

风云四号静止卫星闪电成像仪监测原理和产品算法研究进展

曹冬杰

(中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 静止卫星闪电成像仪通过光学成像探测实现闪电定位, 能够对闪电活动进行长时间连续监测, 为中国地区强对流天气预警和区域闪电活动特征研究提供观测基础。结合国外静止卫星闪电成像仪研究现状, 针对风云四号静止卫星闪电成像仪工作原理和产品算法进行了介绍。

关键词: 闪电成像仪, 实时事件处理器, 虚假信号滤除算法, 聚类分析

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.014

The Development of Product Algorithm of the Fengyun-4 Geostationary Lightning Mapping Imager

Cao Dongjie

(Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: The lightning mapping imager equipped on the satellite is a new technique for lightning observation. The lightning imager equipped on the geostationary satellite could map the optical emission from the lightning discharge and locate the flash. The FY-4 geostationary lightning mapping imager could observe lightning activities continuously, and provide for the severe weather forecasting and lightning activity characterization in China. The paper showed the development of observation method and product algorithm of the satellite lightning imager, discussed the instrument and introduced product algorithm of the lightning imager.

Keywords: lightning imager, real-time event processing, false signals filtering algorithm, cluster analysis

0 引言

闪电放电过程会产生很强的光辐射, 根据闪电的放电特征, 卫星搭载的闪电成像仪通过探测777.4nm中性氧原子近红外吸收谱线的闪电光辐射, 能够确定闪电发生的准确位置^[1-2]。国际上在轨运行的星载闪电成像仪搭载于近赤道非太阳同步轨道卫星, 包括装载于Microlab-1卫星上的闪电光学瞬变探测器(OTD)^[3-5]和装载于热带降水测量计划任务卫星(TRMM)上的闪电成像仪(LIS)^[5-6]。作为LIS的原型, OTD自1995年开始投入运行, 相对赤道倾角70°, 轨道高度740km, 观测区域为75°S—75°N, 轨道周期为100分钟, 完整覆盖全球需55天, 用于探测闪电光辐射的电荷耦合器件探测阵列(CCD)大小为128×128, 观测视场为1300km×1300km, 空间分辨率为10km, 闪电探测率为50%~66%。LIS自1998

年开始投入运行, 工作波长为中性氧原子近红外谱线777.4nm, 带宽为0.909nm, 相对赤道倾角35°, 轨道高度350km, 观测区域为35°S—35°N, 轨道周期90分钟, 完整覆盖全球需49天, CCD面阵为128×128, 观测视场为1300km×1300km, 空间分辨率为3~6km, 其中, 星下点分辨率为3.7km, 闪电探测率为88%。2001年8月轨道抬升至402.5km, 星下点分辨率为4.3km。LIS利用星上实时事件处理器(RTEP)对观测数据进行星上预处理和虚假信号滤除, 并将数据实时发送至地面接收站。

卫星闪电观测产品在天气和气候研究中有重要应用^[7-10]。在低轨道卫星闪电成像仪OTD和LIS的基础上, 通过发展静止卫星闪电成像仪实现对闪电的连续、实时观测, 从而实现雷电的追踪和预警, 成为了国际上雷电空间探测的主要发展方向。美国、中国和欧洲均陆续开展静止卫星搭载闪电成像仪的设计和研发。美国静止卫星^[11](GOES-R)闪电成像仪(GLM), 计划2016年发射, CCD面阵大小为1372×1300, 空间分辨率为8~14km, 闪电探测率为

收稿日期: 2015年9月11日; 修回日期: 2015年12月18日
作者: 曹冬杰(1980—), Email: caodj@cma.gov.cn
资助信息: 国家自然科学基金(41305015)

70%，虚警率为5%。欧洲第三代静止卫星（MTG）闪电成像仪（LI）^[12]，计划2018年发射。中国新一代静止卫星风云四号（FY-4）闪电成像仪（LMI）^[13-14]是我国第一次自主研发的星载闪电成像仪，在仪器研制和产品生成算法等方面都面临着巨大的挑战，首星计划于2016年发射。美国、中国和欧盟静止卫星闪电成像仪，仪器结构和工作原理相似，未来将构成近乎全球覆盖的天基闪电观测网，将对全球闪电探测、大气电学研究等相关领域产生重要影响。

同低轨道卫星闪电成像仪相似，静止卫星闪电成像仪主要包括CCD面阵以及用于星上数据预处理和背景信号滤除的星上实时事件处理器（RTEP），地面处理系统主要包括卫星观测数据定标和定位，以及包括虚假信号滤除和聚类分析等产品算法的产品生成系统。本文对静止卫星闪电成像仪的仪器工作原理和产品生成算法进行详细介绍。

1 仪器工作原理

1.1 仪器工作原理

静止卫星闪电成像仪CCD观测波长为777.4nm，CCD探测来自闪电放电过程产生的光辐射，探测到的光辐射强度数据通过星上RTEP进行星上数据预处理和地面产品生成系统。首先，采用背景光估计等方法滤除CCD面元探测的背景光，提取可能来自于闪电的发光“事件”，数据实时发送至地面接收站。其次，地面接收站对RTEP下传的数据进行定标和定位处理，输出经定标定位后的包含发光“事件”的发生时间，位置和强度等信息的闪电成像仪产品。最后，利用产品算法软件，进行虚假信号滤除和聚类分析，输出包含闪电“事件”、“组”和“闪电”的发生时间、位置和强度等信息的闪电成像仪产品，应用于业务服务和科研。风云四号静止卫星闪电成像仪的观测视场如图1所示，基本能够覆盖中国地区及邻近陆地和海洋区域，实现中国地区闪电活动特征的观测。

1.2 星上 RTEP 算法

星上RTEP接收CCD面阵并行输出的原始观测数据，经信号接收与限幅、多帧平均背景估值、背景信号去除、逐元阈值自适用设置、闪电信号探测、闪电信号编码^[14]，将闪电“事件”与背景数据一并输出给信息编码电路并传至地面接收测站。

GLM利用RTEP实现背景光滤除，如图2所示，星上RTEP算法主要目的是对原始数据进行背景光去除，减小背景光对闪电观测的影响，白天背景光的变化主要与太阳角度、云体反射率和地面反照率有关，根据背景光的特征，滤除方法包括空间滤除、光谱滤除、

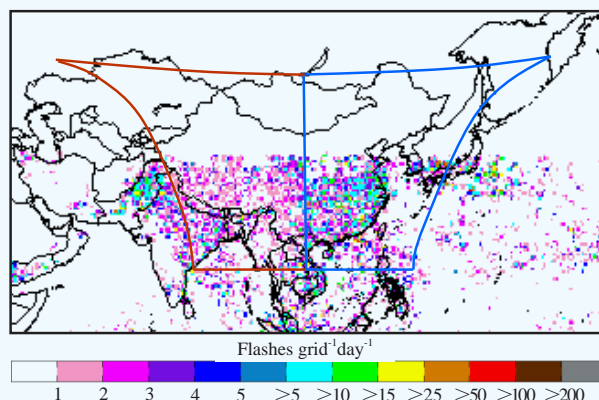


图1 风云四号静止卫星闪电成像仪观测范围（图中不同颜色圆点表示TRMM搭载的LIS观测的2008年7月闪电频数分布日均值）

Fig.1 FOV view from the FY-4 LMI (lightning observations in July, 2008 from the NASA LIS on board the TRMM (TRMM/LIS) low earth-orbiting satellites)

积分滤除和多帧平均背景估值方法^[15]。风云四号静止卫星闪电成像仪将针对背景光特征，综合采用多种方法实现背景光滤除。

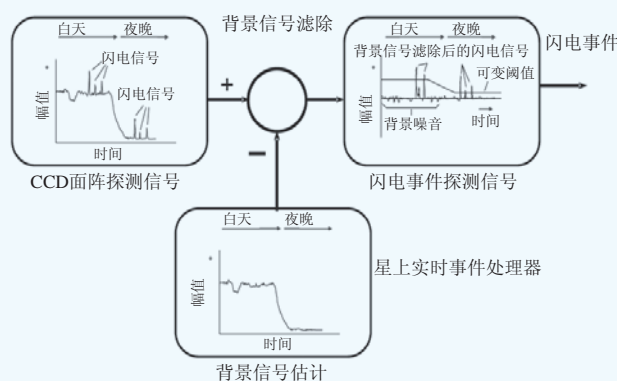


图2 闪电成像仪星上实时事件处理器^[16]

Fig. 2 Real Time Event Processor on Lightning Mapping Imager^[16]

1) 空间滤除。将闪电成像仪焦平面阵列上的每个探测像元的瞬时视场（IFOV）与云顶区域闪电闪击发出的光辐射在空间尺度上进行分析（如5~10km区域），比较闪电信号与背景光。例如，当IFOV范围大于10km时，闪电信号与背景光将没有明显区分，原因是云层对云内垂直分布的闪电放电电源发出的光的散射沿径向光强逐渐减弱，而云顶散射的太阳光在径向方向上的光强则基本不变。如果IFOV范围小于10km，闪电信号和背景光都将减小，但电子噪声不变，因此探测系统信噪比减小。

2) 光谱滤除。利用以777.4nm谱线为中心谱线的窄带干涉滤波器实现光谱滤除，窄带滤波器能够提高探测系统的信噪比，使得相对较弱的闪电信号不会被

背景光“淹没”。

3) 积分滤除。对CCD面阵焦平面上的观测信号在时域进行积分,利用闪电脉冲持续时间(400 μ s的倍数)与背景光持续时间(整秒的倍数,常数)不同的特点进行背景光滤除。积分时间为CCD面阵数据读出之前,各像元电荷积累所需的时间。闪电信号与背景光信号的比值随积分时间接近闪电脉冲持续时间而升高。如果积分时间太短,闪电信号可能在相邻的两帧之间被分离,导致信噪比降低。观测时,闪电成像仪的实际积分时间设置为1.8ms,这样的积分时间设定可最大限度的减小闪电信号被分离的可能,使探测效率最大化。

4) 多帧平均背景估值^[2]。将每秒开始的数帧原始数据做平均,给出背景估值,进而将缓慢变化的背景光从输出的原始数据中滤除,提取瞬态变化的闪电“事件”。同时,采用根据背景强度自适应调整探测阈值的方法,实现瞬态点源弱小目标探测效率最大化,减小背景光的影响。

2 闪电产品生成算法

闪电产品算法对经地面处理系统定标定位处理后的发光“事件”进行虚假信号滤除和聚类分析,输出闪电“事件”、“组”和“闪电”的发生时间、位置和强度等信息,以及基于结构树的闪电“事件”、“组”和“闪电”之间的从属关系。

2.1 虚假信号滤除算法

闪电成像仪CCD面阵探测的原始数据中的噪声主要来源于闪电成像仪的仪器探测系统噪声,包括重复噪声(CCD面阵探测产生)、鬼影噪声(CCD面阵输出设备产生)、棒棒糖噪声(光辐射强度饱和)、轨迹噪声(探测的高能粒子)和冲击噪声等(来源不明,此类噪声表现为杂散点,可导致聚类的闪电“组”远超于真实的闪电“组”个数)。不同CCD面元噪声在总噪声中所占的比例和降噪方法有所不同^[17],可采用面元噪声滤除方法,针对不同噪声特征,对噪声进行初步滤除。

经面元噪声滤除方法处理后的观测数据中仍然存在噪声,这些噪声只能在聚类分析后做进一步滤除,即虚假信号滤除。风云四号静止卫星闪电成像仪虚假信号滤除算法如图3所示,对聚类分析后的闪电“事件”、“组”和“闪电”产品,首先分析特定区域是否只存在一个“事件”、“组”或“闪电”,若出现此类情况,则可能为虚假信号。然后,对聚类分析输出的闪电产品采用如下方法滤除不同噪声产生的虚假信号,蒙特卡洛方法滤除粒子噪声(CCD面阵探测的高能粒子影响产生的随机分布的噪声),背景噪声

分析(对前一步滤除的“闪电”的重新分析来判断背景噪声),过渡区域滤除(明暗过渡的观测区域,如积雪区、海岸线和云边缘等),闪烁滤除(滤除太阳光散射影响卫星观测平台),边缘滤除(滤除CCD面阵边缘的噪声),关联滤除(区域绝大部分闪电“事件”为虚假“事件”,那么该区域剩余的相关“事件”也为虚假“事件”),“组”滤除(如果“闪电”只包含一个“组”,那么判断这个“闪电”为虚假“闪电”)。

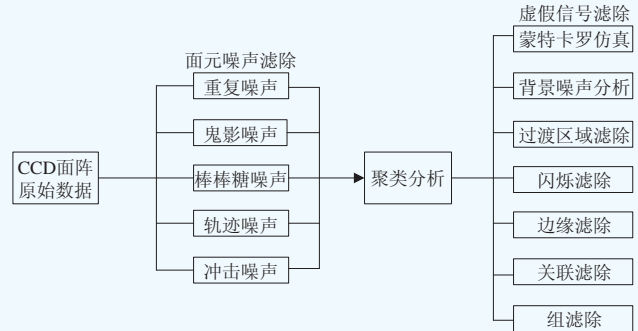


图3 虚假信号滤除算法流程图

Fig. 3 Flow chart of false signal filtering algorithm

2.2 聚类算法

2.2.1 模拟代理数据生成

由于云层的散射和吸收作用,闪电发出的光辐射^[18]在云层中传输,光辐射强度会发生衰减,由于闪电光源非稳态光源的特殊性,应用蒙特卡罗方法可较为准确地模拟闪电光辐射在云中的辐射传输过程^[19]。此外,由于卫星探测的闪电光辐射来自于云顶,因此需利用云顶高度订正提高闪电定位精度^[20]。由于云层对闪电光辐射的影响较为复杂,这里暂不对该过程进行分析。

风云四号静止卫星闪电成像仪模拟代理数据的生成方法如下,首先假定光脉冲的位置和发生时间,其次生成正态分布的光脉冲对应的电流幅值,最后利用经验分布函数^[21]和电流幅值,获得“发光事件”的辐亮度值,以及每个光脉冲对应的光子分布。代理数据模拟结果如图4所示。图4a所示为模拟的光子分布,图4b所示为由光子分布得到的辐亮度分布,图中的辐亮度值是各格点光辐射亮度的叠加值,图中的颜色变化对应于不同范围的辐亮度值,辐亮度的单位为 $\mu\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ 。模拟区域范围为 $10^\circ\times 10^\circ$,格点大小为 $0.1^\circ\times 0.1^\circ$ 。可以看出,光子数集中区域,光辐射亮度较强。利用上述方法获得的模拟代理数据已应用于风云四号静止卫星闪电成像仪的聚类算法仿真测试。

2.2.2 聚类算法

聚类算法的作用是将闪电“事件”聚类为“组”

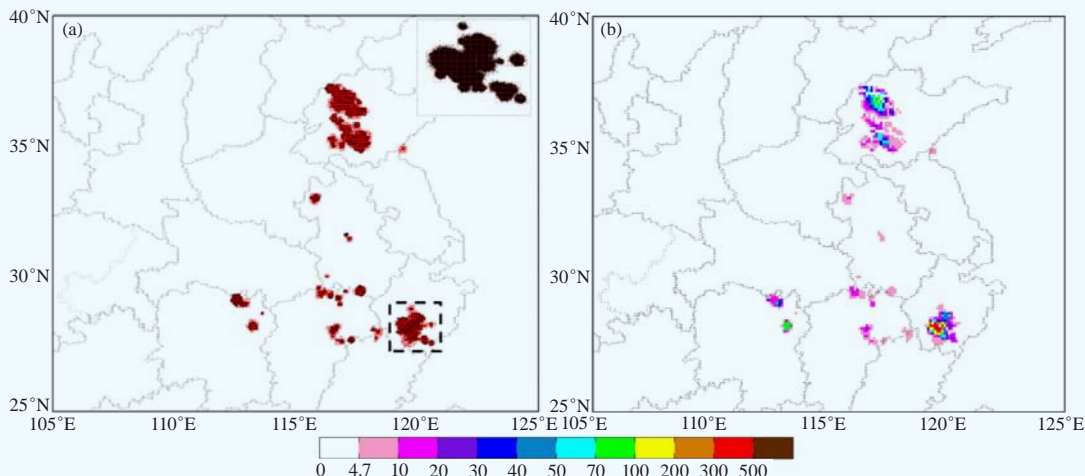


图4 应用算法测试的模拟代理数据

(a) 闪电事件光辐射模拟光子分布; (b) 闪电事件光辐射模拟辐亮度分布

Fig. 4 Simulation of proxy data which is used to test the product generated algorithm

(a) a simulated storm in an area of $10^\circ \times 10^\circ$ with the generated photons (black dots) and detected events (red squares),
 (b) radiance of detected events

和“闪电”，如图5所示，建立闪电“事件”、“组”和“闪电”呈结构树状的级联关系。“组”由同一帧相邻CCD面元的“事件”构成，而“闪电”由时间间隔不大于330ms，空间距离不大于16.5km的“组”构成。这里定义的“闪电”对应于一次真实的闪电过程，而“组”则对应于地闪的一次回击或云闪的一次K变化，但并不是一一对应的关系，一次闪电包含的“组”的个数可能大于实际的“闪击”个数，因为“闪击”之间的放电过程可能也会被判断为“组”。

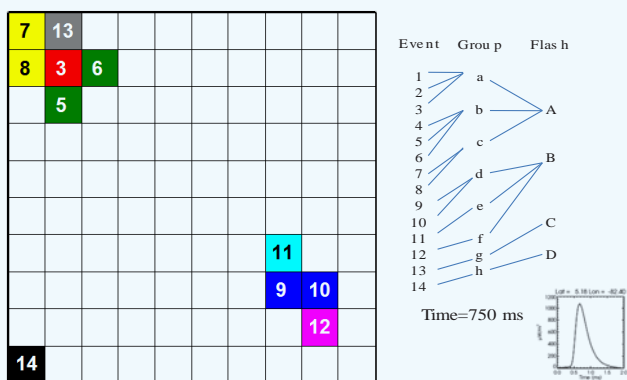


图5 聚类算法示意图^[17]

Fig. 5 Diagram of clustering algorithm^[17]

闪电成像仪产品生成算法流程图如图6所示，将经噪声滤除后的L1级闪电产品作为输入数据，对闪电“事件”进行聚类分析，首先判断该“事件”辐亮度是否满足探测阈值，进而判断其是否属于已有的“组”，如属于已有的“组”，则将其聚类为该

“组”，否则将其定义为一个新的“组”；然后判断该“事件”所属的“组”是否属于已有的“闪电”，如属于已有的“闪电”，则将其聚类为该“闪电”，

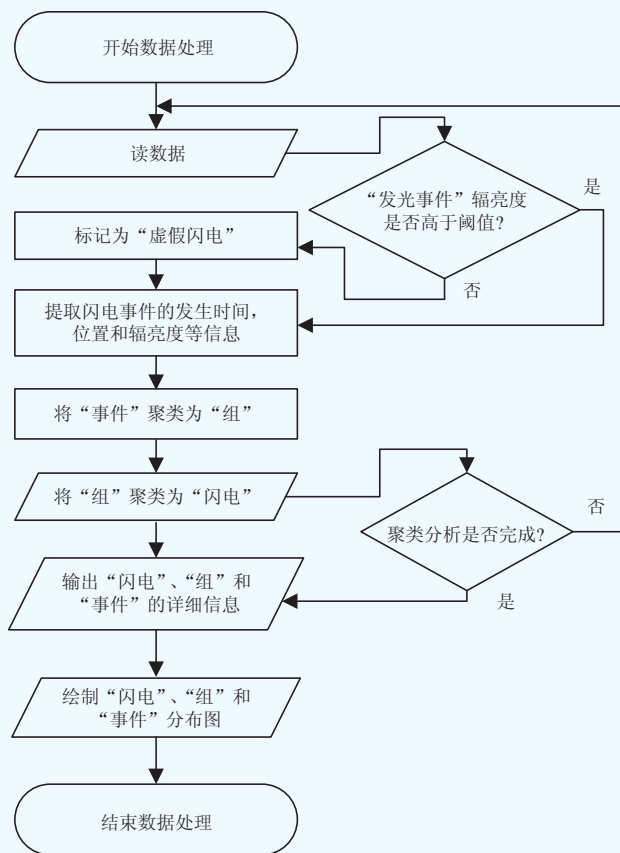


图6 闪电成像仪产品算法流程图

Fig. 6 Flow chart of product generated algorithm

否则将其定义为一个新的“闪电”。若一个“事件”被归为多个“组”，则将这些“组”合并为同一个“组”，然后将该“事件”归为这个“组”。若一个“组”被归为多个“闪电”，则将这些“闪电”合并为同一个“闪电”，然后将该“组”归为这个“闪电”最后输出“事件”，“组”，和“闪电”的位置经度和纬度等信息，进而建立“事件”，“组”，和“闪电”的呈树状结构的从属关系。

风云四号静止卫星闪电成像仪产品生成算法综合了虚假信号滤除算法和聚类算法，在产品生成算法的设计中考虑了中国地区闪电分布特征，参考同步观测的卫星云检测和云相态产品中的云类型识别等信息，进一步滤除虚假信号，提高闪电产品定位精度。卫星发射前，闪电成像仪的探测率和虚警率需根据试验室仪器正样测试结果进行预估^[4]，卫星发射后利用在轨观测数据结合其他闪电定位产品进行准确评估。未来计划基于闪电成像仪全面背景观测数据，采用深对流云目标观测方法对闪电成像仪777.4nm通道仪器辐射衰减特性进行评估；利用闪电成像仪在轨观测数据，中国地基闪电定位网闪电定位产品和雷达观测产品，开展闪电成像仪产品生成算法的检验和闪电探测产品的验证。

3 结论与展望

本文主要介绍了卫星闪电成像仪的工作原理和产品生成算法，在此基础上对即将应用于观测的风云四号静止卫星闪电成像仪做了详细介绍。

1) 静止卫星闪电成像仪通过探测777.4nm中性氧原子近红外吸收谱线的闪电光辐射实现闪电定位，包括用于观测发光“事件”的CCD面阵，用于星上数据预处理和背景信号滤除的星上实时事件处理器，用于数据定标定位和产品生成的地面处理系统。可以为强对流层实时监测、预警预报提供有益的观测信息，具有重要的应用前景。

2) 闪电成像仪星上RTEP算法主要采用多帧背景评估方法，确定背景光强度，实现对CCD面阵探测的原始观测数据进行背景光滤除。此外，针对不同噪声，采用不同的噪声滤除方法，减小噪声对闪电观测的影响。

3) 闪电成像仪产品算法采用虚假信号滤除和聚类分析方法，对经定标定位处理后的闪电成像仪观测数据进行进一步处理。首先滤除发光“事件”中的虚假“事件”，然后利用聚类分析将闪电“事件”聚类为“组”和“闪电”，参考云检测和云相态产品中的云类型识别等信息，进一步滤除虚假“闪电”产品，最后输出聚类分析得到的闪电“事件”、“组”和“闪电”的发生时间、位置和强度等信息，以及基于结构树的闪电“事件”、

“组”和“闪电”之间的从属关系。

风云四号静止卫星闪电成像仪将实现对中国及周边地区的闪电活动全天候连续观测，提供覆盖范围广、时间分辨率高的总闪分布数据，可用于分析中国地区闪电分布特征，实时闪电定位产品的应用，对于研究强对流天气过程，实现雷暴预警和预报，对流初生判断，强风暴活动的提前预警等有重要意义。

参考文献

- [1] Christian H J, Goodman S J. Optical observations of lightning from a high altitude airplane. *J Atmos Oceanic Technol*, 1987, 4: 701-711.
- [2] Christian H J, Blakeslee R J, Goodman S J. The detection of lightning from geostationary orbit. *J Geophys Res*, 1989, 94: 13329-13337.
- [3] Christian H J, Discoll K T, Goodman S J, et al. The optical transient detector (OTD). *Proc 10th Int Conf on Atmosph, Elec, Osaka, Japan, ICAE, 1996: 368-371.*
- [4] Koshak W J, Stewart MF, Christian H J, et al. Laboratory calibration of the optical transient detector and the lightning imaging sensor. *J Atmos Oceanic Technol*, 2000, 17(7): 905-915.
- [5] Boccippio D J, Koshak W J, Blakeslee R J. Performance assessment of the optical transient detector and lightning imaging sensor. Part I: Predicted diurnal variability. *J Atmos Oceanic Technol*, 2002, 19(9): 1318-1332.
- [6] Christian H J, Blakeslee R J, Goodman S J, et al. The Lightning Imaging Sensor. *Proc 11th Int Conf on Atmospheric Electricity, Guntersville, AL ICAE, 1999, 746-749.*
- [7] Ceil D E, Goodman S J, Boccippio D J, et al. Three years of TRMM precipitation features. Part I: Radar, radiometric, and lightning characteristics. *Mon Wea Rev*, 2005, 133: 543-566.
- [8] Ceil D E, Buechler D E, Blakeslee R J. Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description. *Atmos Res*, 2014, 135-136: 404-414.
- [9] Boccippio D J, Goodman S J, Heckman S. Regional differences in tropical lightning distributions. *J Appl Meteor*, 2000, 39: 2231-2248.
- [10] Christian H J, Blakeslee R J, Boccippio D J, et al. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *J Geophys Res*, 2003, 108(D1): 4005.
- [11] Goodman S J, Blakeslee R J, Koshak W J, et al. The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM). *Atmospheric Research*, 2013, 125-126: 34-49.
- [12] Finke U, Hauf T. Detect and locate lightning events from Geostationary satellite observations, Report part II, Feasibility of lightning location from a Geostationary Orbit, EUM/CO/02/1016/SAT, 2002.
- [13] 黄富祥, 郭俊柏, 冯小虎. 闪电成像仪虚警率和探测率模拟计算. *光子学报*, 2009, 38(12): 74-78.
- [14] 鲍书龙, 唐绍凡, 李云飞, 等. 静止轨道瞬态点源多目标闪电信号实时探测技术. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2390-2395.
- [15] Goodman S J, Mach D, Koshak W, et al. GLM lightning cluster-filter algorithm, algorithm theoretical basis document. Ver 4.0, NOAA NESDIS Center for Satellite Applications and Research, Washington, DC, 2010.
- [16] Mach D M, Goodman S J, Koshak W J, et al. GOES-R Geostationary Lightning Mapper performance specifications and algorithms. NOAA STAR GOES-R AWG Review, Madison, United States, 2008.
- [17] Christian H J, Blakeslee R J, Goodman S J, et al. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the Lightning Imaging Sensor (LIS). NASA-MSFC, Earth Science Department, 2000.
- [18] 鄯秀书, 谢屹然, Toumi R. 闪电的光辐射能分布特征. *高原气象*, 2004, 23(4): 476-480.
- [19] 胡丽琴, 黄富祥. 基于蒙特卡罗方法的卫星光学波段闪电辐射观测模拟. *光学学报*, 2012, 32(11): 1101001.
- [20] 陈圣波, 杨莹, 崔腾飞. 静止卫星闪电探测中云影响研究. *地球物理学报*, 2012, 55(3): 797-803.
- [21] Finke U, Grandell J, Defer E, et al. The Lightning Imager (LI) on MTG-Scientific studies and developments, AGU-Fall Meeting San Francisco - CA, USA, 2010.