

新型深空高光谱衍射计算成像探测技术 (特约)

范 斌¹, 刘彦丽^{1*}, 赵海博¹, 徐 婧¹, 孙权森², 王 旭²

- (1. 北京空间机电研究所 先进光学遥感技术北京市重点实验室, 北京 100094;
2. 南京理工大学 计算机科学与工程学院, 江苏南京 161000)

摘 要: 光谱成像技术是深空探测领域的重要技术手段, 可服务于多种空间科学实验。针对深空探测领域对光谱载荷的高稳定性、高光利用率的需求, 提出一种新型深空高光谱衍射计算成像探测技术, 将衍射光谱成像技术和光场成像技术结合, 解决衍射光谱推扫成像系统中探测器需要大范围扫描问题, 实现一次拍照获取目标空间信息和光谱信息, 即快照式成像。这对未来深空探测高光谱成像仪的设计和具有指导意义。

关键词: 深空探测; 衍射光谱; 光场成像; 计算成像

中图分类号: TP79 文献标志码: A DOI: 10.3788.IRLA20201005

A new deep space hyperspectral diffraction computational imaging detection technology(*Invited*)

Fan Bin¹, Liu Yanli^{1*}, Zhao Haibo¹, Xu Jing¹, Sun Quansen², Wang Xu²

- (1. Beijing Key Laboratory of Advanced Optical Remote Sensing Technology, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;

2. School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 161000, China)

Abstract: Spectral imaging technology is an important technical means in the field of deep space exploration and can serve a variety of space scientific experiments. Aiming at the demand of high stability and high light utilization of spectral loads in the field of deep space exploration, a new deep space hyperspectral diffraction computational imaging detection technology was proposed. Combining diffraction spectrum imaging technology and light field imaging technology to solve the problem of large-scale scanning of the detector in the diffraction spectrum push-broom imaging system, and one shot was realized to obtain the target spatial information and spectral information, that is, snapshot imaging. This has guiding significance for the design and research of deep space exploration hyperspectral imagers.

Key words: deep space exploration; diffraction spectrum; light field imaging; computational imaging

收稿日期: 2020-02-03; 修订日期: 2020-03-20

作者简介: 范斌 (1972-), 女, 研究员, 博士, 主要从事空间遥感器设计方面的研究。Email: fanb_bisme@163.com

通讯作者: 刘彦丽 (1989-), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向为计算光谱成像技术。Email: yanliliu214@163.com

0 引言

光谱成像技术是深空探测领域的重要技术手段,可服务于多种空间科学实验。我国在《2016—2030 年空间科学规划研究报告》以及 2030 年国家重大专项中明确了深空探测的重要性。在深空探测领域,光谱载荷的数量比例达到了近 50%。光谱成像技术的研究对于深空探测具有重要的研究价值和应用前景。

衍射光谱成像技术的核心元件为衍射光学元件,可同时提供空间成像和光谱色散功能,不同于传统的狭缝式色散成像光谱仪垂直于光轴方向色散,衍射光学元件沿轴向色散,采用常规探测器沿着光轴进行扫描探测,通过光谱解耦得到目标的光谱图像数据立方体^[1]。目前,衍射成像光谱仪可工作在可见近红外、中波和长波谱段^[2-4]。衍射光谱成像技术直接星载应用存在的缺陷是:光谱扫描为分时成像,无法满足动态目标的探测;需要探测器轴上扫描,运动部件的引入降低了系统可靠性;光谱分辨率越高,数据量越大,数据下行难度较大。因此这种轴向移动扫描成像的方式是不适合在轨面阵光谱成像的。此外,在实际光学系统中,仅有衍射光学透镜通常是不够的,还需要增加校正镜组用于消除像差,单靠衍射镜色散成像是现实的。

针对星载应用时衍射光谱需要“轴向扫描”这一缺陷,需要通过一项技术对衍射主镜光谱进行一次记录,从而避免扫描。目前使用衍射透镜的压缩光谱成像技术仍需进行两次测量重建三维光谱立方体^[5]。光场成像技术的出现为衍射成像光谱仪的应用拓展提供了一种新的解决思路。光场成像通过在传统相机中加入微透镜阵列实现了光线空间和角度信息的同时获取。“微透镜阵列+探测器”共同记录了一束光线的强度与方向,即“光矢量”,得到整个光场三维结构,采用数字重聚焦可得到任意平面的切片,这样就可以做到抛弃移动扫描部件,实现实时静态光谱成像。因此文中提出一种新型深空高光谱衍射计算成像探测技术,可以用于深空目标探测,实现目标空间光谱信息的同时获取。通过理论分析、系统模型设计和系统仿真实验,验证了技术原理的正确性和可行性。这为低成本和简单设计的高分辨率光谱成像开辟了新的可能性。

1 高光谱衍射计算成像技术基本原理

衍射光谱成像系统的主要部件是衍射透镜,其作用类似于成像透镜,不仅能对入射光聚焦成像,还能依据衍射原理产生轴向色差。衍射透镜产生色差的有效焦距与波长成反比^[6]:

$$f(\lambda) = \frac{\lambda_0 f_0}{\lambda} \quad (1)$$

式中: f_0 是设计波长 λ_0 的焦距,为设计焦距。

传统的狭缝式色散成像光谱仪的光栅色散是垂直光轴方向的,而衍射光谱仪不同,如图 1 所示,衍射透镜沿轴向色散,衍射透镜在衍射光谱仪中同时提供空间成像和光谱色散功能。采用常规探测器与衍射透镜平行,沿着光轴进行扫描探测。每个扫描位置对应目标特定的光谱波长,记录每个图像和相应的扫描位置。探测器采集的图像是一个光谱波长的准焦图像和其余相邻光谱波长在这个位置离焦图像的叠加,离焦分量的存在导致探测器采集的图像是模糊的图像。沿着光轴移动扫描,可获得不同波长焦平面位置的模糊叠加图像。采用光谱的谱段解耦算法处理,去除多余的模糊成分,从而改善成像仪的空间和光谱分辨率,得到目标场景的光谱图像数据立方体,如图 2 所示。

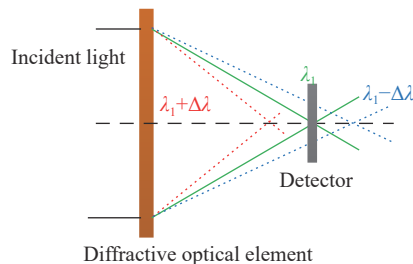


图 1 衍射光学元件色散示意图

Fig.1 Schematic diagram of diffractive optical element dispersion

光场成像是计算光学成像领域的一个重要分支,近几年的研究越来越多^[7-8]。如图 3 所示,传统相机由镜头和探测器组成,对目标直接成像,也就是“所见即所得”。而光场相机成像方式有所不同,在传统相机的探测器前面增加了微透镜阵列,微透镜阵列位于主镜系统焦面前后,实现光线记录,后期处理只需要对光线进行重新追迹即可数字重聚焦^[9]。光场成像基于空间复用,同时记录光线的空间 (x, y) 和角度信息 (u, v) ,不同焦深的图像做不同情况下的二维积分,捕

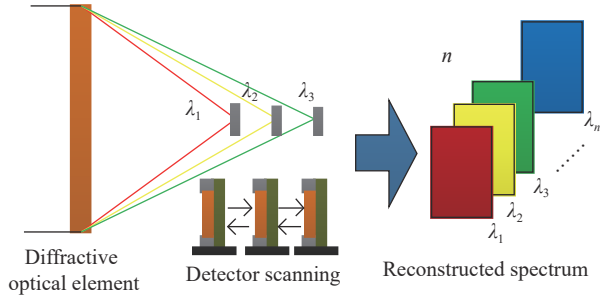


图 2 衍射光谱成像示意图

Fig.2 Schematic diagram of diffraction spectrum imaging

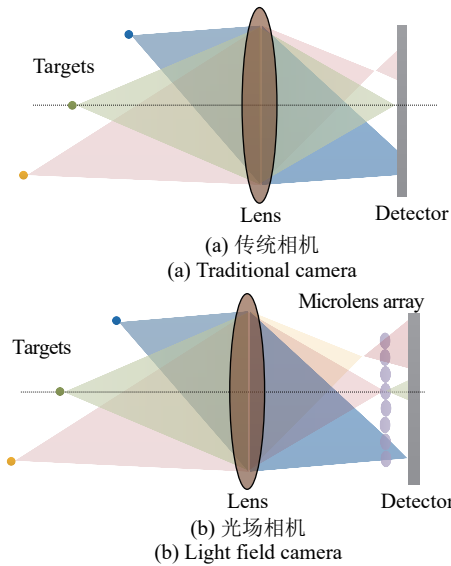


图 3 传统相机与光场相机成像原理示意图

Fig.3 Imaging principle of traditional camera and light field camera

获的四维光场数据可生成多视角图像,可以对其进行进一步处理以生成深度图。因此,光场相机相对于传统相机拥有更大景深,同时,在单次快照中,可以实现

数字图像重新聚焦和三维重建。

2 高光谱衍射计算成像系统模型

新型高光谱衍射计算成像探测技术将衍射光谱成像与光场成像概念有机结合,该系统方案的特殊性在于光场成像可以有效利用衍射成像沿光轴方向光谱色散的特点,实现衍射光谱的一次成像全部获取,弥补了衍射光谱需要沿轴向扫描获取全谱段光谱信息的劣势。

如图 4 所示,基于光场计算的高分辨率、高光谱衍射光学载荷在总体上采用如上结构,系统由衍射主镜、光学光场采集镜头、微透镜阵列和成像探测器四个部分组成,其中光场采集镜头、微透镜阵列和成像探测器构成光场传感器。每一个微透镜对应多个探测器像素,透过衍射主镜沿轴线色散,经光场镜头的折射,可以将景物的光谱影像聚集到微型镜头数组前,透过其上的微型镜头会将此聚集的影像再成像,并投射到高像素影像传感器得到混叠的图谱信息。图像复原包含两部分,光场重聚焦部分和光谱解耦部分。具体为根据先验信息,基于光场重聚焦算法开展深度估计,得到分别聚焦于不同位置的模糊光谱切片,基于三维反卷积光谱解耦技术来去掉叠加的其他谱段的离焦信息,获得清晰的光谱图像信息。如图 5 所示,以单谱段英文字母“CAST”为例,分别为 650、580、550 和 480 nm,通过系统所成的图像为混叠模糊图像,通过光场重聚焦算法开展深度估计,得到分别聚焦于不同位置的四幅模糊光谱切片,经过光谱解耦算法,去掉叠加的其他谱段的离焦信息,获得清晰的

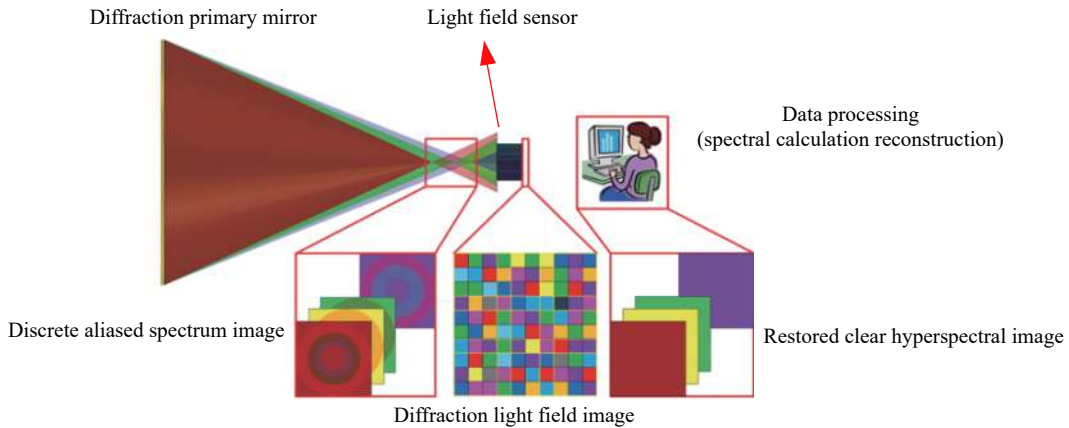


图 4 新型高光谱衍射计算成像探测系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of a new hyperspectral diffraction computational imaging detection system

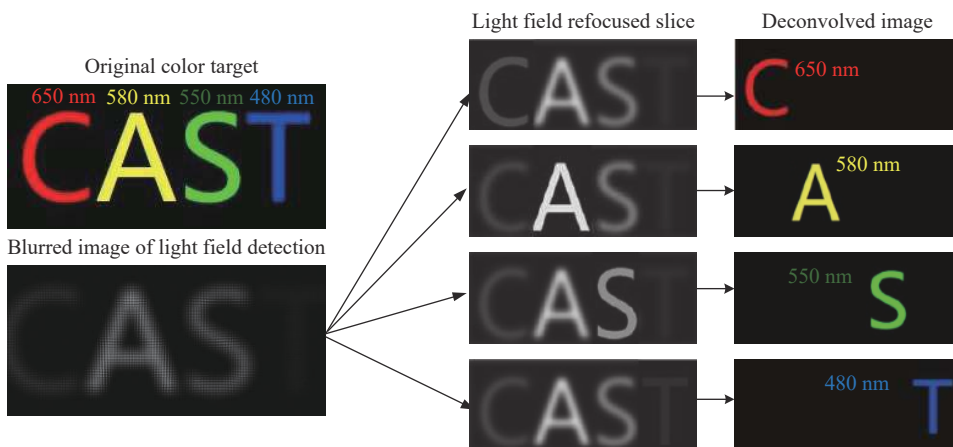


图 5 系统成像复原示意图

Fig.5 System imaging recovery diagram

单光谱图像。

3 高光谱衍射计算成像系统仿真和实验验证

为了验证提出的新型高光谱衍射计算成像探测技术原理可行性,文中对全波段高精度衍射光谱解耦技术和光场数字重构技术开展仿真及验证。首先建立系统光谱图像函数的量化模型。

衍射成像光谱仪中的三维物体空间是二维空间和一维光谱,衍射透镜将物体的光谱信息转换为图像中的第三空间维,表示为 $z(\lambda)$,从而生成相似的三维空间立方体图像 $x, y, z(\lambda)$ 。用三维矩阵代表目标、图像、点扩散函数的成像模型量化方程如下:

$$i(x_i, y_i, z_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(x, y, z) h(x_i - x, y_i - y, z_i - z) dx dy dz \quad (2)$$

由于探测器采集的图像是一个波长的聚焦图像与其他波长的离焦图像的叠加。对于三个目标(object)成像,探测器采集的图像是Image₁、Image₂和Image₃,每个图像是三个光谱图像的总和,每个图像都建模为目标与其点扩展函数 $psf_{\Delta z, \lambda}$ 卷积。 psf 的第一个下标是以 z 为单位测量的散焦量(0为准焦,1为距准焦点为 Δz ,2为距准焦点为 $2\Delta z$),第二个下标为波长^[10]。目标成像方程可扩展为:

$$\begin{aligned} Image_1 &= psf_{0,\lambda 1} * object_{\lambda 1} + psf_{1,\lambda 2} * object_{\lambda 2} + psf_{2,\lambda 3} * object_{\lambda 3} \\ Image_2 &= psf_{1,\lambda 1} * object_{\lambda 1} + psf_{0,\lambda 2} * object_{\lambda 2} + psf_{1,\lambda 3} * object_{\lambda 3} \\ Image_3 &= psf_{2,\lambda 1} * object_{\lambda 1} + psf_{1,\lambda 2} * object_{\lambda 2} + psf_{0,\lambda 3} * object_{\lambda 3} \end{aligned} \quad (3)$$

针对文中提出的高光谱衍射计算成像系统,目标光线经过衍射成像系统后,在不同的光轴位置形成各个波段的光谱图像,形成成像空间,光场仿真通过已知的单波段图像以及各波段的成像位置计算获取探测器采集的光场图像,进而获取成像空间的光场分布。将多个波段图像分别进行光场构建并叠加,即获得了全波段图像的光场信息。

光场重聚焦仿真以光场采样仿真数据为输入,输出获得解耦计算之前的光谱图像,图像的光谱以及空间分辨率特性直观反映前端衍射成像以及光场探测系统的结构参数对光谱探测效果的影响。文中选取八个波段,光谱范围为410~550 nm,在一定波段间隔光程下进行复原仿真,其中微透镜阵列的方向采样数为5,微透镜个数为34×34,原始参考图及得到的光场采样图像如图6(a)、(b)所示,参考光谱图、光场重聚焦得到的模糊切片以及经过光谱解耦算法得到的光谱复原图如图7所示。

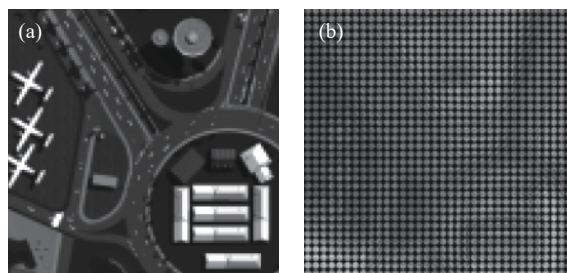


图 6 (a) 原始参考图, (b) 光场采样仿真图

Fig.6 (a) Original reference image, (b) Light field sampling simulation diagram

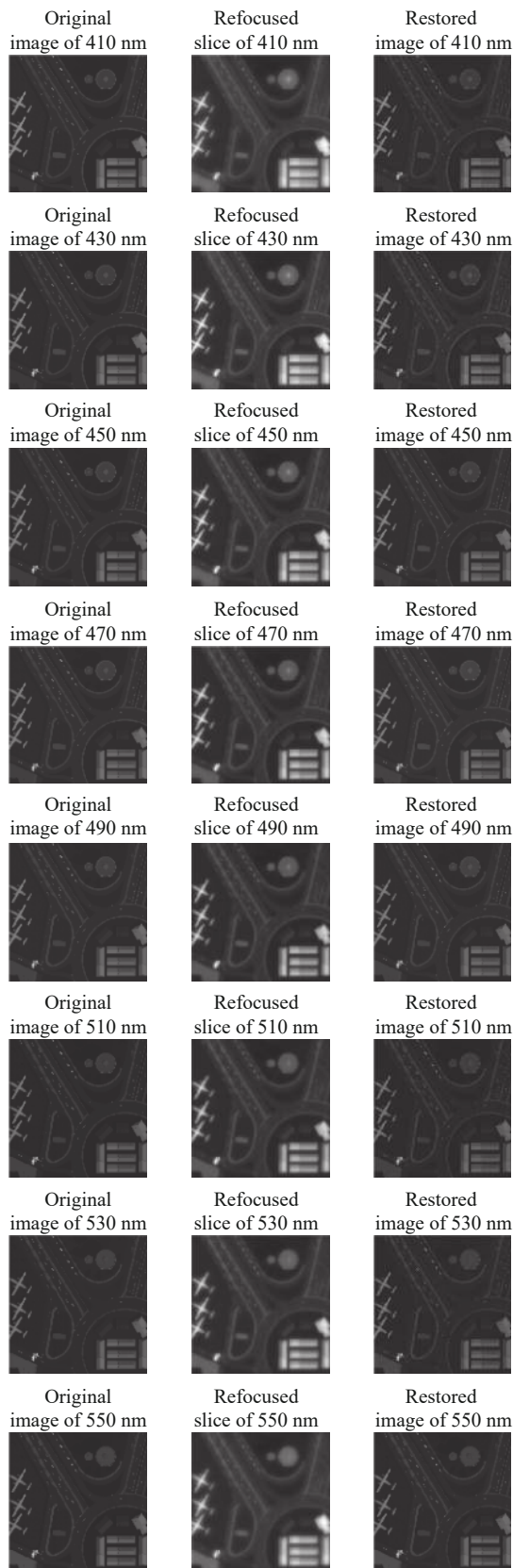


图 7 410~550 nm 谱段光谱解耦复原图

Fig.7 Spectral decoupling recovery map of 410-550 nm

高光谱图像的重建结果质量评价可以从空间维和光谱维两个方面进行。对于空间维,光谱解耦复原图相较于光场重聚焦的混叠切片图,清晰度有明显的提升,与参考图相比复原内容基本一致。在空间维,计算 PSNR, 410 ~550 nm 这八个波段经过平移后的复原结果的 PSNR 值分别为: 39.995 1、46.867 2、39.820 3、47.634 5、47.349 9、45.107 7、46.178 3、44.577 1。平均 PSNR 值均值超过 44.69 dB, 空间分辨率得到明显提升。

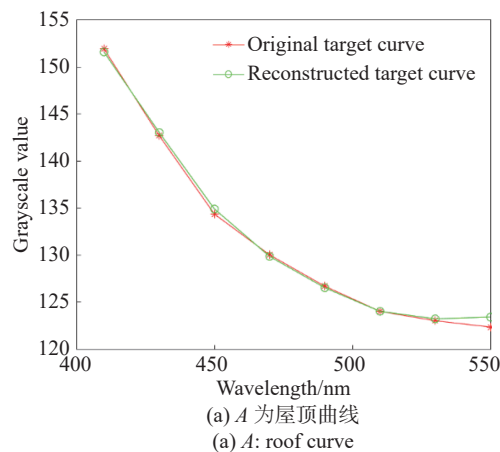
对于光谱维,绘制光谱曲线,观察利用参考图像与重构图像绘制的光谱曲线的变化趋势和拟合程度。如图 8 所示选取 A、B、C、D, 4 个点, 分别表示屋顶、飞机、柏油路、草地。绘制的 4 个目标点的光谱曲线如图 9 所示。

可以看到,复原结果中所选目标区域的光谱曲线和参考图的光谱曲线的变化趋势基本一致,细节上存在细微的差异,光谱一致性达到了 90% 以上。可以说明,通过光场重聚焦技术及光谱解耦技术的仿真及实验验证,新型高光谱衍射计算成像探测技术可同时



图 8 选取目标

Fig.8 Selected targets



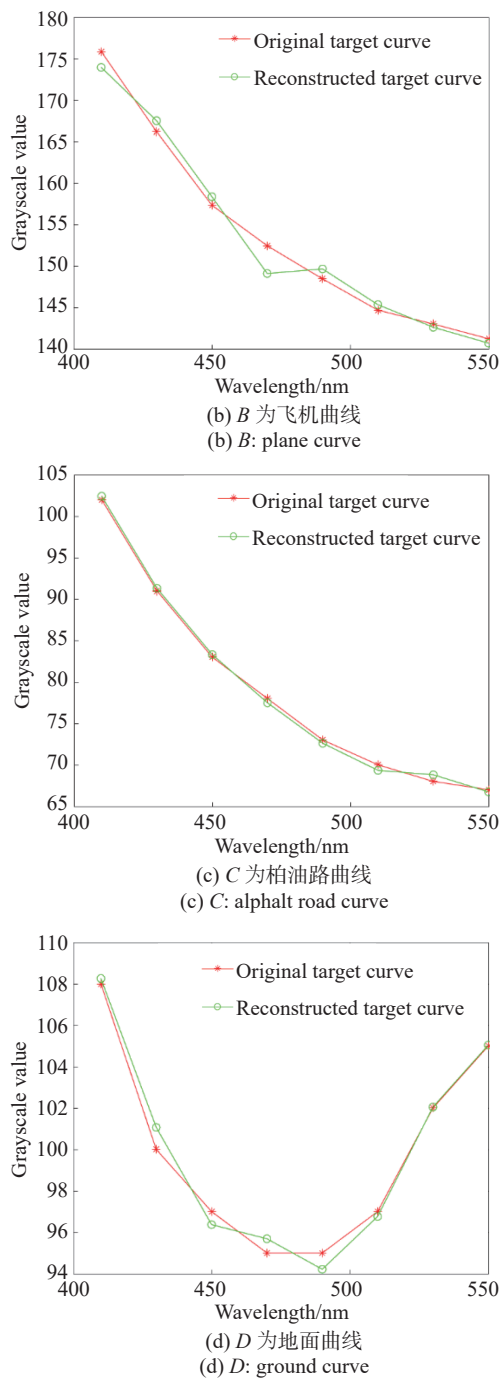


图 9 不同目标的光谱曲线对比

Fig.9 Comparison of spectral curves of different targets

实现二维空间信息和一维光谱信息的同步获取,并能做到高精度的光场重构和光谱解耦。

4 结 论

文中针对深空探测领域对载荷的高稳定性、高光

利用率的需求,提出一种新型深空高光谱衍射计算成像探测技术,通过引入三维光场成像技术,实现衍射轴线色散范围内不同混叠光谱切片的数字重聚焦,解决衍射光谱推扫成像系统中探测器轴向大范围的扫描带来的系统不稳定和不可靠问题。文章通过技术原理分析、系统成像模型设计和成像仿真,验证了系统原理的正确性和可行性。相对于传统棱镜或光栅式光谱成像系统,新型深空高光谱衍射计算成像探测技术具有面阵成像一次获取二维空间信息和一维光谱信息的独特优势,未来可在深空探测领域具有广泛应用前景。

参 考 文 献:

- [1] Lyons D M, Kevin J W. DOE in DOIS: a diffractive optic image spectrometer[C]// Proc SPIE, 1996, 2689: 175-185.
- [2] David Kryskowski, Justin Renken. Longwave multispectral diffractive optic imaging spectrometer[C]// Proc SPIE, 2009: 7334.
- [3] Neelam Gupta. LWIR hyperspectral imager based on a diffractive optics lens[C]// Proc SPIE, 2009: 7303.
- [4] Skidanov R V, Blank V A, Morozov A A. Study of an imaging spectrometer based on a diffraction lens [J]. *Computer Optics*, 2015, 39(2): 218-223.
- [5] Oğuzhan Fatih Kar, Figen S Oktem. Compressive spectral imaging with diffractive lenses [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(18): 4582-4585.
- [6] Lyons D M. Image spectrometry with a diffractive optic[C]//Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 1995, 2480: 123-131.
- [7] Charlotte Herzog, Xavier Granier, Fabrice Harms, et al. Study of contrast variations with depth in focused plenoptic cameras [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(19): 4825-4828.
- [8] Lin R J, Su V, Wang S, et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging [J]. *Nat Nanotechnol*, 2019, 14: 227-231.
- [9] Favaro P. A Split-sensor light field camera for extended depth of field and superresolution[C]// Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering, 2012, 8436: 972-986.
- [10] Lyons D M, Whitcomb K J. Image reconstruction algorithms for DOIS: a diffractive optic image spectrometer[C]//Proc SPIE, 1996: 2758.