

ASO-S卫星工程LST爆发模式触发和终止方案*

卢磊^{1†} 黎辉^{1,2} 黄宇^{1,2} 封莉^{1,2‡} 朱波³
王彭⁴ 宋得朝^{1,2} 甘为群^{1,2}

(1 中国科学院紫金山天文台暗物质与空间天文重点实验室 南京 210023)

(2 中国科学技术大学空间科学与天文学院 合肥 230026)

(3 中国科学院西安光学精密机械研究所 西安 710119)

(4 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要 先进天基太阳天文台(ASO-S)是计划于2021年底或2022年上半年发射的中国首颗综合性太阳探测卫星, 莱曼阿尔法太阳望远镜(LST)作为ASO-S的有效载荷之一, 具体包括莱曼阿尔法全日面成像仪(SDI)、日冕仪(SCI)以及白光望远镜(WST) 3台科学仪器和2台导行镜(GT), 其主要目标是在多个波段对太阳上的两类剧烈爆发现象(太阳耀斑和日冕物质抛射)进行连续不间断的高分辨率观测. 为了实现这一观测目标, LST所有仪器的观测模式中均包含了一种针对爆发事件而设置的爆发模式. 该模式下, SCI将以更高的频率进行图像采集, SDI和WST则以更高的频率对爆发所在区域进行图像采集. 测试结果表明, 观测图像经过中值滤波、像元合并处理后, 可以通过监测图像各像元亮度的相对变化提取爆发事件的时间和位置信息. 这些信息将为LST观测模式间的相互切换提供重要电子学输入.

关键词 太阳: 耀斑, 太阳: 日冕物质抛射, 太阳: 日冕, 仪器: 探测器

中图分类号: P111; 文献标识码: A

1 引言

太阳是太阳系的中心, 也是距离我们最近的一颗恒星, 它孕育了地球的万物. 太阳耀斑和日冕物质抛射(CME)是太阳大气乃至整个行星际空间能量释放最为剧烈的两类爆发现象, 蕴含着丰富的物理过程^[1-4]. 太阳磁场是引起太阳活动的一个根本原因, 是太阳上各种活动现象的能量来源. 对于它们的研究, 既能加深人们对太阳的认识和理解, 又

2020-02-17收到原稿, 2020-04-09收到修改稿

*国家自然科学基金项目(U1731241、11921003、11973012、U1931138), 中国科学院空间科学战略先导科技专项项目(XDA15052200、XDA15320103、XDA15320103-01), 中德科学中心合作交流项目(M-0068)资助

[†]leilu@pmo.ac.cn

[‡]lfeng@pmo.ac.cn

能帮助人们理解宇宙中其他恒星上发生的类似现象^[5-6]。同时,太阳具有地面等离子体实验室无法模拟的高温、高压等极端等离子体环境,是天然的等离子体实验室。因此,发生在太阳上的各种物理现象对实验室等离子体的研究具有重要的指导意义。此外,太阳爆发对空间天气的影响又使得对太阳爆发的研究具有重大的现实意义^[7-8]。

先进天基太阳天文台(ASO-S)是计划于2021年底或2022年上半年发射的我国首颗太阳探测卫星^[9]。它的科学目标主要是为了研究太阳磁场、太阳耀斑和日冕物质抛射的起源及3者之间可能存在的因果关系。莱曼阿尔法太阳望远镜(LST)作为ASO-S的有效载荷之一,具体由莱曼阿尔法全日面成像仪(SDI)、莱曼阿尔法日冕仪(SCI)、白光太阳望远镜(WST) 3台科学仪器和2台导行镜(GT)组成,其主要功能是进行全日面(0到1.2倍太阳半径)和内日冕(1.1到2.5倍太阳半径)的成像观测,获取满足科学需求的高分辨率图像,包括:莱曼阿尔法波段(121.6 nm)的全日面和内日冕图像、白光波段(360 nm)的全日面高分辨率图像以及白光波段(700 nm)的内日冕高分辨率线偏振亮度图像^[10-12]。

对于耀斑和暗条爆发等快变活动现象的研究通常需要较高的时间分辨率,特别是变化快、时间短的白光耀斑。为了能够实现对太阳爆发事件的高分辨观测,LST各仪器的观测模式中均包含了一种针对爆发事件而设置的模式,即爆发模式^[10]。该模式下,各仪器将以最快的速度 and 最高的分辨率进行科学数据采集。同时,采集的数据也以尽可能高的数传率下传。然而,在爆发模式下,如果不改变空间分辨率的情况下继续进行全日面成像观测,探测器将产生巨大的数据量,尤其是对于 4608×4608 像元的SDI和WST,这将为星载的数据存储与传输带来巨大的困难。为了克服以上困难并且确保科学目标的实现,SDI和WST在爆发模式期间均采取了开窗观测,即探测器在有爆发事件发生时选择读取爆发区域附近的 1024×1024 像元区域。这样一来,我们需要在太阳爆发事件的初始时刻对事件的爆发时间和发生位置等信息进行提取,以便能及时地进行观测模式的切换。SCI无需开窗,但在事件爆发期间需要以更高频率进行数据采集,因此SCI需要爆发的初始时间信息。

ASO-S没有单独用于爆发事件识别的独立探测系统,因此,LST需要根据自身需求,发展出一套属于自己的爆发模式触发和终止方案。下文将就该方案做具体论述。

2 SDI爆发模式触发及终止方案

SDI的观测模式均包含了常规、爆发和用户3种观测模式^[10]。在常规模式,为了能够尽可能早地识别爆发事件并及时切换至爆发模式,SDI以较快的频率进行数据采集(每10 s采集1幅全日面图像)。然而,由于受到星载数据存储器容量和星地链路带宽的限制,此模式下采集的图像仅部分下传至地面(每间隔采集3幅经卫星下传1幅,即地面接收到相邻图片间的时间间隔为40 s)。当SDI接收到来自星载计算机的爆发模式触发信号时,在完成当前图像采集后,随即进入爆发模式。爆发模式下,SDI每4 s进行一次开窗观测(开窗区域的中心位置为耀斑的发生位置,开窗区域大小为 1024×1024 像元),每40 s穿插进行一次全日面观测。爆发模式期间采集的所有图像均下传。进入爆发模式后,星载计算机开始对爆发模式的终止信号进行判断,当满足终止条件时,SDI自动退出爆发模式。

一般情况下, 太阳耀斑在初始阶段的辐射强度较低且增加缓慢, 要想及时地把它们从复杂的太阳背景辐射中检测出来, 简单地基于全日面辐射流量的阈值检测是远远不够的. 我们的算法是将最新采集的全日面图像与先前采集的背景图像进行比较, 通过设定一定的阈值来判断耀斑的起始和结束. 该算法完全基于SDI在常规模式及爆发模式下采集的全日面图像而设计, 开窗观测产生的太阳部分像不参与计算. 考虑到星载计算机有限的计算资源, 本算法力求简单, 主要包括以下几个步骤:

(1)**中值滤波**. 当空间望远镜在外太空工作时, 互补式金属氧化物半导体(CMOS)探测器容易受到空间宇宙线(高能粒子流)的轰击, 致使观测图像上出现一些孤立且突然增亮的像元, 进而引起观测模式误触发. 这些误触发不仅浪费了有限的数据存储资源, 还会干扰正常耀斑的识别, 因此, 在对耀斑识别之前, 我们采取一定手段对这些孤立的噪声点进行去除. 中值滤波是一种基于排序统计理论并能有效抑制噪声的非线性信号处理技术, 它将观测图像上每一点的像素值设置为该点邻域窗口(即相邻的像元组成的一个窗口)内所有点的中值, 进而消除孤立宇宙线带来的影响. 具体来讲, 当CMOS探测器采集到一幅全日面图像时, 我们首先对该图像上的每一个像元进行中值滤波处理, 滤波窗口的大小为 3×3 像元;

(2)**像元合并**. CMOS探测器采集到的全日面图像具有较高的分辨率(包含 4608×4608 像元), 如果对每个像元都进行阈值判断, 将消耗很大的计算量. 为了降低参与计算的像元数, 在对当前图像进行阈值判断之前, 我们对能够覆盖整个日面及其边缘的 4096×4096 像元进行邻近像元合并(即每相邻 128×128 像元合并成一个超级像元, 超级像元的像素值为被合并像元的平均值), 得到一个由 32×32 个超级像元组成的低分辨率图像. 像元合并后的图像记为 $F_n(i, j)$, 其中 n 代表采集到的图像序列号, i 和 j 分别代表图像沿水平和竖直方向的像元坐标($i = 0, \dots, 31; j = 0, \dots, 31$). 该步骤可有效地降低背景噪声以及以下步骤中所需的计算量;

(3)**中值背景计算**. 判断日面事件是否爆发的一个主要参照标准是事件爆发前的背景亮度. 本方案中, 我们滚动保存当前观测前6 min内采集到的图像, 用于参照背景的计算(注意, 这些图像均已经过中值滤波、像元合并处理). 为了过滤掉异常像元以及耀斑早期辐射带来的影响, 我们对图像上每个像元沿时间方向取中值, 得到一个中值背景, 然后以该中值背景为参照标准来对当前图像进行判断. 为降低中值计算量, 并且保证6 min的时间跨度, 我们每间隔40 s取1幅, 滚动保存9幅图像用于中值背景计算. 考虑到SDI在不同观测模式下不同的采样频率, 常规观测模式下我们每采集4幅取1幅用于中值背景计算, 进入爆发模式后, 采集到的每一幅全日面图像均用于中值背景计算. 由此计算到的中值背景记为 $F_{\text{ref}}(i, j)$ (其中 $i = 0, \dots, 31; j = 0, \dots, 31$);

(4)**阈值图像计算, 判断触发和终止**. 经过以上步骤的预处理, 本步骤开始计算用于判断爆发模式触发和终止的阈值图像 $\gamma_n(i, j)$. $\gamma_n(i, j)$ 代表采集到的第 n 幅图像上横纵坐标分别为 i, j 的像元接收到的辐射强度相对于参照背景的变化量. 具体表达式如下:

$$\gamma_n(i, j) = \frac{[F_n(i, j) - F_{\text{ref}}(i, j)]^2}{F_{\text{ref}}(i, j) + g}, \quad (1)$$

其中 g 是为了避免背景亮度过小而引入的一个背景亮度补充因子. 注意, 为了提高算法对微弱信号的敏感度, 我们对当前观测与参照背景间的差分图像进行了平方运算. 假

设 γ_1 和 γ_2 分别为爆发模式的触发和终止阈值,当阈值图像上的像元满足

$$\gamma_n(i, j) \geq \gamma_1, \quad (2)$$

(本文称之为触发像元)且像元数NP介于NP1和NP2之间时,触发爆发模式,反之则继续进行常规模式观测.注意, NP1和NP2代表触发像元数的下限和上限,分别是为了滤掉一些小耀斑和避免粒子暴事件带来的误触发.进入爆发模式后,星载计算机继续计算阈值图像,并开始对爆发模式的终止信号进行判断,当阈值图像中没有像元满足

$$\gamma_n(i, j) \geq \gamma_2, \quad (3)$$

即阈值图像上所有像元的数值均降到终止阈值以下,退出爆发模式,反之则继续进行爆发模式观测.注意,为避免反复进入,终止阈值应不大于触发阈值,即 $\gamma_2 \leq \gamma_1$.

考虑到现场可编程逻辑门阵列(FPGA)在进行除法运算时的困难,我们将(1)式代入(2)式和(3)式,并进行简单变形得到

$$[F_n(i, j) - F_{\text{ref}}(i, j)]^2 - \gamma_1 F_{\text{ref}}(i, j) - \gamma_1 g \geq 0, \quad (4)$$

$$[F_n(i, j) - F_{\text{ref}}(i, j)]^2 - \gamma_2 F_{\text{ref}}(i, j) - \gamma_2 g \geq 0, \quad (5)$$

分别用 $Q_{n,1}(i, j)$ 、 $Q_{n,2}(i, j)$ 表示(4)式和(5)式的左侧,即

$$Q_{n,1}(i, j) = [F_n(i, j) - F_{\text{ref}}(i, j)]^2 - \gamma_1 F_{\text{ref}}(i, j) - \gamma_1 g, \quad (6)$$

$$Q_{n,2}(i, j) = [F_n(i, j) - F_{\text{ref}}(i, j)]^2 - \gamma_2 F_{\text{ref}}(i, j) - \gamma_2 g, \quad (7)$$

(2)式和(3)式分别等价于,

$$Q_{n,1}(i, j) \geq 0, \quad (8)$$

$$Q_{n,2}(i, j) \geq 0. \quad (9)$$

常规观测模式下,我们使用(6)式计算阈值图像,并将阈值图像满足(8)式的像元标记为触发像元,当触发像元数大于NP1且小于NP2时,进入爆发模式,反之则继续进行常规模式观测.爆发模式下,我们改用(7)式计算阈值图像,当阈值图像满足(9)式的像元数降为零时,退出爆发模式,反之则继续进行爆发模式的观测.需要强调的是,在对爆发模式触发条件进行判断时,考虑到太阳爆发事件的源区都是在日面上,我们把对触发像元的查找范围限制在1.1倍太阳半径范围之内.在对爆发模式退出条件进行判断时,为了避免开窗区域之外的爆发带来的干扰,我们把对满足(9)式的像元的查找范围限制在开窗区域内.

图1是根据以上步骤设计的SDI星上检测软件工作原理流程图,其中 R_{\odot} 为太阳半径.表1给出了SDI星上检测软件需要上注的自由参数列表.在卫星测试阶段,我们需要根据实际观测,对这些参数进行适当的调整,以使得对爆发的探测达到最佳效果.

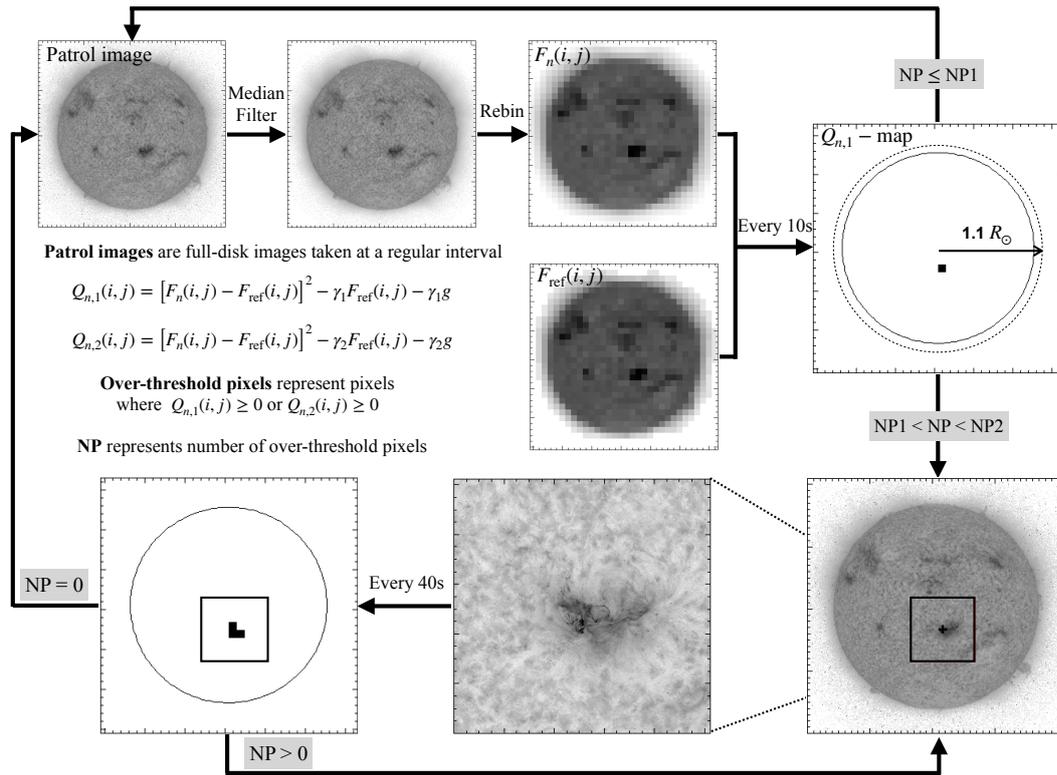


图 1 LST/SDI爆发模式触发和终止方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the trigger and termination scheme of LST/SDI event mode

表 1 LST/SDI爆发事件星上检测软件的自由参数

Table 1 Free parameters of the onboard event detection software of LST/SDI

Parameter	Parameter description
γ_1	Threshold to trigger an event mode
γ_2	Threshold to terminate an event mode
NP1	Minimum number of over-threshold pixels required to trigger
NP2	Maximum number of over-threshold pixels
Maxdur	The allowed maximum duration of the event mode
g	A control parameter to enhance the reference background

3 WST爆发模式触发及终止方案

WST的观测模式也包含常规、爆发和用户3种模式。WST的爆发模式设置较SDI略为简单。在常规模式下, WST每10 s采集1幅全日面图像, 每间隔采集11幅经卫星下传1幅(即地面接受到图像的时间间隔为120 s)。当WST接收到爆发模式的触发信

号(由SDI提供的触发信息给出),在完成当前图像采集后,随即进入爆发模式.进入爆发模式后,WST进行开窗观测(窗口大小同样为 1024×1024 像元),并且每120 s穿插进行一次全日面观测.开窗区域的中心位置同样由SDI提供的触发信息给出.爆发模式期间,WST的开窗观测采用两种采样间隔,分别对应观测的两个阶段(第1阶段5 min,第2阶段为设置(上注)的WST耀斑时长减去5 min),第1阶段采样间隔为1 s,第2阶段为2 s,图像采样后即下传,待两个阶段的观测结束,WST强制退出爆发模式.

4 SCI爆发模式触发及终止方案

SCI仪器在莱曼阿尔法波段和白光波段对太阳大气低日冕(日心距离从1.1倍太阳半径到2.5倍太阳半径)进行观测,其观测模式同样包括常规、爆发和用户3种模式^[10].SCI爆发模式的触发和终止是基于SCI在白光波段的观测进行判断的.白光波段的偏振亮度观测是在3个线偏振角度(-60° 、 0° 和 60°)上进行的^[13],数据的采集从 -60° 开始,然后依次在 0° 和 60° 采集图像,每采集一遍得到一组观测数据.在常规模式下,每30 s采集一组数据,每采集两组数据下传一组,即每60 s下传一组数据.一旦有CME等爆发事件发生,SCI将快速切换至爆发模式.爆发模式期间,SCI的采样间隔保持不变(仍为30 s一组数据),但采集到的每一组数据均下传(下传间隔变为30 s).SCI爆发模式的触发和终止方案与SDI类似,但又略有不同.不同之处在于SCI不需要开窗,因此不需要提供爆发的位置信息,只需要提供爆发模式触发和终止的时间信息即可.具体方案如下:

(1) SCI在白光波段采集的每一组数据相加,得到3个线偏振角度上的总强度图像(图2中patrol image);

(2)总强度图像经中值滤波(滤波窗口为 3×3 像元)、像元合并等处理,得到一个由 32×32 个超级像元构成的低分辨率图像(图2中 $F_n(i, j)$).关于中值滤波及像元合并,请参考第2节;

(3)滚动保存当前观测前6.5 min内经上述步骤处理过的低分辨率图像(共13幅),并对这些图像的每个像元沿时间方向取中值,得到一个中值背景(图2中 $F_{ref}(i, j)$);

(4)计算SCI阈值图像(计算公式同SDI),并对爆发模式的触发和终止进行判断.在常规模式下,我们采用(6)式计算阈值图像,并将满足(8)式的像元标记为触发像元,当触发像元数大于NP1且小于NP2时,SCI观测模式迅速切换至爆发模式,反之则继续进行常规模式观测.爆发模式下,我们改用(7)式计算阈值图像,阈值图像上满足(9)式的像元数降为零时,SCI退出爆发模式,反之则继续进行爆发模式观测.需要强调的是,阈值图像的计算是针对所有像元进行的,而早期CME触发的像元所在的高度一般较低,为了排除大视野中异常增亮引起的误触发,并且考虑到LST有效的观测视野,在对爆发模式触发条件进行判断时,我们将触发像元的查找范围限制在 $1.1-2 R_\odot$ 范围内.

SCI在莱曼阿尔法波段的观测模式同样包含常规模式、爆发模式和用户模式,其中爆发模式的触发和终止信号均由SCI在白光波段的观测提供.常规模式下,SCI在莱曼阿尔法波段每间隔60 s采集一组图像(长曝光、短曝光各1幅),采样后即下传.在接到白光波段提供的爆发模式触发信号后,SCI在完成当前莱曼阿尔法图像采集后,随即进入爆发模式.爆发模式下,SCI在莱曼阿尔法波段的采样间隔和下传间隔均调整为15 s.

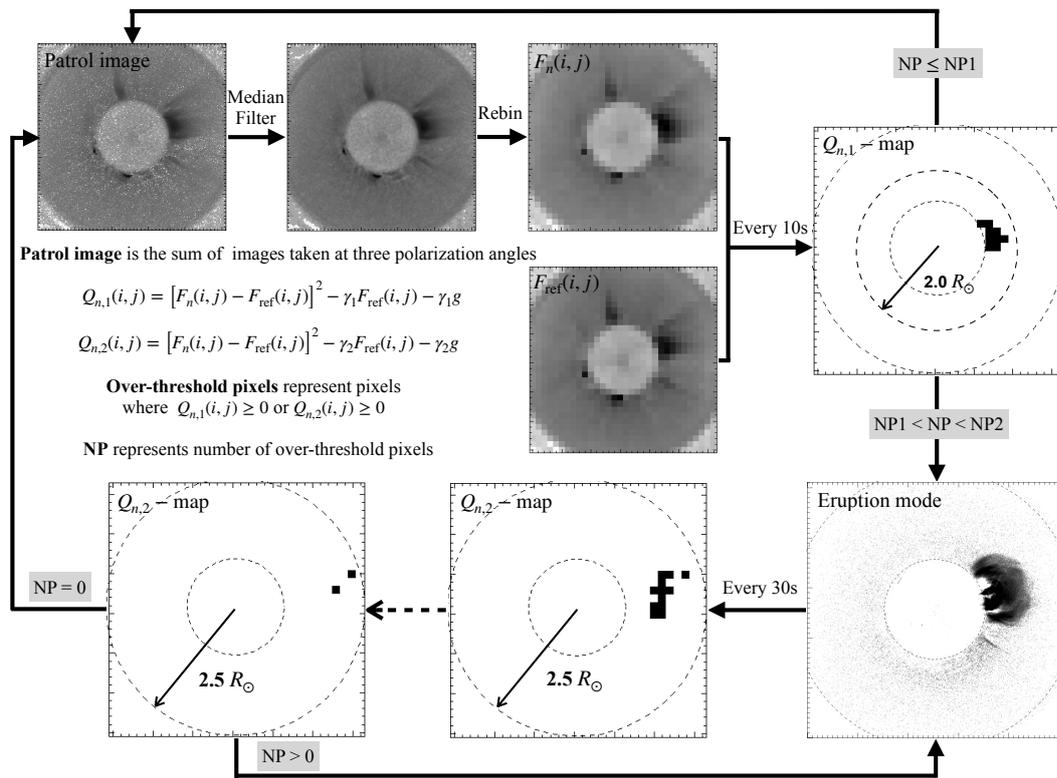


图 2 LST/SCI爆发模式触发和终止方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the trigger and termination scheme of LST/SCI event mode

图2是SCI星上检测软件的工作流程图, 软件需要地面上注的参数同SDI, 见表1. 在卫星测试阶段, 我们需要根据实际观测, 对这些参数进行适当的调整, 以使得对爆发的探测达到最佳效果. 这里需要强调的是, 虽然SCI与SDI的上注参数具有相同的定义, 并且使用了相同的符号和名称, 但它们其实具有不同的值.

5 算法测试

SDI在莱曼阿尔法波段(121.6 ± 7.5 nm)对宁静日面及活动区进行高分辨率观测. 目前能够在该波段对太阳进行观测的仪器主要有美国SDO (Solar Dynamics Observatory)卫星上的EVE (the Extreme Ultraviolet Variability Experiment)仪器以及GOES (the Geostationary Operational Environmental Satellite)系列卫星(GOES-13、GOES-14、GOES-15)上的EUVS (the Extreme Ultraviolet Sensors)仪器. 然而, 它们仅是对太阳的全日面辐射总流量进行监测, 成像观测仍然缺乏.

AIA (Atmospheric Imaging Assembly)是搭载在SDO卫星上的大气成像组件, 被认为是当前太空中运行的最新也是综合性能最好的太阳大气成像观测仪器. 它能在多个紫外(1600 Å、1700 Å)及极紫外波段(94 Å、131 Å、171 Å、193 Å、211 Å、304 Å、335 Å)上同时对宁静太阳大气、冕洞、活动区及耀斑等结构进行成像观测. AIA的7个

极紫外波段分别对应不同的特征温度和太阳大气层次, 除304 Å属于光学厚辐射外, 其余均属于光学薄辐射. 太阳的莱曼阿尔法辐射主要来自于太阳色球中的中性氢, 是太阳紫外波段最亮的发射线. 由于太阳色球中含有大量的中性氢, 莱曼阿尔法发射线也属于光学厚辐射, 因此, 本工作中我们采用SDO/AIA在304 Å的成像观测数据作为实验数据, 对SDI爆发模式触发和终止方案进行验证. 由于AIA的数据量太大, 我们主要对太阳活动比较剧烈的几个时间段的观测数据进行了检验.

根据第2节中描述的方法, 我们设计了耀斑识别软件, 并将从SDO数据网站下载到的304 Å观测图像作为输入, 开展耀斑的识别工作. 表2给出了本次测试中所有参数的设置情况. 图3是耀斑识别软件在爆发模式期间的一个测试界面. 受篇幅限制, 表3仅给出我们对2011年2月13日至18日期间AIA在304 Å波段所有观测数据的识别结果. 表格自左向右依次代表被识别耀斑的编号、发生日期、起始时间、结束时间、持续时间(以分钟为单位)、耀斑的发生位置(日面坐标)、耀斑的显著性以及对应的GOES在软X射线波段探测到的耀斑级别. 其中耀斑的显著性是用来衡量耀斑级别及重要性的一个参数, 具体定义如下:

$$\text{FLARE}_{\text{significance}} = \frac{F_{\text{max}} - F_{\text{bkg}}}{F_{\text{bkg}}}, \quad (10)$$

其中 F_{bkg} 代表耀斑开始前开窗区域的平均背景亮度, F_{max} 代表耀斑爆发过程中开窗区域的最大亮度值.

表 2 耀斑检测软件使用的参数数值, 各参数的定义见表1
Table 2 Parameter values used in the flare detection software, see Tab.1 for

definition of the parameters	
Parameter	Parameter value
γ_1	60
γ_2	2
NP1	1
NP2	6
Maxdur	2 h
g	10

在2011年2月13日至18日, 我们在304 Å波段一共识别出79个耀斑事件, 其中编号为15的触发事件为像元异常增亮(宇宙线)引起的误触发. 这些耀斑的持续时间多数分布在几分钟至十几分钟, 最长不超过1 h. 考虑到耀斑在莱曼阿尔法波段与304 Å波段可能具有相似的辐射特性, 我们这个测试结果也为星上设置耀斑爆发模式的最长持续时长提供了一个依据. 通过将我们的识别结果与GOES耀斑列表进行比较, 我们发现我们的识别软件不仅对M级及其以上的大耀斑有很好的识别, 对于C级及其以下, 甚至是在GOES上没有明显响应的小耀斑也能很好地识别. 此外, 我们将来可以根据需要, 通过适当调节触发参数(比如触发像元数的下限)过滤掉一部分小耀斑.

表 3 2011年2月13日至18日耀斑识别结果. 表格自左向右依次是代表被识别耀斑的编号、发生日期、起始时间(世界标准时间)、结束时间(世界标准时间)、持续时间(以分钟为单位)、耀斑的发生位置(日面坐标, 以度为单位, 其中“N”和“S”分别表示日面北纬和南纬, “E”和“W”分别表示日面东经和西经)、耀斑的显著性以及相应的GOES耀斑级别

Table 3 Flare detection results from 13th to 18th of February 2011. From left to right, the columns represent the flare number, date of observation, flare start time (UTC), flare end time (UTC), flare duration (in unit of minute), flare position (heliographic coordinates in unit of degree, “N” and “S” represent the north and south latitude, “E” and “W” represent the east and west longitude of the solar disk), flare significance, and the corresponding GOES flares class.

Flare	Date	Start (UTC)	End (UTC)	Duration/min	Position	Signif/%	GOES
1	2011-02-13	00:27:20	00:29:08	1.8	S18E12	10.8	B 4.5
2	2011-02-13	13:48:08	13:51:44	3.6	S18E02	18.3	C4.7
3	2011-02-13	14:34:58	14:43:20	8.4	S18E02	18.2	C2.1
4	2011-02-13	15:25:44	15:28:44	3.0	S18E07	10.4	non
5	2011-02-13	17:32:34	18:08:34	36.0	S18E07	127.8	M6.6
6	2011-02-13	18:11:20	18:13:08	1.8	N09E67	14.8	non
7	2011-02-13	18:24:44	18:33:08	8.4	S18E02	20.5	C2.0
8	2011-02-13	19:29:08	19:32:08	3.0	N09E67	18.1	C1.0
9	2011-02-13	20:30:44	20:34:20	3.6	S18 W02	12.9	C1.2
10	2011-02-13	20:34:32	20:38:08	3.6	N19E02	15.3	non
11	2011-02-13	21:14:56	21:18:32	3.6	S18 W02	11.5	non
12	2011-02-13	21:27:44	21:31:56	4.2	S23E07	16.5	B9.3
13	2011-02-14	02:42:20	02:45:08	4.8	S218E07	23.7	C1.6
14	2011-02-14	06:53:08	07:14:44	21.6	S23E03	64.0	C6.6
15	2011-02-14	07:58:44	07:59:20	0.6	N48 W82	0.0	non
16	2011-02-14	09:37:20	09:39:44	2.4	S23E03	11.8	C1.7
17	2011-02-14	12:44:08	13:12:20	28.2	S23 W02	63.5	C9.4
18	2011-02-14	15:00:08	15:01:56	1.8	S23 W02	12.3	non
19	2011-02-14	15:06:08	15:08:32	2.4	S23 W02	14.2	non
20	2011-02-14	17:22:20	17:50:32	28.2	S23 W02	176.6	M2.2
21	2011-02-14	19:24:58	19:55:32	30.6	S18 W02	78.1	C6.6
22	2011-02-14	22:43:56	22:56:32	12.6	S23 W02	20.9	B8.0
23	2011-02-15	00:33:44	00:48:44	15.0	S18 W07	52.2	C2.7
24	2011-02-15	01:48:08	02:33:44	45.6	S18 W12	176.7	X2.2
25	2011-02-15	03:09:20	03:24:56	15.6	S23 W07	27.4	C8.5

表 3 续
Table 3 Continued

Flare	Date	Start (UTC)	End (UTC)	Duration/min	Position	Signif/%	GOES
26	2011-02-15	04:29:08	04:48:20	19.2	S23 W07	82.3	C4.8
27	2011-02-15	05:15:56	05:18:56	3.0	N11E43	17.4	C1.8
28	2011-02-15	07:57:44	08:07:56	10.2	S23 W12	27.6	C1.5
29	2011-02-15	09:01:32	09:13:32	12.0	S18 W12	32.4	non
30	2011-02-15	09:46:44	09:49:44	3.0	S18 W22	10.8	C1.0
31	2011-02-15	14:37:56	14:42:44	4.8	S23 W17	20.3	C4.8
32	2011-02-15	20:27:44	20:45:08	17.4	S22 W22	35.0	C6.6
33	2011-02-15	21:28:20	21:31:20	3.0	S22 W28	13.5	C1.1
34	2011-02-15	23:04:56	23:14:32	9.6	S22 W22	15	B6.5
35	2011-02-15	23:54:08	23:57:08	3.0	S22 W28	14.9	C1.0
36	2011-02-16	01:36:08	01:39:46	3.6	S22 W22	41.2	M1.0
37	2011-02-16	05:42:44	05:53:32	10.8	S22 W28	37.8	C5.9
38	2011-02-16	06:20:44	06:24:20	3.6	S22 W28	18.1	C2.2
39	2011-02-16	07:26:10	07:28:32	2.4	S22 W33	16.1	non
40	2011-02-16	07:35:56	07:49:08	13.2	S22 W33	32.1	M1.1
41	2011-02-16	09:04:08	09:31:44	27.6	S22 W28	51.7	C9.9
42	2011-02-16	09:57:20	10:00:56	3.6	N19 W74	19.0	B9.0
43	2011-02-16	12:01:56	12:08:32	6.6	S22 W28	13.3	C1.0
44	2011-02-16	14:09:08	14:15:44	6.6	S22 W28	10.3	B4.0
45	2011-02-16	14:22:32	14:38:08	15.6	S22 W33	116.4	M1.6
46	2011-02-16	15:29:44	15:39:56	10.2	S22 W33	41.5	C7.7
47	2011-02-16	18:59:08	19:01:32	2.4	N10E26	12.7	B6.5
48	2011-02-16	20:03:56	20:06:56	3.0	N10E26	12.8	B6.0
49	2011-02-16	21:08:56	21:13:44	4.8	S22 W33	32.5	C4.2
50	2011-02-16	23:19:20	23:22:20	3.0	S21 W39	18.9	C1.6
51	2011-02-17	01:43:44	01:53:20	9.6	S21 W39	23.0	C6.1
52	2011-02-17	06:45:56	06:50:08	4.2	S21 W46	18.5	C1.2
53	2011-02-17	08:11:08	08:28:32	17.4	S21 W46	23.8	C1.2
54	2011-02-17	08:38:32	08:45:08	6.6	S21 W46	20.4	C1.0
55	2011-02-17	09:59:32	10:02:32	3.0	S21 W46	15.3	non
56	2011-02-17	12:35:08	12:38:44	3.6	S21 W46	27.8	C2.4

表 3 续
Table 3 Continued

Flare	Date	Start (UTC)	End (UTC)	Duration/min	Position	Signif/%	GOES
57	2011-02-17	16:41:56	16:44:56	3.0	S21 W46	14.5	B5.0
58	2011-02-17	21:32:32	21:36:08	3.6	S21 W46	25.6	C1.1
59	2011-02-17	21:38:56	21:49:44	10.8	N19E07	23.6	C1.1
60	2011-02-18	02:55:56	03:04:20	8.4	S21 W46	19.8	non
61	2011-02-18	04:44:44	04:54:56	10.2	N19E02	43.9	C4.0
62	2011-02-18	05:02:44	05:08:08	5.4	N09E07	12.3	non
63	2011-02-18	06:30:44	06:34:56	4.2	S20 W53	28.8	C8.5
64	2011-02-18	07:13:08	07:41:20	28.2	N19E02	58.0	C7.6
65	2011-02-18	09:05:44	09:22:32	16.8	N19E02	40.3	C4.2
66	2011-02-18	10:09:32	10:26:59	17.4	S20 W53	66.6	M6.6
67	2011-02-18	10:27:08	10:49:56	22.8	N19E02	48.4	M1.0
68	2011-02-18	10:58:08	11:10:44	12.6	S20 W53	46.6	C4.0
69	2011-02-18	11:22:56	11:36:08	13.2	N14E02	37.8	C3.0
70	2011-02-18	11:48:20	11:51:20	3.0	N09 W02	21.2	C1.8
71	2011-02-18	13:01:56	13:10:20	8.4	S20 W53	30.5	M1.4
72	2011-02-18	14:03:32	14:28:08	24.6	N19 W02	58.0	M1.0
73	2011-02-18	16:40:56	16:46:58	6.0	N09 W02	34.2	C2.1
74	2011-02-18	16:49:32	16:56:08	6.6	N19 W02	10.5	non
75	2011-02-18	17:46:08	17:59:56	13.8	N14E12	25.3	C3.8
76	2011-02-18	18:51:56	18:56:08	4.2	N19 W07	28.5	3.3
77	2011-02-18	19:03:20	19:23:08	19.8	N19 W02	41.7	C7.1
78	2011-02-18	21:00:32	21:03:32	3.0	N19 W02	23.7	M1.3
79	2011-02-18	21:49:56	21:57:08	7.2	N14 W07	22.2	non
80	2011-02-18	22:35:08	22:38:08	3.0	N09 W02	19.3	C2.0

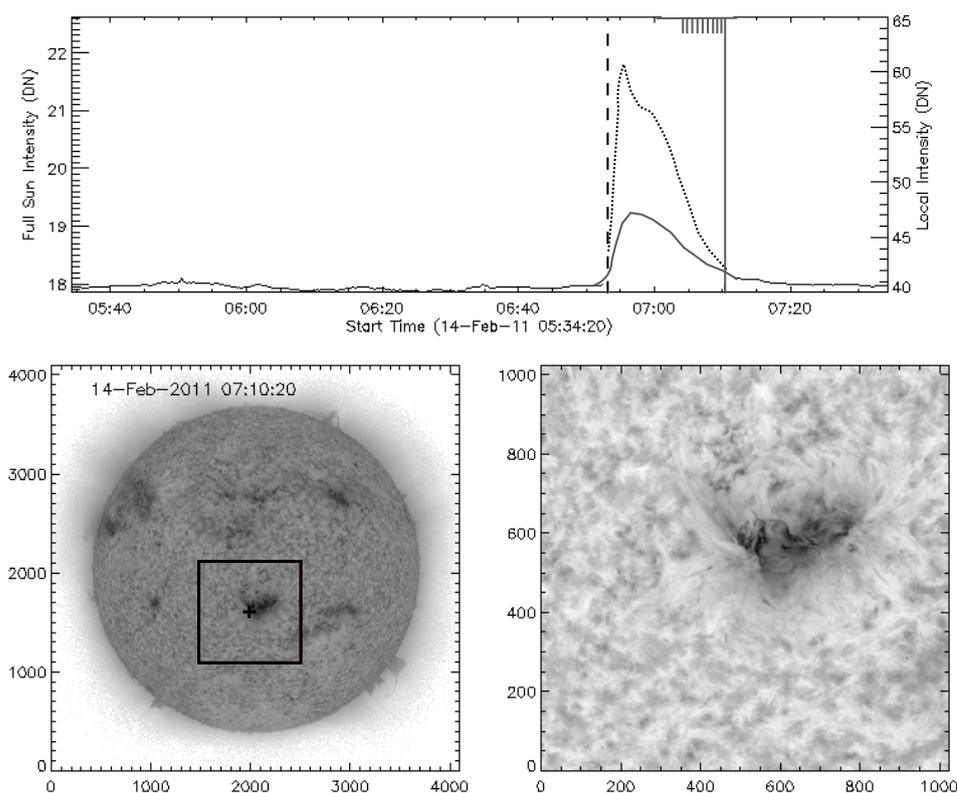


图 3 耀斑识别软件在爆发模式下的一个测试界面. 第1行显示了太阳的全日面(实线)和局域(点线)光变曲线, 其中竖直虚线代表识别到的耀斑起始时间, 竖直长实线代表当前图像所在时刻, 竖直短实线代表用于背景计算的9幅图像所在时刻. 第2行左图显示了当前全日面图像, 黑色方框代表开窗区域. 第2行右图显示了对耀斑区域的开窗观测.

Fig. 3 A test interface of the flare detection software in the event mode. The top panel shows the full-disk (solid line) and the local (dotted line) light curves of the Sun. The vertical dashed line represents the start time of the detected flare, the long vertical solid line represents the time of the current image, and the short vertical solid lines indicate the times of the 9 images used to calculate the background. The bottom left panel shows the current full-disk image, the black box indicates the windowed area. The bottom right panel shows the windowed observation of the flare area.

6 总结与展望

为了克服星上大数据存储和下传的困难, 并且确保ASO-S卫星科学目标的实现, LST各仪器均包含了一种针对爆发事件而设置的模式, 即爆发模式. 该模式下, LST各仪器将以更高的频率进行图像采集, 以获得对爆发事件的高分辨观测(注意, 爆发模式下, SDI和WST采集的图像主要以覆盖爆发区域的局域像为主, 中间穿插少量全日面像). 然而, ASO-S卫星没有专门用于爆发信号监测的系统, 因此, LST各仪器需要根据各自采集的数据, 采用适当的算法, 对爆发信号进行实时检测. 本文基于LST的观测方案及其将来可能产生的观测数据, 详细介绍了LST各仪器爆发模式触发和终止信号的获取方案.

一般来讲, 耀斑等太阳爆发事件在爆发的初始阶段辐射强度十分微弱, 容易被太阳辐射背景噪声淹没, 因此, 要想将它们尽可能早地识别出来, 简单地基于日面总辐射流

量进行阈值判断的方法是行不通的. 本文采用的算法是将观测图像通过像元合并划分成 32×32 个不同的子区域, 对于每个子区域, 我们计算其辐射强度相对于前面图像(背景)的相对变化量, 定义见文中(1)式. 当相对变化量超出预先设定的阈值时, 爆发模式触发. 通过像元合并, 我们有效地抑制了背景噪声, 提高了信噪比. 在计算辐射流量相对变化时, 我们通过对当前与背景间的差分流量取平方(见(1)式分子项)对信号做进一步放大, 进而提高信号识别的灵敏度(该步骤对识别日面边缘事件尤为有效). 我们对触发像元的数目分别设置了上限和下限, 上限可以有效地避免高能粒子暴事件(尤其是当卫星经过南大西洋异常区的时候)带来的误触发, 下限是为了过滤掉一些小耀斑(小爆发)事件.

为了验证我们的算法, 我们选用SDO/AIA在 304 \AA 的观测数据作为测试数据, 对耀斑进行识别, 并且对耀斑的显著性进行了定义(即耀斑期间的峰值强度相对于耀斑前背景的相对变化, 见(10)式). 在2011年2月13日至18日期间, 我们一共识别出80个事件(进一步检测表明, 79个为耀斑事件, 1个为误识别, 详见表3), 耀斑的显著性变化范围为 $10.3\% - 176.6\%$, 几乎识别出 304 \AA 图像上所有肉眼可见的爆发. 由此可见, 我们的识别算法对耀斑具有非常高的识别率. 通过对比GOES卫星在软X射线波段观测到的耀斑, 不难看出, 我们的算法不仅能够很好地识别M级及以上的大耀斑, 对于C级及以下的小耀斑也有很好的识别. 基于以上测试结果, 我们期待本文中研究的算法不仅能够在将来的LST观测中发挥重要作用, 对其他空间和地面观测仪器也能具有一定的借鉴意义.

参 考 文 献

- [1] Benz A O. LRSP, 2017, 14: 2
- [2] Forbes T G. JGRA, 2000, 105: 23153
- [3] 梁莎莎, 梁红飞, 梁周渝, 等. 天文学报, 2019, 60: 1
- [4] Liang S S, Liang H F, Liang Z Y, et al. ChA&A, 2020, 44: 70
- [5] Maehara H, Shibayama T, Notsu S, et al. Nature, 2012, 485: 478
- [6] Argiroffi C, Reale F, Drake J J, et al. NatAs, 2019, 3: 742
- [7] Gosling J T. JGRA, 1993, 98: 18937
- [8] Alex S, Mukherjee S, Lakhina G S. JASTP, 2006, 68: 769
- [9] Gan W Q, Zhu C, Deng Y Y, et al. RAA, 2019, 19: 156
- [10] Li H, Chen B, Feng L, et al. RAA, 2019, 19: 158
- [11] Chen B, Li H, Song K F, et al. RAA, 2019, 19: 159
- [12] Feng L, Li H, Chen B, et al. RAA, 2019, 19: 162
- [13] Feng L, Li H, Inhester B, et al. RAA, 2019, 19: 59

The Trigger and Termination Scheme for the Event Mode of the Lyman-alpha Solar Telescope (LST) Onboard the ASO-S Mission

LU Lei¹ LI Hui^{1,2} HUANG Yu^{1,2} FENG Li^{1,2} ZHU Bo³
WANG Peng⁴ SONG De-chao^{1,2} GAN Wei-qun^{1,2}

(1 Key Laboratory for Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(3 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119)

(4 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

ABSTRACT The Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S) is the China's first comprehensive solar dedicated satellite, scheduled to be launched around 2022. The Lyman-alpha ($\text{Ly}\alpha$) Solar Telescope (LST) is one of the payloads of the ASO-S, consisting of three scientific instruments and two Guide Telescopes (GTs). The scientific instruments include a Solar Disk Imager (SDI), a White-light Solar Telescope (WST) and a Solar Corona Imager (SCI), which are aimed to observe the whole evolving process of various eruptions on the Sun, including solar flares and coronal mass ejections, in multiwavelengths with high temporal and spatial resolutions. To achieve this goal, all the three instruments have an observation mode dedicated to the event observations, called the event mode. In this mode, the SCI takes full-frame coronal images at a higher cadence, while SDI and WST take partial frame images around the eruption region at a higher cadence. The time and location information of the eruption events can be effectively obtained by monitoring the relative changes of brightness of each pixel after the median filtering and rebinning the onboard images. The obtained information will provide an important electronic input for the automatic switching between different observation modes of LST.

Key words Sun: flares, Sun: coronal mass ejections (CMEs), Sun: corona, instrumentation: detectors