

引用格式: LI Daojing, ZHOU Kai, ZHENG Hao, et al. Laser Local Oscillator Infrared Spectral Interferometry Imaging and Its Application Prospect for Shipborne Astronomy (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(2):0211001

李道京,周凯,郑浩,等.激光本振红外光谱干涉成像及其艇载天文应用展望(特邀)[J].光子学报,2021,50(2):0211001

※封面论文※

## 激光本振红外光谱干涉成像及其艇载天文应用 展望(特邀)

李道京<sup>1,2</sup>,周凯<sup>1,2</sup>,郑浩<sup>3</sup>,高敬涵<sup>1,2</sup>,孙艳玲<sup>4</sup>,崔岸婧<sup>1,2</sup>,吴疆<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院空天信息创新研究院 微波成像技术国家级重点实验室,北京 100190)

(2 中国科学院大学,北京 100049)

(3 项目管理中心,北京 100101)

(4 西安电子科技大学 物理与光电工程学院,西安 710071)

**摘要:**本文分析了红外干涉成像现状和难点,介绍了激光本振红外相干探测的原理,阐述了基于电子学的红外光谱细分和干涉成像原理,讨论了激光本振红外阵列探测器形式。激光本振和相干探测器的设置,可保证两个望远镜的红外信号相位的正确传递,在电子学实施窄带滤波形成的窄带红外信号有利于实现长基线干涉成像。在此基础上,类似微波综合孔径射电望远镜,通过不同空间位置的多个较小孔径,组合形成一个大的光学口径,以红外光谱“射电”望远镜形式实现高分辨率天文成像,可大幅降低红外成像系统的复杂度和体积重量。介绍了平流层飞艇平台的特点,该平台为长基线大衍射口径望远镜的安装提供了有利条件,且可大幅减少大气对天文观测的影响,有望成为天文观测的新型平台。给出了 10 m 基线、2 m 衍射口径红外光谱干涉成像望远镜的布设方案,分析了其探测和成像性能,讨论了关键技术及其可能的技术途径。分析表明,基于平流层飞艇平台,3 个 2 m 衍射口径望远镜的组合在 10 m 基线下可等效实现口径 10 m 望远镜的红外天文观测能力。

**关键词:**红外光谱;干涉成像;激光本振;衍射光学系统;平流层飞艇;天文观测

中图分类号:TN215

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215002.0211001

### Laser Local Oscillator Infrared Spectral Interferometry Imaging and Its Application Prospect for Shipborne Astronomy (Invited)

LI Daojing<sup>1</sup>, ZHOU Kai<sup>1,2</sup>, ZHENG Hao<sup>3</sup>, GAO Jinghan<sup>1,2</sup>, SUN Yanling<sup>4</sup>,  
CUI Anjing<sup>1,2</sup>, WU Jiang<sup>1,2</sup>

(1 Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Project Management Office, Beijing 100101, China)

(4 School of Physics and Optoelectronic, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The status and difficulties of infrared interferometry imaging are analyzed, the principle of infrared coherent detection with laser local oscillator is introduced, the principle of infrared spectral segmentation and interferometry imaging based on electronics is expounded, and the frame structure of laser local oscillator infrared array detector is discussed. By means of laser local oscillator and coherent

基金项目:中科院鸿鹄专项(No.E03701011F),中科院重点部署项目(No.E03701010F)

第一作者:李道京(1964—),男,研究员,博士,主要研究方向为雷达系统和雷达信号处理。Email: lidj@mail.ie.ac.cn

收稿日期:2020-08-24;录用日期:2020-11-25

<http://www.photon.ac.cn>

detector, the correct phase transmission of the infrared signals of the two telescopes can be ensured, and the narrow-band filtering in electronics can be implemented. The narrow-band infrared signals are favorable for the long-baseline interferometry imaging. On this basis, similar to the microwave synthetic aperture radio telescope, it can combine many small apertures in different spatial positions to form a large optical aperture, in the form of infrared spectral "radio" telescope to achieve high-resolution astronomical imaging, which is likely to greatly reduce the complexity, volume and weight of the infrared imaging system. The characteristics of the stratosphere airship platform are described, which provides favorable conditions for the installation of long-baseline large diffraction aperture telescopes and can greatly reduce the impact of the atmosphere on astronomical observation, and may become a new platform for astronomical observation. The arrangement scheme of the infrared spectral interferometry imaging telescope with 10 m baseline and 2 m diffraction aperture is presented, its detection and imaging performance is analyzed, and the key technologies and possible technical approaches are discussed. The analysis shows that, the infrared astronomical observation capability of the 10 m aperture telescope can be equivalent through three 2 m aperture diffraction telescopes with the 10 m baseline based on the stratospheric airship platform.

**Key words:** Infrared spectrum; Interferometric imaging; Laser local oscillator; Diffractive optical system; Stratospheric airship; Astronomy observation

**OCIS Codes:** 110.3175; 350.1260; 110.6770; 250.0040

## 0 引言

目前国际上著名的地基大口径望远镜<sup>[1]</sup>包括:10 m级的甚大望远镜(Very Large Telescope, VLT),凯克望远镜(Keck),双子望远镜(Gemini)等;5 m级的多镜面望远镜(Multiple Mirror Telescope, MMT),南非光学望远镜(SOAR),海尔望远镜(Hale)等。著名的天基望远镜就是2.4 m级哈勃望远镜,以及即将发射的6.5 m级詹姆斯韦伯望远镜。

VLT天文望远镜由4个口径为8.2 m的主镜和4个口径为1.8 m的可移动辅镜组成,干涉成像基线长度可达200 m;Keck天文望远镜由2个镜面拼接形成的等效口径为10 m望远镜组成,可观测的极限星等为22,干涉成像基线长度可达140 m<sup>[1]</sup>。VLT天文望远镜和Keck天文望远镜均在红外波段具备干涉成像能力。

基于两个(或多个)望远镜长基线干涉成像方法,可等效实现口径为基线长度望远镜的分辨率,这种高分辨率成像能力使其具备重要的应用价值,其原理也可用光学合成孔径成像概念来解释,目前已投入巨资发展相关技术。

实际应用情况表明,传统红外波段干涉成像观测技术尚不成熟,多数望远镜还是要靠增大望远镜口径的方法来提高自身分辨率,目前30 m级望远镜(Thirty Meter Telescope, TMT)<sup>[2]</sup>正在建造之中。

与此同时,新的红外波段干涉成像观测方法一直在深入研究中。借助于激光本振,2000年加州大学伯克利分校团队在10  $\mu\text{m}$ 红外波段利用光电外差探测,将红外干涉处理转至电子学射频段,在威尔逊山上通过长基线干涉实现恒星角直径测量<sup>[3]</sup>。这种红外空间干涉成像原理,已明确类似于射电望远镜。

本文介绍了射电望远镜和激光干涉成像的研究进展,分析了红外干涉成像现状和难点,阐述了激光本振红外相干探测的原理,以及基于电子学的红外光谱细分和干涉成像处理概念,讨论了激光本振红外阵列探测器形式。基于平流层飞艇平台,给出了10 m基线、2 m衍射口径红外光谱干涉成像望远镜的布设方案,分析了其探测和成像性能,讨论了关键技术及其可能的技术途径。

## 1 射电望远镜和激光干涉成像的研究进展

用于天文观测的射电望远镜已被广泛应用,为提高灵敏度通常设置本振并实施外差相干探测,分单孔径和综合孔径两种形式。

目前世界上最大的单孔径射电望远镜是建设在我国贵州的500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)<sup>[4]</sup>。为实现更高灵敏度(对应接收面积)和更高分辨率(对应口径尺寸),射电干涉综合孔径技术得到了快速发展和实际应用<sup>[5]</sup>,典型的系统如欧洲的甚长基线干涉测量技术(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)网、美国的超长基线阵列(Very Long Baseline Array,

VLBA)、荷兰的低频阵列射电望远镜(Low Frequency Array Radio, LOFAR)以及中国密云、天山、明安图的综合孔径射电望远镜。

干涉综合孔径射电望远镜的基本原理是:用相隔两地的两架射电望远镜接收同一天体的无线电波,两束波信号进行干涉,其等效分辨率最高可以等同于一架口径相当于两地之间距离(基线长度)的单口径射电望远镜。其发明者 RYLE M 因此获得 1974 年诺贝尔物理学奖。综合孔径射电望远镜的核心是干涉,其灵敏度取决于各个天线的总接收面积,空间分辨率则取决于观测中所用的最长基线,从而实现了空间分辨率与灵敏度指标的分离,极大地提高了射电望远镜的空间分辨率。

要特别说明的是,VLBI<sup>[6-7]</sup>在射电天文占有重要地位。2019年,事件视界望远镜国际合作团队使用分布全球的8台大型射电望远镜(空间分辨率相当于一台口径为地球直径大小的射电望远镜),通过甚长基线干涉技术帮助人类获得了首张黑洞照片<sup>[8-9]</sup>,事件视界射电望远镜其实就是一个VLBI网。

目前世界在建的最大综合孔径射电望远镜是平方公里阵列射电望远镜(Square Kilometer Array, SKA)<sup>[10-11]</sup>,目前设计的频率范围为50 MHz至15 GHz,最长基线为3 000 km。

为实现有效的干涉处理,射电望远镜均采用相干探测体制,本振和相干探测器的设置,可保证不同望远镜间信号相位的正确传递。射电望远镜也可看作是一个外辐射源雷达探测系统<sup>[12-13]</sup>,雷达信号外差相干探测接收、匹配滤波和相关处理的很多方法,可在其中得到应用。

激光信号相干性的提高,使得合成孔径激光雷达(Synthetic Aperture Lidar, SAL)(也称激光合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR))和逆合成孔径激光雷达(Inverse Synthetic Aperture Lidar, ISAL)(也称激光逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR))的技术实现成为可能。对相干体制激光雷达,利用合成孔径成像技术,在较小的光学孔径条件下,可对远距离目标实现高分辨率成像。近年来激光SAR技术研究已成为热点并取得重要进展。

2011年美国洛克希德-马丁公司独立完成了机载合成孔径激光雷达演示样机的飞行试验<sup>[14]</sup>,对距离1.6 km的地面目标(观测目标为洛马公司徽标)获得了幅宽为1 m、分辨率优于3.3 cm的成像结果。2013年,美国国防部与Raytheon公司签订合同,宣布由其研制远距离成像激光雷达,用于对地球同步轨道目标进行ISAL成像。2018年,美国报道了EAGLE计划中的工作在地球静止轨道轨道(Geostationary orbit, GEO)天基ISAL成功发射,再次表明了此项技术的意义以及美国对此持续研究的进展。

随着激光合成孔径成像技术的快速发展,将干涉处理的概念引入到激光合成孔径成像中成为新的研究热点。2012年,美国Montana州立大学报道了室内激光干涉合成孔径成像实验结果<sup>[15]</sup>。该实验在1.37 m的距离上对一枚印有林肯头像的涂白硬币(涂白以使硬币各处散射特性均匀)进行了单航过和重航过激光合成孔径干涉成像,获得了分辨率在毫米级,高程精度在10  $\mu\text{m}$ 级的成像结果。实验表明相对于二维光学图像,通过干涉处理可以获得关于目标更多的有益信息。

我国也积极开展跟踪研究,对合成孔径激光成像方式、信号产生、相干性保持和振动抑制等核心技术进行了深入研究,其实际系统研制工作不断深入推进。从2013年开始,中科院电子所系统地开展了机载SAL的研究工作<sup>[16]</sup>。2017年,中科院电子所和上光所分别报道了机载侧视SAL和直视SAL飞行成像试验,获得了地面高反射率合作目标的成像结果。

为抑制振动对成像的影响,基于顺轨干涉处理的激光InSAL方法被提出<sup>[17-19]</sup>;为对远距离目标实现三维成像,基于正交长基线干涉处理的激光InISAL方法也被提出<sup>[20-21]</sup>,干涉处理技术已全面引入激光合成孔径成像研究中。

由于SAL使用相干探测体制,相干体制激光雷达通过本振信号实现相干外差探测,在原理上可通过频域滤波大幅提高探测灵敏度<sup>[22]</sup>,而本振信号的存在使目标微弱小回波可实施光电转换,为后续积累提供条件,其探测性能远优于目前的单光子探测器<sup>[23]</sup>,相干探测的灵敏度比直接探测至少要高20 dB<sup>[24]</sup>,故基于相干体制的SAL同时具有远距离目标探测能力。

显然,干涉型射电望远镜和激光干涉成像技术可供红外干涉成像研究借鉴,2000年伯克利分校的工作<sup>[3]</sup>,已表明了该技术路线的可行性。

## 2 激光本振红外光谱干涉成像原理

### 2.1 红外干涉成像的难点

大气对地基大口径望远镜成像分辨率和两望远镜信号的相干性影响很大,通常需引入自适应光学系统<sup>[25]</sup>来校正大气误差。传统干涉成像概念下,由于瞬时光谱范围较宽使信号带宽较大,实现干涉成像并不容易,而大气误差校正环节的增加,引入存在空间变化的相位误差,进一步增加了其干涉成像的难度。

红外信号是宽带噪声信号,即使两个望远镜的信号是同时采样的,由于两望远镜空间位置不同导致的波程差(延时),也会使两个信号存在时差而去相干,且光谱范围(带宽)越大,越容易去相干。

在两个光路中增加延时器件可解决去相干问题,但由于观测视场的存在,时空耦合使对所有像素精确延时并非易事,且用硬件实现延时的精度有限。

从原理上讲,干涉概念适用于窄带相干信号如激光,对宽带红外信号实施干涉的前提是细分光谱提高相干性,且需在空-时-频三维分析信号的相干性。由于在原理上同一分辨单元的信号才具有相干性,分辨单元尺寸(分辨率)决定着延时器件对应的配准精度。

中心波长为  $1.55 \mu\text{m}$  时,假定窄带滤波后红外光谱范围为  $0.1 \mu\text{m}$ ,对应的信号带宽约为  $125 \text{ THz}$ ,对应的距离分辨率约为  $1.2 \mu\text{m}$ ;当光谱范围为  $0.8 \text{ nm}$ ,对应的信号带宽约为  $100 \text{ GHz}$ ,对应的距离分辨率约为  $1.5 \text{ mm}$ ;当光谱范围为  $0.08 \text{ nm}$ ,对应的信号带宽约为  $10 \text{ GHz}$ ,对应的距离分辨率约为  $1.5 \text{ cm}$ 。干涉成像所需的配准精度,至少要达到距离分辨率。

实际工作中,对2个基线长度在  $100\sim 200 \text{ m}$  范围内的干涉望远镜,用延时器件将其位置精度控制在  $1 \mu\text{m}$  量级并非易事。通过窄带滤波,将光谱范围控制在  $1\sim 0.1 \text{ nm}$ ,则可将干涉成像所需的配准精度,降低到  $1\sim 10 \text{ mm}$  量级,这将大幅提高长基线红外干涉成像能力。

### 2.2 激光本振红外相干探测原理

远距目标成像探测和天文观测需要大口径红外望远镜以获得远距离和高分辨率成像能力,由于制造大口径望远镜难度较高,故科学家提出了基于两个(或多个)望远镜长基线干涉成像方法,可等效实现口径为基线长度望远镜的分辨率。

长基线红外干涉成像系统已投入应用,基于斐索结构<sup>[1]</sup>的位相阵列是一种典型形式,其工作原理如图1。

借鉴干涉型射电望远镜的实现结构,设置激光本振和相干探测器,通过光纤耦合器实现红外信号和激光本振信号的相加,可形成新的红外干涉成像系统结构,其工作原理如图2所示。

在图2中,激光本振和相干探测器设置后,激光作为载波不仅可保证两个望远镜红外信号相位的正确传递,而且可在电子学实施窄带滤波形成窄带红外信号有利于干涉成像,由此形成红外干涉成像所需的激光本振红外相干探测概念,其工作原理和干涉型射电望远镜相同。与加州大学伯克利分校工作的不同在于,图2的干涉成像意指在模数(Analog to Digital, AD)采样后在计算机中完成,并采用了光纤光路。

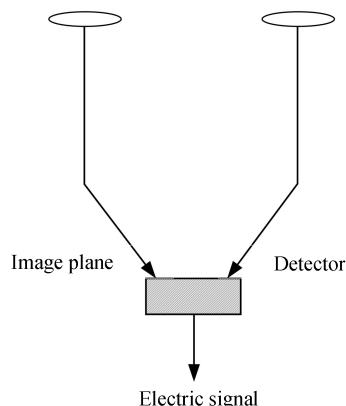


图1 斐索结构位相阵列原理

Fig. 1 The principle of phase array of Fizeau structure

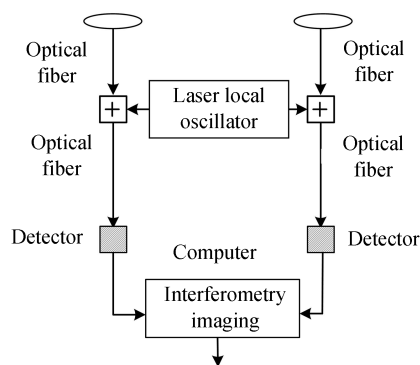


图2 激光本振红外相干探测干涉成像结构

Fig. 2 Laser local oscillator and infrared coherent detection interferometry imaging structure



近年来单光子探测技术得到快速发展,百万像素单光子阵列探测器<sup>[23]</sup>和单光子激光雷达<sup>[25-26]</sup>均已投入应用。特别要说明的是,激光SAR研究表明,本振信号的存在使目标微弱回波可实施光电转换,为后续信号积累提供条件,其探测灵敏度已远优于1个光子<sup>[22]</sup>。

由于工作波段接近,为进一步提高探测性能,基于激光本振的探测器技术很值得红外探测器借鉴。

### 2.3 基于电子学的红外光谱细分和干涉成像处理

红外信号的带宽很宽,红外探测器是一个光电转换器件,其性能最终在电子学表征,目前典型的电子学带宽在10 GHz量级。有限的电子学带宽和严重的红外信号频谱混叠,是红外探测器等效噪声功率高的主要原因,也会对红外信号的干涉产生影响。为此,可采用波长调谐激光本振,以有效控制信号的瞬时带宽。

输入红外光谱范围为 $0.1 \mu\text{m}$ 时,激光本振波长调谐范围应达到 $0.1 \mu\text{m}$ ,若探测器电子学带宽为10 GHz,其对应的瞬时光谱范围约为 $0.08 \text{ nm}$ ,通过本振波长步进调谐完成 $0.1 \mu\text{m}$ 光谱范围覆盖约需1 250次。若在每个波长步进间隔用于观测的时间为 $0.4 \text{ ms}$ ,总的观测时间为 $0.5 \text{ s}$ 。

信号处理的流程为:每像元对每个步进波长观测获取的红外窄带信号先进行自相关处理,再通过两望远镜信号互相关处理获取干涉相位图像,然后对不同波长步进间隔获取的干涉相位图像进行非相干积累。

这里的自相关处理等效脉冲压缩,有利于提高信号峰值信噪比;通过非相干积累可充分利用红外光谱能量,提高干涉成像信噪比。

### 2.4 激光本振红外阵列探测器形式

采用基于光纤激光本振混频结构的单元探测器(可采用平衡探测器和AD采样级联)时,长基线干涉处理本质等效于干涉测角,还实现不了干涉成像。目前的红外阵列探测器和激光焦平面探测器均已获得广泛应用,但要使其与激光本振结合并实现每单元都以平衡探测器和AD采样级联为特征的相干探测,还有许多困难,需研制新的阵列探测器并突破相关关键技术。

对于阵列探测器,目前有空间光路混频和基于光纤阵列网络混频两种方式可供选择。空间光路混频结构简单但容易引入较大的空间相差,混频效率低,为此,一种考虑是采用带有激光本振耦合器的光纤阵列结构<sup>[27]</sup>,使用多个短波红外波段的激光单元探测器拼接形成相干阵列探测器,此处的探测器为平衡探测器,其后级联AD实施信号采样;另一种考虑是将激光相控阵<sup>[28-29]</sup>中的光波导馈电网络与阵列探测器耦合,引入激光本振信号实现相干混频,此处的阵列探测器每个单元应进行平衡探测并级联AD采样,其阵列探测结构如图3所示。

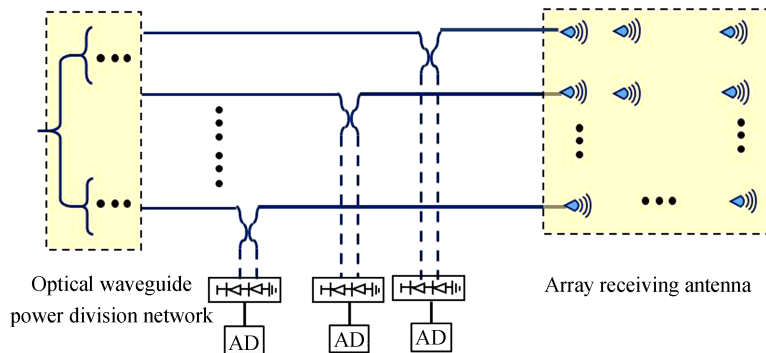


图3 纳米光波导激光本振阵列探测器结构

Fig. 3 Nano optical waveguide laser local oscillator array detector structure

该系统主要由光波导功分网络、阵列接收天线、激光本振混频平衡探测和级联AD组成。其中,光波导功分网络实现本振光的单路输入、多路输出;阵列天线接收空间的信号光;信号光与本振光在光波导中相干叠加经平衡探测器接收。从长远的观点看,这种方案采用纳米加工技术可保证探测器单元间信号的一致性,也有利于器件集成和小型化。

在正交基线条件下,对于阵列探测器若能实现激光本振红外相干探测,其方位向干涉相位图、俯仰向干涉相位图和相位解缠后的干涉成像结果如图4所示,其干涉相位的产生和相位解缠过程,与干涉逆合成孔径雷达(Interferometry Inverse Synthetic Aperture Radar, InISAR)<sup>[30]</sup>和InISAL<sup>[21]</sup>类似。

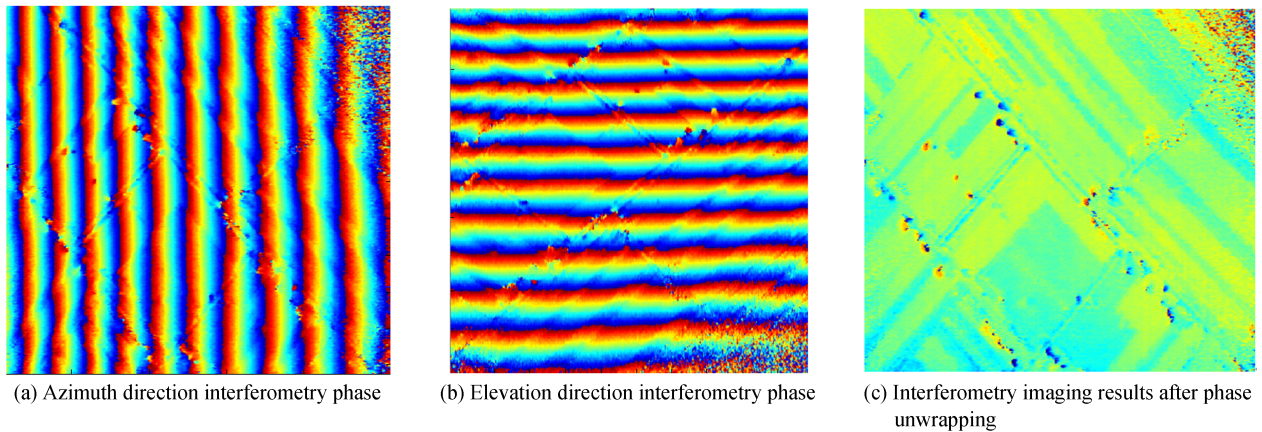


图4 基于正交基线的方位向、俯仰向干涉相位图和相位解缠后的干涉成像结果

Fig. 4 The azimuth and elevation direction interferometry phase based on orthogonal baseline and the interferometry imaging results after phase unwrapping

在正交干涉成像的基础上,有望类似微波综合孔径射电望远镜,通过不同空间位置的多个较小孔径,组合形成一个大的光学口径,以红外光谱“射电”望远镜形式实现高分辨率天文成像,这有可能大幅减少红外成像系统的复杂度和体积重量。

### 3 艇载红外光谱干涉成像的天文应用

#### 3.1 平流层飞艇——新的天文观测平台

平流层飞艇工作在 20 km 高空,大气影响小,为光学/红外设备的天文观测提供了一个新型平台,目前平流层飞艇及其载荷已成为国内外研究热点。

在中科院鸿鹄专项中,已安排了临近空间 35 km 高度球载行星大气光谱望远镜的研制任务<sup>[31]</sup>,该望远镜口径为 0.8 m,有 7 个紫外谱段和 4 个可见谱段。选择高空球载平台,可回避大气影响,有利于天文观测。

平流层飞艇长在 100 m 量级,直径在 30 m 量级,具有巨大的体积和设备安装空间,为长基线大衍射口径望远镜的安装提供了有利条件,其单个望远镜口径最大可达 10 m 量级,干涉基线长度可达 20 m 量级,这为天文观测所需的远距离高精度长基线大口径光学/红外干涉成像系统的技术实现提供了可能。

#### 3.2 艇载 10 m 基线 2 m 衍射口径红外光谱“射电”望远镜

本文对一个衍射口径在 2 m 量级,干涉基线在 10 m 量级,采用激光本振的红外干涉成像系统性能进行了分析,该系统也可称为红外光谱“射电”望远镜。

##### 3.2.1 主要指标

系统主要指标见表 1。该 10 m 基线 2 m 衍射口径红外干涉成像系统,其望远镜拟选用膜基衍射光学系统<sup>[32]</sup>,以大幅减重;设置激光本振和相干探测器保证望远镜间红外信号相位的正确传递,在电子学实施窄带

表 1 10 m 基线 2 m 衍射口径红外干涉成像系统主要指标

Table 1 Main indicators of 10 m baseline 2 m diffraction aperture infrared interferometry imaging system

Parameters	Values
Infrared band	Short wave infrared
Infrared center wavelength	1.55 $\mu\text{m}$
Infrared spectral range	0.1 $\mu\text{m}$
Telescope scanning field of view	3°
Receiving telescope aperture	2 m
Number of receiving telescopes	3 (triangle layout)
Interferometry baseline length	10 m
Interferometry angle measurement accuracy	0.15 $\mu\text{rad}$
Equivalent telescope aperture	10 m

滤波形成窄带红外信号以利于实现长基线干涉成像。

### 3.2.2 望远镜布局

为实现正交观测,可设置3个三角布局的望远镜;为形成一定的观测范围,可在光路压缩后设置扫描机构以实现有限扫描视场。系统的安装方式可采用艇腹悬挂或艇身内置方式。

艇腹悬挂方式下,系统安装简单但天顶向视场受限,该系统在艇上的布设示意图如图5所示。

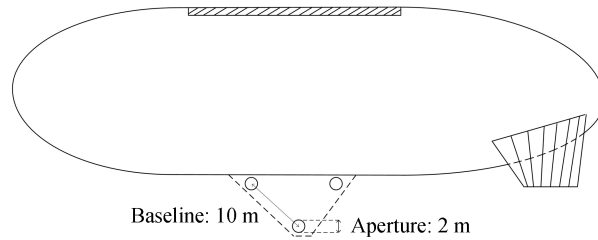


图5 10 m基线2 m口径红外干涉成像系统在艇腹悬挂的布设示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the layout of the infrared interferometry imaging system with 10 m baseline and 2 m aperture suspended in the belly

艇身内置方式下,该系统在艇身顶部的布设示意图如图6所示,要求艇为望远镜设置隔离气囊,平台改装技术复杂,但具有较好的天顶观测能力。

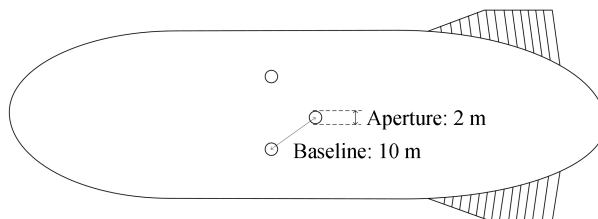


图6 10 m基线2 m口径红外干涉成像系统在艇身顶部内置的布设示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the layout of the infrared interferometry imaging system with 10 m baseline and 2 m aperture suspended on the top of the airship

为实现特定目标的天文观测,飞艇整体也作为转动平台,需进行一定角度的姿态和航向调整,使望远镜指向目标区间,结合望远镜的有限扫描和跟踪功能,对目标进行干涉成像观测。

### 3.2.3 衍射光学系统和色差校正

衍射光学系统轻量化大口径的特点易于实现高分辨率成像,但其光谱范围较窄,当用于红外成像时,需采用色差校正技术<sup>[33]</sup>。图7为衍射光学系统红外成像系统光路示意图,红外信号经衍射主镜接收后,利用与衍射主镜具有相同色散、相反光焦度的衍射透镜进行色差校正,再由光电探测器成像。该方法也称为Schupmann消色差方法。

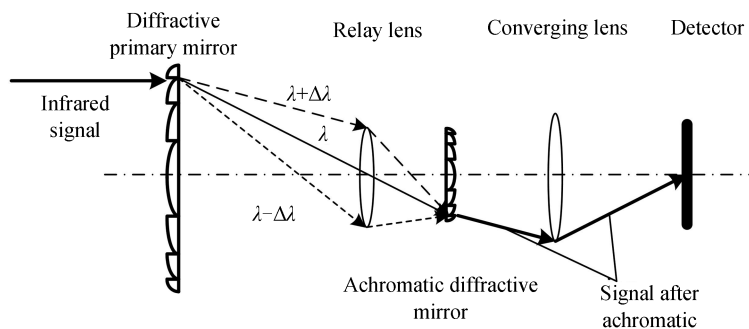


图7 衍射光学系统红外成像光路示意图

Fig. 7 Infrared imaging optical path diagram based on diffractive optical system

## 3.2.4 红外光谱干涉成像信号处理流程和仿真

红外光谱干涉成像信号处理流程如图8所示,与传统的在探测器硬件实现干涉成像方法不同,该流程将干涉成像信号处理放在光电探测AD采样后,并引入了较多的激光InSAR/InISAR<sup>[19-21]</sup>信号处理方法。

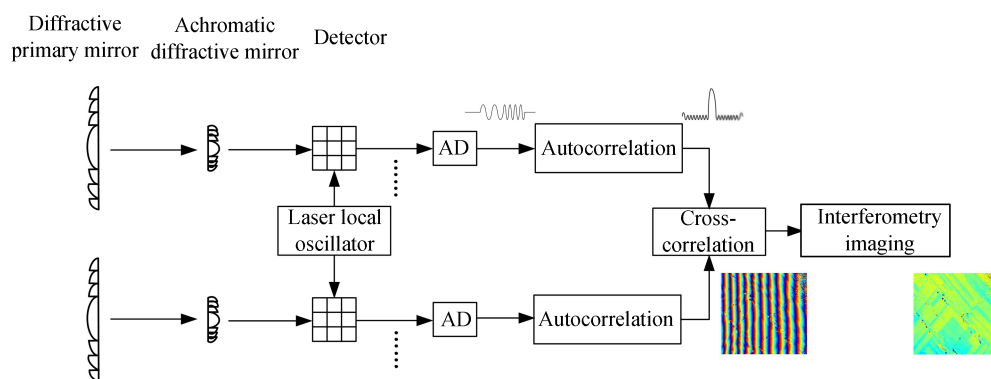


图8 红外光谱干涉成像信号处理流程

Fig. 8 Signal processing flowchart of infrared spectrum interferometry imaging

每个像元对每个步进波长观测获取的红外窄带信号先进行自相关处理,再通过两望远镜信号互相关处理(含配准)获取干涉相位图像,然后对不同波长步进间隔获取的干涉相位图像进行非相干积累。这里的自相关处理等效脉冲压缩,有利于提高信号峰值信噪比;通过非相干积累可充分利用红外光谱能量,提高干涉成像信噪比。

图9给出空间远端红外信号在基线10 m两个望远镜形成的干涉条纹仿真结果。其干涉条纹有两种,一

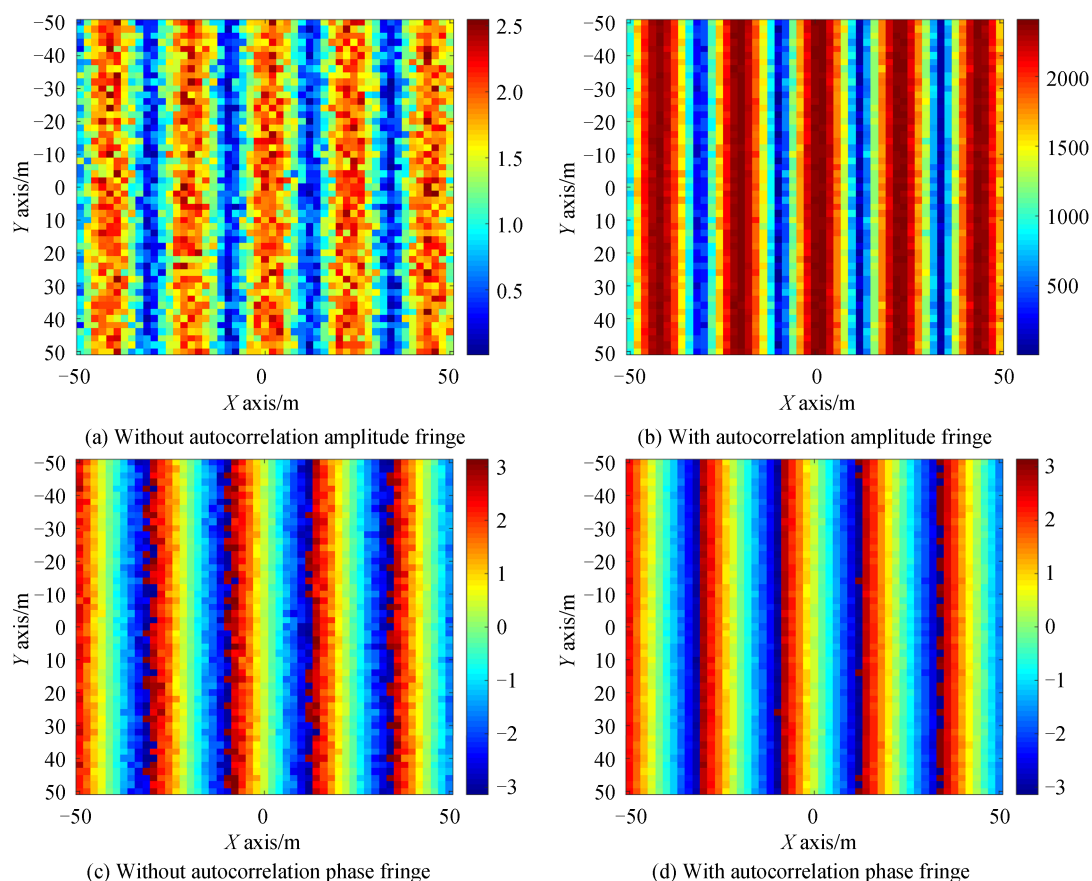


图9 有无自相关处理时两种干涉条纹对比

Fig. 9 Comparison of two interferometry fringes with or without autocorrelation



种是在传统探测器上的幅度条纹(对应图1),另一种是两望远镜复信号共轭相乘后的相位条纹(对应图2),从该结果中可以看出自相关处理前后干涉条纹区别明显,本文方法具有良好的干涉成像能力。

### 3.2.5 观测性能

当红外中心波长为  $1.55\ \mu\text{m}$ ,  $10\ \text{m}$  基线红外干涉测角精度也在  $0.15\ \mu\text{rad}$  量级,与口径  $10\ \text{m}$  望远镜成像分辨率相当。当干涉相位测量误差小于  $2\pi\ \text{rad}$ ,在法线方向上, $10\ \text{m}$  基线红外的干涉测角精度即可优于  $0.15\ \mu\text{rad}$ ;当干涉相位测量误差小于  $1\ \text{rad}$ ,其干涉测角精度可优于  $0.02\ \mu\text{rad}$ 。

干涉成像分辨率方面,本文系统在  $4 \times 10^8\ \text{km}$  处对应的俯仰和方位向的定位精度在  $9\ \text{km}$  量级,该数值即对应干涉成像分辨率。火星距离地球距离在  $5.5 \times 10^7\ \text{km}$  到  $4 \times 10^8\ \text{km}$  之间,显然该系统也可用于高分辨率红外成像火星探测。

探测灵敏度主要由望远镜口径即接收面积、信号光谱范围和探测器体制决定。 $10\ \text{m}$  口径望远镜的接收面积为  $78.53\ \text{m}^2$ ,本文3个  $2\ \text{m}$  口径望远镜的接收面积为  $9.42\ \text{m}^2$ ,两者相差  $8.33$  倍。

采用衍射光学系统,通过激光本振的波长调谐,其可有效接收的光谱范围约为  $0.1\ \mu\text{m}$ ,相比传统光学系统光谱范围  $1.1\sim 2.4\ \mu\text{m}$ ,其接收的红外信号能量减少至约  $1/12$ 。本文采用激光本振红外相干探测体制,由于相干探测的灵敏度比传统的直接探测至少要高  $20\ \text{dB}$  即  $100$  倍,故该系统的探测灵敏度应等效于  $10\ \text{m}$  口径望远镜,可观测的极限星等约为  $22$ 。

本文艇载  $10\ \text{m}$  基线  $2\ \text{m}$  口径激光本振红外干涉成像系统在天文观测领域具有良好的应用前景。和“中国哈勃”空间站载  $2\ \text{m}$  口径天文望远镜<sup>[34]</sup>相比,在技术实现方法和空间分辨率指标上具有特色。

## 3.3 关键技术及其可能的技术途径

### 3.3.1 大口径轻量化望远镜设计和制造

近年来衍射成像光学系统得到了快速发展,使用衍射光学系统易于形成大的接收口径,典型的如膜基透镜<sup>[32]</sup>,其主镜通过衍射器件引入较大的相位变化量实现波前控制,减小焦距并有利于系统的轻量化。这里的衍射器件相当于移相器,将接收的平面波转为同相球面波在焦点处实现聚焦。

膜基透镜和菲涅尔透镜阵列都属于衍射器件,从原理上讲,也可看作二元光学器件,其性能可用微波相控阵天线理论和方法进行分析。文献[35-38]论述了衍射光学系统在激光SAR和激光雷达中的应用问题。

衍射光学系统的光谱范围较窄,适于激光雷达和激光通信,也适用于对空间分辨率要求高的长基线红外干涉成像系统。当用于红外波段时,可采用色差校正技术<sup>[33]</sup>扩大其红外光谱范围,天文观测瞬时视场较小的特点,有利于缓解衍射口径和光谱范围的矛盾。

本文系统主镜可采用膜基衍射光学系统,后面级联色差校正镜,艇载应用没有折叠展开过程,工程实现难度较小。为减少制造大口径薄膜镜的难度,可引入光学合成孔径成像技术,利用多个小口径合成大口径。采用长焦有利于薄膜镜加工也可减少孔径渡越,但增加了系统体积,为此可考虑以谐衍射方式增大薄膜镜厚度,增加其台阶数并减少其台阶宽度,以减小焦距。当口径较小时,谐衍射薄膜镜加工易于实施。

### 3.3.2 衍射光学系统的孔径渡越处理

和微波系统一样,光学系统聚焦所需的波前控制包括相位和时延两个方面,轻量膜基衍射光学系统仅能实现相位控制,由于没有时延控制,为减少孔径渡越,在大口径条件下通常采用的焦距很长,即使采用色差校正技术,其工作的光谱范围和视场也很有限。

定义衍射光学系统中从主镜不同位置处入射到焦点的信号波程差范围  $D^2/(8 \cdot F)$  为孔径渡越长度,其中  $D$  为望远镜口径, $F$  为焦距,当望远镜口径为  $2\ \text{m}$  焦距为  $10\ \text{m}$  时,孔径渡越对应的信号包络错位约为  $5\ \text{cm}$  量级,当红外信号光谱范围为  $0.08\ \text{nm}$ ,带宽约为  $10\ \text{GHz}$  时,对应的距离分辨率约为  $1.5\ \text{cm}$ ,孔径渡越长度大于距离分辨率,需精确补偿后才能聚焦。

借鉴微波相控阵天线孔径渡越补偿思路,文献[35]采用信号处理方法,在一定条件下解决了大口径激光SAR中的相关问题,并给出了信号带宽为  $3\ \text{GHz}$ ,距离分辨率为  $5\ \text{cm}$ ,基于信号处理的  $10\ \text{m}$  口径焦距  $20\ \text{m}$  时孔径渡越补偿前后的聚焦仿真结果,相关研究工作可供借鉴。

减少孔径渡越散焦的另一个方法是划分子口径,并使用光学合成孔径。引入激光本振阵列探测器保证子口径望远镜间红外信号相位的正确传递,光学合成孔径即可借助计算机,通过对光电探测器获得的电子

学复图像相干处理实现。这种信号处理过程类似干涉型射电望远镜成像,使得光学合成孔径成像中的延时配准和相位校正易于用软件实现。当2 m口径分为4个1 m口径,焦距维持10 m时,孔径渡越对应的信号包络错位约为1.25 cm量级,此时对光谱范围为0.08 nm的红外信号,孔径渡越对聚焦不构成大的影响。

近年国外提出分段式平面光电成像探测器(SPIDER)思路<sup>[39]</sup>,利用微透镜干涉成像,其结构类似目前微波雷达的数字阵列天线,有可能同时解决相位和时延问题,由此看来将电子学技术引入光学成像已是趋势。

### 3.3.3 结合飞艇姿态的望远镜有限扫描和跟踪成像

较大口径接收望远镜机械转动不便,需设置折反射镜实现较大的工作视场。采用透射式衍射光学系统时,其光路示意图如图10所示,通过光路压缩,可大幅减少像方折反镜的尺寸,便于小角度二维机械扫描的实现。假定使用10:1压缩光路,要实现 $3^\circ$ 的扫描范围,折反镜的旋转范围应达到 $30^\circ$ 。压缩光路和像方摆扫镜结合扩大视场方法可参考文献[40]。

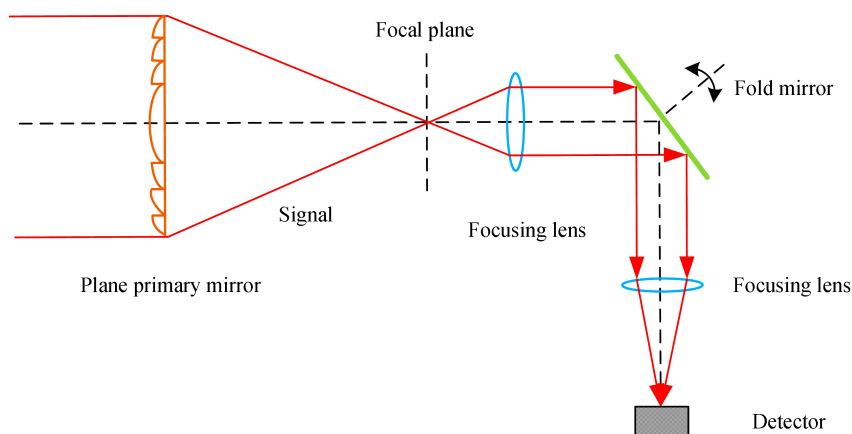


图10 衍射光学系统光路示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the optical path of the diffractive optical system

天文观测具有瞬时视场较小的特点,飞艇整体可作为转动平台扩大观测范围,进行一定角度的姿态和航向调整,使望远镜指向目标区间,结合望远镜的有限扫描和跟踪功能,对目标进行干涉成像观测。

### 3.3.4 干涉基线参数估计和高精度运动误差补偿

10 m基线的刚性结构实现并非易事,红外信号波长短至微米量级,望远镜间微米量级的振动都会引入较大的相位误差并对干涉成像造成影响。

拟引入激光 InSAL /InSAL 成像中的多探测器干涉处理方法<sup>[18,21]</sup>,解决红外干涉基线参数估计和高精度运动误差补偿问题。类似自适应光学中的纳星,也可考虑设置激光定标器,借助激光干涉测量,实现红外干涉基线参数的精确估计。

## 4 结论

针对大口径红外天文观测需求,本文将射电望远镜、激光 SAR 技术体制和信号处理技术引入红外探测系统,基于波长可调谐激光本振,在电子学射频段细分红外光谱,实现红外光谱干涉成像。提出了新的激光本振红外阵列探测器概念和红外光谱正交干涉成像方法。基于平流层飞艇平台,提出了长基线大衍射口径激光本振红外干涉成像系统设想,可减少大气影响并实现高精度干涉成像用于远距天文观测。

目前,快速发展的干涉型射电望远镜成像技术,不仅可供激光本振红外干涉成像研究工作借鉴,也表明了平流层艇载长基线大衍射口径激光本振红外干涉成像系统的研制具有可行性,持续开展相关研究工作,具有重要意义。

**致谢** 感谢中科院西安光机所杨洪涛研究员对本文工作的指导和帮助!

### 参考文献

- [1] ZHOU Chenghao, WANG Zhile, HU 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.
- [2] SHEN Zhixia, FENG Lu. A 30-meter telescope [EB/OL]. [2019-03-11]. [https://kepu.gmw.cn/astro/2019-03/11/content\\_32642506.htm](https://kepu.gmw.cn/astro/2019-03/11/content_32642506.htm).  
沈志侠,冯麓. 盘一架30米的望远镜[EB/OL]. [2019-03-11]. [https://kepu.gmw.cn/astro/2019-03/11/content\\_32642506.htm](https://kepu.gmw.cn/astro/2019-03/11/content_32642506.htm).
- [3] HALE D D S, BESTER M, DANCHI W C, et al. The Berkeley infrared spatial interferometer: a heterodyne stellar interferometer for the mid-infrared[J]. *Astrophysical Journal*, 2000, 537(2):998.
- [4] NAN Rendong, JIANG Peng. Five-hundred-meter aperture spherical radio telescope [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017,53(17): 1-3.  
南仁东,姜鹏. 500 m口径球面射电望远镜(FAST)[J]. *机械工程学报*, 2017,53(17): 1-3.
- [5] WU Xinji. The giant ear that listens to the cosmic waves—the development history of radio telescopes[J]. *China National Astronomy*, 2008, (6): 84-105.  
吴鑫基. 聆听宇宙电波的巨耳——射电望远镜的发展历程[J]. *中国国家天文*, 2008, (6): 84-105.
- [6] HAO Wanhong, LI Haitao, HUANG Lei, et al. The very long baseline interferometry system of the deep space measurement and control network under construction[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2012,31(z1): 34-37.  
郝万宏,李海涛,黄磊,等. 建设中的深空测控网甚长基线干涉测量系统[J]. *飞行器测控学报*, 2012,31(z1): 34-37.
- [7] LI Chunlai, ZHANG Hongbo, ZHU Xinying. Overview of VLBI technology in deep space exploration and its current situation and development in our country[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(8):1893-1899.  
李春来,张洪波,朱新颖. 深空探测VLBI技术综述及我国的现状和发展[J]. *宇航学报*, 2010, 31(8):1893-1899.
- [8] YUAN Yefei, TANG Zeyuan. First EHT images of the supermassive black hole residing in the center of nearby galaxy M87 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(20):2072-2076.  
袁业飞,唐泽源. 事件视界望远镜对近邻星系M87中心超大质量黑洞的成像观测[J]. *科学通报*, 2019, 64(20):2072-2076.
- [9] EVN and Global VLBI results and images [EB/OL]. [2019-12-13]. <http://old.evlbi.org/gallery/images.html>.
- [10] WU Xiangping. Radio telescope: FAST&SKA[EB/OL]. [2018-05-29]. [https://www.sohu.com/a/233364715\\_313378](https://www.sohu.com/a/233364715_313378).  
武向平. 射电天文望远镜:FAST与SKA[EB/OL]. [2018-05-29]. [https://www.sohu.com/a/233364715\\_313378](https://www.sohu.com/a/233364715_313378).
- [11] The SKA project- public website[EB/OL]. [2019-12-15]. <https://www.skatelescope.org/the-ska-project/>.
- [12] ZHOU Jianwei, LI Daojing, HU Xuan. Target detection performance analysis of single illumination and triple observation passive radar[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2017,34(4): 422-430.  
周建卫,李道京,胡焯. 单源三站外辐射源雷达目标探测性能[J]. *中国科学院大学学报*, 2017,34(4): 422-430.
- [13] ZHOU Jianwei, LI Daojing, TIAN He, et al. Performance analysis on airship-borne passive radar based on conformal sparse array[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2017, 39(5): 1058-1063.  
周建卫,李道京,田鹤,等. 基于共形稀疏阵列的艇载外辐射源雷达性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2017,39(5): 1058-1063.
- [14] KRA $\mu$ SE B W, BUCK J, RYAN C, et al. Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]. *Optical Society of America, Conference on Lasers and Electro-optics (OSA/CLEO)*, 2011.
- [15] CROUCH S, BARBER Z B. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture lidar techniques [J]. *Optics Express*, 2012, 20 (22): 24237-24246.
- [16] LI Daojing, ZHANG Qingjuan, LIU Bo, et al. Key technology and implementation scheme analysis of air-borne synthetic aperture lidar[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(2): 143-151.  
李道京,张清娟,刘波,等. 机载合成孔径激光雷达关键技术和实现方案分析[J]. *雷达学报*, 2013,2(2): 143-151.
- [17] MA MENG, LI Daojing, DU Jianbo. Imaging of airborne synthetic aperture lidar under platform vibration condition [J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(5): 591-602.  
马萌,李道京,杜剑波. 振动条件下机载合成孔径激光雷达成像处理[J]. *雷达学报*, 2014,3(5): 591-602.
- [18] DU Jianbo, LI Daojing, MA Meng, et al. Vibration estimation and imaging of airborne synthetic aperture lidar based on interferometry processing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, (9):253-264.  
杜剑波,李道京,马萌,等. 基于干涉处理的机载合成孔径激光雷达振动估计和成像[J]. *中国激光*, 2016, (9): 253-264.
- [19] HU Xuan, LI Daojing. Vibration phases estimation based on multi-channels interferometry for ISAL[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(22):6481-6490.
- [20] HU Xuan, LI Daojing, FU Hanchu, et al. System analysis of ground-based inverse synthetic aperture lidar for geosynchronous orbit object imaging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(6): 0601003.  
胡焯,李道京,付瀚初,等. 地球同步轨道空间目标地基逆合成孔径激光雷达系统分析[J]. *光子学报*, 2018, 47(6): 0601003.
- [21] HU Xuan, LI Daojing, DU Jianbo. Imaging processing for GEO object with 3D rotation based on ground-based InISAL with orthogonal baselines[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(15): 3974-3985.

- [22] BARBER Z W, DAHL J R. Synthetic aperture lidar imaging demonstrations and information at very low return levels[J]. Applied Optics, 2014, 53(24): 5531-5537.
- [23] YIN Fei. Canon developed the world's first 1-megapixel SPAD image sensor[EB/OL]. [2020-07-09]. <https://36kr.com/p/777895854557824>.  
殷飞. 佳能开发出全球首款 100 万像素 SPAD 图像传感器[EB/OL]. [2020-07-09]. <https://36kr.com/p/777895854557824>.
- [24] WANG Hai. Design of a homodyne BPSK system for coherent optical communication[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2009.  
王海. 相干光通信零差 BPSK 系统的设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [25] FENG Lu, ZHANG Yupei, SONG Feijun, et al. Adaptive optics for night astronomy[J]. Physics, 2018, 47(6): 355-366.  
冯麓, 张玉佩, 宋菲君, 等. 夜天文中的自适应光学[J]. 物理, 2018, 47(6): 355-366.
- [26] Leica SPL100 new airborne lidar system officially released [EB/OL]. [2017-03-04]. [https://www.sohu.com/a/127882794\\_583961](https://www.sohu.com/a/127882794_583961).  
Leica SPL100 新型机载激光雷达系统正式发布[EB/OL]. [2017-03-04]. [https://www.sohu.com/a/127882794\\_583961](https://www.sohu.com/a/127882794_583961).
- [27] JIN Chenfei, WANG Ye, CAO LU, et al. Design of fiber-array imaging laser radar system [J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(11): 115-123.  
靳辰飞, 王野, 曹璐, 等. 光纤阵列成像激光雷达系统的设计[J]. 光电工程, 2012, 39(11): 115-123.
- [28] YAACOB I A, SUN Jie, MORESCO M, et al. Integrated phased array for wide-angle beam steering[J]. Optics Letters, 2014, 39(15): 4575-4578.
- [29] SUN Jie, ERMAN T, AMI Y, et al. Large-scale nanophotonic phased array[J]. Nature, 2013, 493(7431): 195-199.
- [30] MA Meng, LI Daojing, LI Liechen, et al. 3-D imaging for moving targets based on millimeter-wave InSAR with long orthogonal baselines[J]. Journal of Infrared and Millimeter, 2016, 35(4): 488-495.  
马萌, 李道京, 李烈辰, 等. 正交长基线毫米波 InSAR 运动目标三维成像[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(4): 488-495.
- [31] HE Fei. Remote sensing of planetary space environment[J]. Chinese Science Bulletin, 65(14): 1305-1309.  
何飞. 行星空间环境光学遥感[J]. 科学通报, 65(14): 1305-1309.
- [32] JIAO Jianchao, SU Yun, WANG Baohua, et al. Development and application of GEO membrane based diffraction optical imaging system[J]. Space International, 2016, (6): 49-55.  
焦建超, 苏云, 王保华, 等. 地球静止轨道膜基衍射光学成像系统的发展与应用[J]. 国际太空, 2016, (6): 49-55.
- [33] REN Zhibin, HU Jiasheng, TANG Honglang, et al. Study on chromatic aberration correction of 10 meter large aperture membrane diffractive primary lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 0422004.  
任智斌, 胡佳盛, 唐洪浪, 等. 10 m 大口径薄膜衍射主镜的色差校正技术研究[J]. 光子学报, 2017, 46(4): 0422004.
- [34] ZHAN Hu. The birth of "China Hubble" | Mr. Sai Astronomy. [2020-07-30]. <https://mp.weixin.qq.com>.  
詹虎. “中国哈勃”诞生记 | 赛先生天文[EB/OL]. [2020-07-30]. <https://mp.weixin.qq.com>.
- [35] HU Xuan, LI Daojing. Space-based synthetic aperture LiDAR system with 10 m diffractive aperture[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1210002.  
胡焯, 李道京. 10m 衍射口径天基合成孔径激光雷达系统[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1210002.
- [36] LI Daojing, ZHU Yu, HU Xuan, et al. Laser application and sparse imaging analysis of diffractive optical system [J]. Journal of Radars, 2020, 9(1): 195-203.  
李道京, 朱宇, 胡焯, 等. 衍射光学系统的激光应用和稀疏成像分析[J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 195-203.
- [37] LI Daojing, HU Xuan, ZHOU Kai, et al. Synthetic aperture lidar imaging detection based on conformal diffractive optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(4): 0428001.  
李道京, 胡焯, 周凯, 等. 基于共形衍射光学系统的合成孔径激光雷达成像探测[J]. 光学学报, 2020, 40(4): 0428001.
- [38] ZHU Jinyi, XIE Yongjun. Large aperture lidar receiver optical system based on diffractive primary lens[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(5): 0518001.  
朱进一, 谢永军. 采用衍射主镜的大口径激光雷达接收光学系统[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 0518001.
- [39] DU Yanchang, LIU Tao. The United States verifies the feasibility of the application of microlens interferometry optical imaging technology[EB/OL]. [2017-09-19]. <https://mp.weixin.qq.com>.  
杜彦昌, 刘韬. 美国验证微透镜干涉光学成像技术应用可行性[EB/OL]. [2017-09-19]. <https://mp.weixin.qq.com>.
- [40] LI Gang, FAN Xuewu, ZOU Gangyi, et al. Design of space optical system with double infrared waveband based on image space scanning[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 861-866.  
李刚, 樊学武, 邹刚毅, 等. 基于像方摆扫的空间红外双波段光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 861-866.

**Foundation item:** Chinese Academy of Sciences Honghu Special Project (No. E03701011F), Key Deployment Projects of the Chinese Academy of Sciences (No. E03701010F)