

太阳上层过渡区极紫外三级次无狭缝成像光谱仪系统设计

沈文杰¹, 邢阳光^{1*}, 黄一帆^{1**}, 彭吉龙², 代树武³, 王颖³, 朱成林³, 闫雷⁴, 刘越^{1***}, 李林¹

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;

²北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;

³北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;

⁴北京宇航系统工程研究所, 北京 100076

摘要 提出了一款工作在 Ne VII 46.52 nm 谱线的新型三级次无狭缝成像光谱仪, 该仪器采用两个超环面等线距光栅作为衍射元件, 其中单个光栅仅工作于一个级次, 这解决了现有三级次仪器使用单个光栅同时工作于三个级次的弊端, 显著提升了系统校正离轴光栅像差的能力, 结合光谱数据反演算法可以实现 24' × 24' 视场下的高空间 (1.547") 和高光谱分辨率 (0.0078 nm) 观测。

关键词 成像系统; 太阳空间观测; 太阳极紫外; 成像光谱仪; 无狭缝; 超环面等线距光栅

中图分类号 O434

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231182

1 引言

太阳是迄今为止唯一能被研究者观测到其详细特征和物理过程的恒星^[1]。通过空间太阳观测研究太阳上发生的各种物理过程, 能够为研究宇宙中其他天体在不同物理参数下的活动特征提供重要参考^[2]。空间太阳观测能为粒子物理学、等离子体物理学、磁流体力学等学科提供地面实验室无法获得的研究数据^[3-4]。耀斑和日冕物质抛射等太阳爆发事件是灾害性空间天气的源头, 通过研究太阳爆发事件引发灾害性空间天气的因果链, 可以大大提升空间天气预报能力, 进而减轻乃至避免其可能对高科技系统和人类生存环境造成的危害^[5-7]。色球和日冕之间的过渡区域是一个受磁场控制的高度动态的等离子体薄层, 普遍存在着各种小尺度的活动现象和精细结构^[8]。过渡区域的研究被认为是建立太阳上层大气的物质循环和能量运输机制、解决日冕反常加热和太阳风起源两大难题的关键^[9]。在 0.02~1.00 MK 的过渡区域温度下, 处于不同电离态的离子会辐射出丰富的极紫外发射谱线, 利用极紫外光谱学观测和诊断技术可以实现过渡区域等离子体特征的精确测量, 进而为研究过渡区域的各种小尺度结构和瞬变事件提供数据支持^[10]。

自 20 世纪 70 年代以来, 多国开始以星载的极紫外

光谱探测设备开展过渡区域的观测^[11]。美国 Skylab 空间站上的 S082A 仪器^[12]是一款摄影记录的无狭缝成像光谱仪, 可在 17.1~33.5 nm 或 32~63 nm 波段同时实现多个极紫外谱线的全日面成像, 空间分辨率为 2"~10", 光谱分辨率最高可达 0.0027 nm, 因极紫外发射谱线分布密集, S082A 仪器获得的相邻谱线的图像可能存在重叠, 造成仪器的光谱分辨能力下降, 仅能在少数孤立的强发射谱线如 He II 30.4 nm、Ne VII 46.52 nm 处取得良好的观测效果^[11]。1995 年, 欧美联合发射的 SOHO 卫星^[13]上搭载的日冕诊断光谱仪 CDS^[14-15], 包含了正入射与掠入射光栅光谱仪两个通道, 其中正入射通道的波段为 31~38 nm 与 52~63 nm, 空间分辨率约为 6", 光谱分辨率为 0.008 nm, 单层镀膜的极紫外光栅的正入射反射率随波长的减小而迅速下降, 该通道的波段受到限制; 通过掠入射的光栅工作方式, 掠入射通道实现了 15~80 nm 的宽波段覆盖, 但该通道存在消像散能力不足的问题, 进而限制了该通道的光谱分辨率 (0.021 nm)。2022 年, 中国发射的 SATech-01 卫星上搭载的极紫外成像仪 SUTRI^[16], 实现了上层过渡区域关键谱线 Ne VII 46.52 nm 窄波段全日面高分辨率成像, 空间分辨率为 8", 因极紫外成像仪普遍不具有高光谱分辨能力, SUTRI 无法获得高分辨率光谱数据。日本计划于 2026 年发射的 Solar-C

收稿日期: 2023-06-25; 修回日期: 2023-07-21; 录用日期: 2023-08-02; 网络首发日期: 2023-08-15

基金项目: 国家自然科学基金 (62205027, 42274208)、中国科学院战略性先导科技专项 (XDA15018300)

通信作者: *xyg@bit.edu.cn; **huangyifan@bit.edu.cn; ***liuyue@bit.edu.cn

卫星^[17-18]上搭载的极紫外高效率光谱望远镜 EUVST^[19],其二级光谱区包括了 46.3~54.2 nm 波段,涵盖了 Ne VII 46.52 nm 重要谱线,预计最高空间分辨率可达 0.4",最高光谱分辨率为 0.003 nm。

国内外长期的太阳物理学研究表明,上层过渡区域是太阳大气中温度在 0.1~0.8 MK 的等离子体区域,该温度范围是理解太阳大气物质和能量传输机制的关键,对诊断各类太阳爆发活动中的物理过程也具有重要意义^[9]。Ne VII 46.52 nm 谱线是上层过渡区域在 45~48 nm 波段的唯一强辐射谱线,利用该谱线开展上层过渡区域的高分辨率光谱学探测,获取温度约 0.5 MK 的上层过渡区域等离子体特征的精确信息,能够为建立太阳低层大气与日冕之间缺失的联系、研究太阳爆发事件的动力学与能量学提供关键信息^[9,16]。SUTRI 实现了 Ne VII 46.52 nm 谱线的全日面高分辨率成像观测,然而目前尚且缺少一款针对该谱线探测设计且能够在大视场范围内实现高分辨率快速二维光谱成像观测的极紫外仪器。鉴于此,本文设计了一款工作于 Ne VII 46.52 nm 窄波段的无狭缝成像光谱仪,仪器采用新的三级次无狭缝光谱色散结构,其中发生色散的±1级次色散平面相互重合,且与非色散的0级次成像面正交,单次快照可同时获得三幅大视场(24'×24')极紫外窄波段(46.0~47.0 nm)的太阳图像。光谱成像质量评价和公差分析结果表明,该仪器能够实现大视场下的离轴光栅像差校正,各级次均取得良好的成像质量,且具有较大的公差容限,兼具轻量化、小体积、大口径的特点,适合卫星遥感平台的应用。

2 三级次无狭缝光谱成像概念

2.1 新型三级次无狭缝光谱成像架构

MOSES^[20-21]的成功实践证明了无狭缝成像光谱仪能够获取传统仪器无法得到的研究太阳大气动态变化的关键数据^[22]。然而,MOSES以及邢阳光等^[23]设计的MOSES改进型仪器都存在一些缺陷,MOSES存

在仪器体积过大、离轴光栅像差校正能力不足导致的视场受限、缺少中间像条件下形成的视场光阑可能造成的视场内谱线受到“污染”、增大光谱数据反演难度等弊端;邢阳光等设计的仪器改善了MOSES的部分缺陷,但也存在采用椭球面变线距(EVLS)光栅导致仪器工程化制造难度极大、采用单光栅同时工作于三个级次的仪器结构导致光栅公差容限要求极为严格等不足。

为解决现有无狭缝仪器存在的弊端,本文提出了一种新的三级次无狭缝成像光谱仪设计方案,采用两个超环面等线距(TULS)光栅作为分光元件可提供±1级次的衍射成像,而0级次的非色散成像由反射镜提供。如图1(a)所示,发生色散的±1级次子系统通过视场光阑耦合于同一个平面内,且与非色散的0级次子系统所在的平面正交。新的系统由三个级次的子系统构成,图1(b)给出了其中一个级次子系统的结构示意图,通过入瞳偏移,三级次子系统的前置望远主镜采用二次曲面反射镜等距离的离轴部分,次镜为TULS光栅或超环面反射镜。不发生色散的0级次子系统相当于一台多层膜成像仪,可直接获取高空间分辨率信息;发生色散的±1级次子系统探测器上接收的是携带空间和光谱混叠数据的太阳色散图像,通过三个级次图像的光谱数据反演,可提取 Ne VII 46.52 nm 谱线处的高分辨率光谱信息。

由于采用了单个光栅工作在一个衍射级次上的新型光谱色散架构,因此采用等线距的光栅即可实现大视场下该级次的离轴光栅像差校正,进而获取较大的仪器观测视场。另外,所采用的TULS光栅的加工与检测技术目前比较成熟,仪器的工程化制作极具可行性。三个级次的子系统仅通过视场光阑耦合,各子系统的元件相对独立,因此相比于单光栅三级次的系统具有更大的公差容限。具有新型光谱色散结构的三级次无狭缝成像光谱仪在各衍射级次均能取得优良的空间和光谱成像性能,兼具轻量化、小体积、大口径

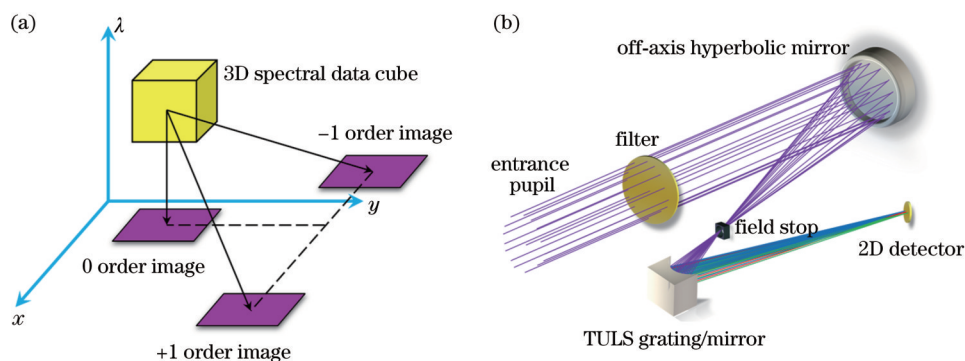


图1 新型三级次无狭缝光谱成像概念。(a)三级次无狭缝成像光谱仪的色散方向图解;(b)三级次无狭缝成像光谱仪的单个级次子系统示意图

Fig.1 New concept of three-order slitless spectral imaging. (a) Dispersion direction diagram of three-order slitless imaging spectrometer; (b) schematic of single-order subsystem of three-order slitless imaging spectrometer

的应用需求,适合部署于卫星遥感平台。

2.2 Ne VII 46.52 nm 谱线科学价值

如图 2 所示,仪器选用的 Ne VII 46.52 nm 谱线形成于上层过渡区域中温度约为 0.5 MK 的等离子体区域^[9],是上层过渡区域观测的关键谱线。一方面,形成该谱线的温度(约为 0.5 MK)是过渡区域谱线由红移转向蓝移的临界温度,过渡区域辐射谱线的多普勒频移是由过渡区域普遍存在的系统性流动导致的,过渡区域大气中的各种加热与冷却过程被认为是产生这种系统性流动的重要因素,因此 Ne VII 46.52 nm 谱线携带着理解日冕加热机制的关键信息;另一方面,温度约为 0.5 MK 的等离子体区域是过渡区顶部因磁重联产生的沿磁漏斗结构向上的物质上升流和过渡区中部普遍存在的物质下行流的分界区域,前者对应初始太阳风的物质流动,因此 Ne VII 46.52 nm 谱线可用于识别太阳风的起源区域^[9,16]。

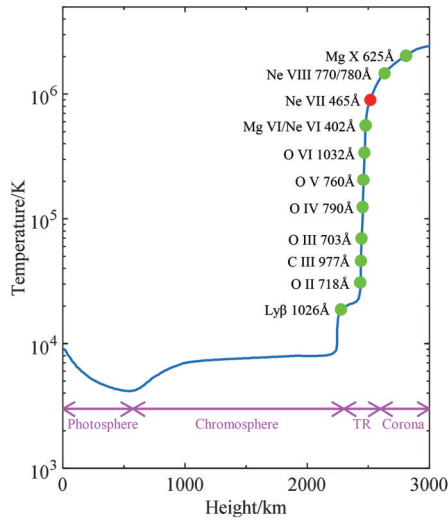


图 2 太阳大气温度随表面高度的变化曲线图^[9]

Fig. 2 Curve of solar atmospheric temperature changing with surface height^[9]

2.3 系统技术指标

采用单光栅单级次的光谱色散结构可显著增强系统校正离轴光栅像差的能力,系统视场可以达到 $24' \times 24'$ 。与 MOSES^[20] ($10' \times 20'$) 和邢阳光等设计的仪器^[23] ($20' \times 20'$) 相比,本文设计的系统能够对更大的日面区域(全日面视场为 $32'$) 实现窄波段高分辨率观测。过渡区爆发事件 (EEs) 是过渡区重要的小尺度瞬变现象之一,其多普勒速度为 $50 \sim 200 \text{ km/s}$ ^[8],根据 EEs 的光谱特征,系统像元光谱分辨率应优于 0.0078 nm/pixel ,反演的光谱分辨率应优于 0.0078 nm 。由 SUMER^[24] 和 CDS 等取得的观测数据可知,EEs 的空间尺度为 $1500 \sim 1800 \text{ km}$ ^[10],因此本文设计的工作于 517 km 高度、 98° 倾角的太阳同步轨道的成像光谱仪的空间分辨率应优于 $2''$ (在近地轨道, $1''$ 对应约 750 km 的日面尺度)。系统总体设计指标如表

1 所示。

表 1 三级次无狭缝成像光谱仪的技术指标

Table 1 Technical specifications for three-order slitless imaging spectrometer

Performance parameter	Design value
Instrument bandpass /nm	46.0–47.0
Objective emission line /nm	Ne VII 46.52
Temperature of plasma /MK	0.5
Light-of-sight velocity /($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	≥ 50
FOV /[($'$) \times ($'$)]	24×24
Spectral dispersion /($\text{nm} \cdot \text{pixel}^{-1}$)	≤ 0.0078
Spectral resolution of inversion /nm	≤ 0.0078
Spatial plate scale /[($''$) $\cdot \text{pixel}^{-1}$]	≤ 1.0
Spatial resolution /($''$)	≤ 2.0
Entrance aperture /mm	60
Pixel size of detectors / μm	12 (2048 pixel \times 2048 pixel)
Optical volume /($\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$)	$\leq 1000 \times 300 \times 300$

3 系统设计原理

3.1 TULS 光栅像差校正条件

本文设计的系统采用的 TULS 光栅的像差校正原理图如图 3 所示^[23]。以光栅顶点 O 为原点建立三维直角坐标系, X 轴为顶点 O 处的法线, Y 轴和 Z 轴分别垂直和平行于光栅刻线方向。 $A(x_a, y_a, z_a)$ 为视场光阑面内任意一点, $A_0(x_a, y_a, 0)$ 为视场光阑的中心。 $P(x, y, z)$ 为 TULS 光栅表面上任意一点, A 发出的波长为 λ 的光线入射到 TULS 光栅上, 在 P 处经过光栅的 m 阶衍射成像于 $B(x_b, y_b, z_b)$ 。 $B_0(x_b, y_b, 0)$ 为 B 在 XOY 面内的投影, 也是与 A_0 共轭的像点。 i, θ 分别为入射角和衍射角, r_A, r_B 分别为入射臂长和出射臂长。

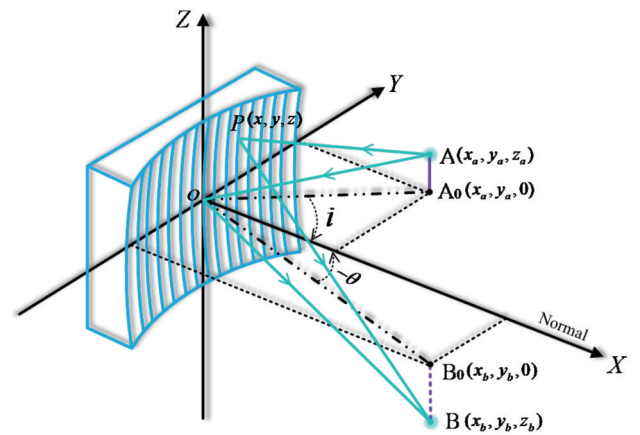


图 3 像差校正的 TULS 光栅的原理图^[23]

Fig. 3 Schematic of aberration-corrected TULS grating^[23]

TULS 光栅在光栅色散方向(子午方向)和垂直光栅色散方向(弧矢方向)内具有不同的曲率半径,可分别用子午半径 R 和弧矢半径 ρ 来表示,其光栅面型方

程为

$$x^2 + y^2 + z^2 =$$

$$2Rx - 2R(R - \rho) + 2(R - \rho)[(R - x)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

Haber^[25] 在 1950 年实现了 TULS 光栅的像差解析, 经过 Huber 等^[26]、Harada 等^[27]、Poletto 等^[28]、Yu 等^[29] 的研究, 目前 TULS 光栅的像差校正理论已相当成熟。鉴于此, 本文直接给出了在扩展光源发散照明条件下 TULS 光栅主要像差(像散和离轴离焦)的校正条件^[28]。

校正子午方向(光栅色散方向)的像散的条件为

$$\frac{\cos^2 i}{r_A} + \frac{\cos^2 \theta}{r_B} - \frac{\cos i + \cos \theta}{R} = 0. \quad (2)$$

校正弧矢方向(垂直于光栅色散方向)的像散的条件为

$$\frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} - \frac{\cos i + \cos \theta}{\rho} = 0. \quad (3)$$

式(2)、(3)分别为校正子午和弧矢像散后得到的光谱聚焦曲线和空间聚焦曲线表达式, 在优化过程中应当尽可能使光谱聚焦曲线和空间聚焦曲线相交或重合, 以实现光谱消像散成像。

离轴离焦像差的校正条件为

$$\frac{\sin \theta}{\sin i} = \frac{r_B}{r_A} = \beta > 1, \quad (4)$$

式中: β 为光栅的横向放大率。本文设计的非罗兰圆结构的 TULS 光栅的衍射角和入射角在满足式(4)时, 可以实现离轴光栅像差的校正; 而工作于罗兰圆结构下的凹面光栅具有单位的横向放大率, 即 $\beta=1$, 因此不满足式(4)无法校正大视场下的离轴光栅像差, 仅能在轴上点获得良好的成像性能。

3.2 初始解与评价函数

成像光谱仪在空间成像平面内的近轴光学模型如图 4 所示, 其中 M 为孔径离轴的二次曲面主镜, 令 M 的二次曲面系数 $k=0$, 则 M 简化为一个曲率半径为 R_T 、离轴量为 Δ 的球面镜, 其焦距 f_T 为

$$f_T = \sqrt{(R_T/2)^2 + \Delta^2}. \quad (5)$$

G 为 TULS 光栅在空间成像面内的等效模型, 焦距为 f_G , 入射臂长为 r_A , 出射臂长为 r_B , G 的子午半径为 R , 弧矢半径为 ρ , 令 $R=\rho$, 则 G 简化为一个球面等线距(SULS)光栅。成像光谱仪系统的焦距为 f , 由近轴光学原理可知

$$\begin{cases} f = -f_T f_G / \nu \\ \nu = r_A - f_G \\ 1/r_A + 1/r_B = 1/f_G \\ \beta = r_B/r_A \end{cases} \Rightarrow f = \beta f_T. \quad (6)$$

式(6)表明: 系统焦距 f 仅与光栅横向放大率 β 和主镜焦距 f_T 有关。

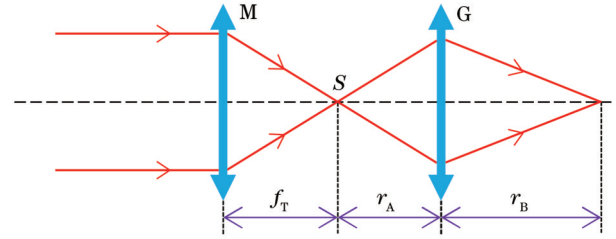


图 4 无狭缝成像光谱仪在空间成像平面内的近轴光学模型图
Fig. 4 Paraxial optical model diagram of slitless imaging spectrometer in spatial imaging plane

成像光谱仪的初始结构应当满足表 1 给出的系统分辨率要求。系统的空间分辨率受像元尺寸限制, 其像元空间分辨率 δ_{pix} 为

$$\delta_{\text{pix}} = \frac{e}{f} \times 206264.81 = \frac{e}{\beta f_T} \times 206264.81, \quad (7)$$

式中: e 为探测器的像元尺寸。系统的像元光谱分辨率 $d\lambda_e$ 为

$$d\lambda_e = e \frac{d_0 \cos \theta \cos \psi}{m r_B}, \quad (8)$$

式中: m 为衍射级次; d_0 为光栅刻线间距; ψ 为衍射光线在探测器上的入射角。在进行初始结构求解时, 可忽略这两个角度的余弦值。

由高斯公式可知入射臂长 r_A 和出射臂长 r_B 在空间成像面内满足:

$$\frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} = \frac{1}{f_G}. \quad (9)$$

考虑到 $R=\rho$ 的简化假设, 则焦距 $f_G=R/2=\rho/2$ 。

成像光谱仪的初始结构还应当满足表 1 给出的光学包络体积要求, 初始结构参数需满足

$$\begin{cases} \max(f_T + r_A, \beta r_A) \leq L \\ 2\Delta + D \leq W \end{cases}, \quad (10)$$

式中: L 为系统轴向长度; W 为系统在 ± 1 级次色散平面内的尺寸; D 为系统的入瞳直径。由于 ± 1 级次子系位于同一色散平面内, 为获得合理的结构布局, 不同级次的主反射镜和探测器之间应避免产生空间干涉, 初始结构参数需满足

$$\begin{cases} \sqrt{(f_T + r_A)^2 + (\beta r_A)^2} - 2(f_T + r_A)\beta r_A \cos(i_{+1} + \theta_{+1}) \geq 2\Delta + D/2 + f \tan \omega \\ \sqrt{(f_T + r_A)^2 + (\beta r_A)^2} - 2(f_T + r_A)\beta r_A \cos(i_{-1} + \theta_{-1}) \leq 2\Delta - D/2 - f \tan \omega \end{cases}, \quad (11)$$

式中: i_{+1} 、 θ_{+1} 分别为 +1 级次光栅的入射角和衍射角; i_{-1} 、 θ_{-1} 分别为 -1 级次光栅的入射角和衍射角; ω 为离轴半视场角。

为获得系统初始解,需要确定一些已知量,包括轴向长度 L 、±1 级次色散平面内的仪器尺寸 W 、光栅横向放大率 β 、光栅刻线间距 d_0 、离轴半视场角 ω 。依次

使用式(5)~(11)计算得到系统初始解,其初始结构参数如表 2 所示。

由计算获得的初始解并不是系统最优解,需要在 ZEMAX 软件中通过多重结构功能和像差优化函数^[30],实现对系统三个级次像差的同时校正。像差优化函数可定义为

$$I_{\min} = \sum_m \left\{ \varphi(m) \sum_{\tau} [\tau_1 F_{02}^2(\lambda_0) + \tau_2 F_{20}^2(\lambda_0) + \tau_3 F_{11}^2(\lambda_0) + \tau_4 F_{30}^2(\lambda_0) + \tau_5 F_{12}^2(\lambda_0) + \tau_6 F_{40}^2(\lambda_0)] \right\}, \quad (12)$$

式中: λ_0 为极紫外窄波段的中心波长; $\varphi(m)$ 为各级次的权重因子,取相同值; $\tau_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 为各光栅像差的权重因子,取不同值,一般高阶像差的权重因子要小于低阶像差的权重因子。

表 2 无狭缝成像光谱仪的初始结构参数

Table 2 Initial structural parameters of slitless imaging spectrometer

Parameter	Value
f / mm	3200
R_T / mm	-1413.193
Δ / mm	80
r_A / mm	202.222
β	4.5
d_0 / mm ⁻¹	2000
m	-1, 0, +1
R / mm	330.909
ρ / mm	330.909

4 光线追迹与性能评价

4.1 系统设计流程

为确保软件优化过程具有较高的收敛速度,依次使用式(5)~(11)计算得到系统初始解,如表 2 所示,然后利用 ZEMAX 的多重结构功能,通过设置多重结构参数,包括入瞳偏移量、衍射级次、光栅面型参数及倾斜角度、探测器位置及倾斜角度,将系统初始解输入

ZEMAX,建立具有三个级次的光学系统,再使用式(12)定义的像差优化函数同时对三级次子系统进行全局优化,以在最小化光栅像差的同时获得三个级次理想的成像性能。为控制系统像差,将式(2)~(4)作为优化约束条件;为满足系统的分辨率要求,将式(7)、(8)作为优化约束条件;为获得合理的仪器布局,将式(10)、(11)作为几何约束条件。经过反复迭代优化,最终得到具有优良的成像质量且满足几何约束条件的光学系统。系统设计流程如图 5 所示。

4.2 系统设计结果

最终优化得到的光学系统的技术指标和元件参数如表 3 所示,其光路布局如图 6(a)所示,系统由三个级次的子系统构成,包括三个硅滤光片、三个望远主镜、一个视场光阑、两个 TULS 光栅、一个超环面反射镜、三个平面探测器。图 6(b)、(c)分别为 ±1 级次和 0 级次子系统的光路布局,可见发生色散的 ±1 级次和非色散的 0 级次子系统分别位于正交的坐标平面内。来自太阳的光线由各级次孔径光阑进入系统,采用滤光片滤除可见光波段的强太阳辐射,利用前置望远主镜在放置于三级次共同的像方焦面处的视场光阑上形成太阳日面的一次像,视场光阑发出的三个不同方向的光束发散照明三个次镜,光线经次镜的衍射或反射后,在相应具有最优位置和倾斜角度的平面探测器上形成太阳的二次像。本文选用厚度为 0.1 μm 的硅滤光片^[31]以抑制可见光波段的强太阳辐射,其透过率曲线如图 7 所示,46.52 nm 处的透过率高于 0.6。为提高系

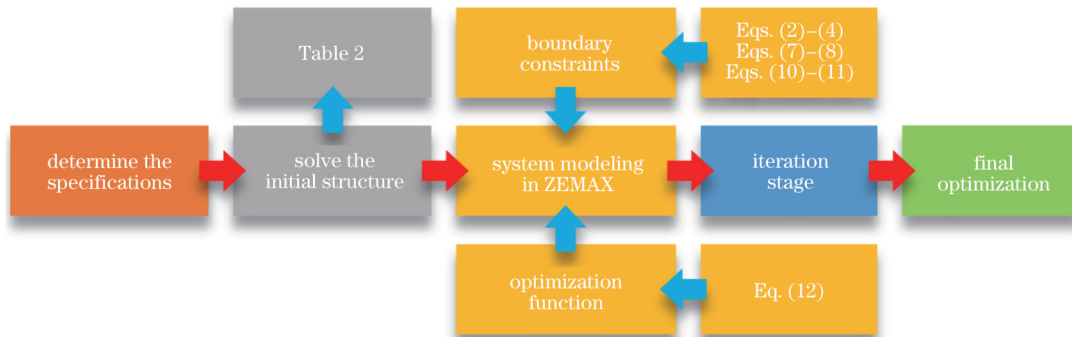


图 5 无狭缝成像光谱仪的设计流程

Fig. 5 Design flow process for slitless imaging spectrometer

统的正入射反射率,在各个光学元件表面镀相同的周期性 Sc/Si 多层膜^[32],其反射率曲线如图 8 所示,在 46.52 nm 处的反射率可达 32.1%。

表 3 三级次无狭缝成像光谱仪的技术指标和元件参数

Table 3 Specifications and optical element parameters for three-order slitless imaging spectrometer

Design	Parameter	Value
Three-order slitless imaging spectrometer	Instrument bandpass /nm	46.0-47.0
	Objective emission line /nm	Ne VII 46.52
	Temperature of plasma /MK	0.5
	Light-of-sight velocity /($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	≥ 50
	FOV /[($^{\circ}$) \times ($^{\circ}$)]	24×24
	Spectral resolution /nm	0.0078
	Spatial resolution /($''$)	1.547
	System focal length /mm	3200
	Entrance aperture /mm	60
	Pixel size of detectors / μm	12 (2048 pixel \times 2048 pixel)
Telescope design	Optical volume /($\text{mm}\times\text{mm}\times\text{mm}$)	950 \times 280 \times 240
	R_T /mm	-1343.265
	Conic	-1.439
	Δ_x, Δ_y /mm	-80,0 (-1 order) 0,80 (0 order) 80,0 (+1 order)
Spectral imaging system design	Field stop size /($\text{mm}\times\text{mm}$)	5.2 \times 5.2
	Groove spacing / mm^{-1}	2000
	Diffraction order	-1 order, 0 order, and +1 order
Grating	r_A /mm	198.702
	β	4.575/4.623/4.724 (-1, 0, +1 order)
	i /($^{\circ}$)	6.243/5.672/4.384 (-1, 0, +1 order)
	R /mm	326.159
	ρ /mm	324.389
	Ruling area /($\text{mm}\times\text{mm}$)	30 \times 30
Three independent detector design	Order	-1,0,1
	Tilt angle of detectors /($^{\circ}$)	19.38,25.03,28.54

为了减少次镜的面型种类以降低仪器成本,在满足成像质量的前提下,通过加入约束条件使得三个级次的次镜面型相同,并且 ± 1 级次光栅刻线密度相同。最终优化得到的次镜面型矢高分布如图 9 所示,光栅刻线区域为直径为 30 mm 的圆形区域,刻线密度均为 2000 line/mm,与 SPICE 仪器^[33]使用的中心刻线密度为 2400 line/mm 的超环面变线距(TVLS)光栅相比,本文设计的系统选用的 TULS 光栅的加工和检测难度更小,工程化制作具有可行性。三个级次的次镜均具有 4.5 倍以上的横向放大率,使得系统在获得良好成像质量的同时,显著减小了体积,相比于 MOSES 高达 2400 mm \times 560 mm \times 80 mm 的光学体积,新系统的光学包络体积仅为 950 mm \times 280 mm \times 240 mm,更加适合卫星遥感平台的应用。

4.3 系统性能评价

图 10(a)~(c)分别为-1 级次、0 级次和+1 级次

在 46.52 nm 处弥散斑均方根(RMS)半径随二维视场变化的分布图。各级次的弥散斑 RMS 半径在全视场内的最大值分别为 5.12 μm 、5.87 μm 、6.26 μm ,除+1 级次边缘视场外,各级次的弥散斑 RMS 半径均小于像元尺寸的一半(6 μm),说明系统取得了良好的空间和光谱成像性能。

图 11(a)~(c)分别为-1 级次、0 级次和+1 级次在 46.52 nm 处的调制传递函数(MTF)曲线图。除部分边缘视场外,各级次 MTF 在奈奎斯特空间频率(41.67 lp/mm)处均高于 0.6,接近衍射极限,说明系统具有良好的成像质量。

选用圈入弥散斑 80% 能量的方形全宽对应的空间分辨率作为评价系统空间分辨率的指标,图 12(a)~(c)分别为-1 级次、0 级次和+1 级次的几何圈入能量曲线图。各级次在 46.52 nm 处全视场圈入弥散斑 80% 能量的方形全宽分别为 10.800 μm 、12.212 μm 、

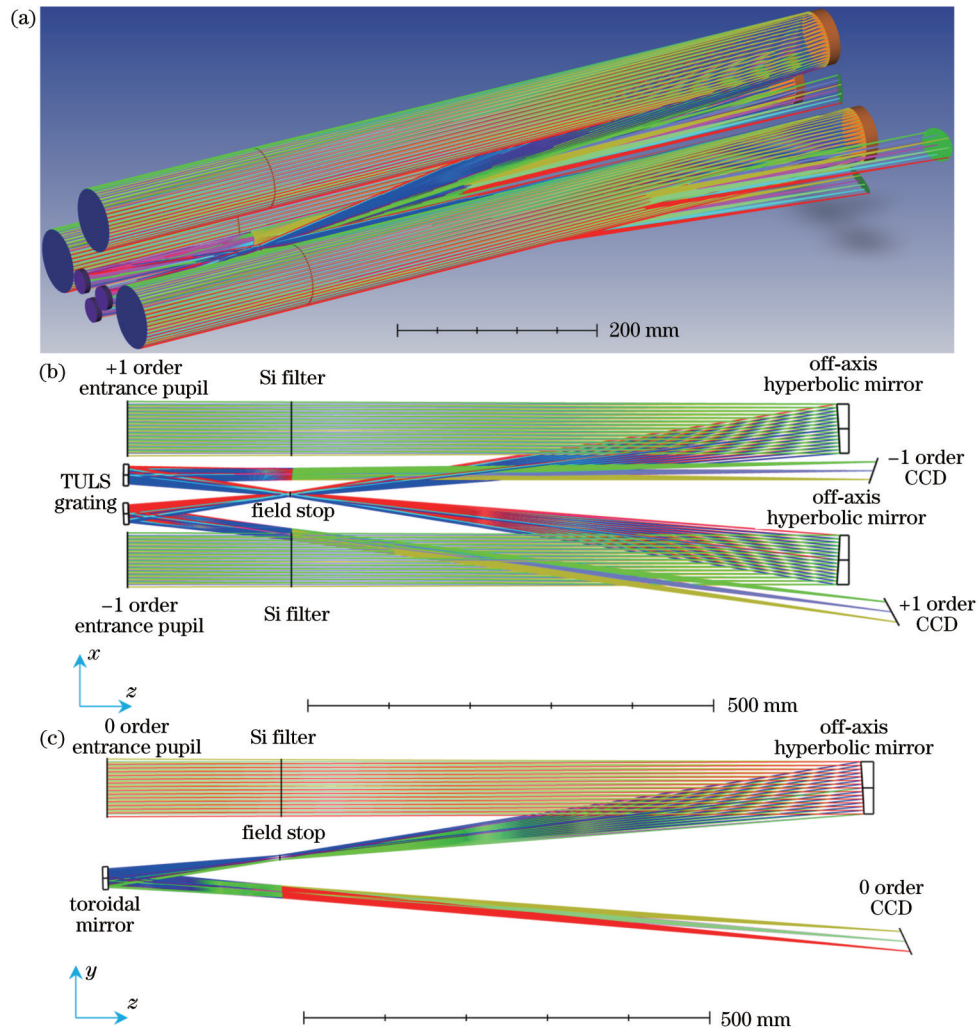


图 6 三级次无狭缝成像光谱仪光路原理图。(a)3D 模型图;(b)±1 级次子系统光路布局图;(c)0 级次子系统光路布局图
Fig. 6 Optical layouts of three-order slitless imaging spectrometer. (a) 3D model diagram; (b) optical layout of ±1 order subsystems; (c) optical layout of 0-order subsystem

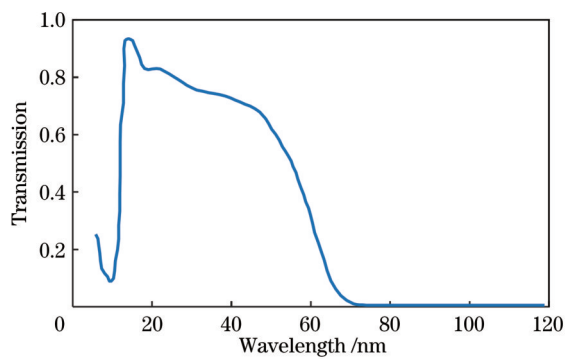


图 7 厚度为 0.1 μm 的硅滤光片透过率曲线
Fig. 7 Transmission of Si filter with 0.1 μm thickness

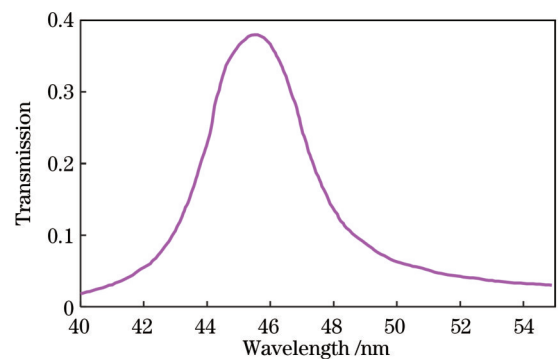


图 8 Sc/Si 多层膜的反射率曲线
Fig. 8 Reflectivity of Sc/Si multilayer

13.624 μm, 对应的空间分辨率分别为 0.696"、0.787"、0.878"; 当方形全宽达到探测器像元尺寸 (12 μm) 时, 除部分级次少数边缘视场外, 三级次相应的几何圈入能量分数均大于 85%, 系统像元空间分辨率达到 0.773", 考虑到探测器的二倍频采样, 系统空间分辨率达到 1.547"。

系统的光谱分辨率取决于 TULS 光栅在 ±1 级次的设计结果, 利用式 (8) 计算得到的 ±1 级次理论像元光谱分辨率如表 4 所示, -1 级次和 +1 级次的理论像元光谱分辨率分别为 0.00622 nm、0.00509 nm。为验证各级次是否具有理论像元光谱分辨率 $\Delta\lambda$, 分别在各级次设置 $\lambda_0 - \Delta\lambda$ 、 λ_0 、 $\lambda_0 + \Delta\lambda$ 三个波长, 其中 λ_0 为

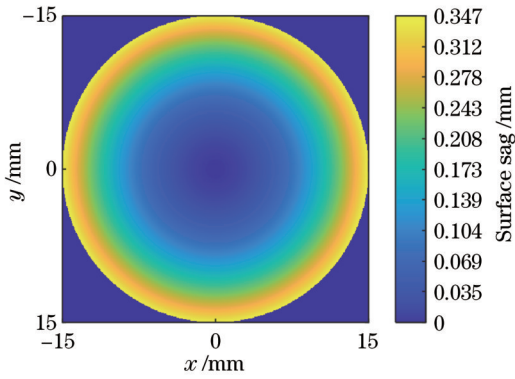
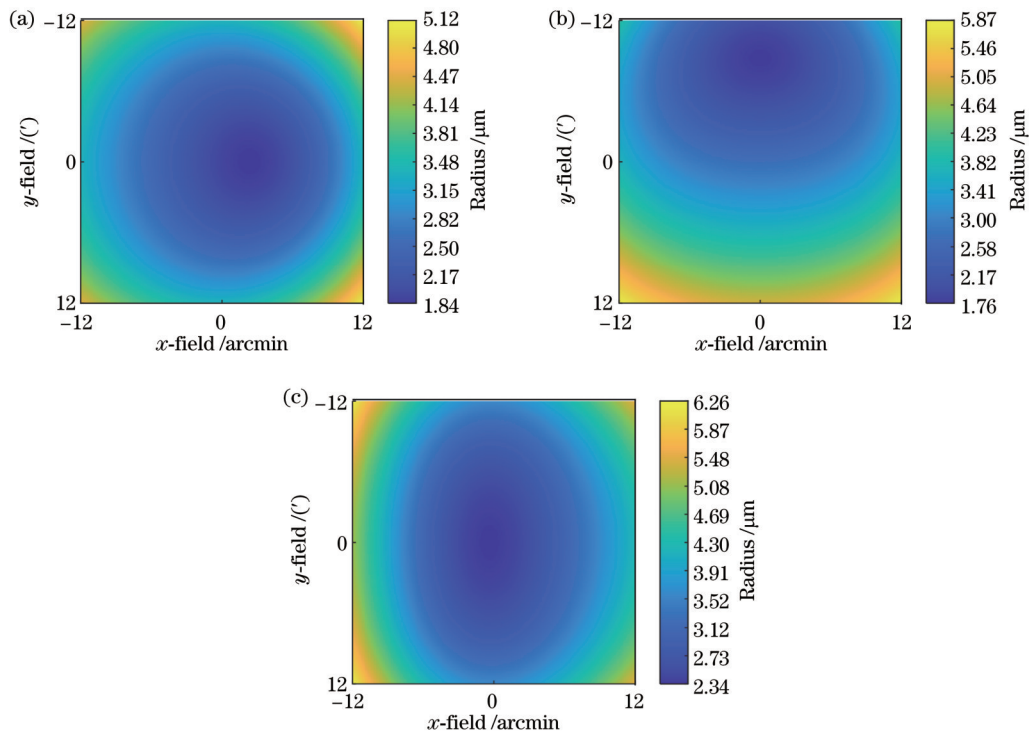


图9 次镜阵列面型矢高分布图

Fig. 9 Surface sag map of secondary mirror array

46.52 nm, $\Delta\lambda$ 为各级次理论像元光谱分辨率, 仿真得到全视场下的弥散斑分布图, -1 级次和 $+1$ 级次的像元光谱分辨率验证结果分别如图 13(a)、(b) 所示。在各级次像面上, 三个波长的弥散斑在全视场下均被明显分开, 说明各级次具有理论像元光谱分辨率, 系统像元光谱分辨率可达 0.0078 nm, 反演的光谱分辨率可达 0.0078 nm, 满足设计指标要求。

图 10 弥散斑 RMS 半径随二维视场变化的分布图。(a) -1 级次; (b) 0 级次; (c) $+1$ 级次Fig. 10 RMS radius of defocused spot varying with 2D field. (a) -1 order; (b) 0 order; (c) $+1$ order

5 结 论

提出并设计了一款新型三级次无狭缝成像光谱仪, 仪器采用两个 TULS 光栅作为衍射分光元件, 提供 ± 1 级次的衍射成像, 0 级次的非色散成像由反射镜

4.4 公差分析

将制造公差和装配公差引入无狭缝成像光谱仪系统中, 分析其对光谱成像性能的影响, 并获取合理的公差分配。在 ZEMAX 软件中给定初始的公差范围, 公差仿真过程中采用反灵敏度分析方法, 将探测器作为后焦距补偿元件, 采用像面弥散斑 RMS 半径作为评价标准, 蒙特卡罗循环次数设置为 1000 次, 通过反复迭代得到系统关键元件的公差容限如表 5 所示。在该公差容限下, 后焦距变化范围为 ± 9.42 mm, 标准偏差为 3.81 mm, 像面弥散斑 RMS 半径有 90% 的概率在 7.44 μm 内变化, 80% 的概率在 6.40 μm 内变化, 说明系统的像质衰减概率是在可控的范围内。

本文对单个 TULS 光栅同时工作于三个级次的光学系统进行了公差分析, 得到的系统关键元件的公差容限如表 5 所示。可见, 单光栅三级次结构的系统相比于本文设计的系统, 主镜的曲率半径、圆锥系数、表面不规则度和粗糙度公差要求更加严格, TULS 光栅的曲率半径、元件偏心与倾斜、表面不规则度和粗糙度公差要求更加严格, 其余公差项指标相当。因此, 本文设计的单光栅仅工作于单个级次的系统, 具有更宽松的公差容限。

提供。系统在 Ne VII 46.52 nm 发射谱线下可实现 $24' \times 24'$ 视场的高分辨率光谱成像观测, 空间分辨率为 1.547", 通过三个级次图像的光谱数据反演, 可提取到分辨率为 0.0078 nm 的高光谱数据。系统性能评价和公差分析结果表明新型成像光谱仪具有优良的成像质

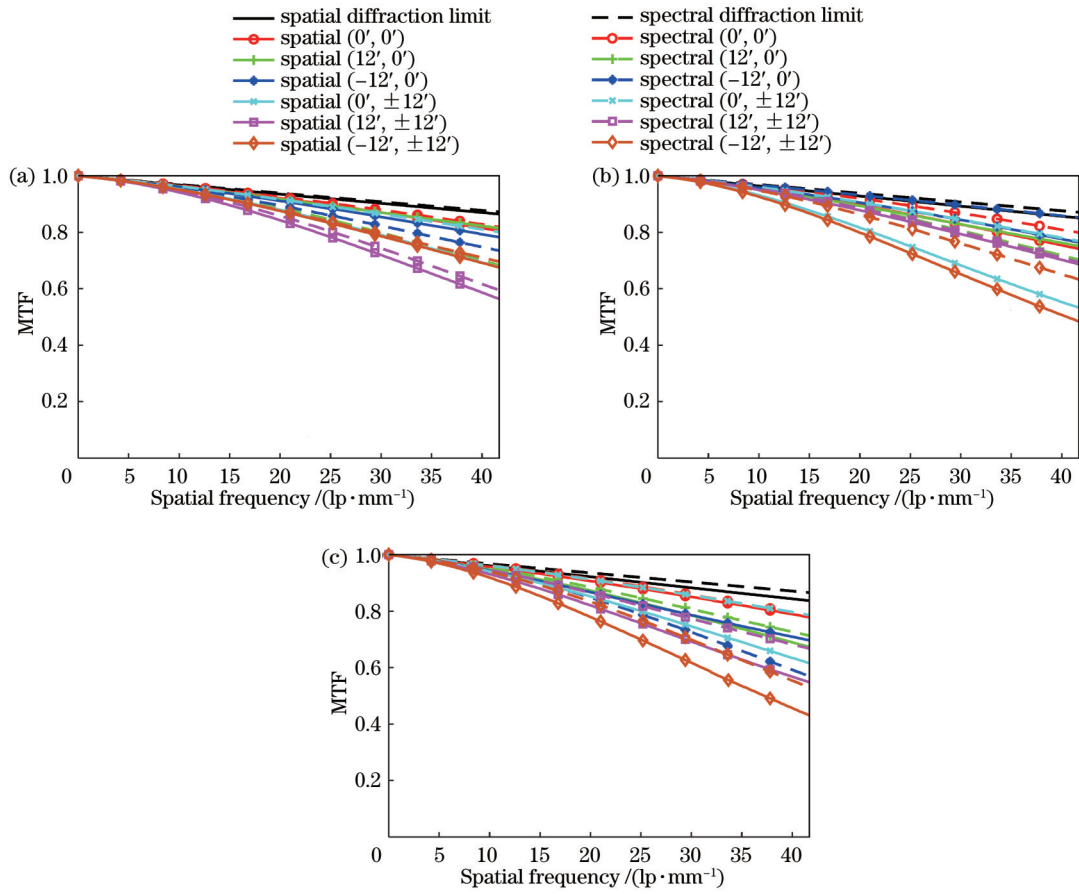


图 11 仪器在不同衍射级次下的 MTF。(a) -1 级次; (b) 0 级次; (c) +1 级次

Fig. 11 MTF of design system under different diffraction orders. (a) -1 order; (b) 0 order; (c) +1 order

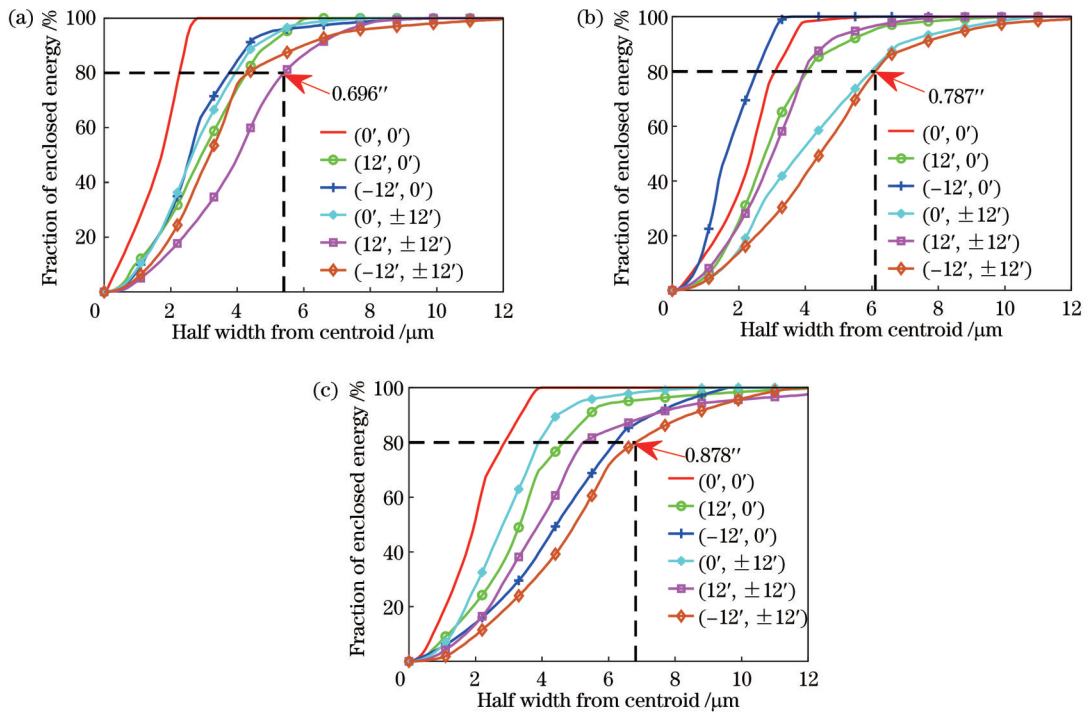


图 12 用于评价光学系统空间分辨率的几何圈入能量。(a) -1 级次; (b) 0 级次; (c) +1 级次

Fig. 12 Geometric ensquared energy to evaluate system's spatial resolution. (a) -1 order; (b) 0 order; (c) +1 order

表 4 理论计算得到的±1级次光谱分辨率

Table 4 Theoretically calculated spectral resolution of ±1 order

m	Spectral resolution /nm	$\lambda/\Delta\lambda$	Light-of-sight velocity /($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)
-1	0.00622	7479.10	40.11
+1	0.00509	9139.49	32.82

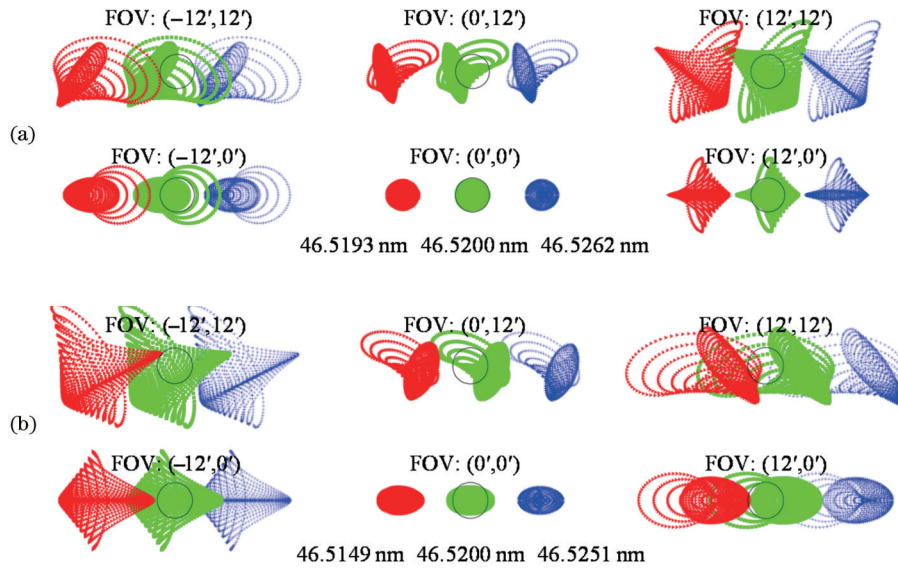


图 13 -1级次和+1级次的光谱分辨率验证。(a)-1级次;(b)+1级次

Fig. 13 Spectral resolution verification for -1 order and +1 order. (a) -1 order; (b) +1 order

表 5 系统关键元件的公差容限

Table 5 Tolerance limits of key components of system

Component	Tolerance item	Single grating working in single order	Single grating working in three orders
Primary mirror	Surface irregularity (RMS)	$\lambda/25$ ($\lambda=632.8$ nm)	$\lambda/40$ ($\lambda=632.8$ nm)
	Conic	± 0.003	± 0.001
	Radius of curvature /mm	± 0.8	$\pm R/3000$
	Microroughness (RMS) /nm	0.6	0.4
	Element decenter / μm	± 25	± 30
	Element tilt /($^\circ$)	± 0.01	± 0.01
TULS grating	Surface irregularity (RMS)	$\lambda/30$ ($\lambda=632.8$ nm)	$\lambda/40$ ($\lambda=632.8$ nm)
	Line density /($\text{groove}\cdot\text{mm}^{-1}$)	± 1	± 1
	Radius of curvature /mm	± 0.12	$\pm R/3000$
	Microroughness (RMS) /nm	0.4	0.25
	Element decenter / μm	± 10	± 5
	Element tilt /($^\circ$)	± 0.025	± 0.010

量、紧凑的系统体积、宽松的公差容限。为了实现对太阳上层过渡区爆发活动的高时空分辨观测,在仪器的实际工程化研制的过程中,高精度且快速收敛的光谱数据反演算法是必需的;另外,为了满足基于遥感卫星平台的应用,仪器的平场及辐射定标,杂散光分析、抑制,以及热流控制等是不可忽略的关键技术。

参 考 文 献

[1] 刘睿,陈耀,邓元勇,等.中国太阳物理学研究进展[J].科学通

报, 2019, 64(19): 2011-2024.

Liu R, Chen Y, Deng Y Y, et al. Recent research progress of solar physics in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64 (19): 2011-2024.

[2] 颜毅华,谭宝林.太阳物理研究与发展[J].中国科学院院刊, 2012, 27(1): 59-66.

Yan Y H, Tan B L. Research and development of solar physics [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(1): 59-66.

[3] 杨孟飞,代树武,王颖,等.太阳空间探测进展与展望[J].中国空间科学技术, 2022, 42(5): 1-10.

Yang M F, Dai S W, Wang Y, et al. Progress and prospect of

- solar exploration in space[J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(5): 1-10.
- [4] 陈鹏飞. 对太阳物理发展趋势的展望[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51(11): 140-144.
Chen P F. Perspectives on the promotion of solar physics[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2021, 51(11): 140-144.
- [5] 方成. 走进我们生活的新学科: 空间天气学[J]. 自然杂志, 2006, 28(4): 194-198, 250.
Fang C. Space weather comes into our life[J]. Chinese Journal of Nature, 2006, 28(4): 194-198, 250.
- [6] 魏奉思. 空间天气科学与有效和平利用空间[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(5): 457-463.
Wei F S. Space weather science and the effective peaceful use of space[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(5): 457-463.
- [7] 王水. 空间天气研究的主要科学问题[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(8): 807-812.
Wang S. Major science problems on space weather research[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(8): 807-812.
- [8] 田晖, 谭博, 夏利东, 等. 太阳过渡区的结构与特性[J]. 天文学进展, 2009, 27(1): 1-13.
Tian H, Tan B, Xia L D, et al. Structure and characteristics of the solar transition region[J]. Progress in Astronomy, 2009, 27(1): 1-13.
- [9] Tian H. Probing the solar transition region: current status and future perspectives[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2017, 17(11): 110.
- [10] 章敏, 夏利东, 黄正化. 太阳过渡区爆发事件的观测及理论研究进展[J]. 天文学进展, 2010, 28(3): 229-242.
Zhang M, Xia L D, Huang Z H. Observational and theoretical studies on explosive events in the solar transition region[J]. Progress in Astronomy, 2010, 28(3): 229-242.
- [11] 白先勇, 田晖, 邓元勇, 等. 太阳极紫外光谱探测的历史与展望[J]. 空间科学学报, 2023, 43(3): 406-422.
Bai X Y, Tian H, Deng Y Y, et al. Current status and future perspectives of solar spectroscopic observations at extreme ultraviolet wavelengths[J]. Chinese Journal of Space Science, 2023, 43(3): 406-422.
- [12] Tousey R, Bartoe J D F, Brueckner G E, et al. Extreme ultraviolet spectroheliograph ATM experiment S082A[J]. Applied Optics, 1977, 16(4): 870-878.
- [13] Domingo V, Fleck B, Poland A I. The SOHO mission: an overview[J]. Solar Physics, 1995, 162(1): 1-37.
- [14] Harrison R A, Sawyer E C, Carter M K, et al. The Coronal Diagnostic Spectrometer for the solar and heliospheric observatory[J]. Solar Physics, 1995, 162(1): 233-290.
- [15] Lidiard K A, Gray P F. Optical design of the coronal diagnostic spectrometer (an instrument on the Solar and Heliospheric Observatory)[J]. Optical Engineering, 1997, 36(8): 2311-2319.
- [16] Bai X Y, Tian H, Deng Y Y, et al. The solar upper transition region imager (SUTRI) onboard the SATech-01 satellite[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2023, 23(6): 065014.
- [17] Shimizu T, Imada S, Kawate T, et al. The solar-C_EUVST mission[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11118: 1111807.
- [18] Shimizu T, Imada S, Kawate T, et al. The Solar-C (EUVST) mission: the latest status[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11444: 114440N.
- [19] Suematsu Y, Shimizu T, Hara H, et al. Instrumental design of the Solar Observing Satellite: solar-C_EUVST[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11852: 118523K.
- [20] Kankelborg C C, Thomas R J. Simultaneous imaging and spectroscopy of the solar atmosphere: advantages and challenges of a 3-order slitless spectrograph[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4498: 16-26.
- [21] Fox J L, Kankelborg C C, Thomas R J. A transition region explosive event observed in he ii with the Moses sounding rocket [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2010, 719(2): 1132-1143.
- [22] 彭吉龙. 空间太阳极紫外无狭缝光谱成像技术综述[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(5): 450-456.
Peng J L. Review of slitless spectral imaging technologies for space solar extreme-ultraviolet observation[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(5): 450-456.
- [23] 邢阳光, 李林, 彭吉龙, 等. 三级次太阳极紫外窄波段无狭缝成像光谱仪光学设计[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0730003.
Xing Y G, Li L, Peng J L, et al. Optical design of 3-order solar extreme ultraviolet narrowband slitless imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0730003.
- [24] Wilhelm K, Curdt W, Marsch E, et al. SUMER - solar ultraviolet measurements of emitted radiation[J]. Solar Physics, 1995, 162(1/2): 189-231.
- [25] Haber H. The torus grating[J]. Journal of the Optical Society of America, 1950, 40(3): 153-165.
- [26] Huber M C E, Tondello G. Stigmatic performance of an EUV spectrograph with a single toroidal grating[J]. Applied Optics, 1979, 18(23): 3948-3953.
- [27] Harada T, Sakuma H, Takahashi K, et al. Design of a high-resolution extreme-ultraviolet imaging spectrometer with aberration-corrected concave gratings[J]. Applied Optics, 1998, 37(28): 6803-6810.
- [28] Poletto L, Thomas R J. Stigmatic spectrometers for extended sources: design with toroidal varied-line-space gratings[J]. Applied Optics, 2004, 43(10): 2029-2038.
- [29] Yu L, Wang S R, Qu Y, et al. Broadband FUV imaging spectrometer: advanced design with a single toroidal uniform-line-space grating[J]. Applied Optics, 2011, 50(22): 4468-4477.
- [30] Zeng J, Bayanheshig, Li W H, et al. Merit function to design holographic gratings for moderate-resolution monochromators[J]. Applied Optics, 2011, 50(33): 6179-6183.
- [31] 彭吉龙, 朱光武, 韦飞, 等. 太阳极紫外多波段成像仪[J]. 空间科学学报, 2009, 29(4): 417-421.
Peng J L, Zhu G W, Wei F, et al. Solar extreme ultraviolet multichannel imager[J]. Chinese Journal of Space Science, 2009, 29(4): 417-421.
- [32] 齐润泽, 张锦龙, 吴佳莉, 等. 极紫外-真空紫外薄膜光学元件研究[J]. 光学学报, 2022, 42(11): 1134003.
Qi R Z, Zhang J L, Wu J L, et al. Study on extreme ultraviolet-vacuum ultraviolet thin film optical elements[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(11): 1134003.
- [33] Anderson M, Appourchaux T, Auchère F, et al. The Solar Orbiter SPICE instrument: an extreme UV imaging spectrometer [EB/OL]. (2019-09-03) [2023-03-02]. <https://arxiv.org/abs/1909.01183>.

System Design of Extreme Ultraviolet Three-Order Slitless Imaging Spectrometer for Solar Upper Transition Region

Shen Wenjie¹, Xing Yangguang^{1*}, Huang Yifan^{1**}, Peng Jilong², Dai Shuwu³, Wang Ying³,
Zhu Chenglin³, Yan Lei⁴, Liu Yue^{1***}, Li Lin¹

¹*School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

²*Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;*

³*Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100094, China;*

⁴*Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100076, China*

Abstract

Objective Solar transition region is a highly dynamic plasma region with a temperature of 0.02–1 MK in the solar upper atmosphere, which is the key field of solar physics research. Extreme ultraviolet (EUV) multi-order slitless imaging spectrometer can observe the sun in a large field of view (FOV) simultaneously with high spectral, spatial, and temporal resolution. We propose and design a novel solar EUV slitless imaging spectrometer operating at Ne VII 46.52 nm. This instrument can simultaneously correct the off-axis grating aberrations of three diffraction orders in a large FOV ($24' \times 24'$) while meeting the requirements of light weight, compact volume, and large aperture. We hope that our three-order slitless spectral imaging strategy and system design can provide a technical scheme that can achieve continuous snapshot high-resolution spectral imaging observations of the upper transition region.

Methods This instrument utilizes two toroidal uniform line-space (TULS) gratings and a toroidal mirror as the diffraction element and the reflective element respectively to realize a new three-order spectral dispersion structure. The ± 1 order dispersion planes overlap with each other and are orthogonal to the 0-order imaging plane without dispersion. We build the paraxial optical model and calculate the initial solution of the optical system. By adopting the multi-configuration of ZEMAX software and the self-defined optimization function, the initial structural parameters of the three-order subsystems are globally optimized by considering the aberration correction conditions of the TULS grating, system resolution requirements, and geometric constraints. Finally, the tolerance analysis is carried out to obtain an optical system with reasonable tolerance allocation.

Results and Discussions Figs. 6 (a)–(c) show the optical layout of the entire instrument, ± 1 order subsystems, and 0-order subsystems respectively. This instrument consists of three hyperboloidal mirrors with off-axis aperture, three Si filters, two TULS gratings, a toroidal mirror, a field aperture, and three independent planar detectors. This entire instrument has a compact optical envelope volume of 950 mm \times 280 mm \times 240 mm, the focal length is 3200 mm, and the FOV is $24' \times 24'$. Meanwhile, we employ a Si filter with a thickness of 0.1 μm to suppress the strong solar radiation in the visible band. The transmittance curve is shown in Fig. 7. The same periodic Sc/Si multilayers are coated at all optical surfaces to provide the reflectivity at 46.52 nm. The reflectivity curve is shown in Fig. 8. To reduce the conversion costs of the system, we add constraint conditions in the optimization process to make the final optimized TULS grating and mirror have identical surface height distribution and grating groove density. The surface height distribution is shown in Fig. 9.

Figs. 10 (a)–(c) are the RMS radius field map of the spot diagram of the three-order subsystems. Except for the marginal FOV of +1 order, the RMS radius of the spot diagram in the full FOV of each order is less than half of the pixel size. Figs. 11 (a)–(c) are the three-order modulation transfer function (MTF) curves respectively. Except for a few marginal FOV, all orders are greater than 0.6 at the Nyquist frequency (41.67 lp/mm), which is close to the diffraction limit. The image quality evaluation shows that the system has excellent imaging performance.

Figs. 12 (a)–(c) are the geometric ensquared energy curves of the instrument. Except for a few marginal FOV, the square full width with 80% ensquared energy at all orders is less than the pixel size. Considering the sampling frequency of the detector, the spatial resolution of the system is 1.547". By adopting the theoretical calculation method, we obtain the pixel spectral resolution ($\Delta\lambda$) at -1 order and $+1$ order is 0.00622 nm and 0.00509 nm, respectively. The spot diagram distribution in the full FOV at ± 1 order is shown in Figs. 13 (a)–(b). The spot diagram of three wavelengths with a wavelength difference $\Delta\lambda$ is obviously separated on the image plane, which indicates that the spectral resolution of the system is 0.0078 nm.

Table 5 shows the tolerance limits of key components of the system. Under this tolerance, the RMS radius of the spot diagram on the image plane has a 90% probability of changing within 7.44 μm , and an 80% probability of changing within

6.4 μm . Tolerance analysis is carried out for the system with single grating working simultaneously at three orders. The results are shown in Table 5. The comparison shows that the designed instrument has a looser tolerance.

Conclusions We propose and design a novel three-order slitless imaging spectrometer. A concave grating array is adopted as the diffractive optical element, and a single grating only works at a single diffraction order to correct the off-axis grating aberration in a large FOV. This system selects Ne VII 46.52 nm spectral line as the central wavelength, and it can realize high-resolution observation under a large FOV ($24' \times 24'$). The spatial resolution of the system is $1.547''$, and the spectral resolution obtained by spectral data inversion is 0.0078 nm. The performance evaluation and tolerance analysis of the system show that the new imaging spectrometer has excellent imaging performance, compact system volume, and loose tolerance. Thus, it is suitable for deployment on remote-sensing satellite platforms to achieve high-resolution observation of solar upper-layer transition regions.

Key words imaging systems; solar space observation; solar extreme ultraviolet; imaging spectrometer; slitless; toroidal uniform line-space grating