

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211593

基于时空上下文的输电线路山火自动识别算法

王开正¹, 付一桐¹, 钱国超², 周仿荣², 文刚², 李露露¹,
单节杉¹, 王飞鹏³, 李剑³

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 605504; 2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217; 3. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 430074)

摘要: 传统极轨卫星观测频次低和观测时间固定, 难以对一个区域进行实时监测。因此, 基于 Himawari-8 (H-8) 静止卫星提出了一种能持续监测输电线路山火的时空上下文火点自动识别算法。该算法首先根据中红外和热红外波段对火点的敏感度差异, 采用固定阈值法快速实现绝对火点识别和潜在火点提取, 然后在空间上利用中红外和热红外的通道值、平均值和标准差之间的比值关系对潜在火点进行细判。在时间上利用 H-8 的高观测频次并融合火点发生概率进行持续性火点识别。所提技术已应用于南方某省级电网输电线路山火监测, 并且准确率达 72.5%, 漏报率为 43.9%。监测结果明显优于固定阈值法与传统的上下文法。

关键词: Himawari-8; 输电线路山火; 时空上下文; 阈值; 潜在火点

An automatic identification algorithm for wildfire occurrences near transmission line corridors based on spatio-temporal context

WANG Kaizheng¹, FU Yitong¹, QIAN Guochao², ZHOU Fangrong², WEN Gang², LI Lulu¹,
SHAN Jieshan¹, WANG Feipeng³, LI Jian³

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 605504, China;
2. Electric Power Research Institute of Yunnan Electric Power Company, Kunming 650217, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing 430074, China)

Abstract: The traditional polar-orbit satellite with low-frequency observations and a fixed observation time is intractable to real-time monitoring for a specific region. Accordingly, a spatio-temporal contextual algorithm for continuous monitoring of wildfires near transmission lines is provided by the Himawari-8 (H-8) geostationary satellite. First, based on the difference in sensitivity of the mid-infrared and thermal infrared bands to the fire spots, the absolute and potential fire spots are determined by a fixed-threshold algorithm. Then, the flame pixels are identified by comparing the ratios between the channel value, mean, and standard deviation of the mid-infrared and thermal infrared from space. Also, persistent fire spots can be located by taking advantage of the high-frequency observation capability of H-8 in conjunction with the fire occurrence probability in terms of time. The proposed technique has been applied to the wildfire monitoring of transmission lines in a provincial power grid in southern China, boosting the accuracy rate to 72.5% and lowering the missing alarm rate to 43.9%, respectively. The current study results are significantly superior to the conventional contextual fire detection algorithm and fixed threshold algorithm.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52107017, No. 52177016, and No. 52130707).

Key words: Himawari-8; wildfire near transmission lines; spatio-temporal contextual; threshold; potential fire spot

0 引言

我国能源资源与负荷需求呈逆向分布, 2/3 的

水电资源集中在西南地区, 80% 以上的陆地风能资源集中在西部和北部地区。而 75% 的电力消费集中在中东部地区, 因此迫切需要建设特高压电网, 以实现电能的大规模、远距离输送^[1-4]。然而随着我国七大新基建之一“特高压电网”的建设, 越来越多的高压输电线路需要跨越地形宽阔的农田、地势陡

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (52107017, 52177016, 52130707)

峭的山脊、气候寒冷的高原以及植被繁茂的山区,因此,雷击^[5]、超强降雨^[6]、极端低温冰雪、山火等灾害均对我国电网安全构成严重的威胁。在众多自然灾害中,因山火引起的输电线路跳闸事故频繁发生,其中云南省 2020 年由于山火导致的线路跳闸事故就高达 60 余次,严重威胁到电力系统的安全性。因此,研究山火火点初期的监测告警技术,对大电网安全可靠运行具有重要意义。

迄今为止,国内外就山火对电网的影响开展了诸多探索,主要包括三类:火点的监测预警技术^[7-8]、山火的蔓延过程模拟^[9]以及山火引起的输电线路间隙击穿机理的研究^[10-11]。其中火点监测预警技术研究的突破能够有效地预防和避免输电线路跳闸事故的发生。目前已采用多种手段进行输电线路山火监测,包括气象卫星遥感技术、固定地点安装烟火探测装置以及气象雷达监视等^[12]。但是,由于输电线路杆塔分布呈现点多面广的特点,定点监测难以对电网山火实现大范围的实时监测,并且成本高;由于受天气雾、霾等因素干扰,采用气象雷达难以监测输电线路走廊附近的小面积山火。如果采用气象卫星进行山火监测,则具有监测范围广、发现及时、成本低等特点,因此该技术一直是研究热点^[13]。由于极轨卫星过境时间比较固定且间隔长(过境时间主要集中在 09:30—11:00 和 13:00—14:30),即使采用多颗极轨卫星协同的方法提高卫星山火监测的时间分辨率^[14],也容易造成火点漏报现象。静止气象卫星的运行与地球自转同步,对目标区域可以实现 24 h 不间断的山火监测,因此,采用静止气象卫星进行山火监测具有极高的应用前景。

森林山火监测方面,林业部门采用气象卫星数据来监测林火,并且取得了成功^[15-16],但这些方法并不适用于输电线路山火监测,原因主要有两点:一方面,与输电线路山火监测不同,林火监测识别的是一些规模较大的火点,然而小型山火就可能造成输电线路跳闸^[17]。另一方面,输电线路山火监测除了需要识别出火点,还需要对火点与杆塔间的距离进行计算,从而确定是否要发出告警信号。因此,林业部门提出的林火监测方法的精度难以满足输电线路山火监测的要求,并且林火监测没有结合输电线路来进行研究。综上,这些方法并不能直接应用于输电线路山火监测。

目前采用卫星遥感技术的火点识别算法主要有固定阈值法^[18-19]和传统的上下文法^[20]。许多学者^[21-22]依据历史数据进行阈值的选择,虽然该方法对绝对火点的监测精度高,计算速度快,但是受地理位置、气象条件等因素的影响,仍有许多山火漏检,尤其

是小型山火。与固定阈值法相比,传统的上下文法在火点的识别方面更加具有优势(可以利用目标像元与相邻像元的亮温差异进行阈值调整)。然而传统的上下文法未能充分考虑卫星数据的时间特性。文献[23]采用的是中等分辨率成像光谱仪(MODIS)数据,这一系列的卫星数据空间分辨率高,但重访周期较长(1天4次),难以对输电线路进行持续监测。文献[24]中使用的卫星数据来源于 H-8 这一类具有高观测频次(10 min 1次)的静止卫星,但仅仅只进行空间特性分析,不能最大限度地发挥卫星数据的优势,因此,对于提高算法的准确率仍有不足。

卫星监测受地理位置、地貌特点、气候类型等因素的影响较大,监测效能随地区、植被、季节等环境的改变在一定范围内不断地变化。若能同时考虑卫星数据的时空特性将有效地降低山火监测的误报率和漏报率。因此本文综合了卫星数据的时间与空间特性的优势,通过不同背景系数的选取引入了火点发生概率,并根据火点发生概率对持续性火点进行分析,提出了时空上下文输电线路山火识别算法。实例分析验证了所提方法在输电线路山火监测方面的有效性与优越性。

1 算法原理及实现方法

虽然已经有部分学者开展了静止卫星山火监测技术方面的研究,但仅限于通过单张卫星图像进行分析,并采用固定阈值法或传统的上下文法进行火点识别^[25]。然而,由于静止卫星空间分辨率相对较低,单个 S-VISSR 图像只能提供非常有限的信息,因此对时间序列的分析就显得尤为重要。其他的一些研究是基于时间序列分析进行的,没有考虑图像特征。但是为了更好地挖掘时间序列分析的潜力并充分利用图像中包含的信息,进行空间分析是必要的。同时,在山火识别算法中引入空间分析可以剔除大量具有非火灾特征的像元,有助于缩短计算时间。

本文提出的输电线路火点识别流程如图 1 所示。首先,对输入的遥感影像进行数据预处理,并根据土地利用数据以及可见光云图合成像元标记图,用以剔除云掩膜以及固定热源。其次,采用固定阈值法快速实现绝对火点识别和潜在火点提取。最后,结合卫星数据的时空特性对火点像元进行更精细的识别。

1.1 研究区域

云南省 2020 年的装机容量超越 1 亿 kW,其中以水电为主的清洁能源发电量占比达 90.94%,在我国“碳达峰,碳中和”的目标中发挥了积极的作用。

为促进云南清洁能源消纳, 南方电网加大各级电网建设改造力度, 现已成为世界上技术最先进、特性最复杂的送端大电网之一。先后建成投产“十直两交”西电东送电力外送大通道, 相当于打通 12 条云南清洁能源送往东部省区的“电力高速”。

随着输电线路长度的快速增长, 输电线路走廊穿越的地理环境变得更加复杂, 要经过大面积的高海拔地区、水域或从山峻岭, 尤其是整个云南省植被覆盖度超过 70%^[26](如图 2 所示), 当遭遇持续干燥天气时, 易爆发大面积山火(仅 2019 年云南省山火热点就有 5151 个, 如图 3 所示), 导致多年来输电线路罕见的山火跳闸事故开始急剧攀升, 云南电网因山火引起的跳闸事故尤为突出。

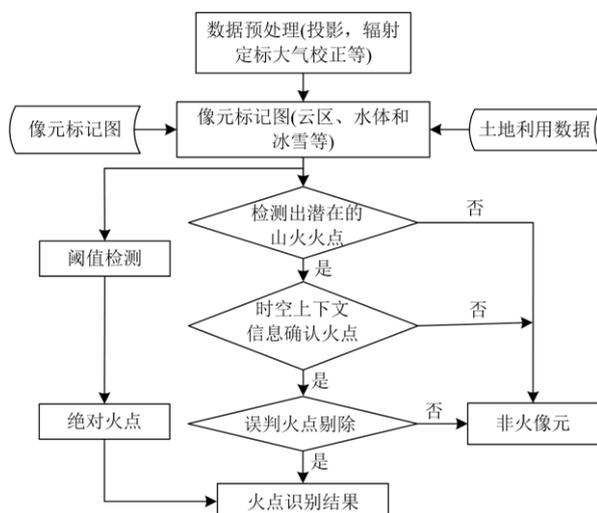


图 1 输电线路火点识别流程

Fig. 1 Detection process of wildfire near transmission lines

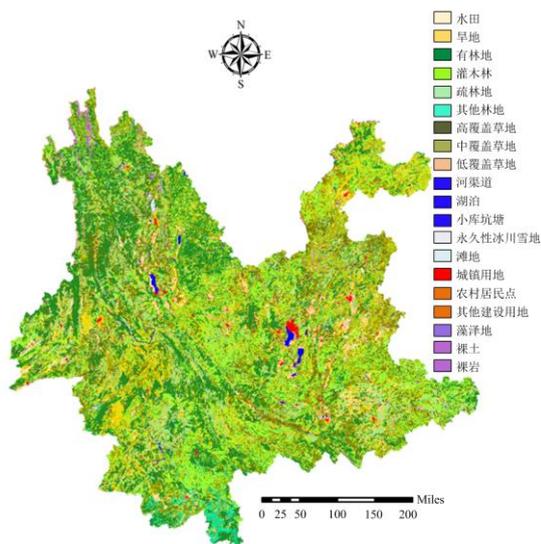


图 2 云南省植被覆盖分布图

Fig. 2 Vegetation coverage in Yunnan province

1.2 数据预处理

堪称世界上最先进的静止卫星 H-8 于 2015 年 7 月正式投入使用^[27]。与上一代卫星(例如 MTSAT)相比, H-8 提供了更高的空间和时间(10 min)分辨率。H-8 还是世界上第一个具有捕获彩色图像功能的静止气象卫星^[28]。它在可见光(VIS)、近红外和热红外(TIR)范围内布置了 16 个观察通道, 其中 7($3.9 \mu\text{m}$)和 14($11.2 \mu\text{m}$)通道最适合用于探测活跃的火灾和燃烧区域。H-8 数据可从 JAXA 的网站(<https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/>)下载。

从 H-8 卫星获取的数据格式为 NetCDF, 在使用之前需要进行数据预处理。这包括转换格式、编写地理信息、剪切和重新投影到地心基准面(GDA)。此外, 获取的原始数据, 还需根据图像的等级分别进行辐射校正、大气校正和图像裁剪等预处理工作, 最终得到研究区域的遥感影像。

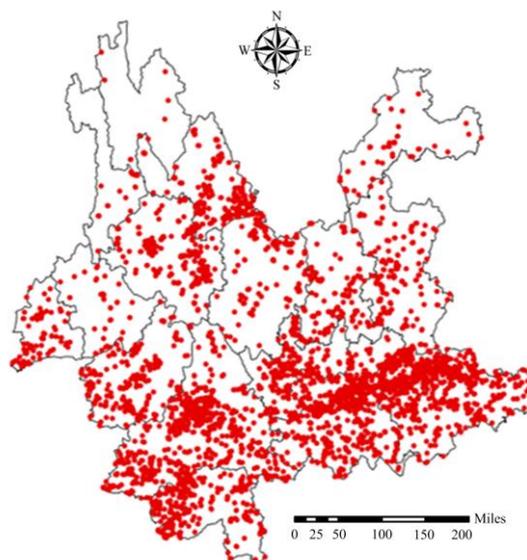


图 3 云南省 2019 年山火热点分布图

Fig. 3 Heat map of wildfires in Yunnan province in 2019

1.3 火点识别原理及算法

物体燃烧时的热辐射与未发生燃烧时的背景辐射差异是火点识别算法的主要识别依据, 常温地表的辐射峰值波长与成像仪中通道 14 的中心波长($11.2 \mu\text{m}$)接近, 而物质燃烧时的辐射峰值波长与通道 7 的中心波长($3.9 \mu\text{m}$)接近。因此, 上下文火点识别算法选取 AHI 成像仪中第 7 通道的中红外亮温数据($T_{3.9}$)和 14 通道的热红外亮温数据($T_{11.2}$)识别火点像元。

根据玻尔兹曼定律: 一个黑体表面, 单位面积在单位时间内辐射出的总功率 J (称为物体的辐射度或能量通量密度)与黑体本身的热力学温度 T (又

称绝对温度)的4次方成正比。这表明辐射程度对温度变化高度敏感。使用此功能,可以根据卫星监视的表面辐射率识别高温热源。

$$J = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

式中: ε 为黑体辐射系数; σ 为玻尔兹曼常数。

可通过普朗克黑体辐射公式推导出卫星通道内亮温值 T_p 的计算公式为

$$T_p = \frac{hc}{\sigma \lambda_p \ln\left(\frac{2hc^2}{\lambda_p^5 I} + 1\right)} \quad (2)$$

式中: c 为真空中的光速; h 为普朗克常数; λ_p 为 p 通道所接收到的辐射波长; I 为辐射率。

1.3.1 水体、冰雪和云掩膜的去除

首先,在火点检测过程中,光学图像无法穿透云层,所以首先要去除的是云像元。云识别采用文献[29]中所描述的方法,通过对比云掩膜剔除前后的效果发现,该方法能有效消除云层的影响(如图4所示)。此外,由于水体和冰雪覆盖地区不可能发生火灾,并且水体以及冰雪具有的较高反射率会增强通道7的辐射亮温,易造成火点误判,所以水体和冰雪像元也需要剔除。不仅如此,剔除大量的水和冰雪像元可以减少计算量。本文采用文献[30]所述方法去除水体以及冰雪的影响,如式(3)、式(4)所示,将归一化植被指数 $NDVI < 0$ 的像元判定为水像元,将冰雪指数 $NDSI > 0.13$ 的像元判定为冰雪像元。

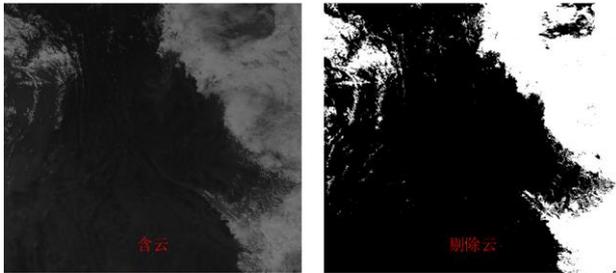


图4 云掩膜剔除的效果(云层全部渲染成白色,未被云层遮挡的部分渲染为黑色)

Fig. 4 Effect of the cloud masks being eliminated (All clouds are rendered white, and the parts not obscured by clouds are rendered black)

$$NDVI = \frac{R_{0.86} - R_{0.64}}{R_{0.86} + R_{0.64}} < 0 \quad (3)$$

$$NDSI = \frac{R_{0.51} - R_{1.6}}{R_{0.51} + R_{1.6}} > 0.13 \quad (4)$$

式中: R 为波段的反射率; 右下角的数字代表 AH1 通道的中心波长。表1给出了各通道对应的中心波

长和检测对象。

表1 AH1 通道特性

Table 1 AH1 channel characteristics

通道号	中心波长/ μm	空间分辨率/ km	检测对象
1	0.46	1	气溶胶、海岸线
2	0.51	1	海洋水色、浮游植物等
3	0.64	0.5	植被、气溶胶等
4	0.86	1	卷云
5	1.6	2	云、积雪等
6	2.3	2	地表、云、积雪等
7	3.9	2	野火、地表温度
14	11.2	2	地表温度、野火

1.3.2 固定阈值识别绝对火点

采用固定阈值法快速判定绝对火点像元,此过程不仅减少了算法的计算时间,而且降低火点识别的复杂度,提高了算法的鲁棒性。如式(5)所示,利用火点在中红外波段(3.9 μm)的敏感度比热红外波段(11.2 μm)更高的特点,对绝对火点进行识别,以快速筛选明显的火点。

$$\begin{cases} T_{3.9} > T_{3.9, \text{threshold}} \\ T_{3.9} - T_{11.2} > T_{\text{threshold}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: T 表示通道的亮温值; 下标中的数字代表通道的中心波长。H-8 卫星的中红外热图如图5所示,对统计中红外波段像元的亮温值从高到低排列,可得到像元数量占前 0.01% 所对应的亮温值,将此值设为 $T_{3.9, \text{threshold}}$, 如果 $T_{3.9, \text{threshold}}$ 小于 320 K 则将其设为 320 K, 否则保留原始值。同样依据统计获得前 0.01% 的 $T_{\text{threshold}}$ 值, 如果 $T_{\text{threshold}}$ 小于 25 K 则将其设为 25 K, 否则保留原始值。



图5 H-8 号卫星的中红外热图
Fig. 5 Heat map of H-8 MIR data

1.3.3 时空上下文火点检测

潜在火点的提取过程与基于阈值的火点检测

方法相似, 但降低了中红外通道的检测阈值。目的是检测到更多的疑似火点, 从而降低漏检率。潜在火点的提取公式为

$$\begin{cases} T_{3.9} > 280 \\ T_{3.9} - T_{11.2} > 5 \end{cases} \quad (6)$$

当目标像元不满足式(5), 但满足式(6)时, 就需要利用背景区像元的亮温对潜在火点进行识别, 当目标像元满足式(7)时就可判定为火点像元。

$$\begin{cases} T_{3.9} - T_{3.9b} > n_1 \delta T_{3.9b} \\ T_{3.9_{11.2}} - T_{3.9_{11.2b}} > n_2 \delta T_{3.9_{11.2b}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $T_{3.9}$ 表示 H-8 中红外通道(波段 7, 3.9 μm)亮温值; $T_{3.9_{11.2}}$ 为中红外通道亮温值与热红外通道(波段 14, 11.2 μm)亮温值的差值; $T_{3.9b}$ 和 $\delta T_{3.9b}$ 为领域内 $T_{3.9}$ 的平均值和标准差; $T_{3.9_{11.2b}}$ 和 $\delta T_{3.9_{11.2b}}$ 为领域内 $T_{3.9_{11.2}}$ 的平均值和标准差; n_1 、 n_2 为背景系数, 白天 n_1 取 4, n_2 取 3.5 (夜晚 n_1 取 3.5, n_2 取 3)时火点发生概率为 80%, 若白天 n_1 取 3.5, n_2 取 3(夜晚 n_1 取 3, n_2 取 2.5)时火点发生概率为 70%。

根据 H-8 卫星数据的时间特性, 并结合火点发生概率, 对检测出来的火点进行结果校正。在白昼时段, 遵循的准则如下列公式所示。

$$\text{白天} \begin{cases} Z_{3.9} > Z_{3.9\text{th}} \\ Z_{3.9_{11.2}} > Z_{3.9_{11.2}\text{th}} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{夜间} \begin{cases} Z_{3.9} > Z_{3.9\text{th}} - 0.5 \\ Z_{3.9_{11.2}} > Z_{3.9_{11.2}\text{th}} - 0.5 \end{cases}$$

$$\text{if} \begin{cases} S(t) = 1 \\ S(t-1) + S(t+1) = 0 \end{cases} \rightarrow S(t) = 0 \quad (9)$$

$$\text{if} \begin{cases} S(t) = 1 \\ S(t-1) + S(t+1) = 2 \end{cases} \rightarrow S(t) = 1 \quad (10)$$

$$\text{白天} \begin{cases} Z_{3.9} > Z_{3.9\text{th}} - 0.5 \\ Z_{3.9_{11.2}} > Z_{3.9_{11.2}\text{th}} - 0.5 \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{夜间} \begin{cases} Z_{3.9} > Z_{3.9\text{th}} - 1 \\ Z_{3.9_{11.2}} > Z_{3.9_{11.2}\text{th}} - 1 \end{cases}$$

$$\text{if} \begin{cases} S(t) = 1 \\ S(t-1) + S(t+1) + S(t+2) = 0 \end{cases} \rightarrow S(t) = 0 \quad (12)$$

$$\text{if} \begin{cases} S(t) = 0 \\ S(t-1) + S(t+1) + S(t+2) = 3 \end{cases} \rightarrow S(t) = 1 \quad (13)$$

式中: $Z = [(O) - \text{mean}(O)] / \text{std}(O)$; $S(t-1)$ 、 $S(t)$ 、 $S(t+1)$ 、 $S(t+2)$ 为连续的火点检测结果。

首先将阈值法识别之后的非潜在火点像元作为有效背景像元, 并选择目标像元周边 $Y \times 7$ 的有效背

景像元构成背景区像元, 为最大限度地利用亮温变化特征并减少由于背景窗口过大引起的误差^[31], 优先令 $Y = 7$ 。晴空条件下, 卫星易于获取地表亮温, 因此, 当窗口内晴空植被像元数不足背景区像元数的 20% 时, 再令 $Y = 9, Y = 11, L$, 直至 $Y = 15$ 像元。若仍不满足条件, 则仅使用固定阈值法进行识别处理。通过计算移动窗口内 $T_{3.9}$ 与 $T_{3.9_{11.2}}$ 的平均值和标准差, 从而实现火点识别阈值的自动调整。

1.3.4 误判火点的去除

1) 滤除太阳耀斑。对图像上所有像元归类后, 仍会存在一定误差, 其中一些误差是由陆地表面对太阳光的高反射率引起的, 因此还需消除由太阳耀斑引起的高反射率像元错误误差。

$$\cos \delta_s = \cos \delta_g \cos \delta_i - \sin \delta_g \sin \delta_i \cos \varphi \quad (14)$$

式中: δ_s 为火点像元的耀斑角度; δ_g 、 δ_i 和 φ 分别为观测天顶角、太阳天顶角和相对方位角。

$$\begin{cases} \delta_s < 10^\circ \\ R_{0.64} + R_{0.86} > 0.2 \end{cases} \quad (15)$$

如果像元满足式(15), 就可以标记为非火点像元。

2) 去除固定热源。某些陆地像元具有与火点像元相似的光谱特征, 因此易被错归为火点, 导致出现误报。为了消除此类错误, 需将标记为火点的所有像元进行误报消除处理。

1.3.5 火点聚合

识别出火点像元后, 为了便于计算火点与线路杆塔间的距离, 需要将相邻的火点像元进行聚合。

卫星数据影像处理作为输电线路山火监测系统的一部分起着承前启后的作用。在获取地表亮温后, 需将经纬网投影到 1000×1100 的定位网格中, 对定位网格进行插值, 以实现通道数据的投影定位。最后剔除插值像元, 即可对火点像元进行聚合进而求出火点中心, 火点聚合过程示意图如图 6 所示。

1.3.6 火点与线路杆塔间的距离

对于卫星监测到的火点, 应第一时间通过计算获得火点与杆塔的距离。运行经验表明, 3 km 以外的火点不会对输电杆塔构成威胁, 即只需对火点 3 km 范围以内的杆塔进行告警计算^[17]。本文采用文献^[17]所述算法计算火点与杆塔的距离。

2 算法性能分析

本文利用 python 实现了固定阈值法^[24]、传统的上下文法^[25]以及时空上下文算法, 分别对南方某省 2021 年 1 月 1 日至 3 月 20 日的卫星数据进行分析。其中固定阈值法准确率达 54.5%, 漏报率达 78%; 传统的上下文法准确率达 60%, 漏报率达 46.1%;

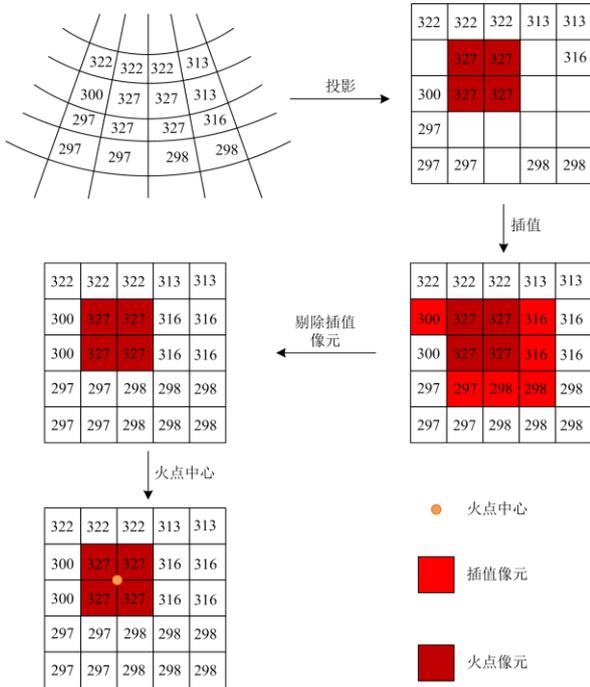


图 6 火点聚合过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the fire point polymerization process

本文所提出的时空上下文算法准确率达 72.5%，漏报率达 43.9%。

准确率和漏报率是检验算法性能的重要指标，单一分析算法的准确率难以体现算法的优越性。然而受云掩膜遮挡、地表植被复杂等因素影响，火点识别算法的漏报率往往较高^[32]。

固定阈值法所设定的阈值较为单一，在某些地形分布较为复杂或者纬度跨越较大的地区，就会导致算法的适用性大幅降低。选取南方某省 2021 年 4 月 25 日 13:00 的真实火点数据进行分析，当背景像元亮温的平均值较高时(如图 7 所示)，此时上下文法的阈值会自适应为 330 K，而固定阈值则保持不变(320 K)，这会导致火点的误报。根据最终人工核实后的结果表明，固定阈值法会将大部分的疑似火点像元判定为真。假如所选取的窗口内亮温平均值更高，固定阈值法的误报率将会更加明显。当背景像元的亮温平均值较低时，例如夜间或高纬度地区，此时，固定阈值法的效能依然不能满足山火监测的要求。选取 4 月 25 日 20:00 真实火点数据进行分析(如图 8 所示)，此时上下文法的阈值动态调整到了 317 K，固定阈值仍是 320 K，在实际应用中，固定阈值法会将一些火灾特征并不明显的真实火点排除在外。综上，固定阈值法难以准确识别不同地理位置、不同季节和不同时段火点。因此，上下文法较固定阈值法更具优势。

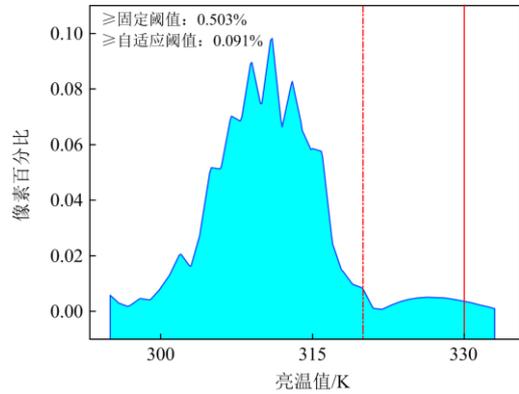


图 7 13:00 高于固定和动态阈值的像素百分比
Fig. 7 Percentage of pixels above fixed and dynamic thresholds at 13:00

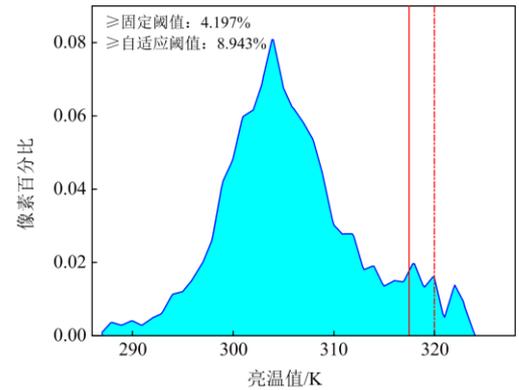


图 8 20:00 高于固定和动态阈值的像素百分比
Fig. 8 Percentage of pixels above fixed and dynamic thresholds at 20:00

传统的上下文法未考虑时间特性，本文利用 H-8 卫星的高观测频次对火点识别结果进行校正。在式(8)一式(10)中，某一时刻像元被判定为火点，且发生概率为 80%，但是在上一个时刻和下一个时刻没有被判定为火点，则该火点像元为假火点。如果某一时刻像元未被判定为火点，但上一个和下一个时刻该像元均被判定为火点，且发生概率为 80%，那么像元便为真火点。同理，在式(11)一式(13)中，某一时刻像元被判定为火点，且发生概率为 70%，但是在上一个、下一个以及最后一个时刻都未被判定为火点，那么该火点像元识别为假。如果某一时刻该像元未被判定为火点，但是在上一个、下一个以及最后一个时刻均被判定为火点，且发生概率为 70%，那么该火点像元为真火点。以南方某省 2021 年 3 月 8 日的火点监测结果为例(如图 9 所示)，在进行时间序列分析时，系统在 10:20 和 10:40 两个时间点均监测到经纬度坐标 $f(104.3, 24.24)$ 有火情

发生, 虽然 10:30 未能监测到, 但根据 10 min 前以及 10 min 后的火点发生概率为 80%, 可以判定 10:30 处也存在火情。经人工核实后, 该处实为持续性火点。如果未进行时序分析, 则在 10:30 这一时刻将会出现火点的漏报, 时间序列分析能有效地解决这一问题。

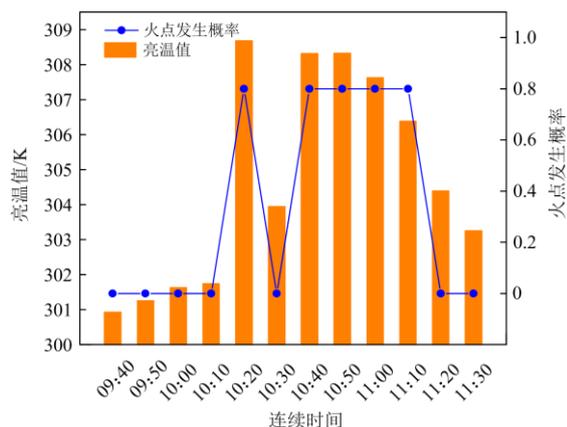


图 9 10:30 未考虑时间特性时的火点发生概率

Fig. 9 Probability of fire occurrence at adjacent times at 10:30

本文提出的时空上下文算法可以全天 24 h 不间断进行山火监测, 因此引入时间特征并结合火点发生的概率, 将有效地降低火点识别的误报率和漏报率。其次, 依据时序分析获取到的火情动态变化和持续时间, 对输电线路附近的火情发展及快速评估具有重要意义。

3 实例分析

目前静止气象卫星 H-8 已应用于南方某省的山火监测。如表 2 所示, 时空上下文火点识别算法在 2021 年 1 月 1 日至 5 月 31 日共监测到山火 583 起, 经现场及视频核实后 423 起属实, 准确率达到了 72.5%。因此, 本文提出的时空上下文火点算法能实现全天 24 h 输电线路山火监测, 且准确率较高。

以 2021 年 2 月 10 日南方某省为例, 采用时空上下文火点识别算法监测到火点 3 处, 现场核实后 3 处火点均属实。该天 15:30 系统监测到某像元为疑似火点像元, 亮温为 312 K, 大于潜在火点的判别阈值 280 K, 通过算法进一步计算后判定该处为火点像元, 且确定了火点位置为 $f_1(100.75, 25.14)$, 距离某 500 kV 杆塔仅 850 m, 如图 10 所示。当日 20:30, 系统监测到某像元为疑似火点像元, 亮温为 302 K, 通过算法进一步确定火点位置为 $f_2(98.74, 23.73)$, 距离某 220 kV 杆塔仅有 205 m, 如图 11 所示。运维人员收到预警信息后赶赴现场有效地控制了火情, 为输电线路安全运行提供了重要保障。夜

间没有太阳辐射, 火点亮温值明显小于白天。

表 2 电网线路山火告警杆塔列表

Table 2 List table of fire alarming transmission line tower of power grid

时间	告警次数	告警杆塔	距杆塔距离/m
1月1日—	26	DL线(#73-#86)	867
1月31日		BS线(#116-#130)	988
		L	L
2月1日—	115	BN线(#137-#140)	2830
2月28日		TY线(#46-#63)	1512
		L	L
3月1日—	158	BN线(#54-#62)	1645
3月31日		TW线(#42)	622
		L	L
4月1日—	70	BF线(#154-#167)	680
4月30日		YM线(#41-#50)	1706
		L	L
5月1日—	30	DY线(#25-#46)	1551
5月31日		TY线(#60-#70)	2073
		L	L

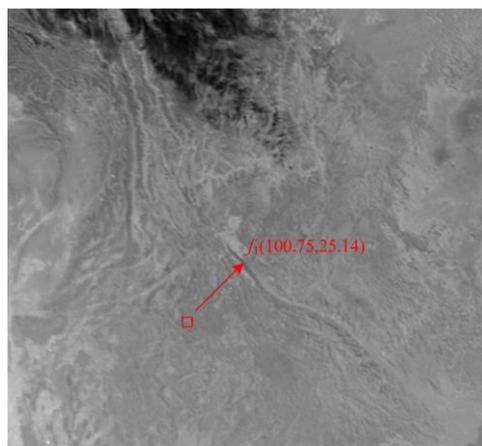


图 10 15:30 火点位置

Fig. 10 Fire point position at 15:30

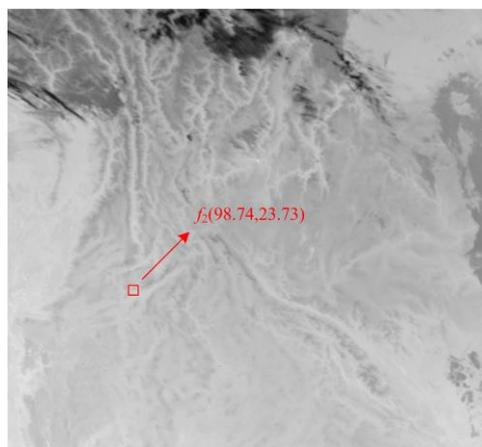


图 11 20:30 火点位置

Fig. 11 Fire point position at 20:30

此处实例分析表明,该系统可以较好地适应不同季节气候所带来的背景亮温波动。

4 结论

本文利用 H-8 卫星监测数据以及南方某省 2019 至 2021 年间的火点统计数据,对比分析了时空上下文火点识别算法、固定阈值法和传统的上下文算法的准确率和漏报率,得到如下结论。

1) 基于 H-8 静止卫星的多通道和高时效性等优势,首先采用固定阈值法,快速筛选出绝对火点,然后根据 H-8 的中红外和热红外波段的亮温差异进行火点细判。在时间上利用 H-8 的高观测频次并融合火点发生概率进行持续性火点识别。本文提出的时空上下文算法能有效地应用到输电线路山火监测过程中,并能快速获取火点亮温、位置及火点与杆塔距离等火情信息。

2) 一方面,根据选取不同的背景系数引入了火点发生概率。另一方面, H-8 卫星在火情监测中能充分发挥卫星遥感高时效、高观测频次的优点。将两者融合后对连续火情监测信息进行分析,可有效减小系统的误报率和漏报率,火情持续时间的获取也有利于对火情发展的评估。本文提出的时空上下文算法与固定阈值法和传统上下文法相比,在空间和时间上更具优势。

3) 时空上下文算法的准确率高达 72.5%,并且仅有 43.9%的漏报率,成效较好(固定阈值法准确率为 54.5%,漏报率为 78%,传统的上下文法准确率为 60%,漏报率为 46.1%)。实例分析表明,应用该算法的火点监测系统可以快速准确地发现输电线路 3 km 以内的火情,并在较短时间内发出预警。

参考文献

- [1] 何立夫, 陆佳政, 刘毓, 等. 输电线路山火可见光-红外多光源精准定位技术[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2548-2555.
HE Lifu, LU Jiazheng, LIU Yu, et al. Precise positioning technology of wild fire nearby transmission lines by visible and infrared vision[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2548-2555.
- [2] 祝佳佩, 赵文彬. 考虑线路潮流波动对母线电压影响的特高压交流电网电压控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 76-82.
ZHU Jiapei, ZHAO Wenbin. Voltage control strategy of a UHV AC power grid considering the influence of line power flow fluctuation on bus voltage[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 76-82.
- [3] ZHANG B, HAO Z, BO Z. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 121-127.
- [4] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [5] 陈强, 王建, 熊小伏, 等. 一种降雨诱发滑坡灾害下输电杆塔的监测与预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 147-155.
CHEN Qiang, WANG Jian, XIONG Xiaofu, et al. Monitoring and early warning method for transmission tower under rainfall-induced landslide disaster[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 147-155.
- [6] 王增平, 吕哲, 许琬昱. 基于暂态波形特征的输电线路雷击干扰与故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 18-26.
WANG Zengping, LÜ Zhe, XU Wanyu. Identification of lightning strike disturbance and faults for transmission line based on transient waveform characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 18-26.
- [7] 翟永赛. 基于航拍图像的电网灾情勘测方法研究及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
ZHAI Yongsai. Research and application of power grid disaster survey method based on aerial images[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [8] 周志宇. 山火灾害下电网输电线路跳闸风险评估研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
ZHOU Zhiyu. Study on risk assessment of transmission line trip under mountain fire disaster[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [9] 周志宇, 艾欣, 陆佳政, 等. 山火灾害引发的输电线路跳闸风险实时分析方法及应用[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5321-5330.
ZHOU Zhiyu, AI Xin, LU Jiazheng, et al. A real-time analysis approach and its application for transmission-line trip risk due to wildfire disaster[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5321-5330.
- [10] 普子恒, 阮江军, 黄道春, 等. 火焰条件下间隙的直流电压击穿特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 453-459.
PU Ziheng, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Study on DC voltage breakdown characteristics of gap under fire conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 453-459.
- [11] ZHANG J, ZHANG B, XIE H, et al. On data analysis in forest fire induced breakdown of the transmission line[C] // International Conference on Intelligent and Interactive Systems and Applications, November 11-13, Beijing, China: 524-529.
- [12] AL-DHIEF F T, SABRI N, FOUAD S, et al. A review of forest fire surveillance technologies: mobile AD-HOC network routing protocols perspective[J]. Journal of King

- Saud University-Computer and Information Sciences, 2019, 31(2): 135-146.
- [13] LIU Y, LI B, WU C, et al. Risk warning technology for the whole process of overhead transmission line trip caused by wildfire[J]. *Natural Hazards*, 2021, 107(1): 195-212.
- [14] 郑伟, 邵佳丽, 王萌, 等. 多源卫星遥感草原火灾动态监测分析[J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(3): 54-61.
ZHENG Wei, SHAO Jiali, WANG Meng, et al. Dynamic monitoring and analysis of grassland fire by multi-source satellite remote sensing[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2013, 22(3): 54-61.
- [15] 周小成, 汪小钦. EOS-MODIS 数据林火识别算法的验证和改进[J]. *遥感技术与应用*, 2006, 21(3): 39-44.
ZHOU Xiaocheng, WANG Xiaoqin. Validate and improvement on arithmetic of identifying forest fire based on EOS-MODIS data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2006, 21(3): 39-44.
- [16] 周永宝, 韩惠. 基于遥感数据的森林火灾监测研究概述[J]. *测绘与空间地理信息*, 2014, 37(3): 134-136.
ZHOU Yongbao, HAN Hui. Research overview of forest fire monitoring based on remote sensing data[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2014, 37(3): 134-136.
- [17] LU J, LIU Y, ZHANG G, et al. Partition dynamic threshold monitoring technology of wildfires near overhead transmission lines by satellite[J]. *Natural Hazards*, 2018, 94(3): 1327-1340.
- [18] HE L, LI Z. Enhancement of a fire detection algorithm by eliminating solar reflection in the mid-IR band: application to AVHRR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(22): 7047-7059.
- [19] FILIZZOLA C, CORRADO R, MARCHESE F, et al. RST-FIRES, an exportable algorithm for early-fire detection and monitoring: description, implementation, and field validation in the case of the MSG-SEVIRI sensor[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 196-216.
- [20] HUH Y, LEE J. Enhanced contextual forest fire detection with prediction interval analysis of surface temperature using vegetation amount[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(11): 3375-3393.
- [21] KOLTUNOV A, USTIN S L. Early fire detection using non-linear multitemporal prediction of thermal imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(1): 18-28.
- [22] 李建, 陈晓玲, 陆建忠, 等. 森林火灾遥感监测方法适用性研究[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 45(3): 485-489.
LI Jian, CHEN Xiaoling, LU Jianzhong, et al. Study on applicability of forest fire detecting algorithms by remote sensing[J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2011, 45(3): 485-489.
- [23] 江全元, 晏鸣宇. 基于概率统计的输电线路山火监测方法[J]. *高电压技术*, 2015, 41(7): 2302-2307.
JIANG Quanyuan, YAN Mingyu. Improved method for forest fire spot detection near transmission line based on probability statistic[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(7): 2302-2307.
- [24] 陈洁, 郑伟, 刘诚. Himawari-8 静止气象卫星草原火监测分析[J]. *自然灾害学报*, 2017, 26(4): 197-204.
CHEN Jie, ZHENG Wei, LIU Cheng. Application of grassland fire monitoring based on Himawari-8 geostationary meteorological satellite data[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2017, 26(4): 197-204.
- [25] WOOSTER M J, ROBERTS G, FREEBORN P H, et al. LSA SAF meteosat FRP products-part 1: algorithms, product contents, and analysis[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(22): 13217-13239.
- [26] 熊俊楠, 彭超, 程维明, 等. 基于 MODIS-NDVI 的云南省植被覆盖度变化分析[J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(12): 1830-1840.
XIONG Junnan, PENG Chao, CHENG Weiming, et al. Analysis of vegetation coverage change in Yunnan province based on MODIS-NDVI[J]. *Geo-Information Science*, 2018, 20(12): 1830-1840.
- [27] LIU X, HE B, QUAN X, et al. Near real-time extracting wildfire spread rate from himawari-8 satellite data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): 1654-1668.
- [28] BESSHO K, DATE K, HAYASHI M, et al. An introduction to Himawari-8/9 Japan's new-generation geostationary meteorological satellites[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japanese Series II*, 2016, 94(2): 151-183.
- [29] GIGLIO L, SCHROEDER W, JUSTICE C O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 178: 31-41.
- [30] REMER L A, KAUFMAN Y J, TAME D, et al. The MODIS aerosol algorithm, products and validation[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, 62(4): 947-973.
- [31] LIN Z, CHEN F, LI B, et al. FengYun-3C VIRR active fire monitoring: algorithm description and initial assessment using MODIS and landsat data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(11): 6420-6430.
- [32] LIN Z, CHEN F, LI B, et al. A contextual and multitemporal active-fire detection algorithm based on FengYun-2G S-VISSR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(11): 8840-8852.

收稿日期: 2021-11-25; 修回日期: 2022-02-10

作者简介:

王开正(1988—), 男, 博士, 讲师, 硕导, 研究方向为电网防灾减灾、电力装备绝缘失效机制与防御技术。E-mail: kz.wang@foxmail.com

(编辑 许威)