

风云四号卫星闪电成像仪虚警滤除方法

高慧婷^{1,2*}, 鲍书龙¹, 梁华¹, 黄福祥³¹北京空间机电研究所, 北京 100094;²先进光学遥感技术北京市重点实验室, 北京 100094;³中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 风云四号闪电成像仪(LMI)在轨数据分析结果表明,虚假闪电事件包括鬼像噪声、高能粒子轨迹噪声和散粒噪声。为了提高闪电探测性能,在深入分析虚假事件特性的基础上,分别提出了基于空间-能量相关性的鬼像滤除方法、基于 Hough 直线检测的高能粒子轨迹噪声滤除方法、基于时空相关聚类的散粒噪声剔除方法,并形成闪电虚警滤除处理系统方法。为了验证虚警滤除算法性能,对云南和海南的两次典型雷暴数据进行处理,并与地基网探测结果进行对比,结果表明,所提算法处理后的闪电事件分布特性与地基探测结果基本一致,验证了风云四号闪电成像仪对雷电变化过程的持续跟踪性能。

关键词 成像系统; 闪电成像仪; 虚假事件; 滤波; 聚类

中图分类号 TP751

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0911001

Filtering Algorithm for Nonlightning Events Using the FY-4 Lightning Mapping Imager

Gao Huiting^{1,2*}, Bao Shulong¹, Liang Hua¹, Huang Fuxiang³¹Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;²Beijing Key Laboratory of Advanced Optical Remote Sensing Technology, Beijing 100094, China;³National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract By analyzing the on-board lightning data of the FY-4 lightning mapping imager (LMI), there are three types of nonlightning events: ghost noise, high-energy-particle-trajectory noise, and shot noise. To improve the performance of lightning detection, based on an in-depth analysis of the characteristics of false events, the ghost-image-filtering method based on spatial energy correlation, the high-energy-particle-trajectory noise-filtering method based on Hough linear detection, and the shot-noise-filtering method based on spatiotemporal correlation clustering are proposed, and the lightning false-alarm-filtering-processing system method is performed. To test the performance of the false-alarm-filtering algorithm, the lightning-filter algorithm is applied to process two thunderstorms in Yunnan and Hainan provinces. We compare the lightning data obtained by the LMI with those obtained by ground-based network. The results show that the distribution characteristics of lightning events processed by the proposed algorithm are consistent with the ground-based detection results, which verifies the continuous tracking performance of the FY-4 lightning mapping imager for the lightning change process.

Key words imaging systems; lightning mapping imager; nonlightning artifact; filtering; clustering

OCIS codes 110.2970; 80.4788; 20.0280

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2020-11-12; 录用日期: 2020-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(41871278)、科技部地导专项(2018YFB0504801)

* E-mail: gaohuiting_1100@126.com

1 引言

闪电是一种能够表征大气强对流活动的现象,航空飞行安全、极端天气预报等需要对闪电进行实时连续观测,静止轨道卫星闪电探测是大范围闪电监测的理想平台。美国 NASA 于 20 世纪 90 年代中期分别发射搭载闪电探测载荷光学瞬态探测器(OTD)和闪电定位系统(LIS)的极轨卫星,获得大量天基闪电观测数据^[1]。2016 年美国新一代静止轨道气象卫星 GOES-R 携带闪电探测载荷(GLM)实现全圆盘连续闪电探测^[2]。

我国新一代静止轨道气象卫星风云四号卫星于 2016 年 12 月 11 日发射升空,星上搭载的闪电成像是我国首台星载闪电探测载荷,覆盖地面 3200 km(纬度)×4800 km(经度)幅宽的扇形区域,星下点空间分辨率为 7.8 km,可实现对我国及周边区域闪电的 24 h 连续观测。闪电成像仪采用波长 777.4 nm 附近的 1 nm 带宽超窄带滤光片实现光谱滤波,采用 2 ms 帧频实现时间滤波,采用实时背景预估算法实现背景噪声去除,具有以下功能:1)连续闪电数据获取,用于雷暴预测;2)早期雷暴预警;3)中国及周边地区闪电的长期变化监测^[3-5]。

闪电成像仪通过光学成像技术将闪电信号转换为连续图像序列,当信号超过设定阈值时即判断为闪电事件。闪电数据中既包括真实信号,也包括非闪电虚假信号,根据 LIS 数据处理经验,虚假事件占全部闪电事件总数的 80%~90%,因此必须进行虚假事件滤波,减少非闪电事件。一些虚假事件是由发生在 CCD 上的特殊现象引起的,在定位时可以被滤除,另外一些虚假事件必须基于闪电空间和时间连续特性进行滤除,需要在事件聚类之后进行滤除处理。

NASA 针对 LIS 在轨数据提出了一系列虚警滤除算法。鬼影噪声产生的原因是 LIS 星上数据读取系统采用循环方式,当 CCD 面阵上某个象限存在一个明亮像元,数据读取系统受跟踪速度限制,没有足够时间重置该像元,就可能在镜像位置产生较暗像元,称为鬼影。滤除处理时设定鬼影产生的响应阈值,逐个像元判断是否满足鬼影产生的条件,如满足,则在鬼影可能产生的位置检测是否出现弱像元响应,若出现,则该像元确定为鬼影事件,直接进行滤除处理。高能粒子轨迹噪声是由空间高能粒子撞击 CCD 面阵产生的,滤除方法研究比较多。Christian 等^[6]针对 LIS 数据采用辐射算法,从形态

上区分真实闪电与高能轨迹噪声信号;Kirkland 等^[7]通过改进的聚类算法滤除高能粒子轨迹噪声;Qu 等^[8]考虑到噪声的聚类属性不同于真实闪电事件,用 Monte-Carlo 方法模拟纯噪声信号,然后对纯噪声信号进行聚类,进而根据特定噪声频率条件下的事件数量,判断滤除哪些闪击。如果高能粒子撞击 CCD 面阵的入射角比较小,通常采用相干算法对只有单个或单组像元产生的散粒噪声进行处理。散粒噪声是相机在光电转换过程中由电荷数涨落产生的虚假闪电事件,采用相干算法进行聚类并滤除。GLM 继承 LIS 星上闪电电检测与存储技术方案,噪声滤除仍然沿用 LIS 处理方法^[9]。

风云四号(FY-4)闪电成像仪在相机设计、星上闪电数据处理和存储传输方面与 LIS 存在差异,导致其在轨数据中虚警的形态和规律也存在差异。本文基于 FY-4 闪电成像仪载荷成像特性,结合实验室测试和在轨数据进行闪电虚假事件特性分析,开展典型虚假事件滤除方法研究,并利用在轨数据进行算法验证。

2 虚假闪电事件滤除算法

2.1 闪电数据定义

闪电成像仪的闪电探测数据由表征闪电信号的闪电事件(event)组成,星上闪电处理器检测出图像中单个像素亮度超过检测阈值时,将其记为闪电事件。闪电事件代表基本的闪电数据单元,闪电事件可能是一次真实脉冲放电,也可能是噪声引起的虚假信号。一次放电通常会引起积分时间内焦面上相邻几个像素的响应,导致一帧图像中存在两个或多个相邻闪电事件,相邻事件组成闪电组(group)。发生在同一次雷电单元内一定时间和空间间隔范围内的一个或多个光学脉冲组成闪击(flash),表现为若干个时空相关闪电组的集合^[10]。

2.2 鬼影

2.2.1 噪声特性

风云四号卫星闪电成像仪使用带宽为 1 nm、反射率为 0.6 的滤光片实现窄带滤波,滤光片位于光学系统最前端,相当于平面镜,经光学元件和 CCD 反射成像光路的光被滤光片对称地反射回去,经光学系统再次成像后,形成鬼像。图 1 为闪电成像仪实验室测试时鬼影噪声图像,图中亮暗线为五线靶标实际图像,在靶标右下侧有类似靶标的暗影(圈出部分),即为鬼影噪声,可以明显看出鬼影噪声与真实信号形态完全一致,且与真实信号存在关于某一

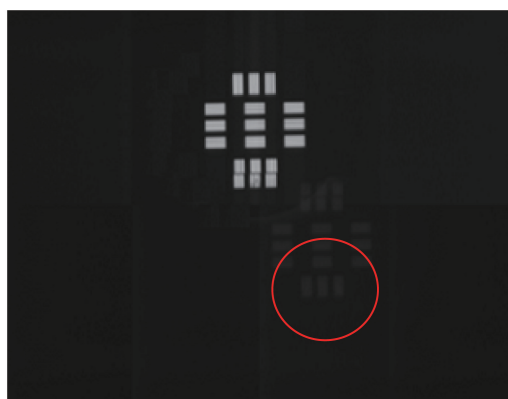


图 1 实验室测试的真实信号及鬼影图像
Fig. 1 Measured true signals and ghosts in laboratory measurement

点的对称关系,统计分析结果是鬼影噪声像素灰度值仅为真实信号的 3%~5%。根据实验室数据可以获得真实信号与鬼影噪声的镜像位置和能量关

系,对于在轨数据的每一个闪电事件,首先计算鬼影噪声在图像中的位置,之后进行能量关系检测,滤除满足位置和能量关系约束的低亮度孤立像元。

2.2.2 处理算法

假设检出的闪电事件在图像中的位置为 (x, y) , 响应值为 $D_{(x, y)}$, 根据实验室测量得到的信号和鬼像间的镜像关系得到其鬼影位置为 (x', y') , 响应值为 $D_{(x', y')}$ 。当两像素响应间的关系满足

$$D_{(x', y')} < \alpha \cdot D_{(x, y)}, \quad (1)$$

则判断 (x', y') 为鬼像。其中 α 为实验室测量信号与鬼像间响应比值关系。

图 2 为闪电成像仪在轨鬼像。白色亮斑表示真实闪电信号, ‘+’ 表示真实信号产生的鬼像。表 1 为信号和鬼像位置的响应值, 可以发现鬼像响应低于信号响应的 5%, 且镜像关系稳定, 与实验室测试结果保持一致。

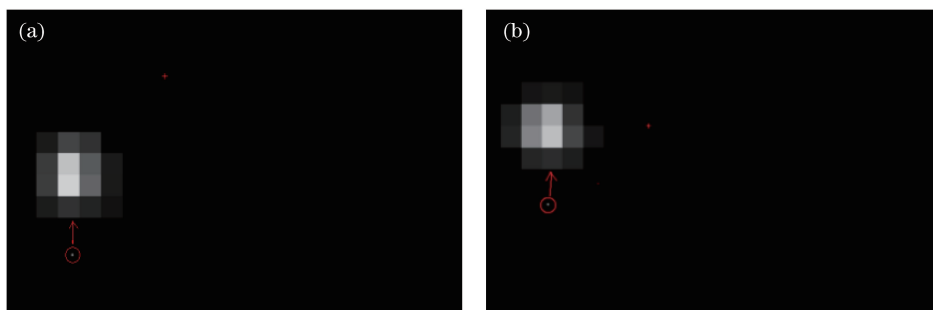


图 2 在轨闪电信号及鬼像噪声示意图。(a)实例 1;(b)实例 2
Fig. 2 On-orbit examples of signals and ghosts. (a) Example 1; (b) example 2

表 1 在轨闪电信号和鬼像位置和响应值
Table 1 Position and D of on-orbit lightning signal and ghost

Image	Example 1			Example 2		
	Row	Column	D	Row	Column	D
Lightning event	89	209	33	153	215	30
	323	88	3428	256	83	3161
	322	88	3197	255	83	2708
	323	89	1580	256	82	2097
	322	89	1406	255	82	1779
	321	88	1074	256	84	1119
	323	87	964	255	84	804
	322	87	938	257	83	716
	324	88	798	257	82	604
	321	89	790	256	81	576
	324	89	568	255	81	485
	324	87	451	257	84	481
	322	90	444	254	83	417
	321	87	417	254	82	364
	323	90	423	256	85	352
	324	90	306	254	84	321

2.3 高能粒子轨迹噪声

2.3.1 噪声特性

由于卫星在轨恶劣的电磁环境,如紫外线、太阳风等,高能粒子撞击闪电成像仪探测器,高能粒子在一帧时间内发生相对运动后形成线性分布轨迹,称为高能粒子轨迹噪声。根据 LIS 在轨探测结果,高能粒子轨迹噪声在一帧内多以成簇形式出现,与闪电事件组接近,但在 2 ms 曝光时间内几十甚至几百千米的闪电信号不可能同时发生,是高能粒子轨迹噪声与闪电事件组(group)的最大区别。闪电成像仪在轨图像中的部分高能粒子轨迹噪声如图 3 所示。

风云四号卫星闪电成像仪高能粒子轨迹噪声特性有形状接近线性;事件组连续或断续;事件发生在相同或相邻帧内。这些特性与 NASA 的 LIS 探测结果有所区别,原因如下。

1) 风云四号卫星闪电成像仪闪电事件星上提取算法与 LIS 存在差异,星上处理器基于阈值进行闪电事件提取,其中闪电阈值根据实验室测试数据

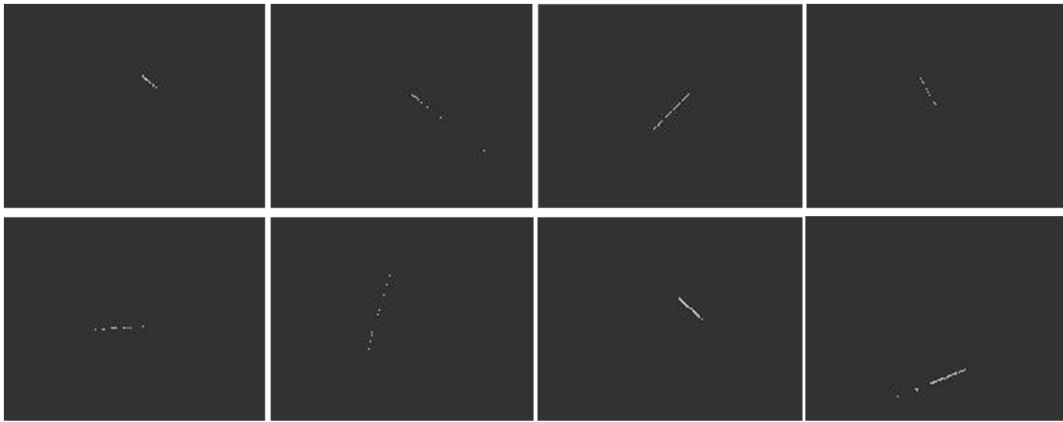


图 3 在轨高能粒子轨迹噪声
Fig. 3 Trajectory noise of on-orbit high energy particles

进行设置,与载荷响应特性密切相关。

2) 风云四号卫星闪电成像仪星上处理盒设计与 LIS 有差别,受星上存储空间限制,闪电成像仪星上处理器每次最多只输出最强的 120 个闪电事件。在相机设计过程中,闪电成像仪视场被分为 8 个子区,国家卫星中心气象用户根据 2 ms 内子区对应我国各个地区闪电发生概率差异,给出了各子区最大输出事件个数建议。结合 LIS 在轨探测全球闪电事件分布特性、全国雷电监测定位系统对全国地闪的长期统计结果,最终确定各个子区内最多可输出事件个数如图 4 所示,子区 7 对应的华南地区($18^{\circ}\sim 27^{\circ}$ N、 $104^{\circ}\sim 117^{\circ}$ E)为我国闪电活动最活跃区域^[11-13]。

area1 Events<=6	area2 Events<=9	area3 Events<=15	area4 Events<=10
area5 Events<=15	area6 Events<=15	area7 Events<=35	area8 Events<=15

图 4 各子区最大输出事件个数

Fig. 4 Maximum number of output events in each sub-area

2.3.2 处理算法

基于高能粒子轨迹噪声特性,提出一种基于 Hough 变换的高能粒子轨迹噪声检测方法^[14-16]。假设待处理图像中的兴趣像素位置为 (x, y) ,对于过该点的任意一条直线,投影至极坐标系 (ρ, θ) 为

$$\rho = x \cos\theta + y \sin\theta, \quad (2)$$

式中: ρ 为从极坐标原点到该空间内直线所引的垂线长度, θ 为此直线与横轴的夹角。如果把直角坐标空间看作原始量测空间,极坐标空间看作参数空间,量测空间中任意一点 (x, y) 将对应参数空间中的一条正弦曲线。

对于每一个特征像素, ρ 和 θ 成对出现, θ 变化范围为 $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$,以一定步长取值,则可根据(2)式计算出 ρ 值,再根据取整后的 ρ 和 θ 值对累加器数组 H 进行累加,由 $H(\rho, \theta)$ 确定共线点的个数,同时 ρ 和 θ 也给出了共线点确定的直线的参数。

量测空间中任意一点 (x, y) 将对应参数空间中的一条正弦曲线,量测空间中位于同一直线上的点确定了参数空间的多条正弦曲线,且这些正弦曲线相交于同一点 (θ_0, ρ_0) ,此交点即确定了原量测空间中直线的参数。如果把量测空间上各点的能量分布到相应 Hough 参数空间的正弦曲线上进行叠加,在这些正弦曲线的交点上将会出现一个峰值。因此,判断量测空间中的各点是否在一条直线上,就等价于在 θ - ρ 平面内找到一簇正弦曲线的交点。

2.3.3 参数分析

高能粒子轨迹噪声在像面上表现为由若干个近似共线离散事件组成的直线,且离散事件之间在一定距离。在利用 Hough 变换进行检测时,需通过控制检测约束解决直线过连接、断续、线性度等问题,提高检测的稳健性^[17]。首先要避免将位于一条直线上但距离较远的点错判为一条高能粒子轨迹噪声,其次由于高能粒子轨迹并非严格直线,若检出不同直线间夹角小于给定阈值,则须合并直线,再次避免将一些短线或离散点误认为是被检测直线。要将 Hough 变化用于高能粒子轨迹噪声检测,必须通过统计分析获取特征参数,构建直线端点、长度、点间距等属性约束模型。

对 2017 年 1~6 月间获取的闪电在轨数据分析,获得以下参数。

1) 1 天中发生次数

1 天内发生次数大致相同,变化 400~500 次,

包含事件个数约占事件总数的 0.7%。

2) 闪电事件个数

表示单次高能粒子轨迹噪声包含闪电事件个数,直方图统计结果表明,闪电事件个数最大值为 42,最小值为 5,95% 以上超过 15。

3) 轨迹长度

表示高能粒子轨迹线段首尾两个事件间的距离,轨迹长度直方图统计结果表明,长度最大值为 117.8,最小值为 5,95.8% 以上小于 30。

4) 事件分布特性

表示高能粒子轨迹中相邻事件间的距离,相邻事件间距离直方图统计结果表明,最大值 6.7,98.8% 以上等于 1。

2.4 散粒噪声

2.4.1 噪声特性

散粒噪声是载荷或卫星引起的随机噪声。一类是由光子和光生电荷数涨落引起的,通常表现为单一像元产生电信号,信号强度一般比较低;另一类是由高能粒子碰撞造成的,如果高能粒子撞入射角较小,只有单个或单组像元产生信号;最后一类是未知原因引起的图像污染。单独看散粒,与闪电事件图像特性相近,但不具有典型真实闪电的时空连续性。散粒噪声基本特性包括:随机性强,一般在同一帧内发生;事件出现在单个像元或几个像元,不具备闪电组(group)或闪击(flash)时空连续性。

2.4.2 处理算法

针对散粒噪声的基本特性,利用时空聚类方法提取闪电信号,未被聚类为闪电产品的事件可以认为是散粒噪声。闪电放电过程通常在一定区域内持续一段时间。当多个事件相邻,可以被聚类为组,满足一定时空相邻约束的组可合并为闪击,空间相邻闪击可聚类为闪区(area)。对于闪电成像仪,定义组聚类为闪击的时间间隔为 330 ms,距离小于 6 个像元。

进行聚类处理时,闪电事件沿顺时针方向被编码为 8 方向 freeman 链码。假设一个闪电事件在图像中的位置为 (x, y) ,按照逆时针方向进行逐像素的轮廓搜索,搜索方向的顺序由当前链码方向确定,每移动一个像素,记录相应的方向编号,直到搜索回到初始点或无法找到下一个点时链码结束。链码的方向和初始位置坐标联合表示一个链码,独立表征任意形态的对象,根据 freeman 链码规则提取闪电事件簇轮廓,之后检测其余闪电事件与轮廓间关系,得到闪电组^[18]。单帧闪电数据聚类处理流程如图 5

所示,聚类结果如图 6 所示,不同颜色表示经过链码聚类后的不同闪电组(group)。

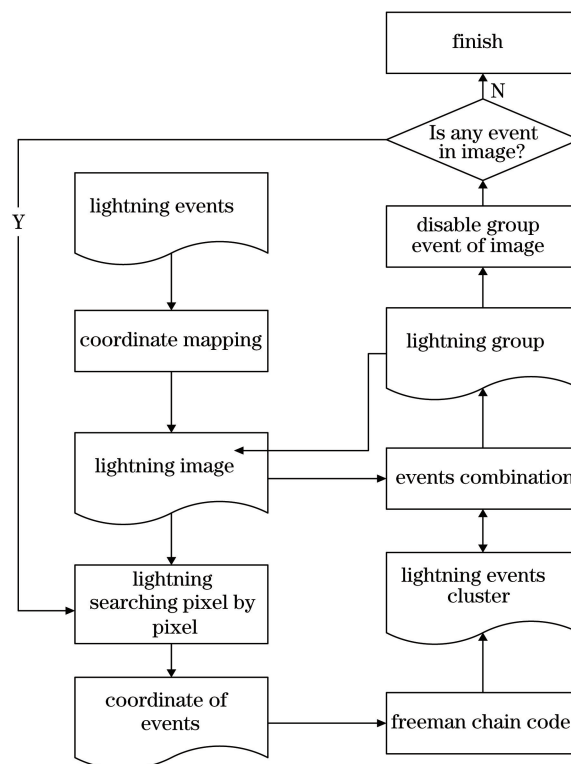


图 5 闪电事件聚类处理流程图

Fig. 5 Flowchart of cluster process of lightning events

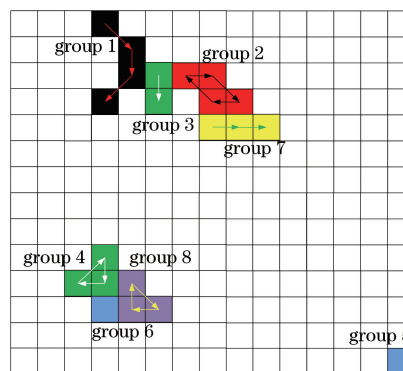


图 6 闪电事件聚类结果

Fig. 6 Result of lightning cluster

实现闪电事件到闪电组的聚类后,根据时空聚类约束进一步将闪电组(group)聚类为闪击(flash),则当某一闪击只出现在某一帧图像中时,可认为该闪击为散粒噪声。

2.5 闪电成像仪虚警滤除处理流程

闪电成像仪虚警滤除处理流程:首先进行鬼像滤除,该虚警由闪电成像仪光学系统多次反射产生,滤除处理对其他虚警滤除算法无影响;之后进行高能粒子轨迹滤除,轨迹形态特性滤除算法能够实现高能粒子轨迹噪声的完整辨识;最后进行散粒噪

声滤除。

3 在轨数据验证与讨论

3.1 虚警滤除算法验证

为了评估所提闪电虚假事件滤除算法的性能,选择 UTC 时间 2017 年 3 月 29 日 10:00—3 月 30 日 01:00,对中国南方出现的一次雷暴过程数据进行处

理,该时段内 FY-4 卫星定位在东经 99.5°,可覆盖中国区域。获取同时段地基网探测的闪电结果用于对比验证。

对该时段数据以 1 h 为间隔的零级数据进行预处理,采用所提算法进行鬼像、高能粒子轨迹、散粒虚假事件滤除,各时段虚假事件滤除统计结果如表 2 所示,平均虚警占比达 70%,与 LIS 处理结果接近。

表 2 虚假闪电事件滤除结果
Table 2 Filtering result of false lightning event

UTC	Number of detected events	Number of ghost filtering	Number of track filtering	Number of granular filtering	Number of lightning events	Proportion of false alarm /%
2017/3/29 10:00-11:00	130783	0	179	110608	19996	84.71
2017/3/29 11:00-12:00	155396	0	190	123686	31520	79.72
2017/3/29 12:00-13:00	149224	0	217	115770	33237	77.73
2017/3/29 13:00-14:00	150203	0	200	108096	41907	72.10
2017/3/29 14:00-15:00	128225	0	152	85157	42916	66.53
2017/3/29 15:00-16:00	112498	3	525	76317	35653	68.31
2017/3/29 16:00-17:00	133884	1	398	89184	44301	66.91
2017/3/29 17:00-18:00	59581	4	407	36424	22746	61.82
2017/3/29 18:00-19:00	106028	4	560	71684	33780	68.14
2017/3/29 19:00-20:00	135637	14	451	95939	39233	71.08
2017/3/29 20:00-21:00	161948	11	355	99454	62128	61.64
2017/3/29 21:00-22:00	160498	7	452	102104	57935	63.90
2017/3/29 22:00-23:00	154676	6	319	83668	70683	54.30
2017/3/29 23:00-00:00	150407	18	373	78749	71267	52.62
2017/3/30 00:00-01:00	89468	2	185	67074	22207	75.18

对 3 月 30 日 0 点开始 1 h 的数据进行虚警滤除预处理,星上闪电探测结果如图 7(a)所示,虚警滤除后结果如图 7(b)所示,色度条表示事件个数。

根据闪电定位信息,确定该时段内最强闪电过程发生在中国云南易武(21.9° N,101.4° E),湖南郴州(25.8° N,113° E)和湖北武穴(29.8° N,115.5° E)

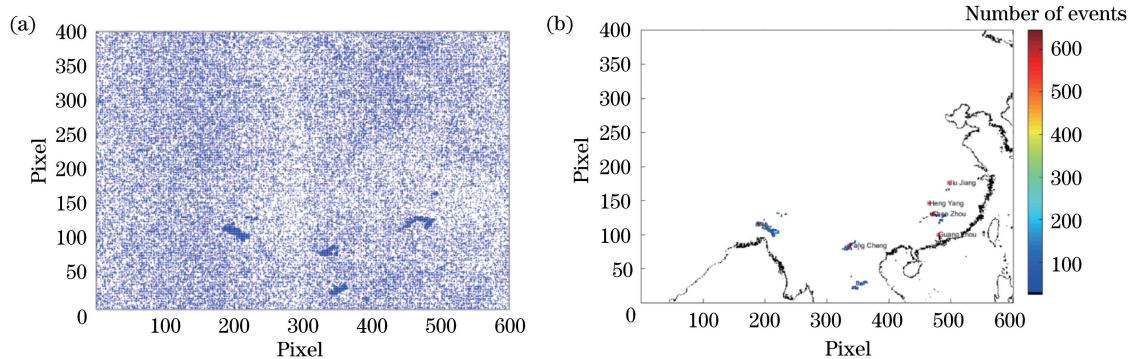


图 7 星上闪电探测和处理结果。(a)闪电事件探测结果;(b)虚警滤除处理后结果

Fig. 7 On-board results of lightning monitor and process. (a) Detection result of lightning event; (b) result after nonlightning events filtering

地区有较弱闪电过程,与同期地基闪电探测位置基本吻合,且相对强度具有较强的相似性。该时段同时监测到泰国和老挝局部地区发生的强雷暴过程,证明静止轨道闪电探测在监测覆盖区域和时间连续性方面具有主要优势,从而为中大尺度强对流天气监测和预报提供有力支撑。

利用 2020 年 6 月 11 日我国海南地区的一次闪电过程星地同步数据,验证 FY-4 闪电成像仪对雷

暴事件跟踪的性能。此次雷电过程发生时间为 6 月 11 日 15:00~18:30,图 8 表示 1 h 同时段内闪电位置星地探测对比,可以看到闪电探测位置基本吻合。雷暴过程中 10 min 间隔星地探测闪电事件个数时变对比如图 9 所示,两种探测对雷暴发生-发展-结束过程的描述基本一致,雷暴最强的时段发生在 17:00~17:30,对比这一时段天地探测闪电个数,总的匹配度接近 90%。

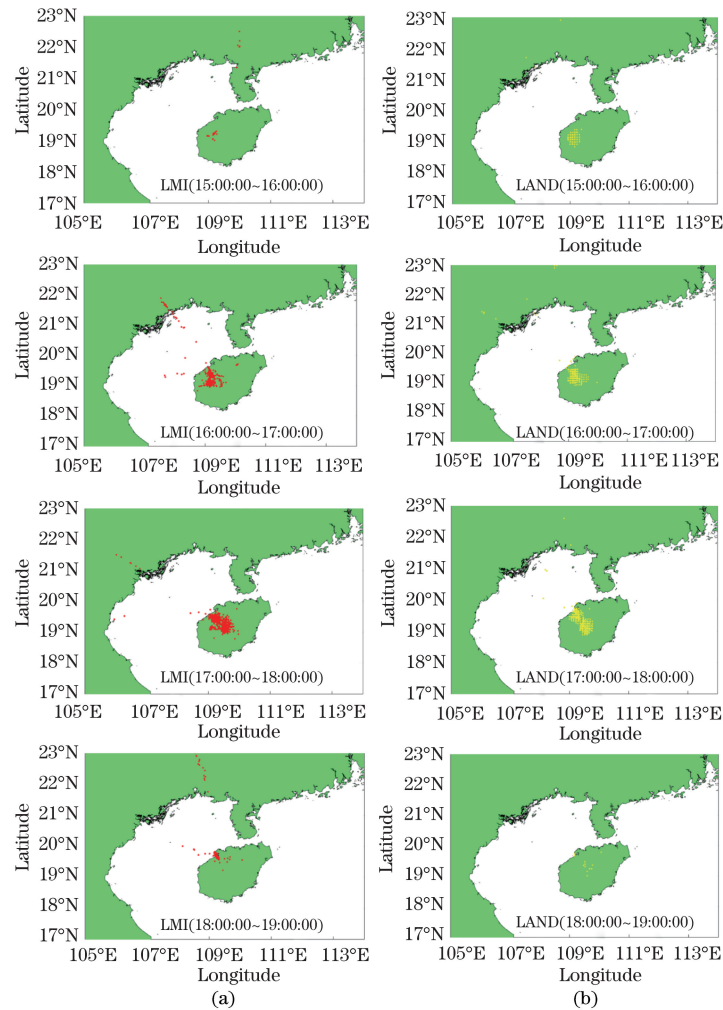


图 8 天地探测闪电 1 h 的结果对比。(a)天基;(b)地基

Fig. 8 Contrast of lightning detection by LMI and LAND every 1 h. (a) LMI; (b) LAND

3.2 星地比对结果讨论

星地闪电探测目前也存在一定的差异,以下几项因素是造成两种探测手段差异的主要原因。

1) 我国地基闪电观测网基于电磁场探测原理,统计云的散射和吸收对放电过程的共同作用下闪击的次数,而闪电成像仪采用光学成像探测原理,探测云顶闪电放电过程中产生的辐射信号。二者在探测原理上有差别,两种数据只在一定程度上适合量化对比。

2) 地基闪电观测网主要观测的是地闪,而闪电成像仪观测的是总闪电。

3) 两种闪电探测方式都存在固有误差。地基闪电观测网探测的闪电数据主要受探测效率、定位误差、时间误差等不确定因素的影响,闪电成像仪像素地面分辨率(GSD)为 7.7 km,定位误差为 1 个像素。闪电探测效率受三方面影响,一是受星上存储和传输资源限制,只保留最强的闪电事件;二是星上闪电处理算法存在一定的漏检;三是闪电成像仪在

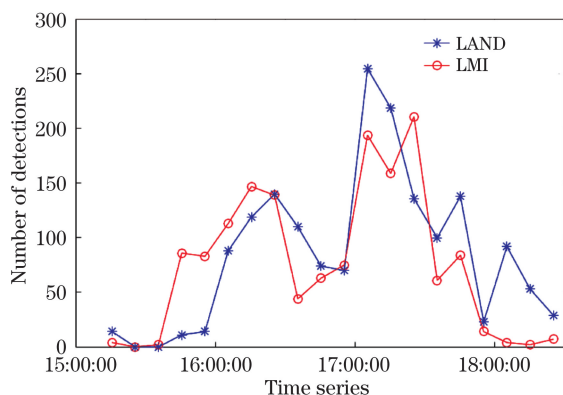


图 9 探测事件时变性

Fig. 9 Change of number of events by time

轨采用 10 min 闪电探测+1 min 地标探测模式, 地标模式下不输出闪电探测结果, 必然造成部分闪电事件丢失。随着后续风云四号 03 星全圆盘闪电探测载荷设计、研制和使用的不断完善, 有望逐步提升星载闪电探测性能。

4 结 论

基于风云四号卫星闪电成像仪特点, 提出一套时-空-辐关联的虚假事件滤除方法, 并利用在轨数据对该方法进行了验证。结果表明, 虚警滤除方法能够有效去除虚假事件, 保证探测性能。风云四号卫星闪电成像仪和地闪探测结果的对比也表明, 闪电成像仪对雷暴发生过程具有良好的全程跟踪和定位能力。

在风云四号卫星闪电成像仪数据中, 未发现 GLM 探测到的一些虚假事件, 如卫星运动引起的抖动噪声、水体反射引起的太阳闪烁等, 可能与载荷探测区域、设计差异有关。我们将持续跟踪虚警变化, 但可以预见的是, 风云四号卫星闪电成像仪将会在中国及周边区域雷暴预报和预警、气候监测方面发挥越来越重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Buechler D E, Christian H J, Koshak W J, et al. Assessing the lifetime performance of the lightning imaging sensor (LIS): implications for the geostationary lightning mapper (GLM) [C]//XIV International Conference on Atmospheric Electricity, August 8-12, 2011, Rio de Janeiro, Brazil. [S.l. : s.n.], 2011.
- [2] Goodman S. High impact weather forecasts and warnings with the GOES-R geostationary lightning mapper (GLM) [EB/OL]. [2020-10-08]. https://www.researchgate.net/publication/267827398_High_Impact_Weather_Forecasts_and_Warnings_with_the_GOES-R_Geostationary_Lightning_Mapper_GLM.
- [3] Bao S L, Tang S F, Li Y F, et al. Real-time detection technology of instantaneous point-source multi-target lightning signal on the geostationary orbit [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2390-2395.
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 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2390-2395.
- [4] Liang H, Bao S L, Chen Q, et al. Design and implementation of FY-4 geostationary lightning imager [J]. Aerospace Shanghai, 2017, 34(4): 43-51.
梁华, 鲍书龙, 陈强, 等. FY-4 卫星闪电成像仪设计与实现 [J]. 上海航天, 2017, 34(4): 43-51.
- [5] Iii S Z, Bao S L, Liang H, et al. The real-time data processing and lightning extraction technology of lightning imager on FY-4 meteorological satellite [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 1084: 108462P.
- [6] Christian H J, Blakeslee R J, Goodman S J, et al. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the lightning imaging sensor (LIS) [EB/OL]. [2020-10-08]. https://www.docin.com/touch_new/mip_previewHtml.do?id=1415166899.
- [7] Kirkland M W, Suszcynsky D M, Guillen J L, et al. Optical observations of terrestrial lightning by the FORTE satellite photodiode detector [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(24): 33499-33509.
- [8] Qu Y, Li H Y, Li W H, et al. The filtering of the energetic partial noise captured by the geostationary lightning image sensor [J]. Sensor Letters, 2013, 11(5): 937-944.
- [9] Goodman S J, Blakeslee R J, Koshak W J, et al. The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM) [J]. Atmospheric Research, 2013, 125/126: 34-49.
- [10] Rudlosky S D, Goodman S J, Virts K S. Initial geostationary lightning mapper observations [J]. Geophysical Research Letter, 2019, 46(2): 1097-1104.
- [11] Bürgesser R E. Assessment of the world wide lightning location network (WWLLN) detection efficiency by comparison to the lightning imaging sensor (LIS) [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2017, 143(708): 2809-2817.
- [12] Cecil D J, Buechler D E, Blakeslee R J. Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: dataset description [J]. Atmospheric Research, 2014, 135/136: 404-414.
- [13] Chen W, Bao S L. Design of RTEP with FPGA [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2005, 26(3): 31-37.
陈伟, 鲍书龙. FY-4 闪电成像仪实时事件处理器

- (RTEP)的 FPGA 设计研究[J]. 航天返回与遥感, 2005, 26(3): 31-37.
- [14] Cui Y, Zhou X C, Liu Y F, et al. Solar meridian extraction method based on Hough transformation [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1701002.
崔岩, 周鑫昌, 刘亚飞, 等. 基于 Hough 变换的太阳子午线提取方法[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1701002.
- [15] Zhang Y F, Dong S Q, Bi K B. Warship formation recognition algorithm based on Hough transform and clustering[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(4): 648-655.
张翼飞, 董受全, 毕开波. 基于 Hough 变换和聚类的舰艇编队队形识别算法[J]. 兵工学报, 2016, 37(4): 648-655.
- [16] Yang W S, Guo S P, Li X J, et al. Checkerboard corner detection based on Hough transform and circular template[J]. Laser & optoelectronics progress, 2020, 57(18): 181510.
杨炜松, 郭帅平, 李学军, 等. 基于 Hough 变换和圆形模板的棋盘格角点检测[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(18): 181510.
- [17] Xu C, Ping X L. Line detection algorithm based on improved random Hough transformation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(5): 051001.
徐超, 平雪良. 基于改进随机 Hough 变换的直线检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 051001.
- [18] Sun J D. Contour representation and retrieval based on spatial feature and relativity of chain codes [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2008, 19(8): 1112-1115.
孙君顶. 基于链码分布特征及相关性的轮廓描述与检索[J]. 光电子·激光, 2008, 19(8): 1112-1115.