



天问二号旋转衍射快照式光谱成像系统设计与定标试验验证

诸葛政跃, 蒋婷婷, 边美娟, 徐豪, 徐南, 李奇*, 徐之海*

浙江大学光电科学与工程学院, 杭州 310027

*联系人, 李奇, E-mail: liqi@zju.edu.cn; 徐之海, E-mail: xuzh@zju.edu.cn

收稿日期: 2025-01-03; 接受日期: 2025-03-24; 网络出版日期: 2025-06-05

天问二号搭载高光谱相机批复(编号: 科工月[2023]21号)、宁波市重点研发计划项目(编号: 2023Z053)和杭州城西科创大走廊创新发展专项(编号: 511308-X02402)资助

摘要 在天问二号探测任务中, 为了获取高速运动目标的整体形貌和光谱信息, 搭载了一台基于旋转衍射机理的面阵式光谱相机. 相机利用衍射光学元件对入射光的相位进行编码, 使得成像系统不同波长的点扩散函数呈现出形状相似, 角度旋转的特征. 这些具有波长依赖性的点扩散函数作为成像系统的光谱先验信息, 让从编码图像中重建光谱数据成为可能. 本文重点介绍折衍射混合光学系统的设计和成像系统的定标工作, 定标获得的点扩散函数与理论设计的点扩散函数具有很好的一致性, 证明定标过程以及图像数据预处理过程准确有效.

关键词 光谱成像, 天问二号, 快照式, 衍射光学元件, 图像重建

PACS: 07.07.Df, 07.05.Pj, 07.05.Mh, 42.30.Kq

1 引言

不同的物质通常具有各自独特的光谱特征, 类似于人类的“指纹”. 光谱成像技术作为一种成像技术和光谱技术相结合的多维信息获取技术, 可以同时获取被测目标的二维空间信息与一维光谱信息, 是物质成分类型、热辐射特性等研究的主要信息获取手段, 被广泛应用于遥感探测^[1,2]、农业^[3]、医学^[4]等领域. 国际上小天体探测已有多年的历史, 美、欧、日等先后完成了多次各自独特的标志性任务^[5-9], 其探测器上均配备了多光谱相机、可见红外成像光谱仪等光谱成像

仪, 对小天体表面的物质、结构等进行探测.

传统的相机通过单次成像只能获取二维的信息, 为了获取包含光谱信息的三维数据立方体, 常规的光谱成像仪使用基于扫描的方法. 沿空间维度扫描的方法单次拍摄可以得到一维空间信息和一维光谱信息, 通过扫描的方式获取另外一维空间信息, 典型的如基于色散元件和狭缝的推扫式光谱成像仪^[10]. 沿光谱维度扫描的方法单次拍摄可以获得二维空间信息, 通过光谱维度的切换可以得到三维光谱数据立方体, 典型的如基于窄带滤光片切换的光谱成像仪. 由于需要扫描的过程, 这类基于扫描的光谱成像系统获取场景光

引用格式: 诸葛政跃, 蒋婷婷, 边美娟, 等. 天问二号旋转衍射快照式光谱成像系统设计与定标试验验证. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 279509
Zhuge Z, Jiang T, Bian M, et al. Design and calibration verification of the diffraction rotational snapshot spectral camera on the Tianwen-2 mission (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 279509, doi: 10.1360/SSPMA-2025-0003

谱信息的耗时较长,无法针对动态目标开展探测,在深空探测任务中,往往需要对探测器和小天体的相对姿态进行实时调整,应用场景受限.与此同时,由于扫描过程需要借助精密的机械结构的辅助,这类系统也具有体积重量大、成本高的特点.

近年来,随着计算成像技术的快速发展,一系列基于编码-解码的计算光谱成像技术被提出并广泛研究^[11],这类系统通常具有快照式、轻小型、便携性好、低成本的优势.特别是快照式特点,能够在保证视场的前提下快速成像,拍摄到其他光谱仪难以捕获的高速运动目标,也能在各设备都能拍摄的时候提供数据对比.根据编码对象的不同,这类计算光谱成像系统可以分为振幅编码型、相位编码型、波长编码型三类^[12].

以编码孔径快照式光谱成像系统(Coded Aperture Snapshot Spectral Imaging, CASSI)^[13]为例的振幅编码系统利用0/1掩模版对入射光场的振幅进行编码,经过振幅编码后的光场被后续的色散元件分散开,最后在传感器平面叠加,得到编码混叠图像.自CASSI系统被提出以来,其硬件系统和重建算法被不断优化.Arce等人^[14,15]提出了彩色的编码孔径,可以减少拍摄次数,提高重建结果质量.Wu等人^[16]提出使用数字微镜器件实现反射式的动态编码.Tao等人^[17]提出双光路的成像系统,使用清晰图像与分辨率退化的编码图像开展融合重建.Meng等人^[18]基于编码-解码的神经网络结构,提出了空间-光谱自注意力机制模块,最后可以实现35 fps的4D快照式光谱成像.Meng等人^[19]提出了基于自监督框架的光谱重建算法,无需大量的数据集即可以得到比较好的结果,结合预训练得到的深度噪声先验,可以进一步提升重构结果.Zheng等人^[20]和Cai等人^[21]在基于神经网络的重建算法上也提出较多算法方案.也有学者将编码孔径光谱成像技术应用在红外波段^[22].由于CASSI系统包含复杂的光学结构,信号受掩模版衰减,其实际应用主要被限制在实验室场景中.

基于相位编码的光谱成像系统通常使用衍射光学元件(Diffractive Optical Element, DOE)对入射光场的相位进行编码,进而对成像系统点扩散函数(Point Spread Function, PSF)的形状进行调控,产生具有波长依赖性的PSF,建立PSF形状和波长之间的对应关系,将光谱先验编码在波长各异的PSF中.Hauser等人^[23]在成像光路中放置相位扩散器,利用扩散器的衍射效应将不同波长的光线色散到相应的位置,并提出一种

基于神经网络的光谱重建算法.Toivonen等人^[24]使用类似的方法,将衍射光栅放置在成像镜头前面,并提出了基于空洞卷积的光谱重建算法,利用不同波长色散距离不同的特点,对图像特征进行提取.Jeon等人^[25]创新性地提出了旋转衍射的成像机理,整个成像系统仅使用一片超薄的DOE即可同时实现成像和色散的功能.浙江大学的学者们针对旋转衍射的光谱成像系统开展了大量的研究,对衍射元件的设计方法进行优化^[26,27],提出计算资源和重建效果均衡的重建算法^[28],提出了基于清晰图像和旋转衍射图像融合重建的成像系统和算法^[29].

基于波长编码的光谱成像系统^[30]通常使用光谱透过率随波长变化的元件作为波长编码元件,对图像传感器接收到的场景波长信息进行编码.由于没有引入光学系统的退化过程,这类系统通常具有空间分辨率高的优点.RGB图像的拍摄过程就可以被理解为波长编码的过程,此时成像系统的波长编码函数是RGB相机的光谱响应函数,从RGB图像中重建出光谱信息可以被理解解码的过程,这类光谱重建算法被广泛研究^[31,32].由于从三通道的RGB图像里面重建30多个通道的光谱数据不适定性较强,这类系统严重依赖于数据集覆盖的场景,以及光谱重建算法的泛化性,因此很多学者针对波长编码的方式开展研究.Zhang等人^[33]提出使用光学薄膜作为波长编码元件,并使用深度神经网络实现光学薄膜的设计以及光谱的重建.Zhu等人^[34]提出使用光子晶体作为波长编码元件,并将其集成在传感器芯片上.Oh等人^[35]提出使用具有不同光谱灵敏度的相机拍摄相同的场景,以增加编码的多样性.Xu等人^[36]提出在RGB相机前面添加编码滤光片,通过滤光片的切换来增加编码的多样性,并使用端到端优化框架实现硬件参数和重建算法的联合设计.

受编码-解码式计算光谱成像系统的启发,本文提出基于旋转衍射机理的快照式光谱成像系统,并针对深空探测应用场景进行优化,改进衍射元件设计方法,提出折衍射混合光学系统,提升光谱重建算法性能.综合这些优化,设计一台旋转衍射快照式光谱成像样机,将在天问二号深空探测任务中被搭载,初步设想的工作模式为交会成像、悬停成像、下降成像.这台正样样机的主要技术指标如表1所示.

相比于传统的光谱成像仪,本文介绍的旋转衍射快照式光谱成像相机具有以下3个特点:(1)快照式成

表 1 旋转衍射快照式光谱相机主要性能指标

Table 1 The main performance indicators of diffraction rotational snapshot spectral camera

参数名称	数值
重量	760.3 g
功耗	5.016 W
光谱范围	480–900 nm
光谱通道数量	43
光谱通道间隔	10 nm
下传数据量化位数	12 bit
视场角	3.09°×3.09°
有效像元数	1024×1024
成像距离	175 m–+∞
图像信噪比	≥30 dB

像, 无需运动部件, 可以获取较大视场动态场景的光谱信息. (2) 结构紧凑, 没有复杂的光机结构, 体积小, 重量轻. (3) 下传图像为1024×1024×3的彩色图像, 光谱解码工作在地面进行, 需要下传的数据量少.

本文首先对旋转衍射快照式光谱成像相机的核心元件设计以及成像原理进行理论推导, 随后详细介绍正样样机的定标工作.

2 成像系统原理

旋转衍射快照式光谱相机的折衍射混合光学系统设计如图1所示.

为了探测远距离目标, 在衍射元件前添加了一个前置望远镜系统, 衍射元件作为核心元件, 同时承担成像和色散的功能, 在衍射元件后面添加一个后置镜组, 用于缩短成像系统后截距, 缓解PSF尺寸和通光口径之间的矛盾.

2.1 折衍射混合光学系统成像模型

为从理论上验证成像系统的效果, 需要对整个光

学系统的成像模型进行推导, 将成像镜头简化为如图2所示的折衍射混合光学系统示意图.

由于本设计中, 相机的PSF是基于定标的, 在定标过程中会考虑光学元件的像差以及装配过程中引入的误差等, 因此在理论分析过程中假设后置透镜为理想透镜, 且紧靠衍射元件后表面. 对于理想的望远镜, 其出射光应该是平行的, 但由于像差的存在, 该平面波叠加了代表光学像差的附加相位项, 此时DOE前表面的光场可以表示为

$$u_0(x, y) = A_0 e^{i\phi_{\text{tele}}(x, y)}, \quad (1)$$

其中 A_0 表示振幅, $\phi_{\text{tele}}(x, y)$ 表示前置望远镜系统的像差. 随后DOE对该光场的相位进行调制, 由DOE引入的相位调制可以表示为

$$\phi_{\text{DOE}}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{\lambda} \cdot h(x, y), \quad (2)$$

其中 $h(x, y)$ 表示DOE的表面轮廓高度. 紧接着DOE后表面的光场可以表示为

$$u_{\text{DOE}}(x, y) = A_0 e^{i[\phi_{\text{tele}}(x, y) + \phi_{\text{DOE}}(x, y)]}. \quad (3)$$

在到达像面前还需要经过后置透镜的会聚, 将后置透镜的会聚作用同样建模为相位调制项, 由后置透镜引入的相位项可以表示为

$$\phi_{\text{Lens}}(x, y) = -\frac{\pi}{\lambda f_{\text{Lens}}} (x^2 + y^2), \quad (4)$$

其中 f_{Lens} 表示后置透镜的焦距. 综合DOE和后置透镜的相位调制作用, 后置透镜后表面的光场复振幅可以描述为

$$u_1(x, y) = A_0 e^{i[\phi_{\text{tele}}(x, y) + \phi_{\text{DOE}}(x, y) + \phi_{\text{Lens}}(x, y)]}. \quad (5)$$

经过距离为 z 的衍射传播到达传感器平面, 可以得到像面的光场复振幅, 使用菲涅尔衍射传播来计算这一过程, 经过化简可得

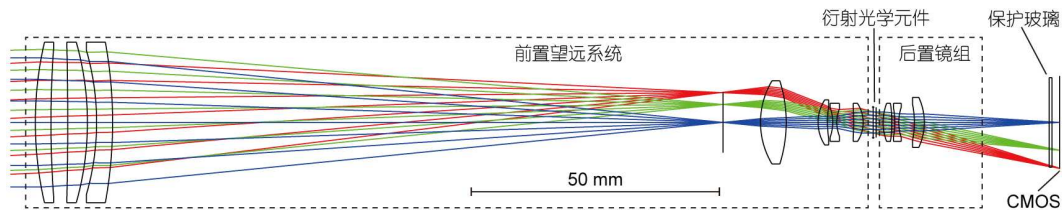

图 1 折衍射混合光学系统设计图

Figure 1 The design diagram of refractive-diffractive hybrid optical system.

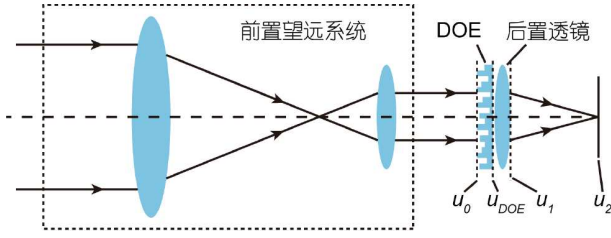


图 2 折衍射混合光学系统示意图

Figure 2 The schematic diagram of the refractive-diffractive hybrid optical system.

$$u_2(x', y') = F \left\{ u_{\text{DOE}} \cdot e^{\frac{ik}{2} \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{f_{\text{Lens}}} \right) (x'^2 + y'^2)} \right\}, \quad (6)$$

其中 $F\{\}$ 表示傅里叶变换, $k = 2\pi/\lambda$, 此时传感器平面光场的强度即为成像系统针对无限远的点扩散函数, 可以表示为

$$\text{PSF}_\lambda(x', y') \propto |u_2(x', y')|^2. \quad (7)$$

最后经过坐标系的换算, 可以得到像面重采样 PSF 图像, 用于代表成像系统的退化过程. 利用仿真得到的 PSF 图像可以开展后续的仿真过程, 模拟成像系统采集到的图像, 以定量评价成像系统硬件参数和光谱重建结果质量之间的关系.

2.2 衍射元件设计与加工

在光学系统中, DOE 为一个圆形器件, 同时承担着成像和色散的功能. 考虑穿过 DOE 的两条光线, 其中一条光线穿过 DOE 的中心, 另外一条光线穿过 DOE 平面上坐标为 (x, y) 的一点. 为实现成像功能, 穿过这两点的光线到达像面时, 两者的光程差应该为 2π 的整数倍. 假设 DOE 表面轮廓高度表示为 $h(x, y) = h_0 + \Delta h(x, y)$, 其中 h_0 为 DOE 基底材料的高度, $\Delta h(x, y)$ 为 DOE 表面轮廓与基底高度之间的高度差, 在实际加工过程中表示刻蚀深度. 两条光线的光程差引入的约束可以描述为

$$\Delta h(x, y) \Delta n_\lambda + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - z = m\lambda, \quad (8)$$

其中 Δn_λ 为基底材料与空气在波长为 λ 时的折射率差, z 为 DOE 与像面之间的距离, 也可认为是 DOE 的焦距, m 为常数, 对上式进行化简, 可以得到

$$\Delta h(x, y) = \frac{m\lambda - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + z}{\Delta n_\lambda}. \quad (9)$$

为实现色散功能, 将 DOE 圆周的 360° 划分为 N 个相同的区域, 并分别针对特定波长进行设计, 对于 DOE 表面上一点, 其坐标为 (x, y) , 转换为极坐标形式为 (h, θ) , 假设成像光谱范围为 $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, 此时波长和 DOE 角度之间的关联可以表示为

$$\lambda(\theta) = \begin{cases} \lambda_{\min} + (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \frac{N}{2\pi} \theta, & 0 \leq \theta < \frac{2\pi}{N}, \\ \lambda \left(\theta - \frac{2\pi}{N} \right), & \frac{2\pi}{N} \leq \theta < 2\pi, \end{cases} \quad (10)$$

其中 $\lambda(\theta)$ 表示角度 θ 处对应的设计波长, 综合式 (9) 和 (10) 即可完成对 DOE 的设计.

设置基底材料为 JGS1 石英玻璃, 基底材料厚度为 $600 \mu\text{m}$, DOE 的通光口径为 5 mm , 焦距为 150 mm , 瓣数 $N = 2$, 工作谱段包含 $480\text{--}900 \text{ nm}$, 为了方便加工, 将 DOE 轮廓的最大高度差离散化为 8 个台阶, 得到如图 3 所示的衍射元件设计结果.

为了测试加工误差对结果的影响, 我们在仿真中, 对衍射元件的台阶随机添加 $0\text{--}10\%$ 的相对高度和宽度扰动, 仿真结果显示 10% 的扰动对 PSF 和最终光谱重建效果无显著影响.

在图 3 中, 每个像素代表了 $1 \mu\text{m}$ 的空间尺寸, 离散化设计后, 每个台阶的高度为 285.50 nm . 对于 8 个台阶, 使用常规的光刻技术以及三次套刻工艺即可完成加工. 加工出来的衍射元件如图 4(a) 所示, 为了验证 DOE 的加工精度, 从多方面对 DOE 开展测试. 使用台阶仪测试 DOE 的台阶高度, 测试样例如图 4(b) 所示. 使用白光

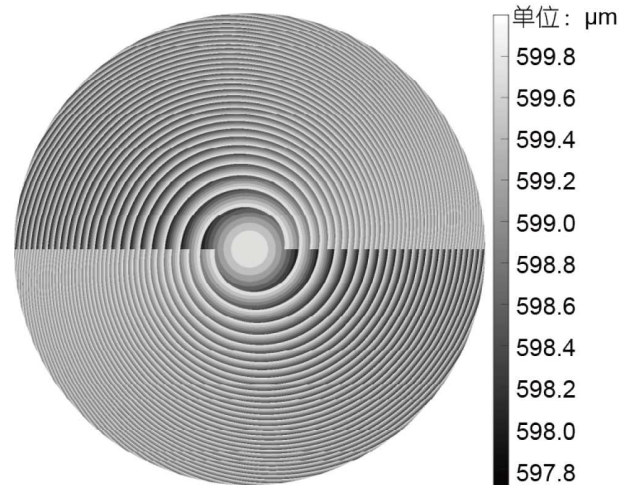


图 3 衍射元件设计结果

Figure 3 The design result of the diffractive optical element.

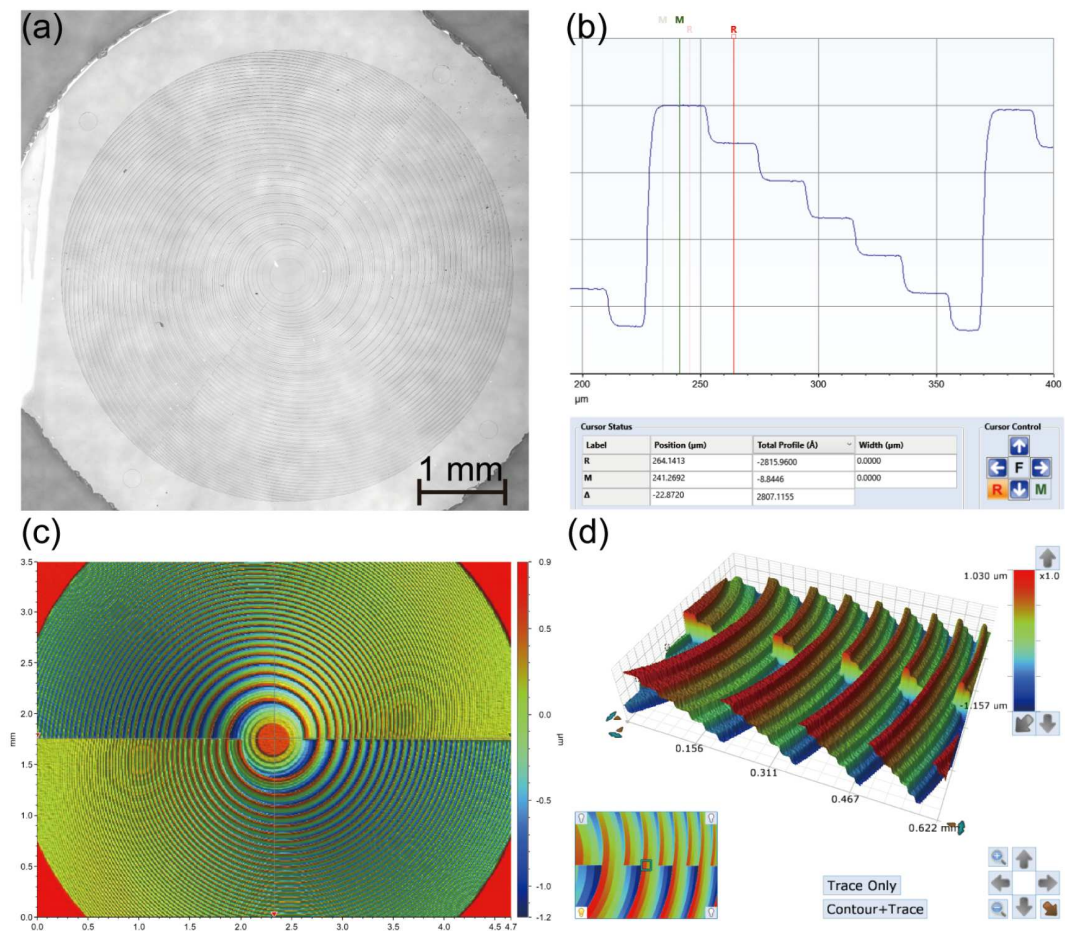


图 4 衍射元件加工结果. (a) 显微镜图; (b) 台阶仪图; (c) 白光干涉仪二维图; (d) 白光干涉仪三维图
Figure 4 The fabrication result of the diffractive optical element. (a) Microscope image; (b) profilometer measurement; (c) 2D white-light interferometry image; (d) 3D white-light interferometry image.

干涉仪测试DOE局部的三维形貌，并评估其局部周期与理论值是否相符，测试样例如图4(c)和(d)所示。

从图4中测试结果可以看到元件表面整洁，无明显污渍与石英玻璃碎屑，DOE台阶清晰，图案与设计值一致。对测试数据进行进一步分析，定量评价DOE的局部周期与台阶高度，分别得到如表2和表3所示的数据。由于图4(b)中所测量的周期内只出现了7个台阶，因此表3中只有6个台阶高度。

结合以上两个表的数据以及仿真分析，宽度和高度的相对误差都远小于10%，因此认为衍射元件加工结果符合加工要求，满足后续成像和色散条件。

2.3 正样样机研制

完成各个光学元件的设计、加工以及测试后，需要装配形成成像镜头，为了保证光学镜片的固定、间

表 2 衍射元件加工结果局部周期误差实测分析

Table 2 The local periodicity analysis of the processing results of the DOE

周期	理论宽度 (mm)	实测宽度 (mm)	相对误差 (%)
1	219	218.1	0.41
2	165	166.7	1.03
3	140	142.7	1.93
4	122	125.7	3.03
5	111	110.2	0.72
6	102	103.1	1.08
7	93	94.6	1.72
8	89	90.4	1.57
9	85	83.3	2.00
10	77	76.3	0.91
11	73	74.9	2.60
12	71	73.5	3.52
13	68	67.8	0.29

表 3 衍射元件加工结果台阶高度误差实测分析
Table 3 The step height analysis of the processing results of the DOE

台阶	实测高度 (nm)	相对误差 (%)
1	280.71	1.68
2	280.05	1.91
3	274.86	3.73
4	280.33	1.81
5	281.56	1.38
6	278.22	2.55

隔、同心度等, 结构系统采用钛合金材料. 镜筒内径精密加工保证镜片之间的同心度, 用隔圈保证镜片之间的空气间隔, 最外面用螺纹压圈固定全部镜片. 镜头中所有的空气间隔都设计有通气孔, 保证在真空环境下镜头内部气压平衡. 每片透镜均通过注胶孔点胶进一步固定, 确保能经受住升空等过程造成的冲击、振动. 最靠近物方一片透镜采用防辐射玻璃制造, 以保证在空间环境中不受高强度粒子的伤害. 与此同时, 为防止其他波段光线的干扰, 还需要在窗口玻璃上镀上480–900 nm的带通膜.

对于相机电路部分, 使用CMV4000成像芯片作为图像传感器, 并移除传感器表面的红外截止片, 以确保接收到700–900 nm的光谱信息. CMV4000成像芯片的空间分辨率为2048×2048, 像元尺寸为5.5 μm, 最大位深度为12 bit, Bayer阵列为RGGB的排列方式. 在开发过程中采用像素四合一的方式, 将Bayer阵列中的R和B分别作为R和B通道的输出, 将两个G平均后作为G通道的输出, 最后输出尺寸为1024×1024×3的RGB图像, 此时每个像素对应11 μm的空间尺寸.

相机机壳的结构采用框架式结构, 此类结构具有体积小、重量轻、刚性好、结构简单、便于安装、调试和维修等优点. 镜头与相机机身部分通过法兰方式连接, 二者中间安装有调整垫片, 可以调节镜头和像面之间的距离. 最后搭建得到的旋转衍射快照式光谱相机正样样机如图5所示, 整个正样样机的重量为760.3 g.

旋转衍射快照式光谱相机由整星提供+12 V二次供电, 数管系统通过422接口完成相机配置、触发与同步, 相机采集的数据通过LVDS接口传入数管系统. 相机具有功能: (1) 响应数管发送的图像采集指令, 按照指定的帧频连续成像, 并将数据送入数管系统; (2) 具备参数曝光的功能, 曝光时间、曝光帧数、增益等参



图 5 旋转衍射快照式光谱相机实物图
Figure 5 The diffraction rotational snapshot spectral camera.

数可调; (3) 通过LVDS接口完成图像数据的输出.

3 正样样机定标试验

完成正样样机的搭建后, 还需要开展定标试验, 一方面验证硬件和软件程序是否能正常工作; 另一方面可以通过定标试验了解正样样机的噪声模型、光学退化情况等, 为后续光谱重建算法部分提供指导.

3.1 暗背景定标

由于本正样样机重建光谱的过程是获取低维的编码图像, 随后利用基于神经网络的光谱重建算法从低维空间到高维空间的重建光谱的过程, 因此整个过程对于噪声非常敏感. 为提升图像质量, 对正样样机在不同曝光时间以及不同环境温度下的暗噪声进行定标.

将正样样机置于高低温试验箱中, 并严格遮光, 设置高低温试验箱的温度, 覆盖−40℃–50℃的温度范围. 每次设定试验箱温度并稳定后, 设置不同的曝光时间进行拍摄, 每次连续拍摄60张图像. 将60张图像的后50张取平均作为当前温度和当前曝光时间下的暗背景.

3.2 相机线性度定标

为验证传感器性能, FPGA程序是否准确, 对正样样机的线性度开展定标. 使用宽波段均匀面光源照明标准24色卡, 设置不同的曝光时间进行拍摄, 为减弱噪声的影响, 每个曝光时间拍摄5张图像取平均, 随后减去对应温度的暗背景, 得到这个曝光时间对应的图

像. 在图像中选取若干个亮度均匀的图像块, 并分别计算图像块在R, G, B通道的响应, 分析曝光时间与响应值之间是否满足线性关系.

3.3 光谱响应函数定标

为验证相机Bayer阵列读取的准确性, 了解正样相机对入射光谱的感知范围, 同时也为了后续的光谱重建算法提供数据, 需要对正样相机的相对光谱响应函数开展定标. 使用经过准确计量的单色仪和积分球作为光源, 试验场景如图6所示.

设置单色仪的输出光谱半峰全宽为10 nm, 中心波长从460 nm开始, 以10 nm为间隔递增至910 nm, 同步使用正样相机拍摄积分球出光口. 拍摄过程中以同样的曝光参数拍摄多次取平均, 并去除暗背景干扰, 从图中截取均匀图像块, 得到如图7(a)所示的不同光谱通道响应图像, 并分别计算这些图像R, G, B三个通道的平均值. 使用不同通道的平均值分别除以单色仪在相应通道的光谱辐亮度, 对数据开展最大值归一化, 得到如图7(b)所示的正样相机相对光谱响应函数.

对比图7(b)所得到的实测值与图7(a)CMOS的理论量子效率可以看到, 在400–700 nm处理论与实测基本一致, 说明正样相机的Bayer读取方式准确, 且可以响应480–900 nm光谱. 在其余波段, 我们的相机受到移除CMV4000红外截止片以及添加480–900 nm带通膜的影响, 二者的响应曲线应该不一致.

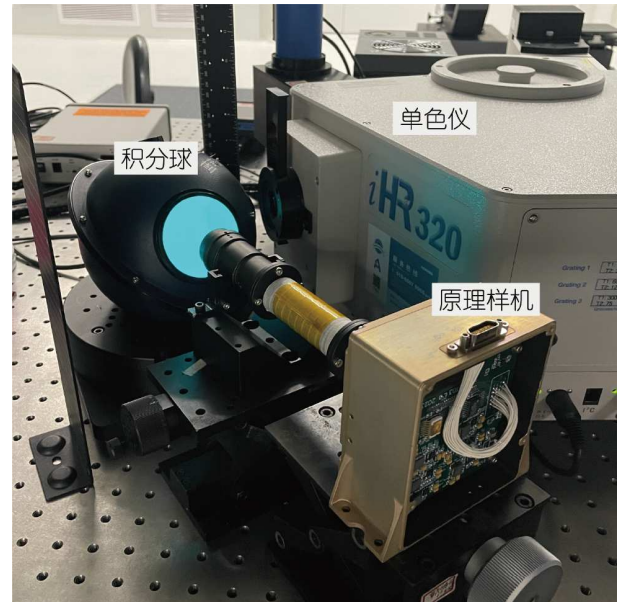


图 6 正样相机光谱响应函数定标系统

Figure 6 Calibration system of the prototype's spectral response function.

3.4 点扩散函数定标

对成像模型进行推导可以从理论上验证方案的可行性, 但是面对实际加工的系统, 还需要考虑镜头像差、DOE以及各类光学元件的加工和装配误差等因素, 因此还需要对正样相机针对无限远目标的PSF进行准确定标, 以了解成像系统真实的退化, 被进一步

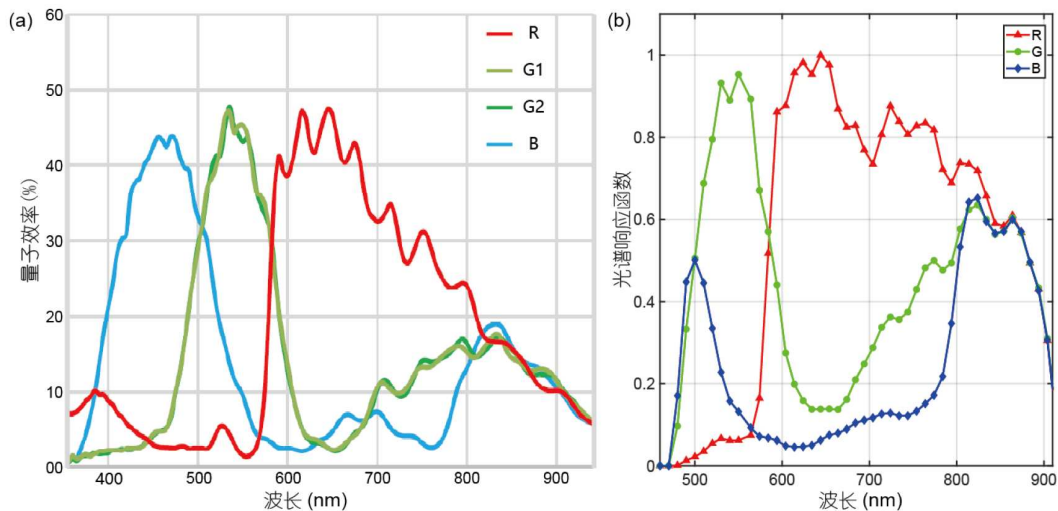


图 7 (a) CMV4000的典型光谱响应; (b) 经过处理得到的相机光谱响应函数

Figure 7 (a) Typical spectral response of CMV4000; (b) camera spectral response function obtained after processing.

用于仿真退化图像, 驱动基于神经网络的光谱重建算法的优化. 为定标成像系统在成像光谱范围内的PSF, 搭建如图8所示的定标系统.

图8中的PSF定标系统由卤素灯杯、匀光片、窄带滤光片、针孔以及准直透镜组成. 卤素灯杯和匀光片用于提供均匀照明, 共有43片窄带滤光片, 中心波长以10 nm为光谱间隔, 覆盖480–900 nm的光谱范围, 其光谱透过率半峰全宽为10 nm. 针孔的直径为50 μm , 放置在焦距为1000 mm的准直透镜的焦平面, 两者一起提供无限远点目标. 定标过程中按顺序切换窄带滤光片, 并调整正样样机的曝光时间至图像最大值占饱和值的70%–90%, 拍摄多张图像并取平均. 图像后处理过程中, 首先减去对应曝光时间和温度的暗背景图案, 随后利用正样样机的线性度, 将所有图像的曝光统一到相同的参数, 得到如图9所示的点扩散函数图像, 为方便展示, 每张图均作最大值归一化处理.

从图9可以看到, 不同光谱通道的PSF均呈现出相

似的两瓣特征, 但是不同的旋转角度, 利用PSF的模糊特征和光谱之间的独特对应关系, 将隐式的光谱先验编码在衍射退化图像的模糊特征中.

用于训练光谱重建网络的仿真退化图像将依赖定标得到的PSF生成, 因此需要确保仿真生成图像与实际成像系统拍摄到的图像退化模型尽可能一致. 理论上43个通道的PSF沿通道维叠加起来可以得到仿真全谱段PSF, 这个仿真全谱段PSF应该与实拍的全谱段PSF尽可能保持一致, 由此出发, 对定标的准确性进行验证. 经过处理后的仿真和实拍全谱段PSF分别如图10所示.

从图10中直观对比看到, 两者的模糊特征, 尤其是特殊的颜色特征保持一致, 更进一步地, 对两者的相似性分别在R, G, B三个颜色通道进行定量评价, 评价结果如表4所示.

从表4中可以看出, 不管从哪个颜色通道进行评价, 实拍与仿真的全谱段点扩散函数相似度指标都很

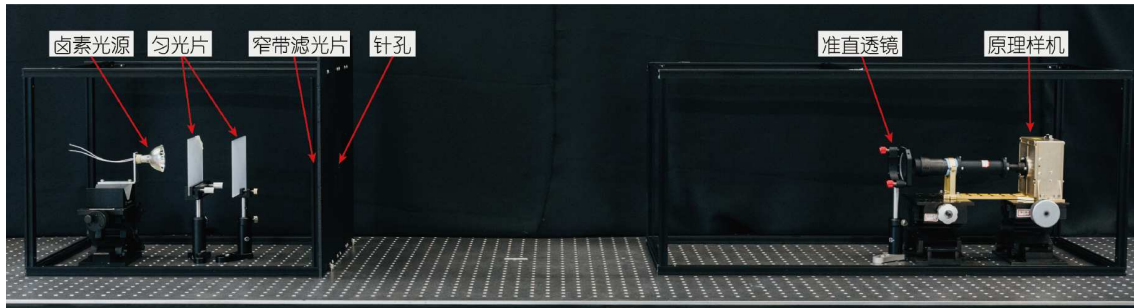


图 8 点扩散函数定标系统

Figure 8 Point spread function calibration system.

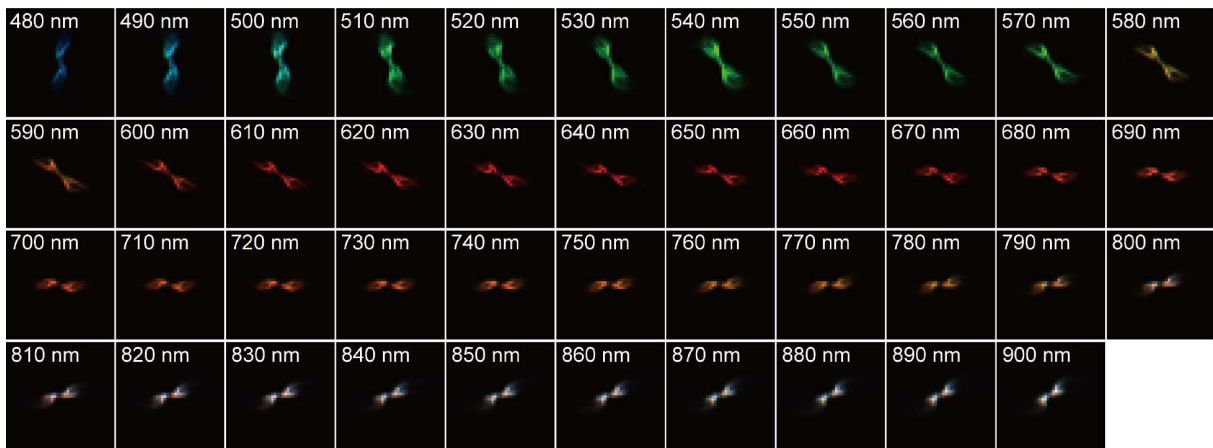


图 9 定标得到各个光谱通道的点扩散函数

Figure 9 Calibrated point spread function in each spectral channel.

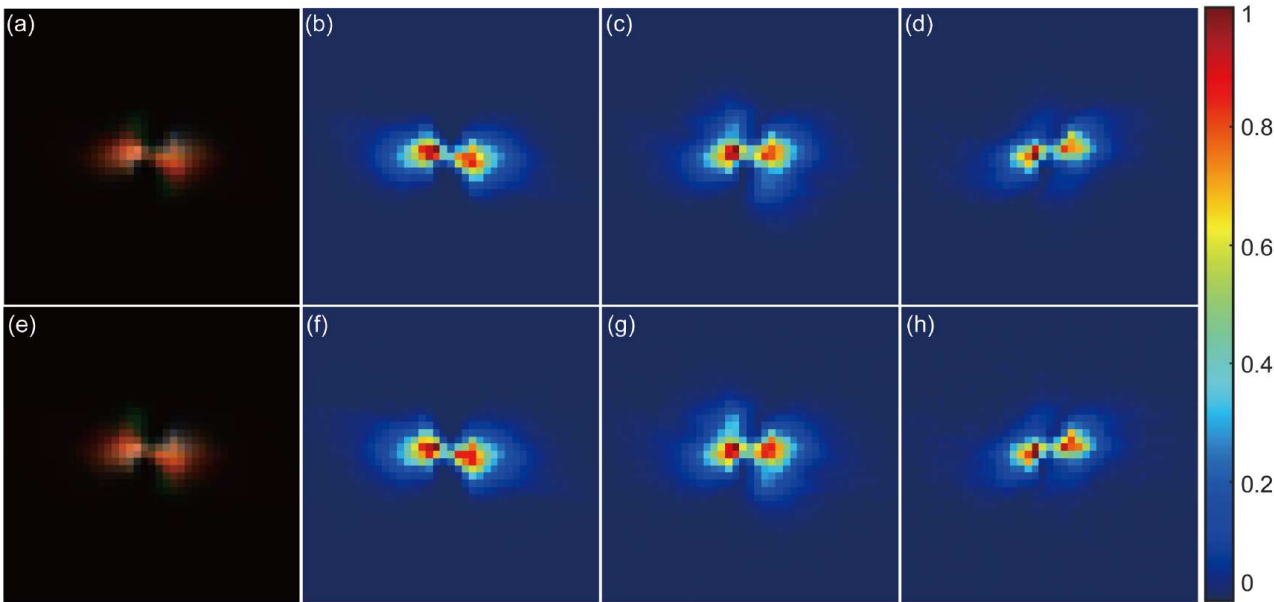


图 10 仿真全谱段PSF与实拍全谱段PSF对比. (a) 仿真全谱段PSF; (b) 仿真全谱段PSF的R颜色通道; (c) 仿真全谱段PSF的G颜色通道; (d) 仿真全谱段PSF的B颜色通道; (e) 实拍全谱段PSF; (f) 实拍全谱段PSF的R颜色通道; (g) 实拍全谱段PSF的G颜色通道; (h) 实拍全谱段PSF的B颜色通道

Figure 10 Comparison between simulated full-spectrum PSF and real-shot full-spectrum PSF. (a) Simulated full-spectrum PSF; (b) R color channel of simulated full-spectrum PSF; (c) G color channel of simulated full-spectrum PSF; (d) B color channel of simulated full-spectrum PSF; (e) real-shot full-spectrum PSF; (f) R color channel of real-shot full-spectrum PSF; (g) G color channel of real-shot full-spectrum PSF; (h) B color channel of real-shot full-spectrum PSF.

表 4 仿真与实拍全谱段PSF相似度定量评价

Table 4 Quantitative evaluation of full-spectrum PSF similarity between simulation and real-shot

颜色通道	PSNR (dB)	SSIM
R	64.3844	0.9994
G	72.3199	0.9998
B	78.7856	1.0000

高, 综合图10和表4可以得出结论, 仿真和实拍的全谱段PSF保持高度一致, 从一定程度上说明定标过程以及对定标所得PSF图像的数据预处理过程准确有效. 后续的数据仿真退化以及光谱重建网络的训练过程将高度依赖这43个光谱通道的PSF.

4 总结与讨论

基于编码-解码的原理, 提出一种基于旋转衍射机理的快照式光谱相机, 并将其应用在天问二号深空探测任务中, 计划对高速运动的小天体开展光谱探测.

本文详细介绍了整个旋转衍射快照式光谱相机的设计方案、成像原理、各项定标试验. 旋转衍射快照式光谱相机由折衍射混合镜头和图像传感器组成, 其中折衍射混合镜头由前置望远系统, 衍射光学元件以及后置镜组组成, 可以缓解传统成像系统中点扩散函数尺寸和系统通光口径之间的矛盾. 整个成像系统具有波长依赖性的点扩散函数, 从而将隐式光谱信息编码在衍射退化图像中. 利用基于神经网络的光谱重建算法, 可以从衍射退化图像中重建光谱信息. 在完成正样样机的研制后, 针对正样样机开展了暗背景、线性度、光谱响应函数以及点扩散函数的定标试验, 并对点扩散函数的定标精度进行初步验证. 结合数据驱动型的光谱重建算法, 可以从正样样机获取的衍射编码图像中重建出场景的光谱信息.

在后续的工作中, 还可以对光谱重建算法进行持续的优化. 本文介绍的载荷具有轻小型、快照式的优点, 将小行星、彗星和其他可能交会的小天体探测中, 快速获取被探测目标的整体形貌和光谱信息, 供科学家们分析.

参考文献

- 1 Zhang Y, Migliavacca M, Penuelas J, et al. Advances in hyperspectral remote sensing of vegetation traits and functions. *Remote Sens Environ*, 2021, 252: 112121
- 2 Li S Y, Liu Z W, Liu K, et al. Advances in application of space hyperspectral remote sensing (invited) (in Chinese). *Infrared Laser Eng*, 2019, 48: 0303001 [李盛阳, 刘志文, 刘康, 等. 航天高光谱遥感应用研究进展(特邀). 红外与激光工程, 2019, 48: 0303001]
- 3 Li J B, Rao X Q, Ying Y B. Advance on application of hyperspectral imaging to nondestructive detection of agricultural products external quality (in Chinese). *Spectrosc Spectr Anal*, 2011, 31: 2021–2026 [李江波, 饶秀勤, 应义斌. 农产品外部品质无损检测中高光谱成像技术的应如何研究进展. 光谱学与光谱分析, 2011, 31: 2021–2026]
- 4 Kulcke A, Holmer A, Wahl P, et al. A compact hyperspectral camera for measurement of perfusion parameters in medicine. *Biomed Tech*, 2018, 63: 519–527
- 5 Cheng A F, Santo A G, Heeres K J, et al. Near-Earth asteroid rendezvous: Mission overview. *J Geophys Res*, 1997, 102: 23695–23708
- 6 Rayman M D, Lehman D H. Deep space one: NASA's first deep-space technology validation mission. *Acta Astronaut*, 1997, 41: 289–299
- 7 Abe M, Takagi Y, Kitazato K, et al. Near-infrared spectral results of asteroid itokawa from the Hayabusa spacecraft. *Science*, 2006, 312: 1334–1338
- 8 Watanabe S, Tsuda Y, Yoshikawa M, et al. Hayabusa2 mission overview. *Space Sci Rev*, 2017, 208: 3–16
- 9 Glassmeier K H, Boehnhardt H, Koschny D, et al. The Rosetta mission: Flying towards the origin of the solar system. *Space Sci Rev*, 2007, 128: 1–21
- 10 Hagen N, Kudenov M W. Review of snapshot spectral imaging technologies. *Opt Eng*, 2013, 52: 090901
- 11 Xu H, Hu H Q, Chen Y T, et al. Review of encoding and reconstruction based snapshot optical spectrometers (in Chinese). *Flight Control Detect*, 2022, 5: 1–11 [徐豪, 胡海泉, 陈跃庭, 等. 基于编码重建的快照式光谱成像技术进展. 飞控与探测, 2022, 5: 1–11]
- 12 Huang L Q, Luo R C, Liu X, et al. Spectral imaging with deep learning. *Light Sci Appl*, 2022, 11: 61
- 13 Gehm M E, John R, Brady D J, et al. Single-shot compressive spectral imaging with a dual-disperser architecture. *Opt Express*, 2007, 15: 14013–14027
- 14 Correa C V, Arguello H, Arce G R. Snapshot colored compressive spectral imager. *J Opt Soc Am A*, 2015, 32: 1754–1763
- 15 Parada-Mayorga A, Arce G R. Colored coded aperture design in compressive spectral imaging via minimum coherence. *IEEE Trans Comput Imag*, 2017, 3: 202–216
- 16 Wu Y, Mirza I O, Arce G R, et al. Development of a digital-micromirror-device-based multishot snapshot spectral imaging system. *Opt Lett*, 2011, 36: 2692
- 17 Tao C, Zhu H, Sun P, et al. Hyperspectral image recovery based on fusion of coded aperture snapshot spectral imaging and RGB images by guided filtering. *Opt Commun*, 2020, 458: 124804
- 18 Meng Z, Ma J, Yuan X. End-to-end low cost compressive spectral imaging with spatial-spectral self-attention. In: *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*. Cham: Springer, 2020. 187–204
- 19 Meng Z, Yu Z, Xu K, et al. Self-supervised neural networks for spectral snapshot compressive imaging. In: *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. Montreal: IEEE, 2021. 2622–2631
- 20 Zheng S, Liu Y, Meng Z, et al. Deep plug-and-play priors for spectral snapshot compressive imaging. *Photon Res*, 2021, 9: B18
- 21 Cai Y, Lin J, Hu X, et al. Mask-guided spectral-wise transformer for efficient hyperspectral image reconstruction. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. New Orleans: IEEE, 2022. 17502–17511
- 22 He W J, Zhao Y S. Spectral reconstruction algorithm of coded aperture MWIR spectral imaging system (in Chinese). *Flight Control Detect*, 2023, 6: 1–9 [贺文俊, 赵雨时. 编码孔径中红外光谱成像系统的光谱重构算法. 飞控与探测, 2023, 6: 1–9]
- 23 Hauser J, Zeligman A, Averbuch A, et al. DD-net: Spectral imaging from a monochromatic dispersed and diffused snapshot. *Appl Opt*, 2020, 59: 11196
- 24 Toivonen M E, Rajani C, Klami A. Snapshot hyperspectral imaging using wide dilation networks. *Mach Vis Appl*, 2021, 32: 9
- 25 Jeon D S, Baek S H, Yi S, et al. Compact snapshot hyperspectral imaging with diffracted rotation. *ACM Trans Graph*, 2019, 38: 1–13
- 26 Hu H, Zhou H, Xu Z, et al. Practical snapshot hyperspectral imaging with DOE. *Opt Lasers Eng*, 2022, 156: 107098
- 27 Xu N, Xu H, Chen S, et al. Snapshot hyperspectral imaging based on equalization designed DOE. *Opt Express*, 2023, 31: 20489–20504

- 28 Xu H, Yang J, Hu H, et al. Fast non-iterative blind restoration of hyperspectral images with spectrally-varying PSFs. *Opt Commun*, 2023, 530: 129163
- 29 Xu H, Hu H, Chen S, et al. Hyperspectral image reconstruction based on the fusion of diffracted rotation blurred and clear images. *Opt Lasers Eng*, 2023, 160: 107274
- 30 Bian L, Wang Z, Zhang Y, et al. A broadband hyperspectral image sensor with high spatio-temporal resolution. *Nature*, 2024, 635: 73–81
- 31 Arad B, Timofte R, Ben-Shahar O, et al. Ntire 2020 challenge on spectral reconstruction from an RGB image. In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Seattle: IEEE, 2020. 446–447
- 32 Arad B, Timofte R, Yahel R, et al. Ntire 2022 spectral recovery challenge and data set. In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New Orleans: IEEE, 2022. 863–881
- 33 Zhang W, Song H, He X, et al. Deeply learned broadband encoding stochastic hyperspectral imaging. *Light Sci Appl*, 2021, 10: 108
- 34 Zhu Y, Lei X, Wang K X, et al. Compact CMOS spectral sensor for the visible spectrum. *Photon Res*, 2019, 7: 961–966
- 35 Oh S W, Brown M S, Pollefeys M, et al. Do it yourself hyperspectral imaging with everyday digital cameras. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas: IEEE, 2016. 2461–2469
- 36 Xu H, Chen S, Hu H, et al. Wavelength encoding spectral imaging based on the combination of deeply learned filters and an RGB camera. *Opt Express*, 2024, 32: 10741–10760

Design and calibration verification of the diffraction rotational snapshot spectral camera on the Tianwen-2 mission

ZHUGE Zhengyue, JIANG Tingting, BIAN Meijuan, XU Hao, XU Nan, LI Qi* & XU Zhihai*

College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

**Corresponding authors (LI Qi, email: liqi@zju.edu.cn; XU Zhihai, email: xuzh@zju.edu.cn)*

In the Tianwen-2 exploration mission, a spectral camera based on the diffracted rotation is deployed to capture the overall morphology and spectral information of the detected target at the moment of encounter with asteroids and other celestial bodies. The camera utilizes a diffractive optical element to encode the phase of incident light, resulting in point spread functions (PSFs) of different wavelengths exhibiting a similar shape while the PSFs rotates as the wavelength changes. These wavelength-dependent PSFs, acting as spectral priors for the imaging system, facilitate the reconstruction of spectral data from encoded images. This paper focuses on the design of the refractive-diffractive hybrid optical system and the calibration of the imaging system. The calibrated PSFs show strong consistency with the theoretically designed PSFs, confirming the accuracy and effectiveness of the calibration process and image data preprocessing.

spectral imaging, Tianwen-2, snapshot, diffractive optical element, image reconstruction

PACS: 07.07.Df, 07.05.Pj, 07.05.Mh, 42.30.Kq

doi: [10.1360/SSPMA-2025-0003](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0003)