

文章编号 1004-924X(2021)12-2774-09

地外生命探测数字全息技术发展现状及趋势

王 越^{1,2}, 刘欣悦¹, 刘欣然^{1,2}, 崔 旭^{1,2}, 孟浩然^{1*}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:地外生命原位探测具有重要的科研与人文价值,未来探测任务中木卫二等海洋世界正逐渐成为新的兴趣目标。结合数字全息技术的深海微生物原位探测场景,提出了其在地外生命原位探测场景的应用设想。调研了用于地外生命探测的数字全息技术研究进展,总结了 Serabyn 团队提出的“共模”与无透镜数字全息显微成像两种技术方案。用于地外生命探测的数字全息技术处于实验室研发阶段,对低温、低细胞浓度海洋环境下的生命探测是地外行星生命探测的基础,侧面验证了所提设想的可行性。数字全息技术是实现地外生命探测的理想方案,对地球海洋环境微生物观测的全息技术进行优化可为未来地外行星生命探测任务奠定基础。

关 键 词:数字全息;海洋原位探测;地外生命探测;微生物探测

中图分类号: TN26 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20212912.2774

Development status and trend of digital holography technology for extraterrestrial life detection

WANG Yue^{1,2}, LIU Xin-yue¹, LIU Xin-ran^{1,2}, CUI Xu^{1,2}, MENG Hao-ran^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

* Corresponding author, E-mail: menghaoran@ciomp.ac.cn

Abstract: In situ detection of extraterrestrial life is significant for scientific research and humanities. In future exploration missions, marine worlds such as Europa are gradually becoming new subjects of interest. Considering the application of digital holography in deep-sea microbial in-situ detection, the application of digital holography in the in-situ detection of extraterrestrial life is proposed in this study. The research progress of digital holography for extraterrestrial life detection is investigated, and the two technical solutions of common mode and lensless digital holographic microscopy proposed by the Gene Serabyn team are summarized. Digital holography for extraterrestrial life detection is in the laboratory-research and development stage; in situ detection of marine microorganisms at low temperature and low cell concentration is the basis for the detection of extraterrestrial life, and the feasibility of the proposed idea has been indirectly verified. Digital holography is an ideal solution for realizing the detection of extraterrestrial life. The optimization of digital holography for in-situ detection of microorganisms in the earth's oceans can lay the founda-

收稿日期:2021-04-30;修订日期:2021-06-30.

基金项目:中国科学院任务/战略性先导科技专项(A类)(No. XDA22020402)

tion for future extraterrestrial life detection missions.

Key words: digital holography; marine in-situ detection; extraterrestrial life detection; microbial detection

1 引 言

地外行星生命探测在帮助人类理解生命起源与早期进化、生物活动和环境变化之间的相互作用,研究模拟环境可居住性过程,探索太阳系内外适宜人类居住的环境,促进行星管理与保护工作,了解人类在宇宙中的位置、设想地球和太空生命的未来,以及激励人类探索未知世界的欲望等方面具有重要意义,并成为太阳系探索任务的焦点^[1]。2017年,美国国会指示美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)与美国国家科学院、工程院和医学部就天体生物学未来十年的发展规划达成协议,并于秋季正式成立了探索宇宙生命的天体生物学科学战略委员会。其主要研究目标包括:(1)概述天体生物学中的关键科学问题和技术挑战,特别是与在太阳系和太阳系外行星系统中寻找生命有关的问题;(2)确定宇宙生命探索中的核心问题,并在未来20年内取得进展;(3)讨论可以由美国和国际空间任务,或正在运行与研制的地面望远镜进行解决的关键目标;(4)扩大国际间、机构间和公共/私人间的合作,以进一步研究生命的起源、演化及分布;(5)实现寻找宇宙生命迹象等任务^[2]。

在地外行星生命原位探测方面,自1978年Viking号以来,NASA没有其他飞行任务试图寻找外星生命。直到2015年,第5次火星登陆任务的成功,人们才发现火星表面存在液态水,并设计任务以寻找当前或过去火星上的“生命”迹象。在过去的几年中,人们的兴趣从研究火星表面转向了疑似存在水的火星地下,以及木卫二(Europa)、木卫三(Ganymede)和土卫二(Enceladus)等行星上^[3]。其中,土卫二极小的逃逸速度使它产生一个极不寻常的现象——间歇泉,即水蒸气羽流通过土卫二冰壳裂缝,以每小时近2 000 km的速度向太空喷射冰层颗粒,

高度可达500 km。基于该现象,人类有望通过发送探测器来收集可能含有微生物的水样并进行相关检测^[4]。

地外行星探测面临的首要挑战是开发一种可以在任何地球环境中检测原核生物的方法^[3]。目前,在太空任务中用于细菌识别和计数的技术和仪器十分有限,生命检测主要有化学检测和光学成像两种技术手段^[5]。其中,化学检测主要通过质谱法寻找糖和氨基酸等目标有机分子,评估有机分子手性、关键分子目标特定的抗体阵列分布特征,标记实验检测目标代谢活性等,但上述化学生物标签很难将复杂的生物与非生物化学反应清楚地区分开。观测生命在环境中的外观,行为,移动以及相互作用方式是解决上述问题的唯一途径。光学显微镜是常用的生物检测仪器,但大多数显微镜的使用需要专业的操作,并且它对振动和温度极端敏感。此外,高分辨率显微镜通常体积、质量大且易碎。随着显微镜技术的进步,数字全息显微成像技术凭借其大景深,数值聚焦,能捕捉目标三维信息并且可同时进行定量振幅与相位成像等诸多优势^[6],被认为是地外行星生命探测的理想之选^[3-4]。

本文基于数字全息技术在地外生命探测场景的应用设想,总结了该领域目前的技术方法,并结合本组的初步研究进展,侧面验证了该设想的可行性,为我国未来的深空探测任务提供技术支持。

2 地外行星生命探测数字全息显微镜发展现状

用于地外行星生命探测的数字全息显微镜研发团队主要有加州理工学院喷气推进实验室的Gene Serabyn团队。该团队于2015年首次报道了“共模”离轴数字全息显微镜的系统方案与初步性能测试^[7],并于2016年提出了第二套基于

梯折 (GRIN) 透镜的无透镜数字全息显微镜方案^[8]。接下来的 5 年时间里,该团队在上述两种仪器的性能改进^[9]、多波长概念的实现以及与荧光光场显微镜结合等方面进行了大量的研究工作。

2.1 “共模”离轴数字全息显微镜

“共模”离轴数字全息显微镜的原理图、硬件模型与仪器照片如图 1 所示,重构软件采用 LynceeTec 的 KOALA 软件^[7]。系统的显微模块由一对非球面透镜组成,物镜为口径 4.7 mm、焦距 7.6 mm、等效数值孔径约 0.3 的单个非球面镜,相比传统复合物镜,大大降低了物镜的成本与复杂性,同时减少了复合物镜间前后镜面形成的内反射,能够达到衍射极限的成像能力;另一个口径较大、焦距为 150 mm 的中继非球面透镜作为管透镜,与物镜构成无限共轭显微模块。其主要功能如下:(1)作为合束透镜,物光与平行参考光轴线关于系统主光轴成镜像对称,经管透镜扩束后以一定夹角传播至相机处形成离轴干涉;(2)作为管透镜,与物镜一起实现 19.7 倍的放大倍率;(3)畸变补偿,当物镜后焦距与管透镜前焦距重合时可校正物镜引入的二次相位畸变^[10]。

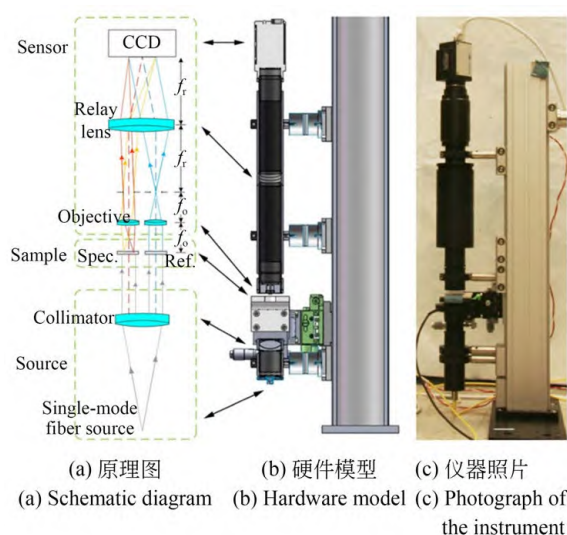


图 1 “共模”离轴数字全息显微镜^[7]

Fig. 1 Common-mode off-axis digital holographic microscope^[7]

刚性、封闭的黑色氧化外壳有助于器件的装调、杂散光的抑制,并减轻颗粒污染和湍流扰动。

相比于 Mach-Zehnder 光路结构,双光束系统具有如下优点:(1)去除合束棱镜,降低仪器体积、成本与装调难度;(2)零光程差位置总在探测器中心,保证物光光路与参考光路的光程基本相同;(3)对系统装调误差或冲击、热弯曲引起的器件标称位置偏差不敏感。

该团队将整个仪器安装于轨道上并放入冰箱,温度设置从 $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降至 $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$,同时用热电偶单独控制样本温度,观察细菌在不同温度下的二维轨迹。如图 2 所示,细菌在 $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时高度活跃;在 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,大多数细菌不显示运动,但少数细菌保持非常快的游动;而在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,只能观测到布朗运动和轻微样品漂移。

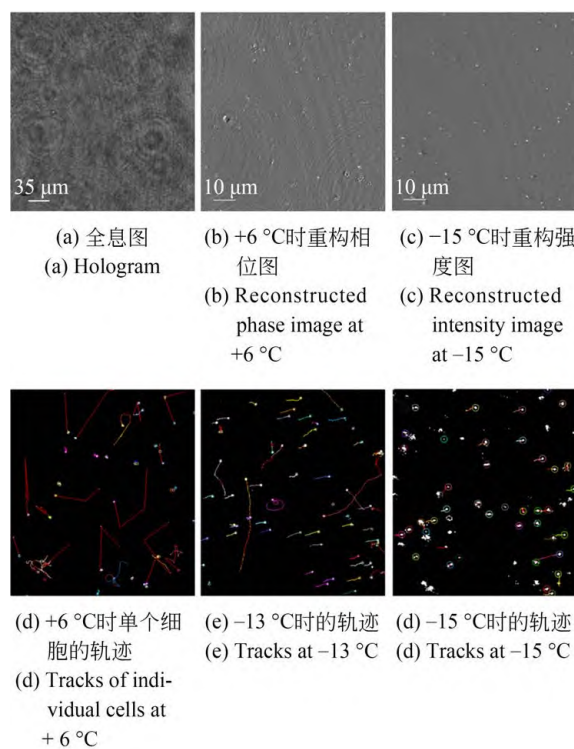


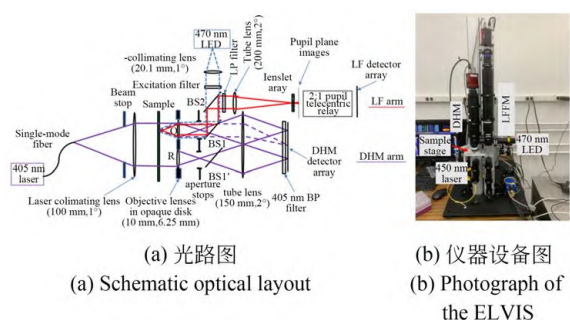
图 2 嗜冷细菌运动性观测^[7]

Fig. 2 Observation of psychrophilic bacteria motility^[7]

2016 年, Gene Serabyn 团队前往格陵兰岛进行原位成像实验,发现在所有样本中,通过真核生物的外观和运动可确定生命迹象;对于原核细胞,仅凭细胞结构无法判断是否存在生命,需要通过加热或使用化学试剂获得其更多的运动特征^[6]。

数字全息显微虽然可以提供细胞形态、结构、折射率和运动的高分辨率成像信息,初步判

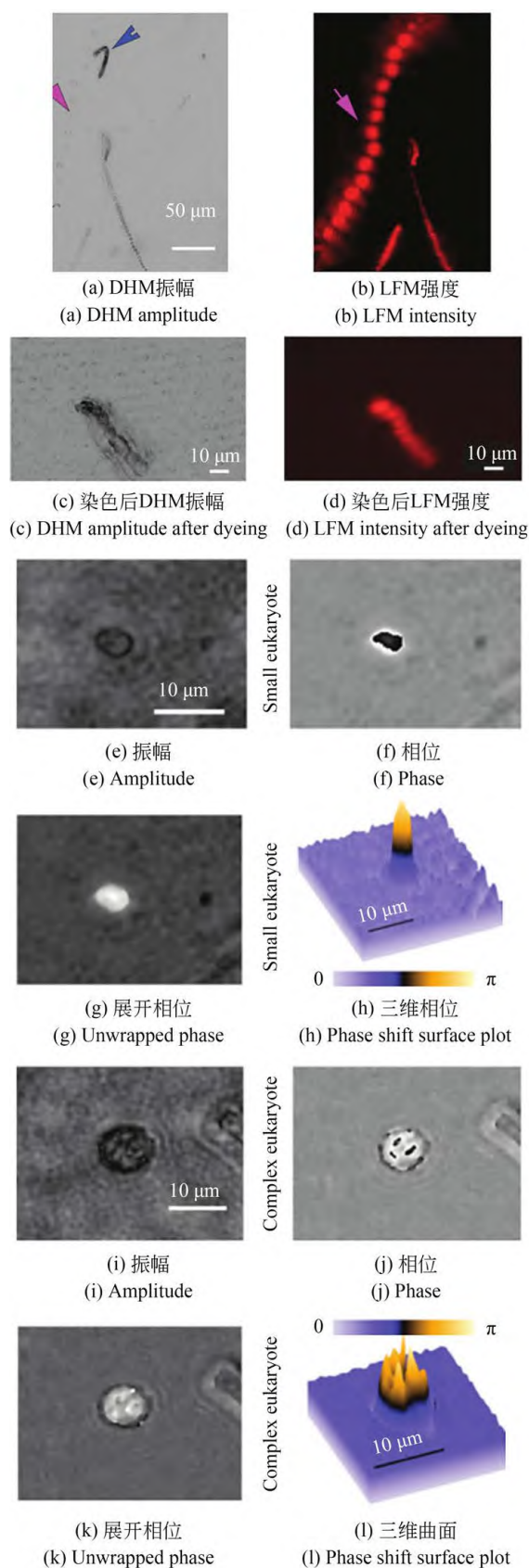
断其生命迹象,但无法进一步获取其化学组成。2019年,该团队提出数字全息显微镜(Digital Holographic Microscope, DHM)与荧光光场显微镜(Fluorescence Light-Field Microscope, FLFM)结合的双模式生命探测成像系统(The Extant Life Volumetric Imaging System, ELVIS),如图3所示。

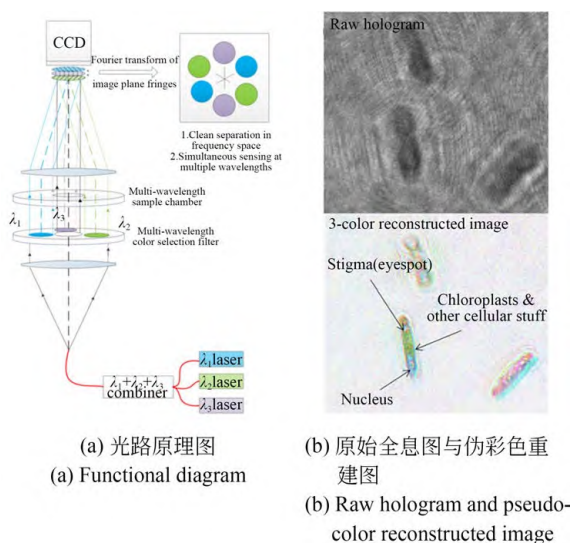
图3 双模式显微镜ELVIS^[11]Fig. 3 Dual-mode microscope ELVIS^[11]

在ELVIS双模式系统中,首先由数字全息显微镜评估样品中细菌的生命活动,随后样品被自动输送到一个混合室,在那里与细胞膜或核酸特有的两种染料中的一种混合,染色后送回显微镜样品室进行荧光光场显微观察。如果地外行星海洋世界中可能发现的细胞在化学组分上与地球上的细胞相似,那么脂类可以用来识别与细胞膜有关的结构,而核酸则可以用来追踪细胞核^[11-12]。该双模式显微镜在加利福尼亚州Newport海滩首次现场演示的结果如图4所示^[13]。

2019年, Gene Serabyn团队在原有装置的基础上,实现了405, 520与638 nm三波长照明的数字全息显微镜,以减小 2π 模糊对全息图相位重建测量范围的影响^[14]。这种粗光谱编码类似于用RGB值进行标记,可以高分辨率重建生物样本的伪彩色图像,如图5所示,从而表征了新的维度^[15]。

上述装置通过多次现场测试证明了其在极端环境下的鲁棒性。当细菌存在运动行为时,很容易判断其生命特征;但当该生物是活的却无法移动,则很难区分它与矿物质的区别。为了解决该问题,2020年 Gene Serabyn团队在多波长装置

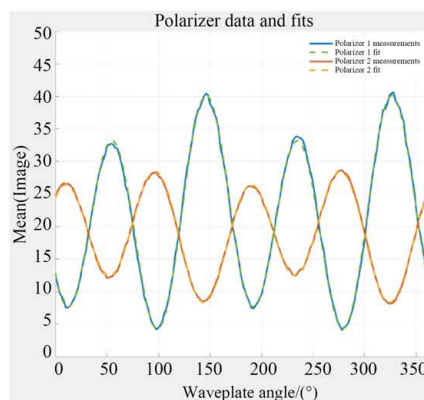
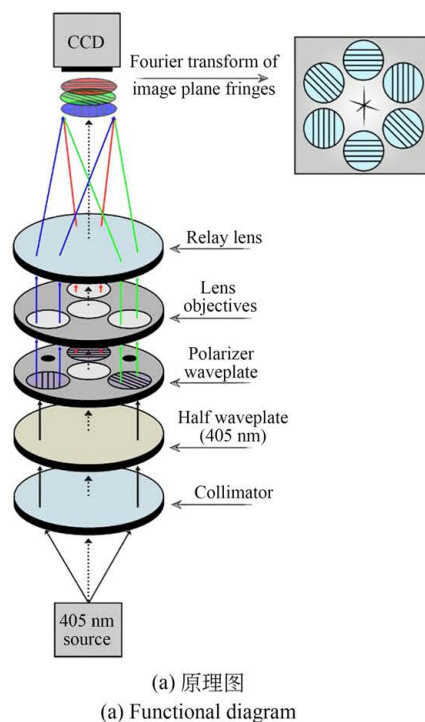
图4 ELVIS性能^[13]Fig. 4 ELVIS performance^[13]

图 5 三波长“共模”离轴数字全息显微镜^[15]Fig. 5 Three-wavelength common mode off-axis digital holographic microscope^[15]

的基础上,修改增加了偏振测量能力,通过对参考光偏振态的独特编码,测量了目标的全部 Stokes 参数,并进行伪彩色成像以显示其主导偏振态,从而区分、识别静态活细菌和晶体样品,如图 6 所示^[16]。

2.2 基于梯折透镜无透镜数字全息显微镜

与传统 Mach-Zehnder 的振幅分割方式相比,“共模”数字全息显微镜采用波前分割方法,利用共享的中继透镜进行相干合束,可以有效地提升系统稳定性并将系统尺寸减小至 $200\text{ mm} \times 115\text{ mm}$ ^[17]。但该系统依赖于光学透镜,焦距长度仍占用了一定的物理空间。为了使系统更适应航天飞行任务,甚至海底探测任务,消除中继透镜以实现质量和体积的最小化仍是主要的研究问题。2016 年, Gene Serabyn 团队提出了第二套基于 GRIN 透镜的无透镜数字全息显微镜方案,如图 7 所示。该方案通过采用高数值孔径的小型 GRIN 透镜,解决了传统无透镜数字全息显微成像系统中针孔难以装调,高数值孔径激光照明导致系统的体积较大等问题^[8, 18]。成像分辨率优化后可达 $0.85\text{ }\mu\text{m}$,与上述“共模”数字全息显微镜的分辨率相当,如图 8 所示^[17, 19-20]。

图 6 偏振“共模”数字全息显微镜^[16]Fig. 6 Polarization common mode digital holographic microscope^[16]

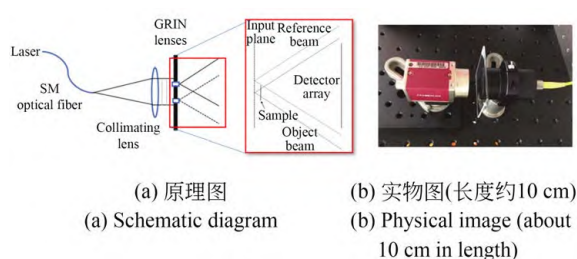


图 7 基于 GRIN 透镜的无透镜数字全息显微镜^[21]
Fig. 7 Lensless digital holographic microscope based on GRIN lens^[21]

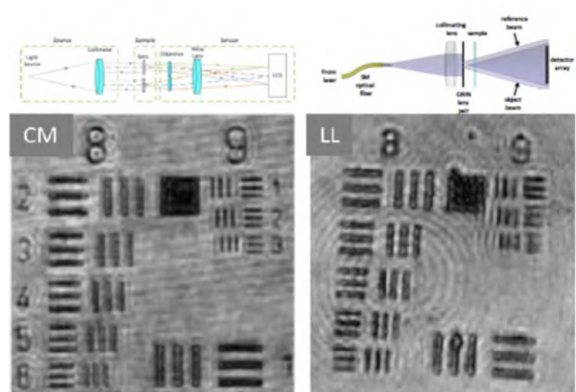
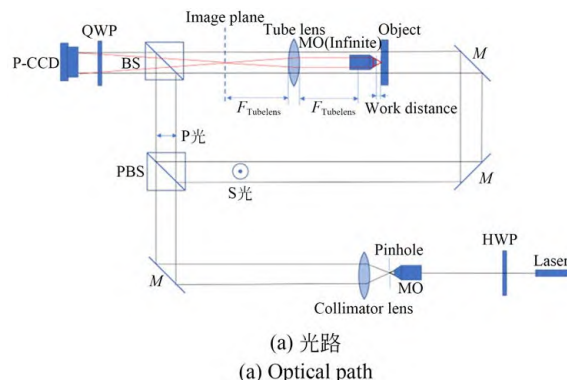


图 8 两种数字全息显微镜方案的分辨率对比^[17]
Fig. 8 Resolution comparison of two digital holographic microscope schemes^[17]

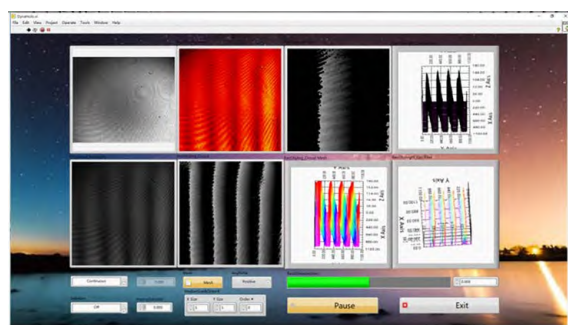
3 并行相移数字全息显微镜

Gene Serabyn 团队提出的“共模”与无透镜数字全息显微镜两种方案,主要采用离轴光路分离重构图像中的直流分量与孪生像,因此物光与参考光路方向间的夹角需大于直流分量与孪生像分离的临界角。由于探测器的采样频率有限,上述临界角限制了观测目标的轴向范围,从而降低了数字全息成像系统的整体分辨率 Δx 。虽然增加显微模块后,数字全息显微镜的分辨率取决于显微模块分辨率 $0.61\lambda/\text{NA}$ 与系统分辨率除以显微模块放大倍率 $\Delta x/M$ 两者间的最大值,且通常为显微模块的分辨率。然而,当系统分辨率达到 $0.61\lambda/\text{NA}$ 时,原系统分辨率越小,则显微模块的放大倍率越大。以无限共轭显微模块为例,当物镜不变时,则其对应的管透镜焦距则更大,间接地扩大了数字全息显微镜的系统体积^[22]。而采用同轴光路结构虽然可以避免上述问题,但需相移方法抑制直流分量与孪生像的影响^[23]。传

统的时域光程调制耗时久、精度低、较难实现动态成像,为了解决这些问题,2020 年中科院长春光机所孟浩然团队提出了基于光波偏振属性的并行相移数字全息技术^[24-25]。该技术在原有系统上增加无限共轭显微模块,利用其中管透镜对物镜引入的二次位相畸变进行物理补偿,可降低数字全息显微镜算法的实现难度^[10,26]。采用 Thorlabs CPS635R 激光照明的并行相移数字全息显微镜的原理图、实现装置及性能测试结果如图 9 所示。其中,显微模块由 $10\times$ 无限共轭显微物镜($\text{NA}=0.25$, $\text{EA}=9\text{ mm}$)与焦距 100 mm 的平凸透镜组成,分辨率约为 $1.55\text{ }\mu\text{m}$,放大倍率约为 11.1 倍;原系统中相机采用 FLIR BFS-U3-



(b) 实验装置
(b) Experimental device



(c) 重构软件
(c) Reconstruction software

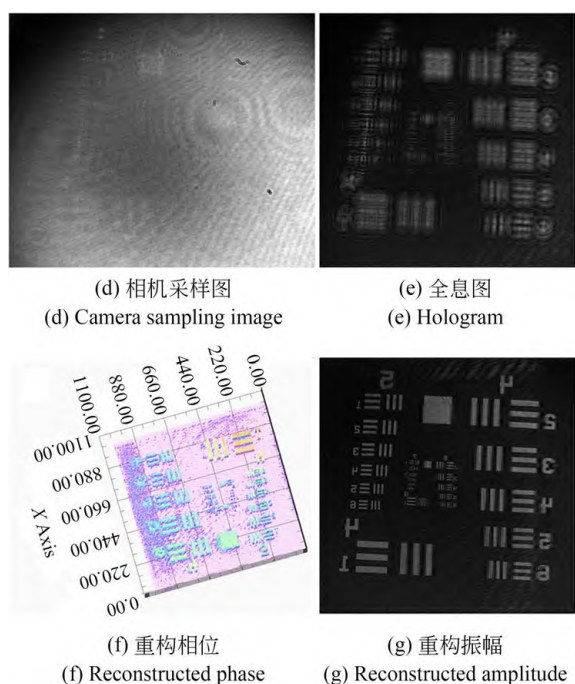


图9 并行相移数字全息显微镜的成像结果

Fig. 9 Imaging results of parallel phase-shift digital holographic microscope

51S5P-C 偏振相机, 像素尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$, 整体分辨率约为 $9.84 \mu\text{m}$, 经显微模块有效放大后可达到物镜衍射极限分辨率^[25]。

该装置主要应用于深海微生物原位显微成像。为进一步缩小系统体积, 2021年孟浩然团队提出基于保偏光纤器件的同步相移数字全息显微镜, 光纤照明可使系统体积小于 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ ^[27]。

4 总结与展望

地外行星生命探测具有重要的科学意义与

人文价值, 越来越受到重视。原位探测涉及的技术多且复杂, 导致地外行星生命探测目前仍无最佳技术方案。在众多原位检测方法中, 数字全息显微成像技术被认为是天体生物学的理想之选。

美国加州理工学院喷气推进实验室 Gene Serabyn 团队是目前为数不多从事地外行星生命探测数字全息显微成像技术研发的团队, 从2015年至今, 已提出“共模”与无透镜数字全息显微镜两种技术方案, 并实现三波长、偏振测量以及与荧光显微镜结合等多种高级功能。但两种方案中均采用了离轴光路结构, 限制了系统分辨率, 间接影响了系统体积, 而采用同步相移数字全息显微技术方案则可在保证成像质量的前提下, 有效地避免上述问题。中科院长春光机所孟浩然团队于2019年从事该方向研究, 目前已初步实现全息显微振幅成像与定性相位成像功能, 并计划应用于深海微生物原位探测中。

低温、低细胞浓度海洋环境下生命探测是地外行星生命探测的基础, 现有光纤耦合式并行相移数字全息显微镜的成功研发, 有助于它在地外行星生命探测领域的应用扩展。此外, 基于光波偏振属性相移方式的数字全息显微方案在目标偏振属性的测量方面具有一定可行性, 有望同时结合多波长与偏振测量两种功能, 荧光数字全息显微系统也在同步研发中。为实现地外行星生命原位探测的基本技术要求, 现有系统的成像功能与稳定性有待进一步优化, 可参考 Gene Serabyn 团队“共模”数字全息显微镜分波前合束方式, 系统体积也有望进一步缩小。

参考文献:

- [1] HAYS L. NASA ASTROBIOLOGY STRATEGY 2015 [EB/OL]. 2015. https://astrobiology.nasa.gov/nai/media/medialibrary/2015/10/NASA_Astrobiology_Strategy_2015_151008.pdf.
- [2] BOARD S S. *An Astrobiology Strategy for the Search for Life in the Universe* [M]. Washington D. C.: National Academies Press, 2019.
- [3] NADEAU J L, BEDROSSIAN M, LINDENSMITH C A. Imaging technologies and strategies for detection of extant extraterrestrial microorganisms [J]. *Advances in Physics: X*, 2018, 3 (1): 1424032.
- [4] PERKINS R. Holographic Imaging Could Be Used to Detect Signs of Life in Space [EB/OL]. <https://www.caltech.edu/about/news/holographic-imaging-could-be-used-detect-signs-life-space-78931>. 2017.
- [5] BEDROSSIAN M, LINDENSMITH C, NADEAU J L. Holographic Imaging Could Be Used to Detect Signs of Life in Space [EB/OL]. <https://www.caltech.edu/about/news/holographic-imaging-could-be-used-detect-signs-life-space-78931>. 2017.

- U J L. Digital holographic microscopy, a method for detection of microorganisms in plume samples from enceladus and other icy worlds[J]. *Astrobiology*, 2017, 17(9): 913-925.
- [6] LINDENSMITH C A, RIDER S, BEDROSSIAN M, *et al.* A submersible, off-axis holographic microscope for detection of microbial motility and morphology in aqueous and icy environments[J]. *PLoS One*, 2016, 11(1): e0147700.
- [7] WALLACE J K, RIDER S, SERABYN E, *et al.* Robust, compact implementation of an off-axis digital holographic microscope [J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 17367-17378.
- [8] SERABYN E, LIEWER K, LINDENSMITH C, *et al.* Compact, lensless digital holographic microscope for remote microbiology[J]. *Optics Express*, 2016, 24(25): 28540-28548.
- [9] BEDROSSIAN M, WALLACE J K, SERABYN E, *et al.* Enhancing final image contrast in off-axis digital holography using residual fringes[J]. *Optics Express*, 2020, 28(11): 16764-16771.
- [10] SÁNCHEZ-ORTIGA E, FERRARO P, MARTÍNEZ-CORRAL M, *et al.* Digital holographic microscopy with pure-optical spherical phase compensation[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(7): 1410.
- [11] SERABYN E, KIM T, LIEWER K, *et al.* Demonstration of a dual-mode digital-holographic/light-field-fluorescence microscope for extant life searches[C]. 2020 *IEEE Aerospace Conference*. March 7-14, 2020, Big Sky, MT, USA. IEEE, 2020: 1-7.
- [12] SERABYN G, LIEWER K, LINDENSMITH C, *et al.* Development of a light-field fluorescence microscope for *in situ* life searches in the solar system [C]. 2019 *IEEE Aerospace Conference*. March 2-9, 2019, Big Sky, MT, USA. IEEE, 2019: 1-7.
- [13] KIM T, SERABYN E, LIEWER K, *et al.* ELVIS: a correlated light-field and digital holographic microscope for field and laboratory investigations-field demonstration[J]. *Microscopy Today*, 2020, 28(4): 14-18.
- [14] COHOE D, HANCZAREK I, WALLACE J K, *et al.* Multiwavelength digital holographic imaging and phase unwrapping of protozoa using custom Fiji plug-ins[J]. *Frontiers in Physics*, 2019, 7: 94.
- [15] WALLACE J K, SERABYN E, LINDENSMITH C, *et al.* A multiwavelength digital holographic microscope architecture for enhancing life detection[C]. 2019 *IEEE Aerospace Conference*. March 2-9, 2019, Big Sky, MT, USA. IEEE, 2019: 1-6.
- [16] WALLACE J K, MCKEITHEN D, SERABYN E, *et al.* Polarization sensing in digital holographic microscopy [C]. 2020 *IEEE Aerospace Conference*. March 7-14, 2020, Big Sky, MT, USA. IEEE, 2020: 1-6.
- [17] LINDENSMITH C, SERABYN E, WALLACE J K, *et al.* Digital holographic microscope trades for extant life detection applications [C]. 2019 *IEEE Aerospace Conference*. March 2-9, 2019, Big Sky, MT, USA. IEEE, 2019: 1-7.
- [18] SERABYN E, LIEWER K, WALLACE K, *et al.* Lensless digital holographic microscopy for microbe detection[C]. *Imaging and Applied Optics* 2016. Heidelberg. Washington, D. C.: OSA, 2016: DTh3F. 4.
- [19] SERABYN E, LIEWER K, WALLACE J K. Resolution optimization of an off-axis lensless digital holographic microscope [J]. *Applied Optics*, 2017, 57(1): A172.
- [20] SERABYN E, WALLACE K, LIEWER K, *et al.* Digital holographic microscopy for remote life detection[C]. *SPIE Photonics Europe. Proc SPIE* 10677, *Unconventional Optical Imaging*, Strasbourg, France. 2018, 1067: 398-403.
- [21] SERABYN E, LIEWER K, WALLACE K. Lensless digital holographic microscopy as a means to search for life in the solar system [C]. 2018 *IEEE Aerospace Conference*. March 3-10, 2018, Big Sky, MT, USA. IEEE, 2018: 1-7.
- [22] 王华英. 数字全息显微成像的理论和实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2008.
- WANG H Y. *Imaging Theory and Experimental Demonstration of Digital Holographic Microscopy* [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [23] 李杰. 广义相移数字全息相移提取算法及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- LI J. *Study of Phase-shift Extraction Algorithm and Its Application in Generalized Phase-Shifting Digital Holography*[D]. Jinan: Shandong University, 2014. (in Chinese)

- [24] 樊元朋, 孟浩然, 刘欣悦, 等. 基于微偏振片阵列的并行相移动态数字全息成像技术[J]. 光电子技术, 2020, 40(4): 270-276.
- FAN Y P, MENG H R, LIU X Y, *et al.* The technology of parallel phase shift dynamic digital holography imaging based on micro-polarizer array [J]. *Optoelectronic Technology*, 2020, 40 (4) : 270-276. (in Chinese)
- [25] 樊元朋. 水下并行相移数字全息成像系统的理论与实验研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020.
- FAN Y P. *Theoretical and Experimental Study of Underwater Parallel Phase Shift Digital Holographic Imaging System*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, University of Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [26] 邓定南. 数字全息显微定量相位测量技术研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2018.
- DENG D N. *Research on Quantitative Phase Measurement with Digital Holographic Microscopy* [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2018. (in Chinese)
- [27] LIU X R, LIU X Y, ZHANG H L, *et al.* Research progress of digital holography in deep-sea *in situ* detection [C]. *Proc SPIE 11763, Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications*, 2021, 1176: 1760-1766.

作者简介:



王 越(1994—),男,博士研究生,研究方向为定量相位成像的同步相移计算全息方法。E-mail: 15584237868@163.com

通讯作者:



孟浩然(1980—),男,副研究员,硕士生导师,主要从事海洋光学探测、激光应用、光学全息与光学显微成像等领域的研究。E-mail: menghaoran@ciomp.ac.cn