



# 航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

中国科技核心期刊

## 反射式紫外天基单镜计算成像系统设计

卞殷旭 张超 于钱 彭吉龙 沈华 朱日宏

## Computational imaging system of single mirror for space solar ultraviolet observation

BIAN Yinxu, ZHANG Chao, YU Qian, PENG Jilong, SHEN Hua, ZHU Rihong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2021.02.013>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 空间太阳极紫外无狭缝光谱成像技术综述

Review of slitless spectral imaging technologies for space solar extreme-ultraviolet observation

航天器环境工程. 2018, 35(5): 450–456 <https://doi.org/10.12126/see.2018.05.008>

#### 太阳极紫外成像仪光学系统研制

Development of an optical system for solar extreme ultraviolet (EUV) imaging telescope

航天器环境工程. 2019, 36(4): 393–397 <https://doi.org/10.12126/see.2019.04.016>

#### 某遥感卫星微振动对成像质量影响分析

Influence of micro-vibration on image quality of a remote sensing satellite

航天器环境工程. 2019, 36(1): 47–55 <https://doi.org/10.12126/see.2019.01.008>

#### 基于小孔成像技术的中能电子成像谱仪及其空间观测结果

An imaging spectrometer for energetic electrons based on pin-hole imaging technique and its space observations

航天器环境工程. 2018, 35(4): 307–314 <https://doi.org/10.12126/see.2018.04.001>

#### 光学遥感卫星杂散光扫描测试系统测控设计

Design of measurement and control for stray light scanning test system of optical remote sensing satellite

航天器环境工程. 2017, 34(2): 195–201 <https://doi.org/10.12126/see.2017.02.015>

#### 天基激光驱动空间碎片降轨效果仿真研究

Simulation of space debris de-orbiting by space-based laser ablation

航天器环境工程. 2018, 35(3): 217–222 <https://doi.org/10.12126/see.2018.03.003>

# 反射式紫外天基单镜计算成像系统设计

卞殷旭<sup>1</sup>, 张超<sup>1</sup>, 于钱<sup>2</sup>, 彭吉龙<sup>2</sup>, 沈华<sup>1</sup>, 朱日宏<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094; 2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 紫外天基成像是目前对太阳观测的主要手段之一。针对紫外天基遥感对成像系统高分辨、轻量化的需求, 开展了紫外天基单镜计算成像系统研究, 应用“光学镜面设计”与“计算成像”相结合的思路, 通过对球面、六次偶次非球面、十次偶次非球面、Q-type 面、Zernike 多项式面的天基反射镜成像光学系统设计, 以及基于傅里叶叠层超分辨的计算成像分析, 验证了该设计方法可在波长 135 nm 紫外光波段实现 5.4° 圆视场、分辨能力优于 0.11 mm 的设计指标。反射式六次偶次非球面具备一定的综合优势。

**关键词:** 天基遥感; 单镜成像; 计算成像; 光学设计; 图像重构

中图分类号: O438; TP751

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2021)02-0193-07

DOI: [10.12126/see.2021.02.013](https://doi.org/10.12126/see.2021.02.013)

## Computational imaging system of single mirror for space solar ultraviolet observation

BIAN Yinxu<sup>1</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>, YU Qian<sup>2</sup>, PENG Jilong<sup>2</sup>, SHEN Hua<sup>1</sup>, ZHU Rihong<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,  
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The space-based ultraviolet imaging is one of the principal approaches for the solar observation. In order to meet the requirements of the high resolution and lightweight imaging for the ultraviolet space-based remote sensing system, the single mirror computational imaging system for the space-based ultraviolet remote sensing is studied in this paper. By combining the idea of the “optical mirror design” and the “computational imaging”, the optical system design using the spherical surface, the sixth-order even order aspheric surface, the tenth-order even order aspheric surface, the Q-type surface, and the Zernike polynomial surface are carried out, respectively, together with the computational imaging based on the Fourier lamination super-resolution. It is shown that the designed systems with the algorithmic image reconstruction can achieve a circular field view up to 5.4° and a resolution better than 0.11 mm at the ultraviolet wavelength of 135 nm. The reflective sixth-order even order aspheric surface system enjoys certain comprehensive advantages.

**Keywords:** space-based remote sensing; single mirror imaging; computational imaging; optical design; image reconstruction

收稿日期: 2020-09-11; 修回日期: 2021-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 62005120); 南京理工大学自主科研专项 (编号: 30919011261); 江苏省基础研究计划项目 (编号: BK20190456, BK20201305); 北京卫星环境工程研究所创新基金项目 (编号: CAST-BISEE 2019-038)

引用格式: 卞殷旭, 张超, 于钱, 等. 反射式紫外天基单镜计算成像系统设计[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(2): 193-199

BIAN Y X, ZHANG C, YU Q, et al. Computational imaging system of single mirror for space solar ultraviolet observation[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, 38(2): 193-199

## 0 引言

太阳是天基遥感观测的重要目标,耀斑、冕洞等太阳活动会影响空间电磁环境,进而影响卫星空间通信、数据传输、导航与定位系统等。这些太阳活动现象在极紫外波段存在明显响应,而由于大气层对紫外波段的强烈吸收,使得极紫外观测只能在空间进行,因此紫外天基成像是目前对太阳观测的主要手段之一。相较于普通成像系统,天基遥感对系统的轻量化和稳定性提出了更高的要求。自由曲面/非球面可校正像差,同时可使成像系统的镜片数量大大缩减,有利于系统的集成化和轻量化,已经被越来越多地应用于天基反射镜成像光学系统的设计<sup>[1-5]</sup>。

随着天基天文观测、天基载荷对地遥感等领域对高分辨、远距离探测的不断追求,光学系统的设计愈加困难,其中在硬件层面,大口径、复杂面形等技术已遇到发展瓶颈,难以再通过几何光学设计来实现更高分辨率、更远距离探测。随着计算机图像处理技术的兴起,“先拍照后处理”的计算成像方法逐渐成为实现高分辨率探测的优选方法之一。2011年, Schuler 等<sup>[6]</sup>通过自制的单透镜相机结合他们提出的图像复原算法复原了一张模糊的图片;之后相继出现多种图像复原算法结合单透镜相机实现清晰成像的报道<sup>[7-11]</sup>。2017年,国防科技大学 Li Weili 等<sup>[12]</sup>用双片镜系统替代单透镜,实现了色差矫正。2018年,中国科学院光电研究院谭政等<sup>[13]</sup>设计了一种三镜片计算成像系统结合数字图像处理技术,对光学成像系统的彗差和像散的数字后处理矫正效果显著,其成像性能与传统的6片球面镜光学系统相当。2018年,美国南加州大学 Sahin 等<sup>[14]</sup>设计了一款只有4片镜片、全视场为120°的超广角相机,在前期设计上放宽了对畸变的约束,转而利用图像后处理技术对前期设计的残留像差进行补偿优化,可在极大简化系统复杂度的同时实现高性能光学成像。但现阶段简单光学系统与计算成像技术的结合仍无法完全实现高性能复杂光学系统成像质量的效果。

本文应用“光学镜面设计”与“计算成像”相结合的思路,对紫外天基单镜计算成像系统进行设计

与仿真:分别对几种不同面形的天基反射镜成像光学系统进行设计,分析它们的成像结果;基于傅里叶叠层成像原理,对紫外天基单镜计算成像系统进行仿真分析,对比单镜成像和计算成像的结果,验证本文方法的可行性。

## 1 紫外天基单镜远摄系统镜面设计

### 1.1 设计指标

紫外单镜远摄系统的设计指标如表1所示。根据该设计指标,分别进行了球面、六次偶次非球面、十次偶次非球面、Q-type面以及Zernike多项式面的天基反射镜成像光学系统设计。

表1 紫外单镜远摄系统设计指标  
Table 1 Design indexes of the ultraviolet single mirror telephoto system

视场	5.4°圆视场
分辨率/(°)	0.026
通光孔径/mm	120
焦距/mm	253
波长/nm	135
传感器直径/mm	24.5
中心视场分辨能力/mm	0.114 8
边缘视场分辨能力/mm	0.115

### 1.2 各面形设计结果

#### 1.2.1 球面

由球面反射镜物像位置公式  $1/l' + 1/l = 2/r$  可知,由于物距  $l$  为无穷远,故反射镜曲率半径  $r$  为像距  $l'$  的2倍,即  $r = 2l'$ 。球面单镜成像系统的基本设计参数如表2所示,其中面形半径参数数值前的负号表示球面反射镜的弯曲方向与光线入射方向相反,下同。

表2 球面单镜成像系统基本设计参数  
Table 2 Basic design parameters of spherical single mirror imaging system

面形半径/mm	-506
尺寸外直径/mm	120
尺寸内直径/mm	—
圆锥系数	0

图1和图2分别为球面单镜成像系统3D光路图和设计结果点列图。由图2可以看出,0°、1.0°、2.7°视场的点列图半径分别为290.9、225.8、347.9 μm,均未达到系统分辨率的设计指标,视场球差均较为明显,大视场会带来明显彗差。因此,单反射镜成像系统需要利用非球面设计来校正像差。

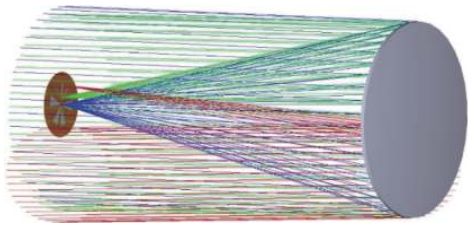


图 1 球面单镜成像系统 3D 光路图

Fig. 1 3D optical path of the spherical single mirror imaging system

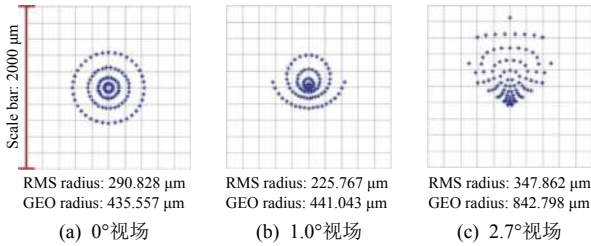


图 2 球面单镜成像系统点列图

Fig. 2 Spot diagram of the spherical single mirror imaging system

1.2.2 六次偶次非球面

六次偶次非球面系统基本设计参数如表 3 所示。本设计的所有非球面面形的圆锥系数均取为-1，基础面形接近抛物面，可对无限远的轴上物点完善成像。

表 3 六次偶次非球面系统基本设计参数

Table 3 Basic design parameters of sixth-order even order aspheric system

面形半径/mm	-506.02
尺寸外直径/mm	120
尺寸内直径/mm	—
圆锥系数	-1
二阶系数	0
四阶系数	$-3.2 \times 10^{-10}$
六阶系数	$1.27 \times 10^{-13}$

图 3 和图 4 分别为六次偶次非球面系统 3D 光路图和设计结果点列图。由图 4 可以看出，0°、1.0°、2.7°视场的点列图 RMS 半径分别为 97.4、135.6、135.6 μm，小视场内均达到分辨率设计指标。需要说明的是，非球面与球面的铣磨原理有很大差别，非球面镜片加工时主要依靠超精密数控机床配合金刚石单点车削的方式开模，再进行抛光。

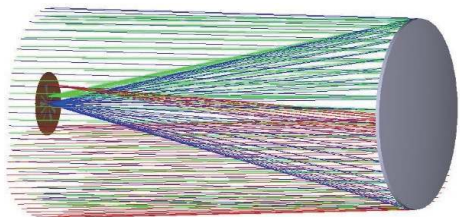


图 3 六次偶次非球面系统 3D 光路图

Fig. 3 3D optical path diagram of sixth-order even order aspheric system

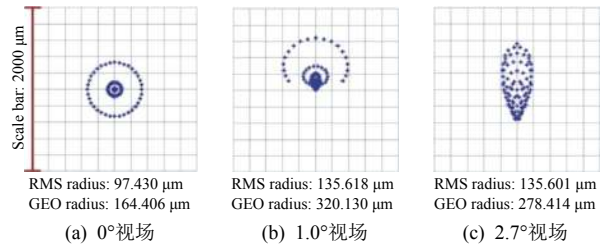


图 4 六次偶次非球面系统点列图

Fig. 4 Spot diagrams of sixth-order even order aspheric system

1.2.3 十次偶次非球面

十次偶次非球面系统基本设计参数如表 4 所示。相比于六次偶次非球面，十次偶次非球面增加了八阶和十阶系数。

表 4 十次偶次非球面系统基本设计参数

Table 4 Basic design parameters of tenth-order even order aspheric system

面形半径/mm	-506
尺寸外直径/mm	120
尺寸内直径/mm	—
圆锥系数	-1
二阶系数	0
四阶系数	$-7.2 \times 10^{-10}$
六阶系数	$5.69 \times 10^{-13}$
八阶系数	$-1.2 \times 10^{-16}$
十阶系数	$8.58 \times 10^{-21}$

图 5 和图 6 分别为十次偶次非球面系统 3D 光路图和设计结果点列图。由图 6 可以看出，0°、1.0°、2.7°视场的点列图 RMS 半径分别为 101.3、42.8、121.1 μm，均基本达到了分辨率设计指标。

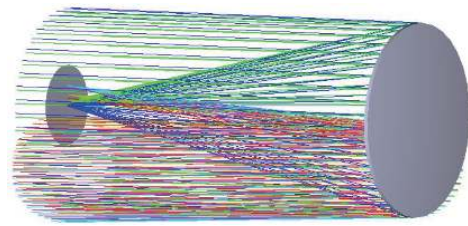


图 5 十次偶次非球面系统 3D 光路图

Fig. 5 3D optical path diagram of tenth-order even order aspheric system

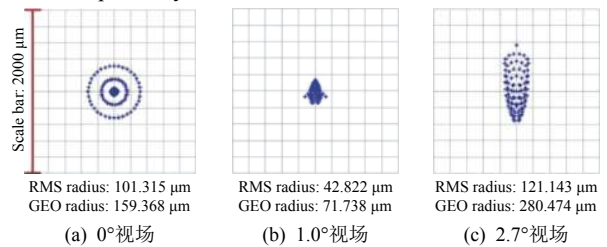


图 6 十次偶次非球面系统点列图

Fig. 6 Spot diagrams of tenth-order even order aspheric system

1.2.4 Q-type 面

与幂级数非球面相比，在设计中采用 Q-type 自由曲面，理论上有利于降低面形相对于基准二次曲

面的偏离量,得到面形梯度变化较小的光学曲面面形,能够降低光学加工和面形检测的难度,提高加工的精度和效率,降低成本。Q-type 面系统基本设计参数如表 5 所示,其中 A0~A3 为 Q-type 系数。

表 5 Q-type 面系统基本设计参数  
Table 5 Basic design parameters of Q-type surface system

面形半径/mm	-506.88
尺寸外直径/mm	120
尺寸内直径/mm	—
圆锥系数	-1
正则化半径	60
A0	$-7.7 \times 10^{-3}$
A1	$-3 \times 10^{-4}$
A2	$5.12 \times 10^{-4}$
A3	$1.06 \times 10^{-4}$

图 7 和图 8 分别为 Q-type 面系统 3D 光路图和设计结果点列图。由图 8 可以看出,0°、1.0°、2.7°视场的点列图 RMS 半径分别为 149.6、63.6、99.5 μm,均基本达到了分辨率设计指标。

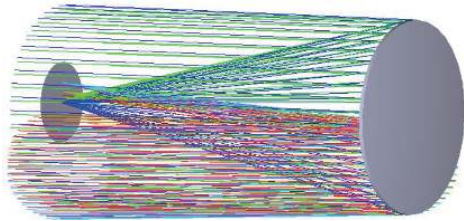


图 7 Q-type 面系统 3D 光路图

Fig. 7 3D optical path diagram of Q-type surface system

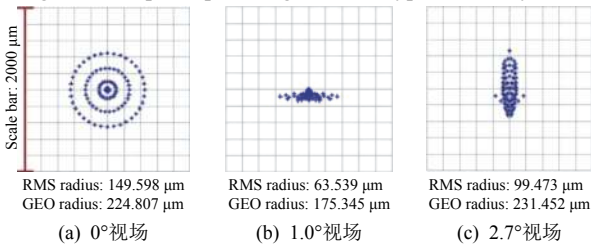


图 8 Q-type 面系统点列图

Fig. 8 Spot diagrams of Q-type surface system

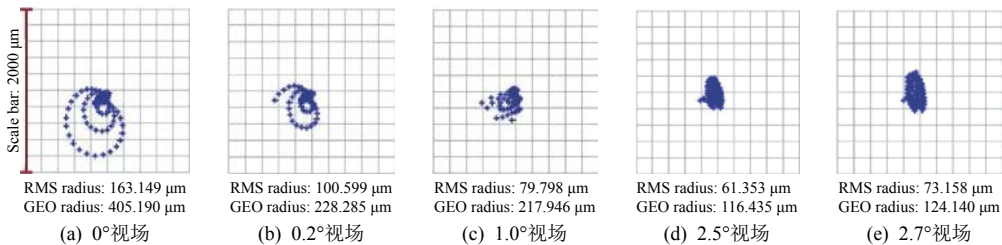


图 10 Zernike 多项式面系统点列图

Fig. 10 Spot diagrams of Zernike polynomial surface system

### 1.2.5 Zernike 多项式面

Zernike 多项式面的正交性使其系数相互独立,在优化时互不干扰。Zernike 多项式面系统基本设计参数如表 6 所示,其中 Z1~Z9 为 Zernike 系数。

表 6 Zernike 多项式面系统基本设计参数  
Table 6 Basic design parameters of Zernike polynomial surface system

面形半径/mm	-506
尺寸外直径/mm	120
尺寸内直径/mm	—
圆锥系数	-1
Z1	0
Z2	0
Z3	0
Z4	$3.06 \times 10^{-3}$
Z5	$-2.0 \times 10^{-3}$
Z6	$-6.4 \times 10^{-4}$
Z7	$-2.2 \times 10^{-3}$
Z8	$-4.7 \times 10^{-3}$
Z9	$1.7 \times 10^{-3}$

图 9 和图 10 分别为 Zernike 多项式面系统 3D 光路图和设计结果点列图。由图 10 可以看出,0°、0.2°、1.0°、2.5°、2.7°视场的点列图 RMS 半径分别为 163.1、100.6、79.8、61.4、73.2 μm,均基本达到了分辨率设计指标。

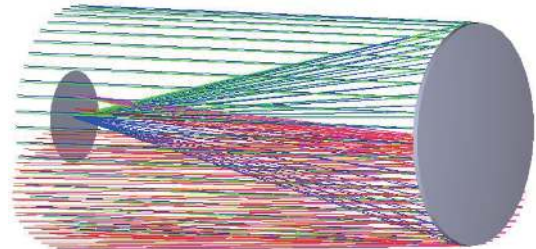


图 9 Zernike 多项式面系统 3D 光路图

Fig. 9 3D optical path diagram of Zernike polynomial surface system

## 2 基于傅里叶叠层超分辨的计算成像

傅里叶叠层成像技术能够提高远距离成像系统的分辨率,通过分时采集不同频谱带宽的信息,

然后数值迭代“拼接”成一个更大的频谱带宽,其在频谱带宽扩展上与合成孔径成像技术具有“异曲同工”的作用<sup>[15-17]</sup>。宏观傅里叶叠层成像技术能够通

过改变成像系统位置、截取不同位置频谱, 采集到本来通带之外的高频信息, 实现远距离超分辨成像<sup>[18]</sup>。其核心思想就是以获得的  $N$  张低分辨率图像作为约束条件, 找出与低分辨率图像相一致的样品估计结果, 从而重构得到样品的高分辨率图像。即, 通过在空间域和频域之间反复迭代, 根据约束条件对解进行不断优化, 最终得到一个满足约束条件的最优解。下面以紫外成像系统参数为仿真数据基础, 叙述基于傅里叶叠层超分辨的紫外天基单镜计算成像系统仿真设计过程。

1) 假设紫外天基单镜成像系统固定在一个与光轴垂直的二维精密机械平移台上, 可逐步平移 (如图 11 所示)。每次平移时, 新位置的成像系统的光瞳位置与上一位置的成像系统的光瞳位置有 60% (及以上) 的面积重叠。记录每一位置的图像  $I_{ij}$  及其对应的图像中心点坐标  $(c_i, d_j)$ 。紫外天基单镜成像系统在不同的位置记录图像, 利用自身的有限频谱带宽孔径成像能力记录不同频域带宽的信息。以前述紫外天基单镜成像系统光学设计参数为例, 焦距  $f=253 \text{ mm}$ , 外口径  $D=120 \text{ mm}$ ,  $\lambda=135 \text{ nm}$ , 像方  $\text{NA}=0.22$ , 像方截止频率为  $k_x=\text{NA} \times (2\pi/\lambda)=1.02 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$  (或者  $k_y$ )。

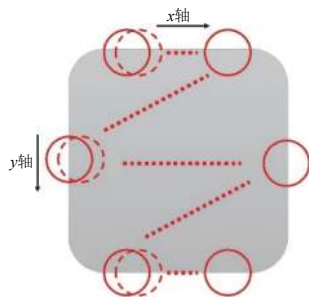


图 11 紫外天基单镜成像系统平移示意

Fig. 11 Translation of the ultraviolet space-based single mirror imaging system

2) 将左上角第一幅图  $I_{0,0}$  (实函数) 进行傅里叶变换, 并将变换后得到的复函数的相位初始化为 0 元素构成的矩阵, 并对该复函数矩阵的尺寸上采样扩大  $4 \times 4$  倍, 得到样本频谱的初始猜想  $\widehat{U}_0(k_x, k_y)$ 。本文中, 空间域坐标为  $(x, y)$ , 频谱域坐标为  $(k_x, k_y)$ 。

3) 左上角第一幅图  $I_{0,0}$  对应的光瞳函数为  $A(k_x - c_0, k_y - d_0)$ , 则在此位置处紫外天基单镜成像系统的频谱复函数  $\widehat{U}_0(k_{0x}, k_{0y})$  与“真实”频谱复函数  $\widehat{U}_a(k_x, k_y)$  之间的关系可表示为

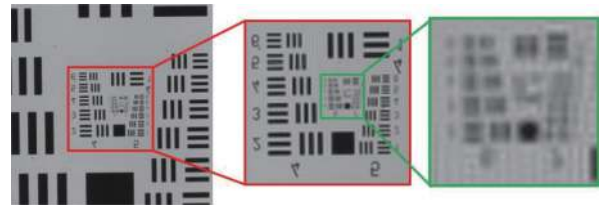
$$\widehat{U}_0(k_{0x}, k_{0y}) = \widehat{U}_a(k_x, k_y) A(k_x - c_0, k_y - d_0); \quad (1)$$

同理, 对于任意位置处紫外天基单镜成像系统的频谱复函数  $\widehat{U}_i(k_{ix}, k_{iy})$  与“真实”频谱复函数  $\widehat{U}_a(k_x, k_y)$  之间的关系可表示为

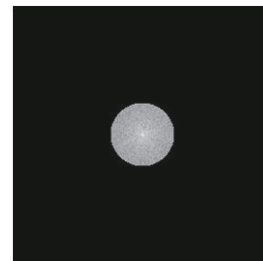
$$\widehat{U}_i(k_{ix}, k_{iy}) = \widehat{U}_a(k_x, k_y) A(k_x - c_i, k_y - d_i). \quad (2)$$

我们可基于数学迭代的方式<sup>[16-18]</sup>, 利用每一幅单帧紫外图像逆向构建“真实”物体信息  $\widehat{U}_a(k_x, k_y)$ , 从而实现有限孔径“低分辨”图像到“高分辨”图像的重建。

图 12(a) 是紫外天基单镜成像系统图像中心位置为  $(c_3, d_3)$  的原始图像, 图 12(b) 是该原始图像的傅里叶频谱。



(a) 图像中心位置为  $(c_3, d_3)$  的原始图像



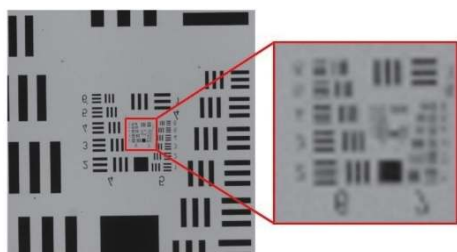
(b) 原始图像的傅里叶频谱

图 12 单镜成像系统的分辨率及傅里叶频谱

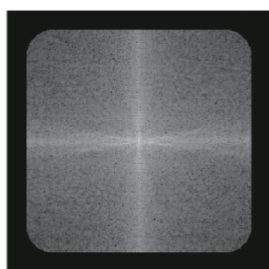
Fig. 12 Resolution and Fourier spectrum of the single mirror imaging system

图 13(a) 是根据 49 帧 (本文建议最低图像帧数为 9) 不同位置的图像利用 FP 技术<sup>[16-18]</sup>重建得到的结果, 图 13(b) 是该重建图像所对应的傅里叶频谱。从重建结果来看, 紫外天基单镜成像系统在二维方向 (如图 11) 上的扫描 FP 技术能够有效提高图像分辨率。在原始图像中勉强能够分辨的图案为 G5-E3 (Group 5, Element 3, USAF-1951), 对于更细的图案无法分辨具体的数字和条纹行数; 而在重建图像中, 可以清楚地看到 G6-E4 (Group 6, Element 4, USAF-1951), 成像分辨率提高了 2.2 倍 (按照 USAF-1951 分辨率板的图案线宽的定义)。也就是说, 通过基于紫外天基单镜成像系统扫描的傅里叶叠层成像技术, 图 1~图 10 中的单镜光学面形的分

辨能力可从原有点列图表征的分辨能力进一步提高 2.2 倍, 分别为: 球面单镜, 约  $115\ \mu\text{m}$ ; 六次偶次非球面, 约  $100\ \mu\text{m}$ ; 十次偶次非球面, 约  $100\ \mu\text{m}$ ; Q-type 面, 约  $100\ \mu\text{m}$ ; Zernike 多项式面, 约  $100\ \mu\text{m}$ 。



(a) 傅里叶叠层法重建图



(b) 重建图的傅里叶频谱

图 13 傅里叶叠层成像系统的分辨率及傅里叶频谱

Fig. 13 Resolution and Fourier spectrum of the Fourier stack imaging system

### 3 分析与讨论

单透镜成像设计能够利用两个光学面形像差互补的形式进行像差补偿, 而反射式单镜结构没有任何像差补偿的可能性。因此, 依靠单个反射面矫正光学像差, 必然会增加光学面形的复杂度。对比 1.2 节列举的各面形直接光学设计结果可以发现, 非球面的点列图的 RMS 半径值相比球面反射镜几乎有 2~3 倍的提高; 但是, 反射式十次偶次非球面、反射式 Q-type 非球面和反射式 Zernike 多项式面的点列图 RMS 半径值相对于反射式六次偶次非球面并没有大幅度提高。兼顾考虑当前紫外成像非球面反射镜面加工和检测的复杂度, 反射式六次偶次非球面反而具备一定的综合优势。

另外, 在傅里叶叠层计算成像提高分辨率方面, 空间载荷的相对运动状态决定了在天基紫外成像系统不可能无限制地扩大“合成孔径”的能力。因此, “3×3”(在二维平面上, 平移 3×3 次)、“5×5”和“7×7”是紫外天基单镜计算成像系统实现傅里叶叠层成像的几种可能方式。当然, 在保持空间载荷与目标成像物相对静止的条件下, 傅里叶叠层计算成

像提高分辨率的能力受益于能够平移扫描的次数: 平移扫描次数越多、扫描过的孔径面积越大, 成像分辨率提高的可能性越大。

基于相机扫描的天基傅里叶叠层计算成像方法不仅适用本文的单镜紫外天基系统, 也适用于其他的天基成像系统。

### 4 结束语

基于天基遥感系统对轻量化、易集成和高分辨等的要求, 本文提出了“光学镜面设计”与“计算成像”相结合的思路, 对紫外天基单镜计算成像系统进行了设计与仿真。分别对球面、六次偶次非球面、十次偶次非球面、Q-type 面及 Zernike 多项式面进行了反射式天基单镜成像系统设计。通过对比设计结果, 同时兼顾考虑当前紫外成像非球面反射镜面加工和检测的复杂度, 认为六次偶次非球面可能具备一定的综合优势。

同时, 本文提出了紫外天基单镜成像系统实现傅里叶叠层成像的方法, 并以数值仿真的方式, 结合紫外成像非球面反射镜面的指标参数, 对硬件直接成像的图像进行算法重建, 可将设计的单镜成像系统分辨能力至少提高到原有的 2 倍。

本文工作为紫外天基遥感系统提供了新的解决思路, 也为天基单镜成像系统提供了新的设计方法。

#### 参考文献 (References)

- [1] 杨通, 段瓔哲, 程德文, 等. 自由曲面成像光学系统设计: 理论、发展与应用[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0108001  
YANG T, DUAN Y Z, CHENG D W, et al. Freeform imaging optical system design: theories, development, and applications[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0108001
- [2] 倪栋伟, 李旭阳, 杨明洋, 等. 基于自由曲面的大视场天基探测光学系统[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 302-311  
NI D W, LI X Y, YANG M Y, et al. Large field of view space-based optical detection system based on freeform surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 302-311
- [3] 李博, 王淑荣, 王俊博. 天基紫外跟踪详查光学系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 247-251  
LI B, WANG S R, WANG J B. Optical design of space-based ultraviolet tracking and detailed reconnaissance system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 247-251
- [4] 刘韬. 国外静止轨道大口径反射成像技术发展综述[J].

- 航天返回与遥感, 2016, 37(5): 1-9
- LIU T. An overview of development of foreign large aperture reflection imaging technology on geostationary orbit[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(5): 1-9
- [5] 郭疆. 碳化硅大口径空间反射镜设计与制造研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019
- [6] SCHULER C J, HIRSCH M, HARMELING S, et al. Non-stationary correction of optical aberrations[C]//IEEE International Conference on Computer Vision. Barcelona, Spain, 2011: 659-666
- [7] HEIDE F, ROUF M, HULLIN M B, et al. High-quality computational imaging through simple lenses[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, 32(5): 149
- [8] LI W L, LIU Y, YIN X Q, et al. A computational photography algorithm for quality enhancement of single lens imaging deblurring[J]. *Optik*, 2015, 126(21): 2788-2792
- [9] 崔金林. 基于计算光学的非完善光学系统图像质量提高及其应用研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018
- [10] WANG J Y, WANG L, YANG Y, et al. An integral design strategy combining optical system and image processing to obtain high resolution images[C]//Conference on Remotely Sensed Data Compression, Communications, and Processing XII. Baltimore, MD, USA, 2016: 98740F
- [11] 郑云达. 简单光学系统计算成像技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019
- [12] LI W L, YIN X Q, LIU Y, et al. Computational imaging through chromatic aberration corrected simple lenses[J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64(20): 2211-2220
- [13] 谭政, 相里斌, 吕群波, 等. 基于像差选择性校正的光学-数字联合设计[J]. *光子学报*, 2018, 47(5): 0511001
- TAN Z, XIANG L B, LÜ Q B, et al. Optics/digital processing co-design method based on aberration optional-correcting[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(5): 0511001
- [14] SAHIN F E, TANGUAY A R. Distortion optimization for wide-angle computational cameras[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5478-5487
- [15] DONG S, HORSTMAYER R, SHIRADKAR R, et al. Aperture-scanning Fourier ptychography for 3D refocusing and super-resolution macroscopic imaging[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13586
- [16] 谢宗良, 马浩统, 任戈, 等. 小孔扫描傅里叶叠层成像的关键参量研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 94-102
- XIE Z L, MA H T, REN G, et al. Research on the key parameters of aperture-scanning Fourier ptychography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 94-102
- [17] ZHENG G, HORSTMAYER R, YANG C. Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(9): 739-745
- [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): 101-107
- ZHAO M, WANG X M, ZHANG X H, et al. Experimental research on macroscopic Fourier ptychography super-resolution imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 101-107

(编辑: 张艳艳)