

衍射光学系统的激光应用和稀疏成像分析

李道京*^① 朱宇^② 胡焯^{①③} 于海锋^② 周凯^{①③} 张润宁^② 刘磊^②

^①(中国科学院空天信息创新研究院微波成像技术重点实验室 北京 100190)

^②(中国空间技术研究院总体设计部 北京 100094)

^③(中国科学院大学 北京 100049)

摘要:近年来衍射光学系统得到了快速发展,衍射器件(如二元光学器件和膜基透镜)相当于微波天线的固定移相器,微波相控阵天线成熟的理论和方法应可用于其性能分析。激光SAR和激光通信都具有单色且波长较长的特点,特别适合采用非成像衍射光学系统,通过衍射器件实现信号波前控制,减小焦距并有利于系统的轻量化。基于衍射光学系统,研究激光SAR和激光通信技术具有重要的理论意义和应用价值。该文给出了衍射光学系统的相控阵解释,介绍了基于衍射光学系统已开展的机载激光SAR和星载激光SAR研究工作。提出了艇载1 m衍射口径激光通信和干涉定位系统概念并分析了其性能,该系统在10 m短基线下,其作用距离将达到 4×10^8 km,对应的定位精度在6 km量级,可用于深空探测。该文同时探讨了稀疏采样激光成像问题,在激光照射目标条件下,提出用傅里叶透镜将激光图像信号变换到频域,在低频区域利用小规模探测器实施稀疏采样,等效进行2维低通滤波处理,再用计算机重构目标图像的想法,给出了一些初步的仿真结果。

关键词:衍射光学系统;激光雷达;激光通信;合成孔径成像;干涉测角定位;稀疏成像

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2020)01-0195-09

DOI: 10.12000/JR19081

引用格式: 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. doi: 10.12000/JR19081.

Reference format: 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. doi: 10.12000/JR19081.

Laser Application and Sparse Imaging Analysis of Diffractive Optical System

LI Daojing*^① ZHU Yu^② HU Xuan^{①③} YU Haifeng^②
ZHOU Kai^{①③} ZHANG Running^② LIU Lei^②

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

^②(*General Design Department, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China*)

^③(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In recent years, the diffractive optical systems have developed rapidly. Diffractive devices such as binary optical device and membrane-based lens are equivalent to fixed phase shifters of microwave antennas. Thus, the mature theories and methods of a microwave phased-array antenna could be used for diffractive devices' performance analysis. Both laser Synthetic Aperture Radar (SAR) and laser communication feature a single color and long wavelength, and they are specifically suitable for non-imaging diffractive optical systems. A signal wave front control realized by a diffraction device reduces the focal length and the weight of a system. Research on laser SAR and laser communication technology has important theoretical significance and

收稿日期: 2019-09-09; 改回日期: 2020-02-03; 网络出版: 2020-02-24

*通信作者: 李道京 lidj@mail.ie.ac.cn *Corresponding Author: LI Daojing, lidj@mail.ie.ac.cn

基金项目: 国家高分辨率对地观测系统重大专项(GF0314)

Foundation Item: The Major Project of High-Resolution Earth Observation System of China (GF0314)

责任编辑: 邵晓鹏 Corresponding Editor: SHAO Xiaopeng

application value for diffractive optical system. In this paper, we provide a phased-array interpretation of a diffractive optical system and introduce research that has been conducted on airborne and spaceborne laser SAR with respect to diffractive optical systems. We propose the concept of shipborne 1 m diffraction aperture laser communication and an interferometric positioning system and analyze its performance. The results indicated that, using a 10 m short baseline, this system can reach 400 million km with a corresponding positioning accuracy of 6 km that is suitable for use during deep space probes. We also discuss the sparse-sampling laser-imaging problem using a laser to illuminate the target, transforming the laser image signal into the frequency domain with Fourier lens, using the small-scale detector to perform sparse sampling in the low-frequency domain, and reconstructing the target image using a computer. Some preliminary simulation results are provided.

Key words: Diffractive optical system; Lidar; Laser communication; Synthetic aperture imaging; Interferometric angular positioning; Sparse imaging

1 引言

近年来衍射光学系统得到了快速发展^[1,2], 衍射器件(如二元光学器件和膜基透镜)相当于微波天线的固定移相器, 微波相控阵天线成熟的理论和方法应可用于其性能分析^[3]。

衍射光学系统可用于激光雷达^[4], 激光SAR和激光通信具有单色且波长较长的特点, 特别适合采用非成像衍射光学系统^[3,5], 通过衍射器件实现信号波前控制, 减小焦距并有利于系统的轻量化。基于衍射光学系统, 研究激光SAR和激光通信技术具有重要的理论意义和应用价值。

本文给出了衍射光学系统的相控阵解释, 介绍了基于衍射光学系统已开展的机载激光SAR和星载激光SAR研究工作, 提出了艇载1 m衍射口径激光通信和干涉定位系统概念并分析了其性能, 同时探讨了图像频域稀疏采样激光成像问题。

2 衍射光学系统的相控阵解释

衍射光学系统中的衍射器件相当于移相器, 等效在阵列空间上插入波程差对应的移相量的共轭值, 将接收的平面波转为同相球面波在焦点处实现聚焦。

根据相控阵原理, 相控阵引入的移相量可以 2π 为模进行折叠, 且可对 $0\sim 2\pi$ 的相位进行量化处理, 移相器的量化位数将影响天线方向图的远区副瓣和积分旁瓣比等参数。

对衍射光学系统, 二元光学器件台阶宽度和相控阵辐射单元间距对应, 其台阶数和移相器的量化位数相对应。台阶数将直接影响波束方向图的远区副瓣和积分旁瓣比, 进而影响衍射光学系统的衍射效率。

举例: 去掉波长整数倍光程差部分, 再以几分之一波长将厚度量化(台阶化), 假定台阶数8时, 能以 2π 为模对相位实现8值化处理, 移相器的量化位数就是8。

在此基础上, 透射式衍射光学系统的工作原理, 和微波透镜相控阵(空馈相控阵)相同。

3 基于衍射光学系统的机载和星载激光SAR系统分析

3.1 机载激光SAR

文献^[3]明确了激光SAR可使用较为简单的非成像光学系统的特点, 分析了机载激光SAR的光学系统和作用距离, 在馈源和主镜两处使用衍射器件, 在主镜口径300 mm条件下经20:1压缩光路实现 2° 接收视场, 利用衍射器件给馈源处光纤准直器插入高阶相位, 将 40° 宽视场信号收入光纤是其重要的特点。该机载激光SAR具备分辨率为0.05 m幅宽1.5 km作用距离5 km条带成像能力, 其接收衍射光学系统示意图如图1所示。

2018年10月, 西安电子科技大学用实验验证了宽视场激光回波信号收入单模光纤的可行性, 这使得激光SAR相干探测所需的混频及后续信号处理在实现结构上较为简单。

3.2 星载激光SAR

文献^[5]分析了400 km轨道高度星载对地成像激光SAR系统指标和实现方案, 为形成足够的功率口径积, 采用10 m口径衍射光学系统, 并提出了基于数字信号处理的孔径渡越补偿方法。研究结果表明, 10 m 衍射口径星载激光SAR具备分辨率为0.1 m幅宽5 km条带成像能力, 可对远距离特定目标进行高数据率高分辨率成像跟踪, 其技术实现具有一定的可行性, 其系统概念示意图如图2所示。

通常卫星平台的供电能力和雷达天线尺寸需综合平衡和优化, 在卫星平台供电能力有限条件下, 激光雷达采用大口径衍射光学系统实现远距离微弱回波接收应是一个合理的选择。

制造大口径膜基透镜难度较高, 由于加工条件

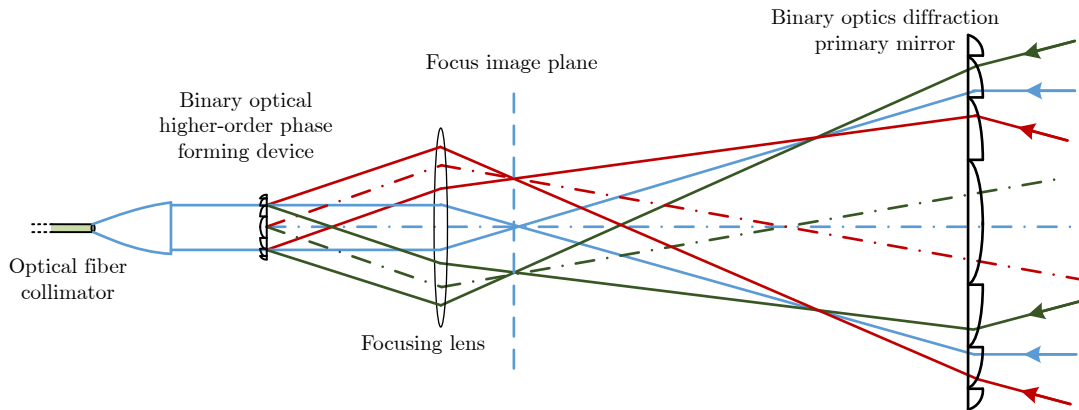


图1 在馈源和主镜两处使用衍射器件的机载激光SAR接收衍射光学系统示意图
 Fig. 1 Schematic diagram of an airborne laser SAR receiving diffraction optical system using a diffraction device at both the feed and the main mirror

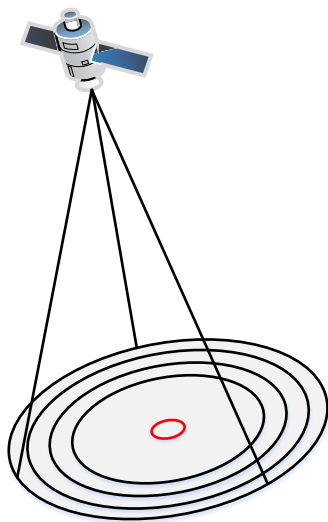


图2 基于衍射光学系统的星载激光SAR系统概念示意图
 Fig. 2 Schematic diagram of spaceborne laser SAR system based on diffractive optical system

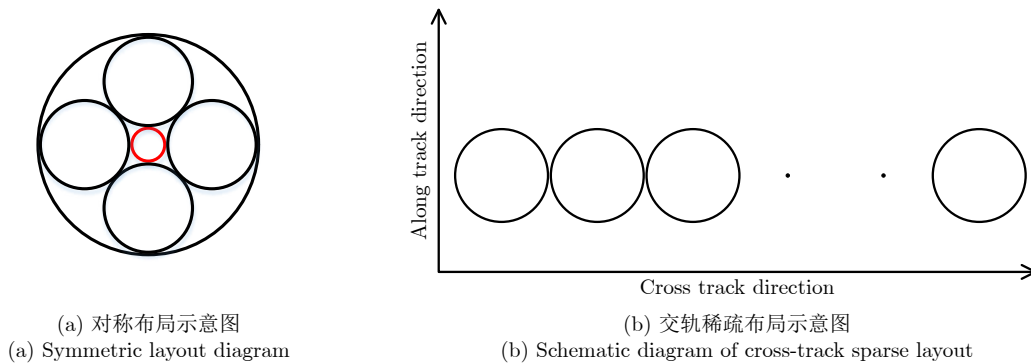
的限制，通常会将大口径分为若干小口径加工，再采用光学合成孔径技术通过多个小口径拼接组装成大口径^[6]。图3为基于4个小口径的光学合成孔径衍

射光学系统示意图，图3(a)中间为用于激光发射的小口径，4个较大的接收口径对称布局。光学合成孔径的实现对小口径间光学加工、装调和校准的一致性要求很高，其误差要控制在1/10波长量级，星载口径较大时需使用折叠展开机构，其实现难度将更大。由若干小口径合成大口径，其拼接“小缝隙”造成的稀疏采样问题会使图像副瓣有所增加，需引入图像处理办法保证图像质量。

形成足够的激光回波接收口径对保证激光雷达作用距离和成像分辨率都很重要，当图3(a)中4个小口径的直径为5 m，可等效实现1个直径为10 m的大口径接收能力。

和上述以提高空间角分辨率为目标的光学合成孔径不同，可使用非成像光学系统的激光SAR获取的图像在斜距-多普勒频率二维，需要宽的接收视场，但不要求具有高的空间角分辨率，其采用较大口径光学系统主要是为了提高激光回波接收能量保证成像信噪比，在此基础上，可降低对小口径间一致性要求。

目前微波合成孔径成像技术已由2维向3维扩



(a) 对称布局示意图
 (a) Symmetric layout diagram
 (b) 交轨稀疏布局示意图
 (b) Schematic diagram of cross-track sparse layout

图3 基于光学合成孔径的衍射光学系统
 Fig. 3 Schematic diagram of diffractive optical system based on optical synthetic aperture

展,文献[7]给出了基于交轨稀疏阵列的3维成像微波SAR结构,采用稀疏阵列结构,可大幅减少设备的体积和重量,尤其适用于对空间分辨率要求高,体积重量要求小的场合,可供未来3维成像激光SAR参考。

图3(b)给出了一个基于光学合成孔径的3维成像激光SAR衍射光学系统示意图,在交轨基于7位巴克码[1110010]稀疏布局^[7]4个接收口径(激光发射的小口径可布设在阵列任一端)。3维成像激光SAR获取的图像在斜距-多普勒频率-交轨空间角3维,其斜距分辨率由激光信号发射带宽决定,顺轨实现基于运动的合成孔径成像,其顺轨分辨率可远优于小口径成像分辨率;交轨实现阵列成像(即光学合成孔径成像),在原理上经稀疏采样图像重构,其交轨分辨率可比小口径成像分辨率高6倍。

显然,该3维成像激光SAR要实现交轨向光学合成孔径,其小口径间光学加工、装调和校准误差要控制在1/10波长量级。与此同时,针对稀疏口径带来的稀疏采样图像重构问题也需深入研究。

目前,在微波成像领域提出的基于干涉处理变换域(主要是频域)稀疏雷达成像方法,与传统满采样成像方法相比,该方法在约50%的稀疏采样条件下,仍可获得接近满采样的成像效果^[8,9],相关概念可供交轨稀疏口径激光SAR 3维成像参考。

上述激光SAR成像技术与光学合成孔径成像技术的结合方式,为大口径星载激光SAR的技术实现提供了一种选择。

4 艇载1 m衍射口径激光通信和干涉定位系统分析

目前,基于异地分布的甚长基线微波通信(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)系统已在深空探测中得到广泛应用^[10,11],根据其工作原理,构建激光通信和干涉定位系统也应具有可行性。由于激光波长比微波至少短4个数量级,有可能形成用于

深空探测的短基线激光通信干涉系统,并减少异地设站带来的同步问题。为回避大气影响,该系统可装载在临近空间平流层飞艇上,为减少重量,激光望远镜可选用膜基衍射光学系统。激光通信无需成像的特点,使其衍射光学系统应较为简单。

平流层飞艇巨大的体积和空间,为口径1 m基线长度约10 m的轻量干涉膜基衍射光学系统安装提供了条件。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。在艇上的系统布设示意图如图4所示。

短基线激光通信干涉系统主要指标为:激光波长:1.064 μm ,望远镜口径:1 m,望远镜数量:3个(三角布局),干涉基线长度:10 m,工作视场:优于 5° ,干涉测角精度:0.1 μrad 量级,作用距离:4 $\times 10^8$ km。

较大口径望远镜机械转动不便,设置折反射镜并通过折反镜的2维机械扫描可实现较大的工作视场,此时馈源保持静止,便于实现激光信号的收发。采用透射式衍射光学系统时,通过光路压缩,可大幅减少折反镜的尺寸,便于2维机械扫描的实现。假定使用10:1压缩光路,要实现 5° 的波束扫描范围,折反镜的旋转范围应达到 25° 。激光通信可使用非成像光学系统的特点,降低了上述光路实现的难度。基于压缩光路和机械扫描结合的激光通信用衍射光学系统如图5所示,随着激光相控阵技术的发展,未来可采用小尺寸激光相控阵实现激光波束二维电扫,采用有限电扫描方式^[12]满足远距离通信需求。

假定目前S波段VLBI系统参数:波长10 cm,基线长度1000 km,天线口径100 m。激光波长1.064 μm ,基线长度10 m,望远镜口径1 m。两者波长和基线都相差 10^5 倍,原理上可获得同样的干涉测角精度。

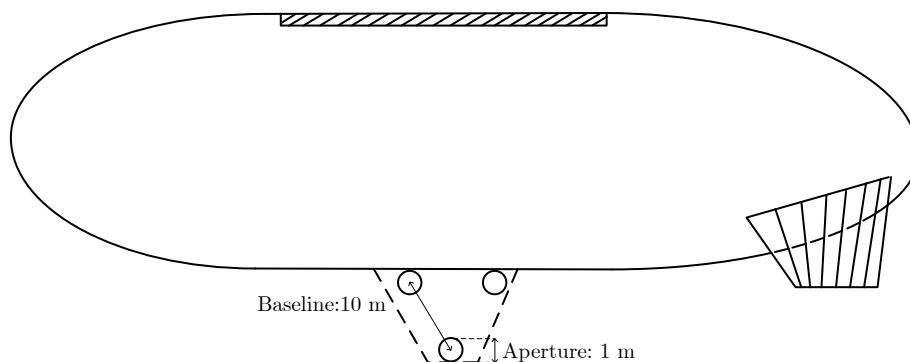


图 4 短基线激光通信干涉系统在艇上的布设示意图

Fig. 4 Schematic diagram of short baseline laser communication interferometric system on the ship

激光1 m口径望远镜的增益要比S波段100 m口径天线高60 dB(10⁶倍), 在表1通信系统参数下, 其作用距离将达到4×10⁸ km。具体分析和参数如下所示:

假设激光发射功率为P_t, 则在距离R处的激光接受功率密度

$$\rho_r = \frac{P_t G_t \eta_{sys}}{4\pi R^2} \quad (1)$$

其中, G_t为发射望远镜增益, η_{sys}为发射和接收系统的传输效率, 设激光发射光学系统的传输效率为η_t, 接收光学系统的传输效率为η_r, 外差探测效率为η_m, 并设光学系统的其他损耗为η_{oth}, 则η_{sys}为

$$\eta_{sys} = \eta_t \eta_r \eta_m \eta_{oth} \quad (2)$$

基于相干探测体制的激光通信最大距离为^[13,3]

$$R_{max} = \sqrt{\frac{P_t \cdot G_t \cdot S_r \cdot \eta_{sys} \cdot \eta_D}{4\pi \cdot h \cdot \nu \cdot B \cdot F \cdot SNR_{min}}} \quad (3)$$

其中, S_r为接收望远镜面积, SNR_{min}表示信噪比,

h为普朗克常量, ν为激光频率, η_D为光电探测器的量子效率, F为电子学噪声系数, B为工作带宽。

和文献[14]中最大作用距离7.5×10⁷ km的AIM激光通信系统相比, 地球端收发均使用大口径可明显降低对激光发射功率的要求并实现远距离通信。

目前微波通信VLBI的测角精度在百分之几角秒量级, 约在0.1 μrad(0.02''), 10 m基线激光的干涉测角精度也在0.1 μrad量级。当干涉相位测量误差小于2π rad, 在法线方向上, 10 m基线激光的干涉测角精度即可优于0.1 μrad; 当干涉相位测量误差小于1 rad, 其干涉测角精度可优于0.016 μrad。在4×10⁸ km处对应的俯仰和方位向的定位精度在6 km量级。深空探测器和地面通信基站通常具有统一的时间基准, 在此基础上, 距离向的定位精度取决于探测器发回信号的时标和回波延时测量精度, 当延时测量精度在20 μs时, 距离向定位精度可优于6 km。

火星距离地球距离在5.5×10⁷~4.0×10⁸ km

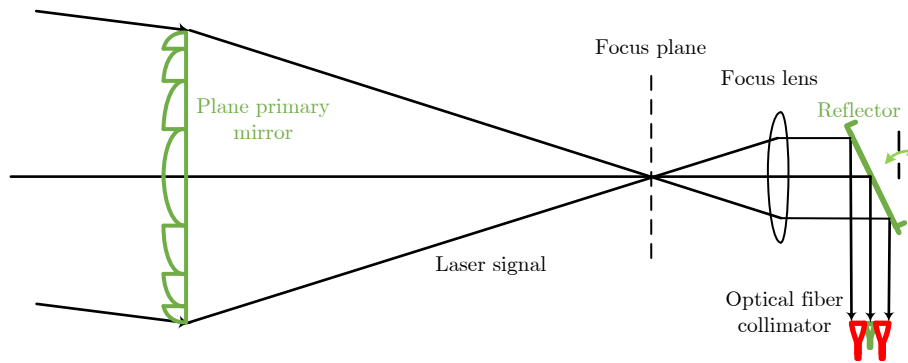


图5 激光光束2维扫描的衍射光学系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of a diffractive optical system for laser beam two-dimensional scanning

表1 激光通信系统参数

Tab. 1 Parameters of laser telecommunication system

下行参数	数值	上行参数	数值
波长	1.064 μm	波长	1.064 μm
带宽	15 kHz	带宽	15 kHz
探测器发射望远镜口径	0.1 m	艇载发射望远镜口径	1.0 m
艇载接收望远镜口径	1.0 m	探测器接收望远镜口径	0.1 m
探测器激光发射功率	10 W	艇载激光发射功率	15 W
探测器发射光学系统传输效率	0.9	艇载发射光学系统传输效率	0.7
艇载接收光学系统传输效率	0.8	探测器接收光学系统传输效率	0.9
光电探测器量子效率	0.5	光电探测器量子效率	0.5
外差探测效率	0.5	外差探测效率	0.5
光学系统的其他损耗	0.3	光学系统的其他损耗	0.3
电子学噪声系数	2 dB	电子学噪声系数	2 dB
下行数据信噪比	6 dB	上行数据信噪比	6 dB
作用距离	4.08×10 ⁸ km	作用距离	4.32×10 ⁸ km

之间，利用该系统可实现火星探测器远距离激光通信，通过对接收数据的正交干涉处理，对探测器实现高精度测角定位。

5 图像频域稀疏激光成像探讨

目前探测器规模在 $20\text{ k}\times 20\text{ k}$ 的可见光相机已很常见，随着高分辨率宽幅相机需求的不断扩大，探测器的规模还在进一步扩大。由此带来两个问题：

(1) 大规模探测器研制周期长成本较高，通过小规模探测器拼接大规模探测器(尤其是要实现无缝拼接)将使相机方案复杂，并会增加较多的体积重量；

(2) 大规模探测器产生的海量数据，给数据存储、传输和处理带来极大困难，为实现数据传输，数据压缩已是必不可少环节。

前端先大数据量采集，然后后端再数据压缩，这似乎是一个前后矛盾的过程，研究在稀疏采样条件下的高分辨率宽幅成像方法具有重要意义。

激光是一种窄带单色信号，不同于宽谱段的可见光，对直接探测体制激光雷达，激光照射下的地物目标图像在频域是稀疏的，且场景的连续性使其频谱集中在低频段。

基于上述概念，在激光照射目标条件下，可考

虑用傅里叶透镜将激光图像变换到频域，将探测器设置在频域实施稀疏采样，再用计算机经傅里叶反变换重构图像。实现过程可参照图6傅里叶光学成像4f实验^[15]，探测器设置在图中的傅里叶平面。

当使用小规模面阵探测器且探测器设置在低频区时，这种稀疏采样激光成像等效进行2维低通滤波处理，也可用图像数据压缩概念解释。这种稀疏采样方式虽会对图像分辨率产生一定影响，但有可能大幅缓解探测器规模和高分宽幅成像的矛盾。

近年来快速发展的叠层傅里叶成像技术^[16-18]和计算成像技术，为该思路提供了一些理论和实践支撑，如文献^[17]明确了自然场景图像频谱的稀疏性(频谱能量主要集中在低频区域)，文献^[18]研究了叠层傅里叶成像技术在远距离遥感中的应用问题。

下面为一个初步的仿真结果，遥感图像的像素规模为 2048×2048 ，分别给出了不同规模频域探测器的稀疏采样和等效2维低通滤波处理成像结果。其中图7为原始遥感图像、2维频谱及其局部放大图；图8和图9分别为采用 $1/2\times 1/2$ 规模和 $1/4\times 1/4$ 规模的频域探测器对原始遥感图像进行频域稀疏采样及图像重构结果，其相当于不同谱宽尺寸的低通滤波；图10为5个无缝拼接 $1/4\times 1/4$ 规模频域

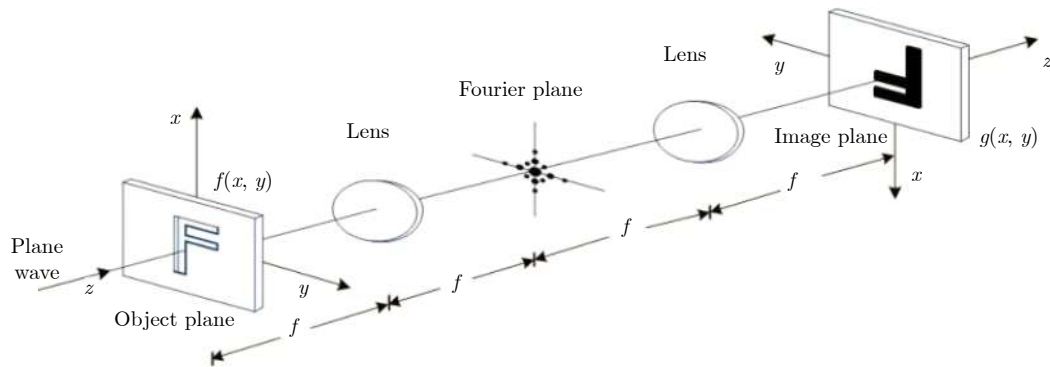
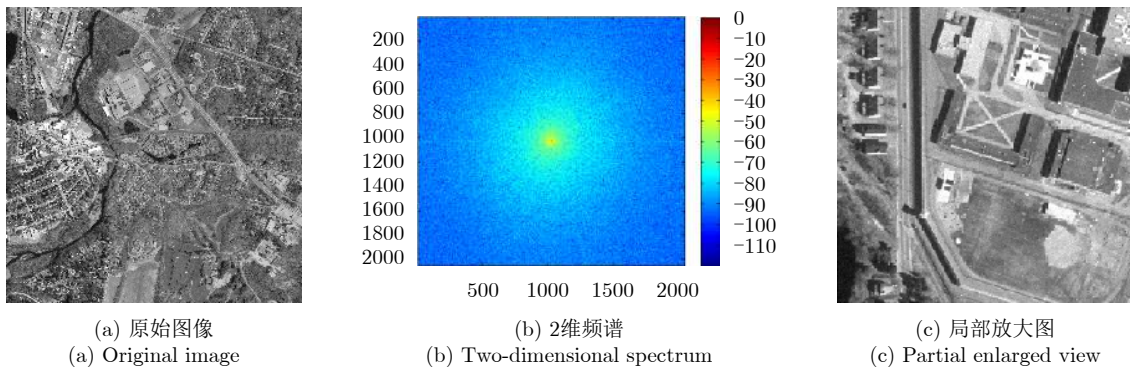


图 6 傅里叶光学成像中的4f实验示意图

Fig. 6 Schematic diagram of 4f experiment in Fourier optical imaging



(a) 原始图像
(a) Original image

(b) 2维频谱
(b) Two-dimensional spectrum

(c) 局部放大图
(c) Partial enlarged view

图 7 原始图像、2维频谱及其局部放大图

Fig. 7 Original image, two-dimensional spectrum and its partial enlarged view

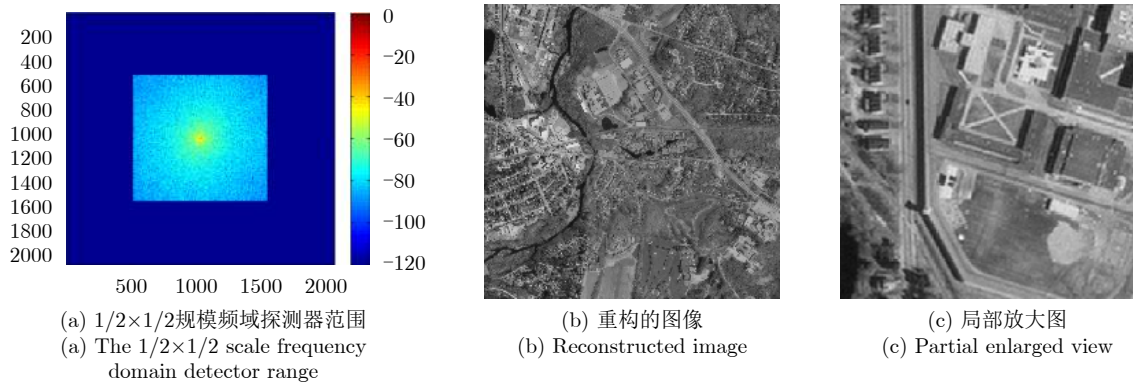


图 8 $1/2 \times 1/2$ 规模频域探测器范围、对应的图像及其局部放大图

Fig. 8 The $1/2 \times 1/2$ scale frequency domain detector range, its corresponding image and partial enlarged view

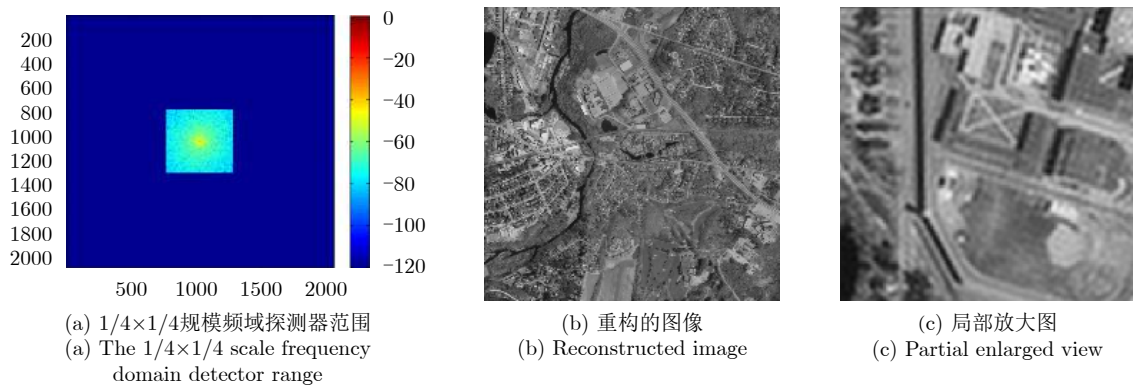


图 9 $1/4 \times 1/4$ 规模频域探测器范围、对应的图像及其局部放大图

Fig. 9 The $1/4 \times 1/4$ scale frequency domain detector range, its corresponding image and partial enlarged view

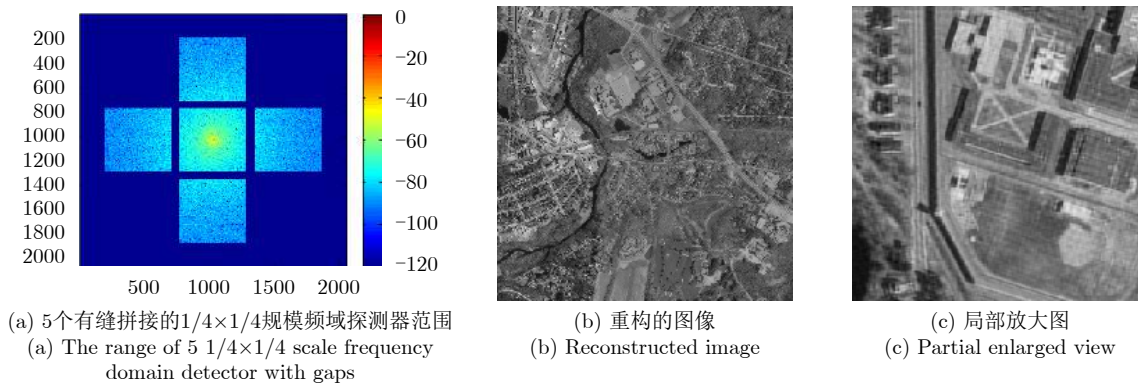


图 10 5个有缝拼接的 $1/4 \times 1/4$ 规模频域探测器范围、对应的图像及其局部放大图

Fig. 10 The range of 5 $1/4 \times 1/4$ scale frequency domain detector with gaps, its corresponding image and partial enlarged view

探测器实现的频域稀疏采样及重构结果，其近似十字型 $1/4$ 谱宽低通滤波。

从目视低频区域稀疏采样和等效2维低通滤波处理成像结果看，1个 $1/2 \times 1/2$ 规模频域探测器，在25%($1/4$)的频域稀疏采样条件下，可获得接近满采样的成像效果；1个 $1/4 \times 1/4$ 规模频域探测器，在6.25%($1/16$)的频域稀疏采样条件下，图像分辨率有明显下降；5个有缝拼接 $1/4 \times 1/4$ 规模频域探

测器组成的近似十字型稀疏采样结构，在约31% ($5/16$)的频域稀疏采样条件下，仍可获得较好的图像。

目前国外已具备规模为 320×256 、像元尺寸 $10 \mu\text{m}$ 的激光焦平面阵列探测器商业化产品能力，但我国在研激光雷达使用焦平面阵列探测器的规模均较小，一般不超过 64×64 。本文将稀疏采样设置在图像频域的设想，为通过小规模激光焦平面阵列

探测器, 实现高分辨率宽幅激光3维成像提出了一种新思路, 虽未给出从空域图像到频域频谱所需变换和频域采样系统实现具体参数, 但其稀疏采样激光成像的原理是清楚的, 相关工作将在后续完善和验证。

6 结束语

本文论述了衍射光学系统的几种激光应用方式, 表明了衍射光学系统的重要价值, 相关概念对大口径激光雷达和激光通信技术的发展具有重要意义, 而临近空间和外层空间, 已成为衍射光学系统激光应用的广阔天地。

本文同时探讨了图像频域稀疏采样激光成像问题, 考虑到衍射光学系统的光谱宽度很窄, 窄带的可见光和红外信号是否能类似激光实现傅里叶光学成像, 并最终实现稀疏成像, 很值得深入探讨, 持续开展相关研究工作对我国高分辨率光学成像探测技术的发展也具有重要意义。

致谢 感谢中科院院长光所姚园副研究员, 西安电子科技大学刘飞、孙艳玲副教授, 航天科技集团508所林招荣研究员, 浙江大学徐之海教授, 中科院上海技物所王跃明研究员, 中科院西安光机所李东坚、谢永军研究员对本文工作的指导和帮助!

参 考 文 献

- [1] 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.
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.
- [2] 刘韬, 周润松. 国外地球静止轨道高分辨率光学成像系统发展综述[J]. 航天器工程, 2017, 26(4): 91–100. doi: [10.3969/j.issn.1673-8748.2017.04.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-8748.2017.04.015).
LIU Tao and ZHOU Runsong. Development overview on GEO high resolution optical imaging system[J]. *Spacecraft Engineering*, 2017, 26(4): 91–100. doi: [10.3969/j.issn.1673-8748.2017.04.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-8748.2017.04.015).
- [3] 李道京, 胡烜. 合成孔径激光雷达光学系统和作用距离分析[J]. 雷达学报, 2018, 7(2): 263–274. doi: [10.12000/JR18017](https://doi.org/10.12000/JR18017).
LI Daojing and HU Xuan. Optical system and detection range analysis of synthetic aperture lidar[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(2): 263–274. doi: [10.12000/JR18017](https://doi.org/10.12000/JR18017).
- [4] ZHU Jinyi and XIE Yongjun. Large aperture diffractive telescope design for space-based lidar receivers[C]. The SPIE 9795, Selected Papers of the Photoelectronic Technology Committee Conferences Held June–July 2015, Harbin, China, 2015.
- [5] 胡烜, 李道京. 10 m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. doi: [10.3788/CJL201845.1210002](https://doi.org/10.3788/CJL201845.1210002).
HU Xuan and LI Daojing. Space-based synthetic aperture LiDAR system with 10 m diffractive aperture[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1210002. doi: [10.3788/CJL201845.1210002](https://doi.org/10.3788/CJL201845.1210002).
- [6] 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. doi: [10.3788/co.20171001.0025](https://doi.org/10.3788/co.20171001.0025).
ZHOU Chenghao, WANG Zhile, and ZHU Feng. Review on optical synthetic aperture imaging technique[J]. *Chinese Optical*, 2017, 10(1): 25–38. doi: [10.3788/co.20171001.0025](https://doi.org/10.3788/co.20171001.0025).
- [7] 李道京, 侯颖妮, 滕秀敏, 等. 稀疏阵列天线雷达技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
LI Daojing, HOU Yingni, TENG Xiumin, *et al.* Sparse Array Antenna Radar Technology and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [8] 李烈辰, 李道京. 基于压缩感知的连续场景稀疏阵列SAR三维成像[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(9): 2166–2172. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01645](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01645).
LI Liechen and LI Daojing. Sparse array SAR 3D imaging for continuous scene based on compressed sensing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(9): 2166–2172. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01645](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01645).
- [9] 田鹤, 李道京. 稀疏重航过阵列SAR运动误差补偿和三维成像方法[J]. 雷达学报, 2018, 7(6): 717–729. doi: [10.12000/JR18101](https://doi.org/10.12000/JR18101).
TIAN He and LI Daojing. Motion compensation and 3-D imaging algorithm in sparse flight based airborne array SAR[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(6): 717–729. doi: [10.12000/JR18101](https://doi.org/10.12000/JR18101).
- [10] 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(S1): 34–37.
HAO Wanhong, LI Haitao, HUANG Lei, *et al.* Development of a VLBI system for China's deep space network[J]. *Journal of spacecraft TT & C technology*, 2012, 31(S1): 34–37.
- [11] 朱新颖, 李春来, 张洪波. 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. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2010.08.001](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2010.08.001).
ZHU Xinying, LI Chunlai, and ZHANG Hongbo. A survey of VLBI technique for deep space exploration and trend in China current situation and development[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(8): 1893–1899. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2010.08.001](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2010.08.001).
- [12] 彭祥龙. 国外毫米波电扫描技术[J]. 电讯技术, 2009, 49(1): 85–91. doi: [10.3969/j.issn.1001-893X.2009.01.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893X.2009.01.019).
PENG Xianglong. Electronically controlled millimeter wave beam steering technologies[J]. *Telecommunication Engineering*, 2009, 49(1): 85–91. doi: [10.3969/j.issn.1001-893X.2009.01.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893X.2009.01.019).

- [13] 李海涛. 深空测控通信系统设计原理与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
LI Haitao. Principles and Design Methods of Deep Space TT&C System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [14] 高铎瑞, 李天伦, 孙悦, 等. 空间激光通信最新进展与发展趋势[J]. 中国光学, 2018, 11(6): 901-913. doi: 10.3788/CO.20181106.0901.
GAO Duorui, LI Tianlun, SUN Yue, *et al.* Latest developments and trends of space laser communication[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 901-913. doi: 10.3788/CO.20181106.0901.
- [15] LI Luchang. 傅里叶光学基础总结[EB/OL]. <https://blog.csdn.net/u013701860/article/details/77546546>, 2017.
LI Luchang. Summary of Fourier optical foundation[EB/OL]. <https://blog.csdn.net/u013701860/article/details/77546546>, 2017.
- [16] ZHENG Guoan, HORSTMAYER R, and YANG C. Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(9): 739-745. doi: 10.1038/nphoton.2013.187.
- [17] 孙佳嵩, 张玉珍, 陈钱, 等. 傅里叶叠层显微成像技术: 理论、发展和应用[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1011005. doi: 10.3788/AOS201636.1011005.
SUN Jiasong, ZHANG Yuzhen, CHEN Qian, *et al.* Fourier ptychographic microscopy: Theory, advances, and applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1011005. doi: 10.3788/AOS201636.1011005.
- [18] 赵明, 王希明, 张晓慧, 等. 宏观傅里叶叠层超分辨率成像实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(12): 121101.
ZHAO Ming, WANG Ximing, ZHANG Xiaohui, *et al.* Experimental research on macroscopic Fourier ptychography super-resolution imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 121101.

作者简介



李道京(1964-), 男, 1986年和1991年在南京理工大学分别获通信与电子系统专业工学学士和硕士学位。1986年至2006年在中国兵器工业第206研究所从事地面雷达的研制工作。2003年7月在西北工业大学电路与系统专业获工学博士学位, 同年10月进入中科院电子所通信与信息工程专业做博士后, 2006年3月出站正式进入中科院电子所工作。现任中国科学院空天信息创新研究院微波成像技术重点实验室研究员、博士生导师, 主要研究方向为雷达系统和雷达信号处理。已经发表学术论文100余篇, 出版专著3部, 获得授权发明专利20余项。

E-mail: lidj@mail.ie.ac.cn