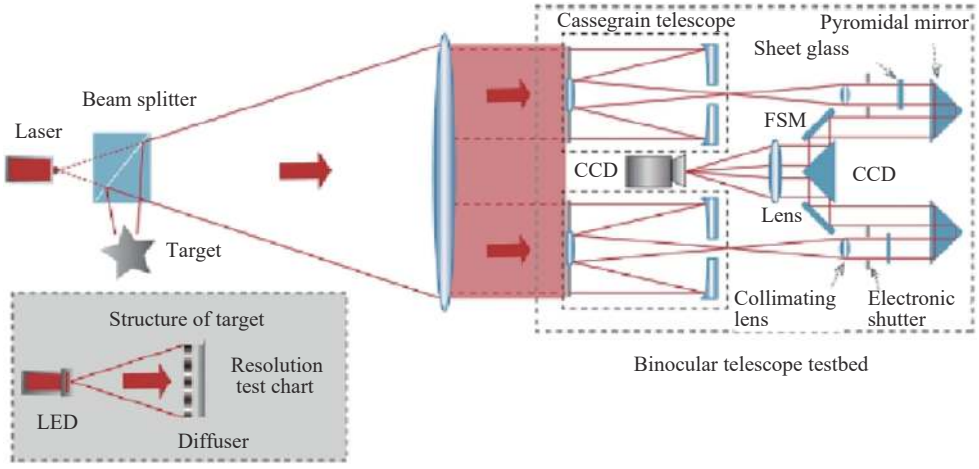


图 15 双筒望远镜实验平台的光学结构

Fig. 15 Optical structure of binoculars experimental platform

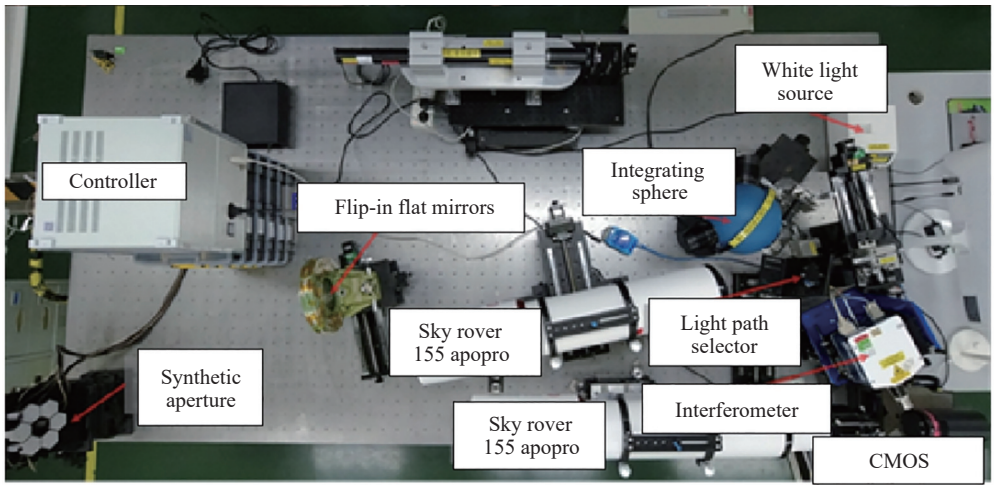


图 16 六孔径合成孔径光学探测系统样机

Fig. 16 Prototype of six-aperture synthetic aperture optical detection system



图 17 三孔径分布式样机

Fig. 17 Three aperture distributed prototype

3 分布式合成孔径系统的技术前沿

尽管分布式合成孔径系统可以通过若干小口径编队组合实现等效大口径望远镜的效果, 绕过了超大口径光学元件制造与发射的难题, 但是对星间通信、自主编队、星间测距、位相同步、时间同步等都提出了更高要求.

(1) 干涉成像编队控制技术. 分布式合成孔径系统是一种离散的高精度干涉成像编队, 其探测性能会直接受到平台基线、位相同步精度的影响, 严重时直接决定任务成败, 因此需要研究力光耦合下的干涉编队姿态控制动力学及控制技术, 只有形成分布式平台轨道构型和编队高精度控制方案, 才能实现对分布式平台的外部约束, 以及严格的星间链路保持. 此外, 分布式合成孔径系统在深空多体系统会受到日地复杂应力以及太阳光压作用, 使得分布式合成孔径系统星间链路是一个时间变化量, 需分析编队轨道运动影响, 发现多体摄动力影响下编队自然运动演化规律, 建立力光耦合作用编队动力学模型, 得到分布式平台的扰动信息.

(2) 长距离高精度星间测距技术. 分布式合成孔径的基线长度决定了干涉成像系统的角分辨率, 需要进行精确测量. 鉴于分布式平台基线, 集光相机和合光相机间距达百米级, 相应的星间测距量程也达到百米量级, 测量精度也需达到亚微米级. 因此需要开展长距离高精度的星间测距技术研究, 以实现分布式合成孔径系统间基线长度以及分布式平台相对漂移的精确测量.

(3) 高精度星间时间同步传递技术. 在长基线背景下, 信号的相对时间延迟较大, 为了保证测量精度, 需要更高的时间同步精度. 如果没有精准的时间测量和同步系统, 集光相机和合光相机终端在位相上的差别就会导致光束无法形成有效干涉, 必须利用时间同步传递装置建立一个统一的时间参考架. 目前光纤时间传递同步技术已经相对成熟, 需要将其进一步应用到以空间激光为介质的时间同步传递装置, 以实现星间长距离下的高精度时间同步传递.

(4) 跨层级高精度位相同步测量与控制技术. 实现天基分布式合成孔径对目标干涉成像探测的关键是实现位相同步, 即光程差接近于零, 要求位相同步精度达到几十纳米, 目前詹姆斯·韦伯空间望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST) 可实现这一在轨位相同步精度指标. 卫星自主编队控制精度一般

为毫米级, 与位相同步精度相距甚远, 需要采用色散条纹追踪技术和相位复原技术不断将位相同步测量精度收敛至纳米级别. 同时采用高精度的位相补偿技术, 来补偿在轨扰动、卫星平台漂移等误差, 从而实现跨层级高精度位相同步.

4 结论

天基分布式合成孔径技术将难以工程实现的极大口径光学元件拆散为多个离散孔径元件, 并以多孔径的光学干涉成像机理作为理论支撑, 以精密位相测量与控制等技术为工程途径, 实现大型柔性可重构空间望远系统, 可以达到与整体望远镜成像系统近乎一致的成像波前, 极大提升光学系统的观测分辨率, 在科学和工程领域均具有里程碑式的意义. 但是目前国内外分布式合成孔径技术尚未发展成熟, 在星间测距、时间同步传递、位相同步控制、卫星自主编队等技术领域仍需开展深入研究.

参考文献

[1] TIAN Feng, HU Xiong, WU Ji. Research progress and prospect of exoplanetary atmospheres and habitable exoplanet sciences[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2016, **36**(6): 815-827 (田丰, 胡雄, 吴季. 系外行星大气与宜居系外行星研究进展及发展趋势 [J]. 空间科学学报, 2016, **36**(6): 815-827)

[2] WANG Jiaqi, WANG Huijuan, WANG Wei, *et al*. The recent progress of detection and research of exoplanets[J]. *Progress in Astronomy*, 2021, **39**(1): 1-28 (王佳琪, 王汇娟, 王炜, 等. 太阳系外行星探测研究进展 [J]. 天文学进展, 2021, **39**(1): 1-28)

[3] HU Yongyun. Searching for exoplanets and exo-life: On the 2019 nobel prize in physics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, **64**(36): 3798-3807 (胡永云. 系外行星和系外生命——兼谈 2019 年度诺贝尔物理学奖 [J]. 科学通报, 2019, **64**(36): 3798-3807)

[4] NASA. Exoplanet and Candidate Statistics[EB/OL]. (2023-12-28)[2023-12-28]. https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html

[5] BRACEWELL R N. Detecting nonsolar planets by spinning infrared interferometer[J]. *Nature*, 1978, **274**(5673): 780-781

[6] MARTIN S R, KSENDZOV A, LAY O, *et al*. TPF-Interferometer: a decade of development in exoplanet detection technology[C]//Proceedings of SPIE 8151, Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets V. San Diego: SPIE, 2011: 81510D

[7] GABOR P. A Study of the Performance of A Nulling Interferometer Testbed Preparatory to the Darwin Mission [D]. Paris: Universite Paris Sud, 2009

[8] QUANZ S P, OTTIGER M, FONTANET E, *et al*. Large Interferometer For Exoplanets (LIFE): I. Improved exoplanet detection yield estimates for a large mid-infrared space-interferometer mission[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2022, **664**: A21

[9] NASA Headquarters. Kepler Completes Prime Mission, Begins Extended Mission[EB/OL]. (2012-11-15)[2023-12-28]. https://www.astronomy.com/science/kepler-completes-prime-mission-begins-extended-mission/

[10] KIM S E. What Comes After the James Webb Space Telescope? Some Astronomers Want LIFE[EB/OL]. (2022-06-02)[2023-12-28]. https://www.popsci.com/science/next-james-webb-space-telescope-find-exoplanets/#The%20Origins%20of%20Life

[11] Kammerer J , Quanz S P . Simulating the Exoplanet Yield of a Space-based MIR Interferometer Based on Kepler Statistics[J]. *Earth and Planetary Astrophysics* , 2017, 609: A4

[12] QIAO Yanfeng, LIU Kun, DUAN Xiangyong. Optical synthetic aperture imaging techniques and development[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(3): 175-183 (乔彦峰, 刘坤, 段相永. 光学合成孔径成像技术及发展现状 [J]. 中国光学与应用光学, 2009, **2**(3): 175-183)

[13] ZHOU Chenghao, WANG Zhile, ZHU Feng. Review on optical synthetic aperture imaging technique[J]. *Chinese Optics*, 2017, **10**(1): 25-38 (周程灏, 王治乐, 朱峰. 大口径光学合成孔径成像技术发展现状 [J]. 中国光学, 2017, **10**(1): 25-38)

[14] GLINDEMANN A, ABUTER R, CARBOGNANI F, *et al*. The VLT Interferometer: a unique instrument for high-resolution astronomy[C]//Proceedings of SPIE 4006, Interferometry in Optical Astronomy. Munich: SPIE, 2000

[15] GLINDEMANN A, ALGOMEDO J, AMESTICA R, *et al*. The VLTI and its subsystems[J]. *EAS Publications Series*, 2003, **6**: 91-91

[16] GLINDEMANN A. Introduction to Spatial Interferometry[EB/OL]. (2022)[2022]. https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/telescopes/vlti/tuto/tutorial_spatial_interferometry.pdf

[17] LIN Xiejia, WU Zhen. Study on *uv* coverage of optical synthetic aperture imaging technology and optimization of aperture[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(1): 30-36 (林燮佳, 吴桢. 光学合成孔径成像技术的 *uv* 覆盖与孔径排列研究 [J]. 应用光学, 2012, **33**(1): 30-36)

[18] DEFRÈRE D, HINZ P, SKEMER A, *et al*. Exoplanet science with the LBTI: instrument status and plans[C]//Proceedings of SPIE 9605, Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets VII. San Diego: SPIE, 2015: 96051G

[19] HILL J M, GREEN R F, SLAGLE J H. The large binocular telescope[C]//Proceedings of SPIE 7733, Ground-based and Airborne Telescopes III. San Diego: SPIE, 2006: 77330C

[20] ERTEL S, HINZ P M, STONE J M, *et al*. Overview and

prospects of the LBTI beyond the completed HOSTS survey[C]//Proceedings of SPIE 11446, Optical and Infrared Interferometry and Imaging VII. Online Only: SPIE, 2020: 1144607

[21] PATRU F, ESPOSITO S, PUGLISI A, *et al*. The LBTI Fizeau imager – I. Fundamental gain in high-contrast imaging[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, **472**(3): 2544-2553

[22] HINZ P M, DEFRÈRE D, SKEMER A, *et al*. Overview of LBTI: a multipurpose facility for high spatial resolution observations[C]//Proceedings of SPIE 9907, Optical and Infrared Interferometry and Imaging V. Edinburgh: SPIE, 2016: 990704

[23] COLAVITA M M, WIZINOWICH P L, AKESON R L, *et al*. The Keck Interferometer[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2013, **125**: 1226-1264

[24] VASISHT G, BOOTH A J, COLAVITA M M, *et al*. Performance and verification of the Keck interferometer fringe detection and tracking system[C]//Proceedings of SPIE 4838, Interferometry for Optical Astronomy II. Waikoloa: SPIE, 2003

[25] WOILLEZ J, AKESON R, COLAVITA M, *et al*. ASTRA: astrometry and phase-referencing astronomy on the Keck interferometer[C]//Proceedings of SPIE 7734, Optical and Infrared Interferometry II. San Diego: SPIE, 2010

[26] SCHÖLLER M. The very large telescope interferometer: current facility and prospects[J]. *New Astronomy Reviews*, 2007, **51**(8/9): 628-638

[27] EISENHAUER F, PERRIN G, STRAUBMEIER C, *et al*. GRAVITY: microarcsecond astrometry and deep interferometric imaging with the VLTI[C]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2007, **3**(S248): 100-101

[28] ABUTER R, ACCARDO M, AMORIM A, *et al*. First light for GRAVITY: Phase referencing optical interferometry for the very large telescope interferometer[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, **602**: A94

[29] COCKELL C S, LEGER A, FRIDLUND M, *et al*. *Darwin*-a mission to detect and search for life on extrasolar planets[J]. *Astrobiology*, 2009, **9**(1): 1-22

[30] WALLNER O, ERGENZINGER K, FLATSCHER R, *et al*. DARWIN mission and configuration trade-of[C]//Proceedings of SPIE 6268, Advances in Stellar Interferometry. Orlando: SPIE, 2006: 626827

[31] FRIDLUND M, GONDOIN P. GENIE – the Darwin demonstrator[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2003, **286**(1): 93-98

[32] GONDOIN P, ABSIL O, FRIDLUND C V M, *et al*. Darwin ground-based European nulling interferometer experiment (GENIE)[C]//Proceedings of SPIE 4838, Interferometry for Optical Astronomy II. Waikoloa: SPIE, 2003: 700-711

[33] HENRY C, LAY O, AUNG M, *et al*. Terrestrial planet finder interferometer: architecture, mission design, and technology development[C]//Proceedings of SPIE 5491, New Frontiers in Stellar Interferometry. Glasgow: SPIE, 2004: 265-274

[34] LAWSON P R, LAY O P, JOHNSTON K J, *et al*. Terrestrial Planet Finder Interferometer Science Working Group Report[M]. California: Jet Propulsion Laboratory, 2007

[35] HANSEN J T, IRELAND M J, The LIFE Collaboration. Large Interferometer for Exoplanets (LIFE) IV. Ideal kernel-nulling array architectures for a space-based mid-infrared nulling interferometer[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2022, **664**: A52

[36] RANGANATHAN M, GLAUSER A M, BIRBACHER T, *et al*. The nulling interferometer cryogenic experiment: I [C]//Proceedings of SPIE 12183, Optical and Infrared Interferometry and Imaging VIII. Montréal: SPIE, 2022: 121830L

[37] TONG Zhaoyuan, LI Meng, CUI Chengbo, *et al*. Design and analysis of the configuration of deployable membrane sunshield[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2021, **41**(3): 82-88 (仝照远, 李萌, 崔程博, 等. 空间可展开薄膜遮光罩设计与分析 [J]. 中国空间科学技术, 2021, **41**(3): 82-88)

[38] JIANG A M, WANG S, DONG Z C, *et al*. Wide-band white light sparse-aperture Fizeau imaging interferometer testbed for a distributed small-satellites constellation[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(11): 2736-2746

[39] XUE J W, JIANG A M, WANG S, *et al*. Design and experimental demonstration of pointing correction module for a Fizeau imaging interferometer[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(34): 9936-9943

[40] XIE Zongliang. Study on key technology of phased telescope array imaging[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2018 (谢宗良. 相控望远镜阵列成像关键技术研究 [D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2018)

[41] XIE Z L, MA H T, QI B, *et al*. Restoration of sparse aperture images using spatial modulation diversity technology based on a binocular telescope testbed[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(3): 7802611

[42] XIE Z L, MA H T, HE X J, *et al*. Adaptive piston correction of sparse aperture systems with stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(8): 9541-9551

作者简介



王小勇 男, 1972 年 11 月生, 籍贯吉林省长春市. 现为北京空间机电研究所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为高分辨率空间光学遥感技术等.