

# 可获得高分辨率谱线信息的新型太阳极紫外成像仪

彭吉龙<sup>1</sup>, 冯桃君<sup>1</sup>, 聂翔宇<sup>1</sup>, 田东波<sup>1</sup>, 易忠<sup>1</sup>, 王姗姗<sup>2</sup>,  
于钱<sup>1</sup>, 张凯<sup>1</sup>, 马子良<sup>1</sup>

1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094
2. 北京理工大学, 北京 100081

**摘要** 极紫外光谱观测和诊断是研究太阳大气基本物理过程的最重要手段之一。但因为波长短, 很多可见光仪器的设计方案不再适用, 且极紫外观测只能在太空中开展。国际上现有卫星上的太阳极紫外成像仪和光谱仪都有各自的不足, 比如极紫外成像仪不能获得高光谱分辨率的谱线信息; 狭缝式光谱仪通过扫描可得到活动区域的信息, 但扫描时间过长, 对于研究剧烈变化的太阳活动有很大的局限性。这些不足制约了对日冕物质抛射(CME)和耀斑等太阳活动的高精度观测及对其机理的研究: 无法看到 CME 在内日冕的加速过程, 而且无法将可见光看到的 CME 现象同极紫外看到的日面源区直接联系; 缺少观测目标的视向速度信息, 难以识别 CME 的触发过程。采用多级衍射成像方式的一种新型太阳极紫外成像仪, 除实现传统极紫外成像仪功能外, 还可以在太阳活动变化过程中同步获得全日面各区域的光谱信息。新型成像仪可以得到高光谱分辨率数据, 用于反演低日冕的等离子体视向速度, 获得全日面的速度分布, 与同时得到的高空间分辨率图像相结合, 可以识别太阳活动现象对应的物质运动, 为空间科学研究提供数据; 因为没有狭缝和运动部件, 可以实现大视场的太阳活动区域的高时间分辨率成像, 有利于捕捉日面活动的快速变化。新型成像仪采用无狭缝光谱分光成像的设计理念, 即同一时间把一定光谱带宽的信息记录到一个二维的图像上, 此过程可以看成是从某一个角度将空间和光谱数据立方体投影到一个面上, 然后再利用反演得到空间分辨图像和光谱信息。多级光谱成像的光学设计与传统光谱仪最大的不同是其不存在逐行扫描的狭缝, 这使得其能够同时获得大视场内太阳的空间信息和光谱信息。因为极紫外波段的特殊性, 以及本仪器面向卫星遥感应用, 不可能像可见光波段或者医用 CT 机一样实现很多衍射级的同时成像。因此, 新型极紫外成像仪光学系统由反射镜、色散光栅和五个探测器组成, 入射的太阳极紫外辐射经过光栅色散后分别由五个级次的探测器接收, 其中四个探测器分部接收 $\pm 1$ 和 $\pm 2$ 衍射级图像, 另外一个接收 0 级图像。空间信息可以直接从 0 级图像得到, 而光谱信息则需要根据五个级次成像的反演结果得出。介绍了光学系统的设计以及反演算法, 并分析了反演算法的误差。光路基于变间距光栅设计, 可实现空间分辨率  $1.8 \text{ arcsec} \cdot \text{pixel}^{-1}$ , 光谱分辨率  $7.8 \times 10^{-3} \text{ nm} \cdot \text{pixel}^{-1}$ , 同时减小了体积和重量, 适合空间应用。

**关键词** 极紫外光谱; 多级衍射; 日冕物质抛射

**中图分类号:** P111.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)03-0953-06

## 引言

太阳是唯一可以对之进行高时空光谱分辨率观测的恒星。同时, 太阳活动是空间天气变化的源头, 可能引起日地环境的剧烈变化, 对航天、通讯、导航产生严重的影响。开展太阳活动观测不仅是科学研究的需要, 也是国家战略发展的需求。对日地环境影响巨大的太阳活动包括耀斑、日冕物

质抛射(coronal mass ejections, CME)等。太阳极紫外光谱学观测(包括成像与分光光谱测量)和诊断是研究太阳大气各层次基本物理过程的最重要手段之一, 同时可以监测日冕物质抛射、耀斑等爆发活动及伴随现象的发生、发展过程及其形成机制, 进而研究太阳活动与地球灾害性空间天气事件的因果关系。

目前已经有多个卫星在多个波段对太阳活动进行观测。然而, 现有对太阳活动观测的仪器都存在各自的不足之处,

收稿日期: 2017-12-22, 修订日期: 2018-04-18

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0501300, 2016YFB0501304)资助

作者简介: 彭吉龙, 1977年生, 北京卫星环境工程研究所高级工程师 e-mail: JL\_Peng@hotmail.com

制约了我们对太阳活动的高精度观测及对其机理的研究。

现有对太阳活动进行观测的仪器主要包括成像仪和光谱仪两类。成像仪器可以观测各种太阳活动的形态、强度及其演化,如 SOHO 卫星的极紫外成像望远镜(EIT)、白光日冕仪(LASCO),SDO 卫星的极紫外大气成像组件(AIA)等。目前的光谱仪则一般利用狭缝和光栅,可以同时得到沿狭缝方向一维空间多条谱线的光谱,进而通过扫描得到二维成像光谱,如 SOHO 卫星的 UVCS,IRIS 卫星等。一方面,这些观测仪器为我们理解 CME 及太阳耀斑等爆发现象的物理本质提供了丰富的信息<sup>[1-5]</sup>;另外一方面,由于不能获取全日面活动现象的谱线信息,导致难以识别 CME 的触发过程<sup>[6-7]</sup>。

传统狭缝式光谱仪观测有两个很大的弊端:一是小视场的限制使得这些仪器很难捕捉到爆发现象,狭缝需要恰好在爆发源区才能得到有效的观测;二是因为狭缝扫描时间和曝光积分时间的限制,不能得到活动区域高时间分辨率的信息。这些限制使我们很难观测到 CME 的源区特征和触发过程,影响了我们对 CME 触发机制及初始加速阶段的研究,严重制约了太阳物理的发展。

## 1 新型太阳极紫外光谱成像设计思想

所有的成像光谱仪都是为了得到一个观测对象的空间信息和光谱信息,也就是二维的空间加上一个光谱维的三维立方体的数据。

由于 CCD 成像只能是一个二维的信息,因此传统的狭缝扫描式成像光谱仪通过扫描的方式将一个个的二维数据拼成一个三维数据,扫描完成后拼接得到的图像包含不同时间的空间信息。对于静态或者变化不太剧烈的目标,传统的光谱仪可以取得非常好的效果。但要观测太阳耀斑和 CME 等变化剧烈的目标时,扫描过程中空间分布的数据是不同步的,反演得到的速度图存在很大的误差。

为了在得到目标大视场极紫外图像的同时获得高分辨率的谱线信息,需要采用无狭缝光谱分光成像的设计,即同一时间把一定光谱带宽的信息记录到一个二维的图像上,可以把这个过程看成是从某一个角度将数据立方体投影到一个面上。然后再利用反演得到空间分辨图像和光谱信息。借鉴 X 射线 CT 机设计思想,在极紫外波段,可以采用对全视场多个衍射级同时成像的方式来设计仪器。以三级衍射成像的原理来说明本仪器的设计思想,如图 1 所示,相当于将整个立方体在三个方向进行投影,CCD 记录的将是一个个二维的投影信息,通过三个投影信息反演出原始的三维数据<sup>[8]</sup>。

如图 1 所示,光学系统由一个光栅和三个探测器组成,入射的太阳极紫外辐射经过光栅色散后分别由三个级次的探测器接收,其中两个探测器接收的图像发生过色散,另外一个未发生色散,即相当于一个极紫外的成像仪。空间信息可以直接从未发生色散的那个级次得到,而光谱信息则需要根据三个级次成像的反演结果得出。五级系统同三级系统原理相同,多了两个级次后反演误差更小。

因为可以突破以往成像仪和光谱仪的限制,同时获得空

间图像和高分辨光谱信息,可以观测太阳活动形态演化对应的物质运动,因此本仪器在空间科学研究中有独特的意义。同时,可以重构等离子体运动的三维速度。虽然 CME 的方向受多种因素的影响<sup>[9]</sup>,但初期 CME 的方向和速度,将有助于提高空间天气预报的准确度。

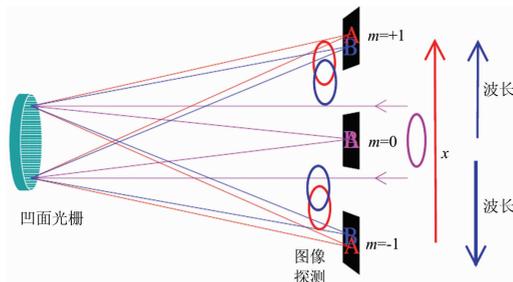


图 1 无狭缝光谱成像实现原理示意图

Fig. 1 The principle of slitless spectral imaging

## 2 设计方案

### 2.1 光学系统

为观测全日面的太阳活动现象,必须有足够大的仪器视场。同时减小仪器体积和重量以适应卫星上的应用。由于极紫外波段光学系统效率普遍偏低,且探测器的量子效率不是很高,因此,光学结构必须尽可能地简化。为此,整体采用窄带滤光片望远镜加光栅光谱仪结构。为保证仪器的信噪比和测速精度,需要对系统的入瞳和光谱仪部分进行合理的选择。

#### (1) 前置光学系统设计

为尽可能减少系统的能量损失,前置光学系统采用离轴系统,离轴抛物面反射镜适于小视场要求系统,光线被聚焦在系统焦面上。采用 Zemax, Lighttools 等与其他工程分析软件完成系统光学设计和杂光分析。

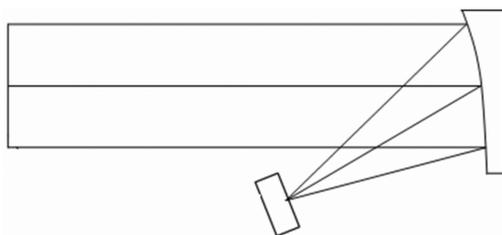


图 2 前置光学系统

Fig. 2 The forward optical system

#### (2) 光谱仪系统设计

由于谱线中心波长的多普勒频移为极小的量,为提高测量精度,波长变化对应的位移变化量应尽可能的大,即仪器的光谱分辨率应足够高,以满足等离子体速度测量精度的要求。为尽量提高系统的效率,光谱仪结构应尽量简单。根据光谱仪结构形式,最简单的光谱仪结构即为罗兰圆结构。采用图 3 所示变异的罗兰圆结构实现无狭缝光谱分光的全日面极紫外成像系统。

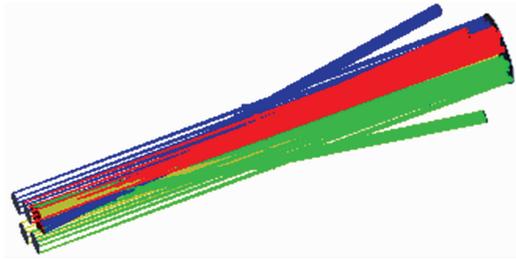


图 3 五级衍射系统光路图

Fig. 3 The layout of the 5-order diffraction system

入射光线经过反射镜反射后入射到高轴椭球面衍射光栅上。通过优化椭球面光栅的倾角, 保证系统具有最佳的成像质量。通过入瞳的偏移, 采用反射镜的任一象限中心位置, 成像在主镜光轴上。经过优化之后, 系统的点列图如图 4—图 8 所示。

直接成像部分:

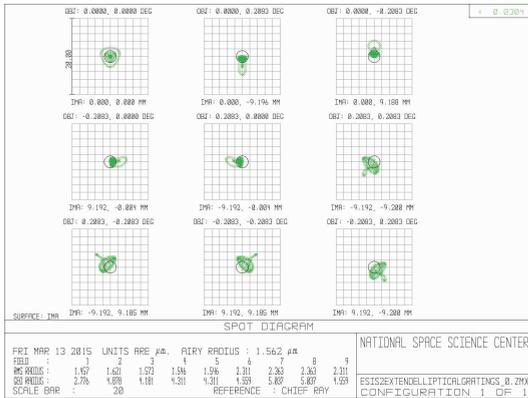


图 4 零级图像点列图

Fig. 4 Spot diagram of the 0-order image

第 1 级衍射:

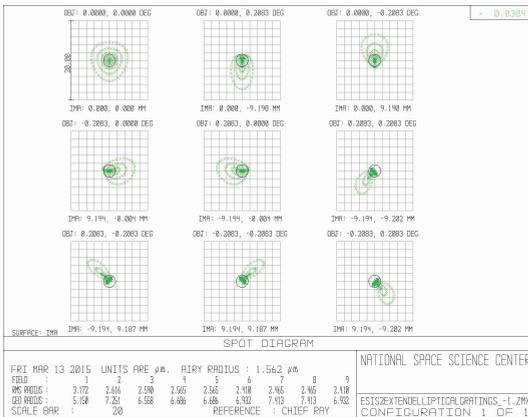


图 5 一级图像点列图

Fig. 5 Spot diagram of the 1-order image

第一级衍射:

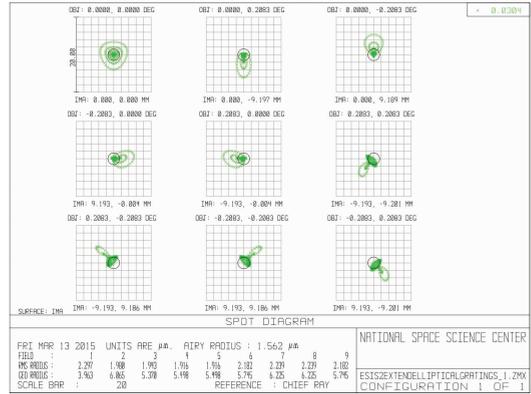


图 6 负 1 级图像点列图

Fig. 6 Spot Diagram of the -1-order image

第 2 级衍射:

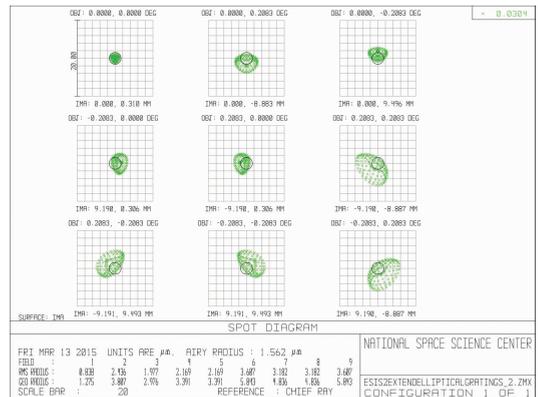


图 7 二级图像点列图

Fig. 7 Spot Diagram of the 2-order image

第一级衍射:

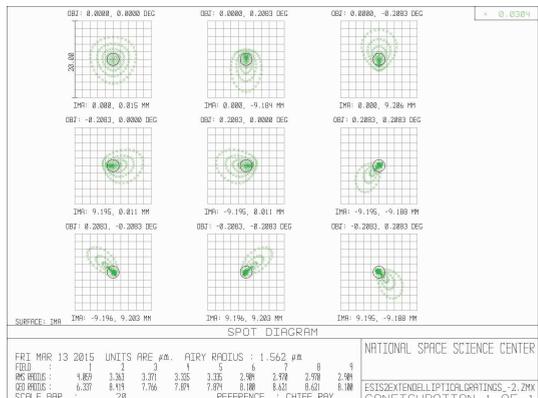


图 8 负二级图像点列图

Fig. 8 Spot Diagram of -2-order image

采用以上结构具有以下优点:

- ① 将多个级次同时集成在一个系统中, 结构形式简单, 利用效率高;
- ② 系统的成像质量好, 光谱分辨率、空间分辨率较高;
- ③ 系统的光学总长仅约 1.3 m, 适合于卫星应用。

这种仪器类型适用于多条极紫外谱线。考虑到目前国内在滤光片、多层膜等方面的工艺成熟度,本项目选择 19.5 nm 成像。仪器对应的技术指标如表 1 所示。

表 1 仪器技术指标

Table 1 Specifications of the instrument

主镜直径/cm	视场/arcmin	面型	光栅常数(变间距)/(Line·mm <sup>-1</sup> )	口径/mm	像元数	像元尺寸/μm	像面尺寸/(mm×mm)	读出噪声(20 kHz)	入射谱线/nm	空间分辨率/(arcsec·pixel <sup>-1</sup> )	光谱分辨率/(mÅ·pixel <sup>-1</sup> )	时间分辨率/s	仪器重量/kg
4	34	椭球面	3 600	22	2 048×2 048	13.5	26.6×26.6	5e <sup>-</sup>	19.5(±0.5)	≤1.8	≤78	≤30	≤40

## 2.2 反演算法

多级衍射成像反演谱线信息的方法是一个病态反演问题。比较压缩感知、傅里叶反投影、SMART(smooth multiplicative algebraic reconstruction technique)等不同反演方法后,发现 SMART 算法对于这种有限级次的病态反演问题能够给出更准确和高效的结果。所以在 SMART 算法基础上,针对本仪器开发算法软件。用  $G(x, \lambda)$  来定义数据反演目标,  $T$  表示投影过程,  $R$  代表重采样过程,  $I$  代表各个角度的投影。具体流程如下:

(1) 设  $G(x, \lambda) = I_0(x)I_\infty(\lambda)/N$ 。  $N$  是 0 维图像所有的像素个数。

(2) 在  $-2, -1, 0, +1, +2, \infty$  六个方向对目标  $G(x, \lambda)$  进行投影,一共得到六个一维图像,其中  $+2, -1, -2$  三个级次需要进行重采样处理。即  $[I'_{+1}, I'_0, I'_\infty] = T[G]$ ,  $[I'_{+2}, I'_{-2}, I'_{-1}] = T[R[G]]$ 。

(3) 投影值将和真实值不同,用其比例来修正“立方体”

$$G = G \left[ \frac{I_0(x)}{I'_0(x)} \right]^\gamma \left[ \frac{I_{+1}(x+\lambda)}{I'_{+1}(x+\lambda)} \right]^\gamma G \left[ \frac{I_{+2}(x)}{I'_{+2}(x)} \right]^\gamma \cdot G \left[ \frac{I_{-2}(x)}{I'_{-2}(x)} \right]^\gamma \left[ \frac{I_{-1}(x-\lambda)}{I'_{-1}(x-\lambda)} \right]^\gamma \left[ \frac{I_\infty(\lambda)}{I'_\infty(\lambda)} \right]^\gamma$$

$\gamma$  小于 1,  $\gamma$  是为了防止由于噪声引起的数值不稳定引入的因子。

(4) 平滑改正后的立方体

$$G = G \otimes \frac{1}{1+2a+2b} \begin{bmatrix} 0 & a & 0 \\ b & 1 & b \\ 0 & a & 0 \end{bmatrix}$$

参数  $a$  和  $b$  是为了平滑  $\lambda$  和  $x$  轴。

(5) 重新投影,  $[I'_{+1}, I'_0, I'_\infty] = T[G]$ ,  $[I'_{+2}, I'_{-2}, I'_{-1}] = T[R[G]]$ 。

(6) 评价匹配度 (goodness-of-fit, GOF)。用  $\chi^2 = 1 + \sum (I'_{xi} - I_{xi})^2/N$  作为参数,每个维度都有一个对应的值,  $\chi_0^2, \chi_{+1}^2, \chi_{-1}^2, \chi_{+2}^2, \chi_{-2}^2$ 。

(7) 用  $\chi^2$  来调整平滑参数  $a$  和  $b$ ,  $a = a/(\chi_{+1}^2 \chi_{-1}^2)$ ,  $b = b/\chi_0^2$ 。

跳回 3 进行循环迭代。迭代完成后检查  $\chi^2$  的值,如果  $\chi^2$  不符合条件,则继续进行迭代,迭代初值是上一次的迭代过程的结果。

为了验证本仪器 5 维光学系统的效果,我们利用一组模拟数据,分别在 5 个维度和 3 个维度投影的情况下进行了反演重建,其结果如图 9 所示。

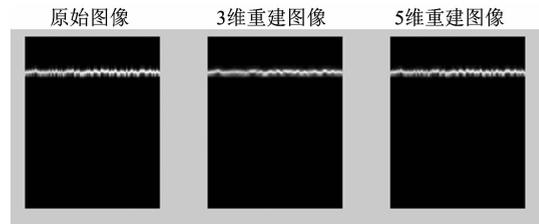


图 9 重建图像对比

Fig. 9 Comparison of the primitive image and the reconstructed images

对重建的谱线中心位置与原始数据进行比较,引入谱线中心的相关系数  $\rho$ 、谱线偏移拟合直线的斜率  $k$ 、谱线偏移的均方根误差 3 个参数用来定量地判断重建结果的好坏。在这次的模拟数据反演中,三个参数的值如表 2 所示。

表 2 反演效果评价指标

Table 2 The evaluation indicators for the reconstruction

	相关系数	斜率 $k$	均方根误差
3 维重建	0.735 6	0.492 8	0.397 9
5 维重建	0.966 7	0.847 0	0.158 8

可以看出,用 5 个维度反演图像比 3 个维度反演得到的结果更精确:相关系数提升到 0.966 7,说明用 5 个维度得到的谱线中心位置已经基本和原始图像重合;斜率值由原本的 0.5 左右上升到 0.85 左右,相对于 3 个维度反演 50% 的系统误差,15% 的系统误差对于太阳活动观测我们认为是可以接受的;均方根误差从 0.397 9 降为 0.158 8,说明重建之后得到的谱线偏移量更加靠近真值<sup>[10]</sup>。因此,可以认为这种新的光学设计思路是可行且十分有效的。

## 4 结论

由于太阳爆发现象的变化时标非常短,而传统的狭缝扫描式光谱仪建立二维光谱图像的方法并不是一个时间同步的过程,所得到的速度图在不同空间区域的信息在时间上相差很大,限制了光谱观测在太阳活动现象研究中的价值。因此,需要采用一种快速的成像技术,必须在太阳发生明显变化之前建立起完整的带光谱信息的图像。对于可见光区域,通过技术的改进,利用传统的“扫描”技术就可以达到这个目标<sup>[11]</sup>。但对于极紫外区域来说,由于光子效率低,分光手段

受限, 用传统的技术无法实现快速成像的目标。本文介绍的带谱线信息的新型成像仪可以在极紫外区域实现“大视场空间信息”和“光谱信息”同步成像的目标, 它抛弃了狭缝, 将整个视域内的所有数据全部接收, 从而不必进行扫描, 实现同时对全日面空间、时间和光谱的高分辨率观测, 获得真正

意义上的全日面速度图。此外, 可以利用单台仪器实现对 CME 部分亮结构视向速度和传播方向的测量, 提高预报 CME 对地影响的准确性和精度, 对于太阳物理研究和空间天气研究都有重要意义。

## References

- [ 1 ] Li L P, Zhang J, Peter H, et al. *Nature Physics*, 2016, 12(9): 847.
- [ 2 ] Chen P F. *GMS*, 2016, 216: 381.
- [ 3 ] Lemen J R, Title A M, Akin D J, et al. *Solar Phys.*, 2012, 275(1): 17.
- [ 4 ] Pesnell W D, Thompson B J, Chamberlin P C. *Solar Phys.*, 2012, 275(1): 3.
- [ 5 ] Pontieu B D, Title A M, Lemen J R, et al. *Solar Phys.*, 2014, 289(7): 2733.
- [ 6 ] Liu K, Wang Y M, Shen C L, et al. *Astrophysical Journal*, 2012, 744(2): 168.
- [ 7 ] Harra L K, Matthews S, Culhane J L, et al. *Astrophysical Journal*, 2013, 774(2): 122.
- [ 8 ] Fox J L, Kankelborg C C, Thomas R J. *Astrophysical Journal*, 2010, 719(2): 1132.
- [ 9 ] Wang Yuming, Zhang Quanhao, Liu Jiajia, et al. *JGR*, 2016, 121(8): 7423.
- [ 10 ] SHENG Fang-liang, PENG Ji-long(盛方梁, 彭青龙). *Chin. J. Space Sci. (空间科学学报)*, 2016, 36(6): 925.
- [ 11 ] Hagino M, Ichimoto K, Kimura G, et al. *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation, Proceedings of SPIE*, 2014, 9151: 91515V.

## Novel Solar Extreme Ultraviolet Spectral Imager with High Spectral Resolution Line Information

PENG Ji-long<sup>1</sup>, FENG Tao-jun<sup>1</sup>, NIE Xiang-yu<sup>1</sup>, TIAN Dong-bo<sup>1</sup>, YI Zhong<sup>1</sup>, WANG Shan-shan<sup>2</sup>, YU Qian<sup>1</sup>, ZHANG Kai<sup>1</sup>, MA Zi-liang<sup>1</sup>

1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China

2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** Extreme Ultraviolet (EUV) spectroscopic observation is one of the most important approaches in diagnosing the basic physical phenomena in the solar atmosphere. However, the designs of many instruments used for visible wavelengths cannot be applied for EUV because of its much shorter wavelength. Conventional solar EUV imagers and spectrographs have their own limitations; Where as we cannot get spectral information from a EUV imager, it takes too long time for a single slit spectrometer to scan an area, which makes it difficult to catch the dynamics of highly transient solar activities. These limitations make the high resolution observation of solar activities and the research of its mechanism very difficult. We cannot observe the acceleration process of CME (coronal mass ejections) in inner coronal and cannot connect the CME observed by visible light with the activity area observed by EUV directly. Moreover, we cannot get the line-of-sight velocity of the solar activities, so it is difficult to find the source area of CME. In this paper, we present the design of a new type of solar EUV spectral imager with extra high spectral resolution. It can get the full-disk EUV image of the Sun with additional information on spectral line profile. So we can get the line-of-sight velocity of plasma in low coronal and the velocity map of the full coronal disk. Combining the spatial and spectral information, we can identify the movement corresponding to the configuration evolvement of the plasma. Because there is no slit and movement assembly, the imager can get high temporal resolution data of the whole solar disk to capture the rapidly transformation of solar activities. The new imager adopts a kind of slitless spectral imaging design, which means to project a narrow band spectrum data from different angle to a plate detector and invert to get the spatial image and spectral information. The biggest difference between the multi-order spectral imaging and the traditional spectrograph is that there is no scanning slit in former. These give the new imager the advantage which can get the spatial and spectral information in a wide field of view simultaneously. Considering the limitations of the EUV band and space application, it is impossible to get many orders image like the medical CT or telescopes response to visible light. Based on the multi-order imager principle, we proposed a five-order spectrograph. The optical system of the new imager consists of a reflect mirror, a grating and five CCD detectors. The dispersed lights

after the grating are received by five detectors. Four detectors receive  $\pm 1$  and  $\pm 2$  orders of diffraction, and another one receives 0 order image with spatial resolution information. The spectral information can be obtained by inversion with five orders spectral images. The paper introduces the design of the optical system based on a varied line space (VLS) grating and the inversion algorithm, which will improve the instrument efficiency and image quality with limited volume and weight. The spatial resolution will be  $1.8 \text{ arcsec} \cdot \text{pixel}^{-1}$  and the spectral resolution will be  $7.8 \times 10^{-3} \text{ nm} \cdot \text{pixel}^{-1}$ . With this technology, we can get the full solar disk velocity map as well as the intensity map simultaneously, which is suitable for space application.

**Keywords** EUV spectrum; Multi-order diffraction; Coronal mass ejections

(Received Dec. 22, 2017; accepted Apr. 18, 2018)

---

## 敬告读者——《光谱学与光谱分析》已全文上网

从 2008 年第 7 期开始在《光谱学与光谱分析》网站([www.gpxygpx.com](http://www.gpxygpx.com))“在线期刊”栏内发布《光谱学与光谱分析》期刊全文,读者可方便地免费下载摘要和 PDF 全文,欢迎浏览、检索本刊当期的全部内容;并陆续刊出自 2004 年以后出版的各期摘要和 PDF 全文内容。2009 年起《光谱学与光谱分析》每期出版日期改为每月 1 日。

《光谱学与光谱分析》期刊社