

基于双光谱的森林烟火 警监测研究

陈卓^{1,2} 侯冬青¹ 刘海洋^{1,2} 梁保柱^{1,*} 党祯³ 郑明章⁴

(1.滇西科技师范学院智能与信息工程学院 临沧 677000 ; 2.清华大学公共安全研究院安全科学学院 北京 100084; 3. 中国移动通信集团云南有限公司大理分公司 大理 671001; 4.吉林省林业勘察设计院 长春 130022)

摘 要:【目的】森林火灾危害着自然资源、经济发展和人类安全。烟雾是森林火灾的早期显著特征,能够作为林火的有效监测对象。本研究旨在推进森林烟火的智能识别,构建完备的林火综合管理平台,达成迅速、高效的预警监测。【方法】本研究采纳森林火灾早期阶段的识别特征,多角度对森林烟火业务的痛点需求进行分析,对林火监控设备进行成像能力测试、监护范围及定位能力测试、防护性能检验及测试、森林烟火智能识别能力测试。其中,对森林防火专业 AI 摄像机和高精度球台等林火视频感知设备进行烟火智能识别能力测试,分别测量不同点烟距离、点火距离的识别能力以及离线火情识别能力;通过“红外坐标映射+可见光辅助判别”的模式,结合多光谱算法,组建复合部署结构,建设森林防火综合管理平台。

【结果】本研究累积百万级烟火图像样本和非烟火样本数据,构建可见光火情样本库和热成像数据样本库;通过采用先进的前端烟火识别算法和边端过滤算法,使林火烟雾智能识别漏报率小于千分之一,误报率达到每万公顷每日小于 2 次;森林防火综合管理平台以智能识别、多端联合等特点,能够有效达成森林火灾的监测预警,并指导消防队伍及时救援火情。【结论】双光谱技术指导下,森林烟火探测装备的合理化、高效化应用落实于预警监测实践中,能够减少森林火灾的漏报率和误报率,满足森林烟火业务的痛点需求。

关键词: 智慧林业; 森林火灾; 烟雾识别; 双光谱; 预警监测

中图分类号 S762; TP3

文献标识码: A

文章编号: 1001-7488 () -0000-00

Study on early warning and monitoring of forest fireworks based on bispectrum

Chen Zhuo^{1,2} Hou Dongqing¹ Liu Haiyang^{1, 2,*} Dang Zhen³ Zheng Mingzhang⁴

(1. School of Intelligent and Information Engineering, West Yunnan University Lincang 677000; 2. School of Safety Science, Institute for Public Safety Research, Tsinghua University Beijing 100084; 3. Dali Branch of China Mobile Yunnan Company Dali 671001; 4. Jilin province forestry survey design & research institute Changchun 130022)

Abstract: 【 Objective 】 Forest fires are endangering natural resources, economic development and human security. Smoke is an early significant feature of forest fire, which can be used as an effective monitoring object of forest fire. The purpose of this study is to promote the intelligent identification of forest fireworks, build a comprehensive forest fire management platform, and achieve rapid and efficient early warning and monitoring.

【 Method 】 In this study, the identification characteristics in the early stage of forest fire were adopted, and the pain demand of forest fireworks business was analyzed from multiple angles. The imaging ability test, monitoring

基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2022YFC3105100); 国家自然科学基金青年科学基金项目(42007420)

*梁保柱为通讯作者。

range and positioning ability test, protective performance test and test, and intelligent identification ability test of forest fireworks were carried out for forest fire monitoring equipment. Among them, the intelligent recognition ability of forest fire video sensing equipment such as forest fire prevention professional AI camera and high-precision table is tested, and the recognition ability of different cigarette lighting distances and ignition distances and the off-line fire recognition ability are measured respectively; Through the mode of "infrared coordinate mapping+visible light aided discrimination" and multi-spectral algorithm, a composite deployment structure is established to build a comprehensive forest fire prevention management platform. 【 Result 】 In this study, millions of pyrotechnic image samples and non-pyrotechnic sample data were accumulated, and the visible light fire sample database and thermal imaging data sample database were constructed. By adopting advanced front-end smoke identification algorithm and edge-end filtering algorithm, the missing rate of intelligent identification of forest fire smoke is less than one thousandth, and the false alarm rate is less than two times per ten thousand hectares per day. With the characteristics of intelligent identification and multi-terminal combination, the integrated management platform of forest fire prevention can effectively achieve the monitoring and early warning of forest fires and guide the fire brigade to rescue the fire in time. 【 Conclusion 】 Under the guidance of dual-spectrum technology, the rationalization and efficient application of forest fireworks detection equipment in early warning and monitoring practice can reduce the rate of missing report and false report of forest fires and meet the pain point demand of forest fireworks business.

Key words: Smart forestry; Forest fire; Smoke recognition; Bispectrum; Early warning monitoring.

1 引言

森林作为必不可少的自然资源，是重要的陆地生态系统，有“地球之肺”的美誉(Naderpour et al., 2021)。全球森林火灾频发的态势在近些年尤为突出，林火管理的重要性逐渐凸显(王劲等, 2022)。森林火灾对森林生态系统构成了重大威胁，生物和非生物条件均受到显著影响(Kyungil et al., 2023; Ramalho et al., 2024)。森林火灾的“突发性强、辐射面广、可控性低、破坏性大”等特征，导致了严重的森林资源损害和社会经济损失(朱龙祥等, 2024)。此外，森林火灾会产出大量的温室气体和细颗粒物，从而导致全球变暖(Kandasamy et al., 2023)。因此，森林火灾在生态、经济、人类健康等方面构成了严峻的挑战(Sarkar et al., 2024)。

为了减轻火灾损失、降低灭火活动，及早监测和发现森林火灾是重中之重(Wei et al., 2024)。现有的森林火灾探测技术包括人工巡视、卫星观测、传感器网络、无人机航拍、红外探测器等(Noureddine et al., 2023; Adisorn et al., 2023; Momeni et al., 2024; Giannakidou et al., 2024)。传统的森林火灾监测方法，存在消耗高、效率低、范围小、误报率高等局限性(Sahoo et al., 2021)。在林火的预警监测领域，集成人工智能实现火灾探测的自动化新技术愈发普遍(R M et al., 2023)。计算机、遥感、激光监测、雷达通信和卫星图像监测等先进技术提高了监测野火的能力(Alkhatib et al., 2021)。林火监测可分为火焰检测和烟雾检测，其中，烟雾是森林火灾的早期表现，能否准确快速准确地识别森林烟火对于林火防控是至关重要的(Li R et al., 2024)。深度学习模型在森林火灾烟雾与火焰特征的提取、火灾与非火灾图像的分类、火灾的预判跟踪中起到了无与伦比的作用(王丽霞等, 2023)。

森林火灾烟雾的图像检测方法已成为林火监测研究的重点领域(Sheng et al., 2023)。研究热点主要表现在火灾图像识别的深度学习模型、森林火灾图像及火灾影响、火灾遥感图像识别算法等，基于深度学习的火灾烟雾探测位于研究前沿(Wang et al., 2023; K. A .,2023; Zheng et al.,2024)。国际上，针对森林火灾图像识别的研究成果，在数量上整体呈现出波浪式上升的趋势(李海等, 2023)。欧美国家在这一领域的研究较为深入，与无人机等先进技术具有更为紧密的联系(Ts. et al., 2024; Shamta and Demir, 2024)。其中，Joseph 等提出的 Yolo 系列算法在森林火灾监测中的应用具有广泛的重要意义(Nguyen et al., 2022)。Saydirasulovich 等(2023)提出了一种针对无人机(UAV)图像环境定制的增强型 YOLOv

8 模型, 以提高检测精度。而中国在该领域研究起步较晚, 但是也通过大量的研究增强了泛化性能(贾一鸣等, 2023; 高源等, 2023; 何乃磊等, 2023)。Chen 等(2023)基于 GS-YOLOv5 提出了一种的轻量级的早期森林火灾烟雾探测方法, 以 Super-SPPF 结构降低了误报率和计算复杂度。Liang 等(2023)提出一种基于超分辨率重构 VIIRS 图像的森林火灾烟雾探测方法, 能够有效地分割低分辨率遥感图像中的烟雾像素。Han 等(2024)引入了一种应用多个色彩空间的自适应加权特征融合的语义分割方法进行火灾烟雾检测。

由于烟雾本身特征的规律性较弱, 现有森林火灾烟雾探测方法在识别方面的效率和准确率仍有待提高。红外光和热成像技术是林火图像识别领域中进行检测的重要工具(仲亭玉等, 2017; Haeri et al., 2024), 多光谱技术也对精确提取森林火灾的区域信息做出了重大贡献(崔中耀等, 2024)。本研究采用“红外坐标映射+可见光辅助判别”的模式, 结合双光谱算法和双模型级联网络, 通过多级判断降低了烟火识别的漏报率和误报率, 并规范设计了森林防火综合管理平台——森林眼。

2 材料与方法

2.1 森林烟火业务痛点 求分析

森林环境具有较强的杂乱背景, 若通过火焰对林火进行图像识别, 在火灾的早期阶段很容易被阻挡(Zhan et al., 2022)。基于森林火灾发生时火焰与烟雾的自身特征(Pang et al., 2023), 及时、高效检测烟雾并精确定位烟雾发生区域, 对缩短森林灭火响应时间、减缓森林火灾破坏的严重程度尤为重要(图 1)。而在森林烟火探测中, 火情识别时间、火情识别距离、火情识别准确度都是不可或缺的主要环节。森林烟火识别算法应以可见光烟火识别为主, 多光谱烟火识别为辅, 不断迭代森林烟火样本数据, 能够适应森林复杂天气、环境的干扰, 高精度的进行无错漏的森林烟火识别。

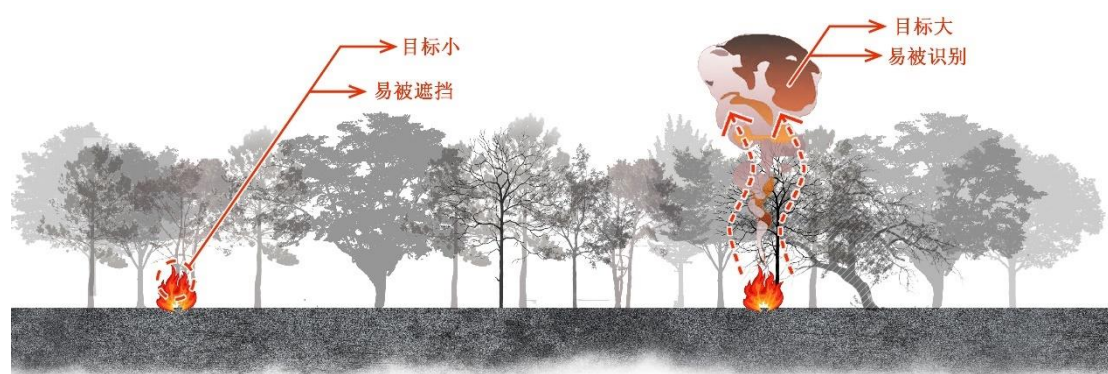


图 1 森林火灾中火焰与烟 的特征

Fig.1 Characteristics of flame and smoke in forest fires

2.1.1 火情识别时间

森林火情在发生后 30 分钟内, 如果未被扑灭就无法再扑灭, 只能等其自然烧光。因为当火焰燃烧为树冠火时往往已经无法扑救, 要在地表火阶段及时识别到火情(Azlan et al., 2024)。但地表火往往被茂密树林遮挡, 难以识别, 而烟雾识别由于目标明显, 是火情早识别的重要手段(Sun et al., 2023)。及时发现森林火灾, 能够缓解蔓延的林火对生态系统造成的巨大破坏, 减少对消防工作的严峻威胁(Lucas-Borja et al., 2018)。

2.1.2 火情识别距离

森林林区范围的广袤, 决定了单台相机设备需要满足半径 3km、10km 甚至 15km 半径的无漏点巡航(A.M et al., 2021)。然而, 热成像由于距离过远后物体的热辐射衰减严重, 有限的火焰识别范围会导致误报概率的增加, 且对烟雾的识别效果较差(Barmoutis et al., 2020)。红外图像与可见光图像的识别在远距离森林火灾监测和预警技术中发挥着越来越重要的作用(Shang et al., 2024)。王博文等(2022)实

现了高分辨率红外和可见光图像重建，显著提高了融合图像的成像质量，推动可见光图像识别更进一步。综上，可见光识别是远距离火情识别的主要手段。

2.1.3 火情识别准确度

在森林火灾预警监测领域，实现森林火灾的高精度探测仍然是一个重大的难题（Qian et al.,2023）。根据《森林防火视频监控系统技术规范 LY/T 2581—2016》要求，火情识别漏报率不大于 1‰；万公顷日误报次数不大于 3。由研究可知，可见光烟火识别应该能够有效过滤雾、霾、雪、云、阴影、光线、树枝晃动等因素引起的误报（Ciprián-Sánchez et al.,2021）。红外烟火识别应有效过滤建筑、水体、车辆等热源引起的误报（S. M et al.,2023）。

2.2 林火视 感知设备

目前，计算机视觉技术的发展使可安装在森林中的视频监控系统已成为以往检测方法的合适替代品，具有成本更低、部署方便、检测效率高等特点（Huang et al.,2023）。相机与瞭望塔、无人机的搭配组合使自动监测森林火灾烟雾更进一步（Zhang et al.,2020; Ye et al.,2022）。必须选择正确的监控工具才能实时获得清晰可见的烟雾图像(Zhan et al.,2022)。本研究采用了森林防火专业 AI 摄像机和高精度球台(图 2)，以支持林火视频的有效获取。

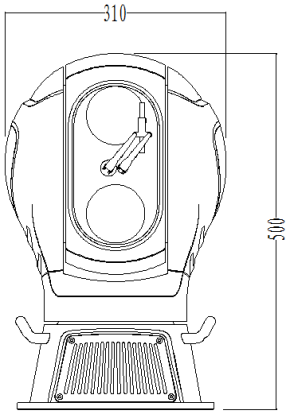


图 2 精度双光谱 AI 球型转台

Fig.2 High precision bi-spectral AI spherical turntable

森林防火专业 AI 摄像机是一款可见光与热成像系统相结合的产品，作为适应野外工作环境的专用球型转台设备，较以往的云台设备对一定性能进行了优化（表 1）。算法方面依托烟火实验室、多年烟火识别技术积累以及大量项目锤炼，建立了百万级的烟火训练样本数据库及数据回流机制，采用正负样本融合训练，通过双模型级联决策能力，进而极大减少算法误报率，提升算法告警的准确性。

表 1 云台监控与转台监控的差异

Tab. 1 Difference between pan-tilt monitoring and turntable monitoring

设备类型 Device type	适用场景 Applicable scenario	使用寿命 Service life	成像能力 Imaging ability	定位能力 Positioning ability
云台监控	无需面对恶劣环境的城市、室内安防场景	两到三年	5 级风 10 公里外成像高频、明显晃动	10 公里定位误差超 800 米
转台监控	极端恶劣环境如飓风、高温、极寒、高腐蚀等场景	长达 5 年以上	10 级飓风 10 公里外成像无抖动	全国首家实现 0.0038° 定位精度、10 公里误差<100 米

森林防火专业 AI 摄像机分为 3KM、5KM、10KM 三种类别，可针对性早期预警野外烟火；结合后端烟火识别算法可知，烟火识别漏报率小于千分之一，误报每天小于 2 个/万公顷；前置识别算法，内置高算力 AI 芯片，可实现无压缩画质烟火识别；通过“力矩电机 + 高精度轴承”定位，火点定位精度≤100 米，保障火情早发现、早扑救、早打了；精密军工级质量，具有极强的稳定性和耐腐蚀性，其 IP67 防护等级，能在-40℃-70℃稳定运行，6KV 防浪涌设计，具有极强的适应性。

高精度球台应用高精度同轴传动机构，内置力矩电机和位置编码器，采用了闭环伺服控制系统，支持

光学透雾、3D 定位、自动标定地理坐标、烟火自动识别等功能，具有精度高、响应速度快、稳定性好、灵活性高的特点，其双光轴机械可调，能够交叉识别确认，具有较高的设备精度（表 2）。球台选取了工业级 CMOS 传感器，成像真实细腻，无漏光，由于增强了长焦距，能够轻松捕捉动态小细节；在超低照度情况下，其 400 万分辨率输出能够达到星光级成像能力；支持红外连续变焦，热影像输出清晰。

表 2 300 系列转台设备参数

Tab.2 Equipment parameters of 300 series turntable

名称 Project	参数 Parameter
防护等级	球仓：IP67/底仓：IP66
防雾	加热/特种玻璃
尺寸	Φ 310(mm)×500(mm)
重量	<20kg
水平范围	360° 连续旋转
水平速度	水平键控速度：0.01° /s -60° /s，速度可设 水平预置速度：60° /s
垂直范围	+90°~ -90°
垂直速度	垂直键控速度：0.01° /s -40° /s，速度可设 垂直预置速度：40° /s
重复定位精度	0.033°
预置位数量	2048 个
可见光最大图像尺寸	1920×1080
热成像最大图像尺寸	768×576
可见光分辨率及帧率	50Hz: 25fps (1920×1080) 60Hz: 30fps (1920×1080)

2.3 林火视 监控设备的测试

基于设备的功能、性能、质量、适用性及公平原则，本研究针对森林防火视频监控预警设备软硬件配合成熟度，前端监控设备参数指标实用性、可靠性，对林区火灾视频监控设备、系统的早期烟火报警能力，以及报警后的业务调度能力进行实际场景测试（图 3）。

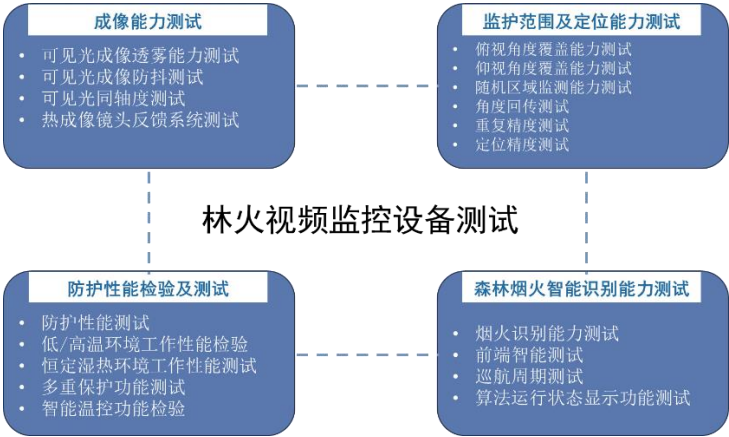


图 3 林火视 监控设备测试内容

Fig.3 Test content of forest fire video monitoring equipment

如何在森林火灾发生初期实现烟雾识别，同是提高火灾预警的准确率，是亟待解决的技术难题（Hu e t al.,2022）。本次测试要求：林火感知系统应具有烟火自动识别能力，通过配备的可见光烟火自动识别算法进行 24 h 自动巡航；系统应能有效过滤雾、霾、雪、云、阴影、光线、树枝晃动等因素引起的环境变化干扰。

方法：所有参加测试设备提前设置自动巡航。通知点火后，同时记录开始时间，在规定时间内完成区域内烟火识别。依据距离分为 3 类，每类 2 组，每组进行 5 轮测试，分别测量不同点烟距离、点火距离的识别能力以及离线火情识别能力，详见表 3。最终人工核查系统报警日志的火情视频及图片、火情坐标信息数据，是否与实际点烟时间和地点一致。由工作人员统计正报次数、正报时间、误报次数、漏报次数，

并录像取证，填表确认。

表 3 烟火识别能力测试
Tab.3 Fire and smoke identification ability test

序号	测试内容	点火轮次	燃烧物及 用量	使用装置数量	持续时间
1	点烟距离 3km~5km	第一轮	烟雾弹	一组 6 枚同时点燃	20 分钟
2		第二轮	烟雾弹	一组 6 枚同时点燃	20 分钟
3		第三轮	烟雾弹	一组 6 枚同时点燃	20 分钟
4		第四轮	烟雾弹	一组 6 枚同时点燃	20 分钟
5		第五轮	烟雾弹	一组 6 枚同时点燃	20 分钟
6	点烟距离 5km~8km	第一轮	烟雾弹	一组 8 枚同时点燃	20 分钟
7		第二轮	烟雾弹	一组 8 枚同时点燃	20 分钟
8		第三轮	烟雾弹	一组 8 枚同时点燃	20 分钟
9		第四轮	烟雾弹	一组 8 枚同时点燃	20 分钟
10		第五轮	烟雾弹	一组 8 枚同时点燃	20 分钟
11	点火距离 3km~5km	第一轮	木材	火面积 2m ² ~3m ²	20 分钟
12		第二轮	木材	火面积 2m ² ~3m ²	20 分钟
13		第三轮	木材	火面积 2m ² ~3m ²	20 分钟
14		第四轮	木材	火面积 2m ² ~3m ²	20 分钟
15		第五轮	木材	火面积 2m ² ~3m ²	20 分钟
16	点火距离 5km~8km	第一轮	木材	火面积 3m ² ~4m ²	20 分钟
17		第二轮	木材	火面积 3m ² ~4m ²	20 分钟
18		第三轮	木材	火面积 3m ² ~4m ²	20 分钟
19		第四轮	木材	火面积 3m ² ~4m ²	20 分钟
20		第五轮	木材	火面积 3m ² ~4m ²	20 分钟
21	离线火情识别 能力测试 5km~8km	第一轮	烟雾弹	一组 8 枚同时点燃	20 分钟
22		第二轮	烟雾弹	一组 8 枚同时点燃	20 分钟
23		第三轮	烟雾弹	一组 8 枚同时点燃	20 分钟
24		第四轮	烟雾弹	一组 8 枚同时点燃	20 分钟
25		第五轮	烟雾弹	一组 8 枚同时点燃	20 分钟
26	离线火情识别 能力测试 5km~8km	第一轮	木材	火面积 3m ² ~4m ²	20 分钟
27		第二轮	木材	火面积 3m ² ~4m ²	20 分钟
28		第三轮	木材	火面积 3m ² ~4m ²	20 分钟
29		第四轮	木材	火面积 3m ² ~4m ²	20 分钟
30		第五轮	木材	火面积 3m ² ~4m ²	20 分钟

注：报警时间早于点烟或点火的开始时间视为误报。

3 森林防火综合管理平台建设

3.1 平台总体架构

森林防火综合管理平台总体架构由硬件设备（前端感知部分）、云端传输、中台支撑、智能应用、业务管理五个主要部分（图 4）。其中硬件设备按照 2024 年《灾害风险视频监控平台地方建设任务书》要求推荐采用运营商专线接入市级电子政务外网。本级应急管理部门协调政务云资源，保障通用计算资源、智能计算资源、存储资源、网络资源等的合理规划与使用。

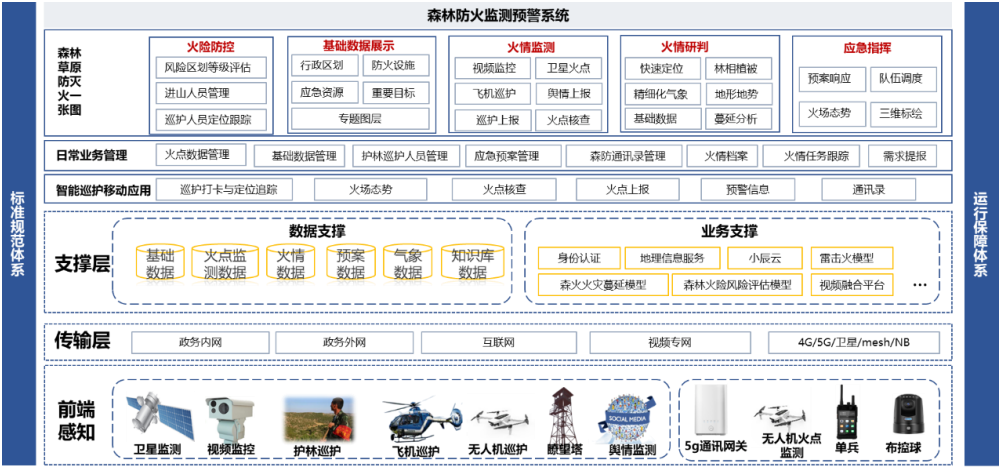


图 4 平台总体架构

Fig.4 Overall platform architecture

本平台提供丰富中台支撑能力，包括媒体中台、数据中台、物联中台、AI 中台、业务中台等能力。本研究秉持着“实际应用为本、高科技辅助”的宗旨设计，系统平台功能与应急管理需求同步，实现信息化、智能化在应急业务范畴管理中充分应用。

3.2 系统功能要点

森林防火综合管理平台系统通过云端和手机端的联合部署，具有完备的烟火识别、监控告警、预防管理、指挥调度等完备的功能体系（图 5）。基于结构化数据汇聚分析，算法仓库提供统一管理、模型评估、云端下发、三方算法接入等能力。同时，实现对汇聚的视频图像二次智能解析，提供视频智能算法分析管理、调度、调优等功能，提供视频图像解析、事件检测、特征搜索等视频数据价值挖掘工具。

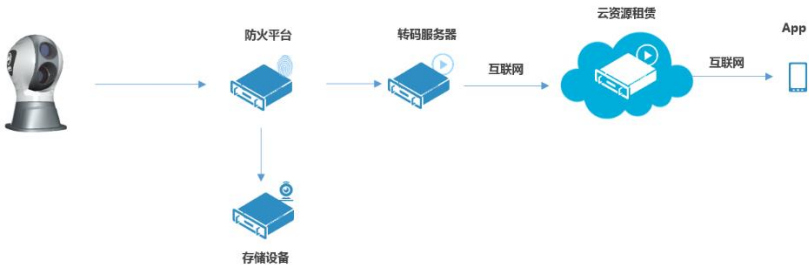


图 5 平台部署方式

Fig.5 Platform deployment mode

手机端的森林防火综合管理系统 App，包括森林防火视频实时查看、球台控制、火情定位及处理、综合统计分析以及业务协同等功能，具有良好的易用性和可靠性。App 适用于 Android 5.0 及以上版本系统的手机，首页显示当日所有球台告警信息的统计，能够实时查看对应球台的监控视频，并对球台进行调焦、变焦、透雾开关、巡航启停等操作。此外，App 能够完成查看告警、火情确认、火点定位等功能（图 6）。

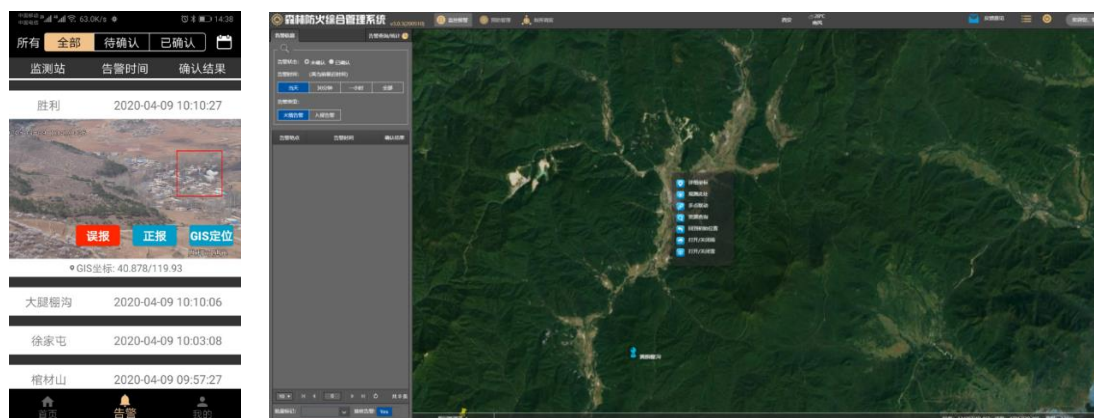


图 6 手机端的界 和电脑端的界

Fig.6 The interface of mobile phone and the interface of computer.

电脑端的森林防火综合管理系统具备智能分析告警功能,其提供了 100 余种检测告警,支持告警联动、告警压缩等功能。并且支持事件根因分析、环境分析的闭环能力,快速、轻松的应对每一次告警,持续保障业务系统稳定运行。在接收到告警信息后,对信息进行告警确认和交叉验证,经过确认火情属实后,关闭告警进入指挥扑救阶段并关联新建火情(图 7)。

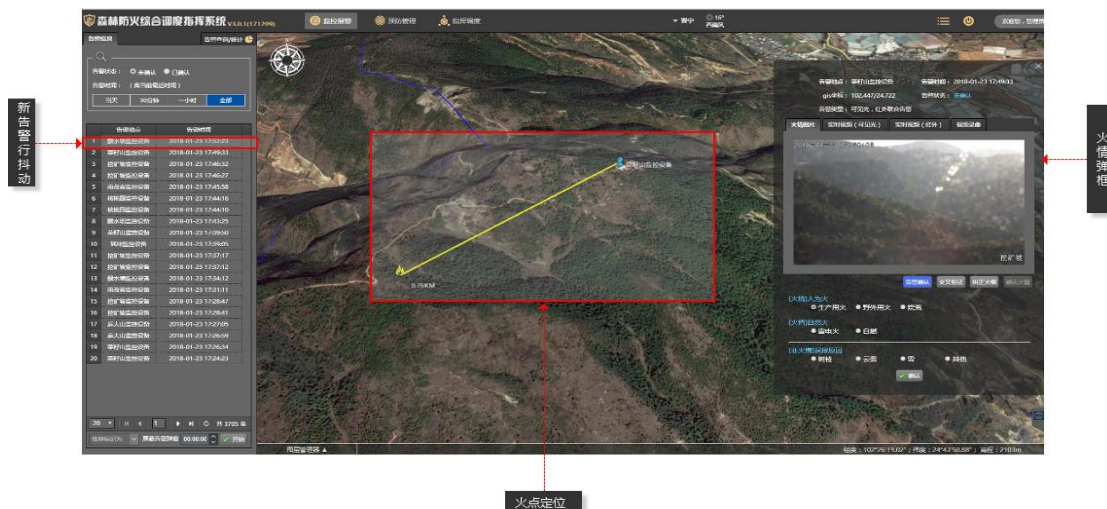


图 7 系统对新告警信息的处理

Fig.7 Processing of new alarm information by the system.

系统应用“红外坐标映射+可见光辅助判别”的模式,对受光照、极端天气影响拍摄的视频/图像进行优化处理,基于领先的深度学习技术,能够对质量较低的图片进行去雾、对比度增强、无损放大、拉伸恢复等多种优化处理,提高森林烟火识别的准确度。

3.3 烟火识别算法优势

森林火灾烟雾图像或视频很难在实际应用中完成捕捉(Li et al.,2022)。森林图像中如云、湖面、雾等的烟雾类似因素,以及自然环境中的光线变化都会影响烟火特征的提取和识别,从而引起误报(Mira et al., 2020; Huang et al., 2023)。

3.3.1 样本库

本研究经过全国范围内十几年来不间断采集,累积超 400 万烟火图像样本及近 4000 万的非烟火样本数据,构建了海量烟火正负样本库,涵盖数百万级可见光火情样本库和热成像数据样本库(图 8),样本数据持续回流支持算法模型迭代优化。

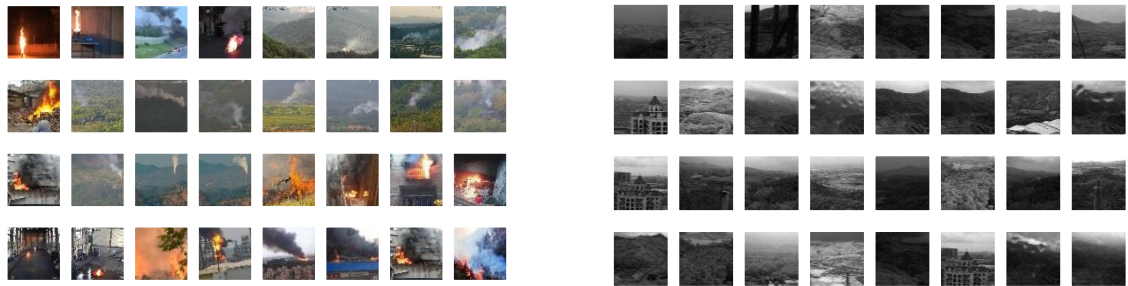


图 8 可见光数据样本和热成像数据样本
Fig.8 Visible light data samples and thermal imaging data samples

3.3.2 算法方案

算法逻辑：动静结合，采用静态图像加烟雾动态识别技术，利用烟雾的动态特性，以及烟雾的纹理、颜色和形状等特点通过算法和模型结构，实现对烟雾的准确识别和分割。

前端识别算法：前端算法具有实时性、精确性和低延迟等特点，有效规避了后端算法在传输网络不稳定、视频花屏等因素下产生的烟火漏报问题，，基于多种先进的深度学习技术，累计训练林草特色烟火模型迭代数百次，有效地降低漏报率（小于千分之一）。

可见光算法方案：可见光烟火识别算法使用双模型级联网络，通过多级判断减少误报。应用 YOLOv8 检测器进行烟火识别，针对火和烟的形态特征、纹理特征、移动特征进行目标检测模型训练，尽量过滤掉雾、霾、云、车灯、积水反光、雾霾、晨雾等环境因素干扰造成的误报。以连续帧+能量判断的模式，基于检测模型的连续检测结果进行判断，若连续几次均为同一检测结果，则再进行形态位置判断，判断是否符合正检逻辑，进一步减少误报。此外，经由判别器检测，将符合能量判断正检逻辑的检测框内图像扣出，放入分类模型进行进一步分类检测，最终判断是否为正报警，再次减少误报

多光谱算法方案（图 9）：应用近红外、中波红外、热成像等多光谱技术结合可见光烟火识别技术，弥补可见光烟火算法在某些易漏检、易误检场景的需求痛点，提高火情信息提取准确度，拓宽多谱段信息判别维度，并进行火焰和热烟气的判别。

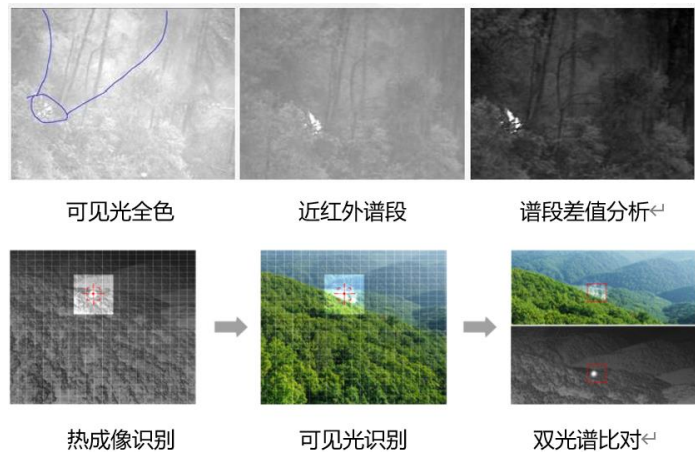


图 9 可多光谱算法图示
Fig.9 Graphical representation of multispectral algorithm

边端过滤算法：采用更为精确的规则和过滤机制，对前端算法发出的警报进行二次筛选。通过对前端告警数据置信度的逻辑判断和数据校验，边端过滤算法能够有效地降低误报率，过滤指标达到 95%。

云端复合算法：借助云端的高算力进行复合计算。通过将大量的数据和复杂的模型部署在云端，对数据进行深入挖掘和分析。进一步优化烟火识别的准确性和效率，提高整个系统对复杂场景的应对能力。

4 讨论

对于林木资源的健康发展和生态系统平衡来说, 如何应对森林火灾成为了巨大的挑战(王亚男等, 2023)。烟雾在林火早期具有更为明显特征, 更容易通过相机识别火势(Li et al.,2023; Ding et al.,2024)。及时准确地探测野火烟雾, 不仅有利于森林火灾预警和扑救, 而且可以最大限度地减少生命和财产损失(Qian et al.,2023)。

在计算机视觉技术的持续助推下, 基于视频的烟雾检测方法以低成本、覆盖面广、信息获取较全面等优势逐渐成为研究热点(朱弥雪等, 2022)。许多学者已经证明, YOLO 系列在目标检测领域具有优异的性能, 并在林火监测领域进行了大量的实践(Xiao et al.,2023)。本研究应用的 YOLOv8 检测器, 能够有效提高森林火灾烟雾模型的检测精度。

以往的森林火灾监测系统具有成本高、功耗大、维护复杂的缺点(林金亮等, 2024)。随着计算机技术的发展, 基于人工特征提取的传统火灾烟雾探测方法开始出现。先由安装在瞭望台的监控来获取森林火灾视频或图像, 然后手动提取特征并设计标识符(Qian et al.,2023)。基于软件的视频稳定方法专门用于森林火灾的热红外图像, 为可见光和多光谱识别提供了新途径(Miguel et al.,2021)。热红外相机、多光谱相机、可见光相机都具有一定的监测准确率, 而多光谱相机对于不同林火状态的适应性更强(贾志成等, 2024)。本研究采用“红外坐标映射+可见光辅助判别”的模式, 结合多光谱算法组成双模型级联网络, 通过多级判断有效减少了漏报率和误报率。

物联网设备与放置在森林中的林火感知设备集成进一步提高了数据的粒度和即时性(Wang et al.,2024)。本研究的森林防火综合管理平台, 支持监控摄像头、录像机、无人机、智能相机、智能盒、智能服务器、物联平台等类型设备统一管理; 支持实时视频流、离线视频文件、图片等多种处理模式, 可对普通监控摄像头灵活定义各个不同智能能力。

由于自然环境本身的复杂和多变, 基于计算机视觉的林火识别检测方法仍面临着多目标处理困难、场景适应性有限等挑战, 森林火灾的烟雾图像可能存在图像模糊、烟雾特征不明显的缺点。本研究可见光和多光谱结合的形式虽然具备较高的准确度, 仍旧不能完全避免误报, 有待在今后的探索中突破。

5 结论

本研究基于林火图像识别领域, 从烟火识别时间、烟火识别距离、烟火识别准确度三个维度分析了森林烟火业务的痛点需求, 应用森林防火专业 AI 摄像机和高精度球台等林火视频感知设备达成森林烟火的智能识别, 并应用可见光算法和多光谱算法, 有效降低了漏报率和误报率, 最终构建功能完备的森林防火综合管理平台, 助力林火监测预警和消防救援工作。

参 考 文 献

- 崔中耀,赵凤君,赵 爽,等.2024.基于多光谱无人机及机器学习的林木火灾受损信息提取研究.自然灾害学报,33(01):99-108.
- (Cui Z Y, Zhao F J, Zhao S, et al. 2024. Research on information extraction of forest fire damage based on multispectral UAV and machine learning. Journal of Natural Disasters, 33(01):99-108. [in Chinese])
- 高 源,杨 堃,曹 磊,等.2023.基于改进 YOLOv5 的特征抑制多尺度林火检测算法.林业工程学报, 8(06):145-153.
- (Gao Y, Yang F, Cao L, et al. 2023. Feature suppression multi-scale forest fire detection algorithm based on improved YOLOv5. Journal of Forestry Engineering, 8(06):145-153. [in Chinese])
- 何乃磊,张金生,林文树.2023.基于深度学习多目标检测技术的林火图像识别研究.南京林业大学学报(自然科学版):1-13.
- (He N L, Zhang J S, Lin W S, et al. 2023. Research on Forest Fire Image Recognition Based on Deep Learning Multi-Target Detection Technology. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition):1-13. [in Chinese])
- 贾一鸣,张长春,胡春鹤,等.2023.基于少样本学习的森林火灾烟雾检测方法.北京林业大学学报, 45(09):137-146.

- (Jia Y M, Zhang C C, Hu C H, *et al.* 2023. Forest fire smoke detection method based on few-shot learning. Journal of Beijing Forestry University, 45(09):137-146. [in Chinese])
- 贾志成,段棋峰,汪 东.2024.基于无人机多光谱遥感的林火监测模型.中南林业科技大学学报,44(03):22-32.
- (Jia Z C, Duan Q F, Wang D. 2024. Model research for monitoring forest fires based on UAV multispectral remote sensing. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 44(03):22-32. [in Chinese])
- 李 海,孙 鹏.2023.基于知识图谱的火灾图像识别研究.中国安全科学学报, 33(10):147-159.
- (Li H, Sun P. 2023. Research on fire image recognition based on scientific knowledge graph. China Safety Science Journal, 33(10):147-159. [in Chinese])
- 林金亮,彭侠夫.2024.改进 TDM-LoRa 低功耗森林火灾监测预警系统.福州大学学报(自然科学版):1-8.
- (Lin J L, Peng X F. 2024. Design of a low power forest fire monitoring and warning system based on improved TDM-LoRa. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 1-8. [in Chinese])
- 王 劲,张文文,王秋华,等.2022.地中海沿岸主要国家林火管理综述及对我国的启示.世界林业研究,35(05):107-112.
- (Wang J, Zhang W W, Wang Q H, *et al.* 2022. Review of Forest Fire Management in Mediterranean Countries and Its Enlightenment to China. World Forestry Research,35(05):107-112. [in Chinese])
- 王丽霞,夏 雪,高 凡,等.2023.深度学习在森林火灾检测中的研究进展.林产工业, 60(11):88-92.
- (Wang L X, Xia X, Gao F, *et al.* 2023. Research Progress of Deep Learning in Forest Fire Detection. China Forest Products Industry, 60(11):88-92. [in Chinese])
- 王亚男,王洪庆,王新建.2023.中国省域森林火灾风险评价体系构建与风险评估.自然灾害学报, 32(04):94-103.
- (Wang Y N, Wang H Q, Wang X J. 2023. Construction of provincial forest fire risk index system and risk assessment in China. Journal of Natural Disasters, 32(04):94-103. [in Chinese])
- 仲亭玉,刘文萍,刘鹏举.2017.基于分数阶微分视频融合的森林烟火检测算法.北京林业大学学报, 39(03):24-31.
- (Zhong T Y, Liu W P, Liu P J. 2017. A forest fire smoke detection algorithm based on fractional-calculus video fusion. Journal of Beijing Forestry University, 39(03):24-31. [in Chinese])
- 朱龙祥,王自法,张 昕,等.2024.基于 GIS 和多种机器学习算法的广东省森林火灾预测模型.林业工程学报,9(03):159-167.
- (Zhu L X, Wang Z F, Zhang X, *et al.* 2024. Forest fire prediction models for Guangdong Province based on GIS and multiple machine learning algorithms. Journal of Forestry Engineering, 9(03):159-167. [in Chinese])
- 朱弥雪,刘志强,张 旭,等.2022.林火视频烟雾检测算法综述.计算机工程与应用, 58(14):16-26.
- (Zhu M X, Liu Z Q, Zhang X, *et al.* 2022. Review of Research on Video-Based Smoke Detection Algorithms. Computer Engineering and Applications, 58(14):16-26. [in Chinese])
- Adisorn L, Thongchai K, Sunee R. 2023. Detection of forest fires and pollutant plume dispersion using IoT air quality sensors.Environmental pollution (Barking, Essex : 1987), 338122701-122701.
- Alkhatib, A.A.A.; Abdelal, Q.; Kanan, T. 2021. Wireless Sensor Network for Forest Fire Detection and behavior Analysis. Int. J. Adv. Soft Comput. Its Appl., 13, 82–104.
- A. M A, Andy C, A. N C. 2021. Unmanned Aerial Vehicles for Wildland Fires: Sensing, Perception, Cooperation and Assistance. Drones, 5(1):15-15.
- Azlan S, Asyraf M Z, Haspi H H, *et al.* 2024. Forest fire surveillance systems: A review of deep learning methods. Heliyon, 10(1): e23127-.
- Barmpoutis P, Papaioannou P, Dimitropoulos K, *et al.* 2020. A Review on Early Forest Fire Detection Systems Using Optical Remote Sensing. Sensors, 20, 6442.
- Chen Y S, Li J H, Sun K, *et al.* 2023. A lightweight early forest fire and smoke detection method. The Journal of Supercomputing, 80(7):9870-9893.
- Ciprián-Sánchez J, Ochoa-Ruiz G, Gonzalez-Mendoza M, *et al.* 2021. FIRE-GAN: A novel deep learning-based infrared-d-visible fusion method for wildfire imagery. Neural Comput. Appl., 35, 18201–18213.
- Ding Y, Wang M, Fu Y, *et al.* 2024. Forest Smoke-Fire Net (FSF Net): A Wildfire Smoke Detection Model That Co

mbines MODIS Remote Sensing Images with Regional Dynamic Brightness Temperature Thresholds. *Forests*, 15, 839.

Giannakidou S, Grammatikis R P, Lagkas T, et al. 2024. Leveraging the power of internet of things and artificial intelligence in forest fire prevention, detection, and restoration: A comprehensive survey. *Internet of Things*, 26101171-.

Kandasamy G, Sabariswaran K, Mathiyazhagan N. 2023. Influences of wildfire on the forest ecosystem and climate change: A comprehensive study. *Environmental research*, 240(P2):117537-117537.

Kyungil L, Byeongcheol K, Seonyoung P. 2023. Evaluating the potential of burn severity mapping and transferability of Copernicus EMS data using Sentinel-2 imagery and machine learning approaches. *GIScience Remote Sensing*, 60(1):

Han Z, Tian Y, Zheng C, et al. 2024. Forest Fire Smoke Detection Based on Multiple Color Spaces Deep Feature Fusion. *Forests*,15(4):

Wang A, Liang G, Wang X, et al. 2023. Application of the YOLOv6 Combining CBAM and CIoU in Forest Fire and Smoke Detection. *Forests*,14(11):

Haeri P S B, Abolfazl R. 2024. IC-GAN: An Improved Conditional Generative Adversarial Network for RGB-to-IR image translation with applications to forest fire monitoring. *Expert Systems With Applications*, 238(PD):

Hu Y, Zhan J, Zhou G, et al. 2022. Fast forest fire smoke detection using MVMNet. *Knowledge-Based Systems*, 241.

Huang J, Zhou J, Yang H, et al. 2023. A Small-Target Forest Fire Smoke Detection Model Based on Deformable Transformer for End-to-End Object Detection. *Forests*, 14(1):162-162.

K. A. 2023. Robust stacking-based ensemble learning model for forest fire detection. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(12):13245-13258.

Li R, Hu Y, Li L, et al. 2024. SMWE-GFPNNet: A high-precision and robust method for forest fire smoke detection. *Knowledge-Based Systems*, 289111528-.

Li T, Zhang C, Zhu H, et al. 2022. Adversarial Fusion Network for Forest Fire Smoke Detection. *Forests*,13(3):366-366.

Li X, Zhang G, Tan S, et al. 2023. Forest Fire Smoke Detection Research Based on the Random Forest Algorithm and Sub-Pixel Mapping Method. *Forests*,14(3):485-485.

Liang H, Zheng C, Liu X, et al. 2023. Super-Resolution Reconstruction of Remote Sensing Data Based on Multiple Satellite Sources for Forest Fire Smoke Segmentation. *Remote Sensing*, 15(17):

Lucas-Borja E M, Zema A D, Carrà G B, et al. 2018. Short-term changes in infiltration between straw mulched and non-mulched soils after wildfire in Mediterranean forest ecosystems. *Ecological Engineering*, 12227-31.

Miguel M V, Steven V, Bret B, et al. 2021. Thermal Infrared Video Stabilization for Aerial Monitoring of Active Wildfires. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING*,142817-2832.

Mira J, Minji P, Jaeyeal N, et al. 2020. Light-Weight Student LSTM for Real-Time Wildfire Smoke Detection. *Sensors (Basel, Switzerland)*,20(19):5508-5508.

Momeni M, Hashem E A M J M S. 2024. Collaboration of thermal sensors and drones in fighting wildfires; Mathematical model and heuristic approach. *Internet of Things*, 26101168-.

Naderpour M, Rizeei H M, Ramezani F. 2021. Forest Fire Risk Prediction: A Spatial Deep Neural Network-Based Framework. *Remote Sensing*, 13(13):2513.

Nguyen, H D. 2022. Hybrid models based on deep learning neural network and optimization algorithms for the spatial prediction of tropical forest fire susceptibility in Nghe an province, Vietnam. *Geocarto Int.*, 37, 11281–11305.

Noureddine M, Edmond N, Kebira A, et al. 2023. A reinforcement learning based routing protocol for software-defined networking enabled wireless sensor network forest fire detection. *Future Generation Computer Systems*, 149478-493.

Pang Y, Wu Y, Yuan Y. 2023. FuF-Det: An Early Forest Fire Detection Method under Fog. *Remote Sensing*, 15(23):

Qian J, Bai D, Jiao W, et al. 2023. A High-Precision Ensemble Model for Forest Fire Detection in Large and Small Targets. *Forests*,14(10):

Qian J, Lin J, Bai D, et al. 2023. Omni-Dimensional Dynamic Convolution Meets Bottleneck Transformer: A Novel I

Improved High Accuracy Forest Fire Smoke Detection Model. *Forests*, 14(4):

Ramvalho C H A, Fiedler C N, Santos D R A, et al. 2024. Forest firefighting technology: Strategic water reservoir placement for terrestrial and aerial vehicles. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 108104496-.

R M, Cuddapah A, Thomas K A, et al. 2023. An IoT based forest fire detection system using integration of cat swarm with LSTM model. *Computer Communications*, 21137-45.

Sahoo G, Wani A, Rout S, et al. 2021. Impact and contribution of forest in mitigating global climate change. *Des. Eng.*, 4, 667-682.

Sarkar S M, Majhi K B, Pathak B, et al. 2024. Ensembling machine learning models to identify forest fire-susceptible zones in Northeast India. *Ecological Informatics*, 81102598-.

Saydirasulovich N S, Mukhiddinov M, Djuraev O, et al. 2023. An Improved Wildfire Smoke Detection Based on YOLOv8 and UAV Images. *Sensors*, 23(20):

Shamta I, Demir E B. 2024. Development of a deep learning-based surveillance system for forest fire detection and monitoring using UAV. *PloS one*, 19(3):e0299058-e0299058.

Shang D, Zhang F, Yuan D, et al. 2024. Deep Learning-Based Forest Fire Risk Research on Monitoring and Early Warning Algorithms. *Fire*, 7(4):151-.

Sheng S, Niu X, Pan J, et al. 2023. Research on smoke relative concentration identification method based on Landsat 8-OLI multispectral data and multivariate analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 44(11):3550-3571.

Sun L, Li Y, Hu T. 2023. Forest Fire Detector: Expanding Channel Depth for Fine-Grained Feature Learning in Forest Fire Smoke Detection. *Forests*, 14(11):

S M, C V. 2023. Drone network for early warning of forest fire and dynamic fire quenching plan generation. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2023(1):

Ts. T S, Lauren T, Julia T, et al. 2024. Forest fire, thinning, and flood in wildland-urban interface: UAV and lidar-based estimate of natural disaster impacts. *Landscape Ecology*, 39(3):

Wang B, Zou Y, Zhang L, et al. 2022. Multimodal super-resolution reconstruction of infrared and visible images via deep learning. *Opt. Lasers Eng.*, 156, 107078.

Wang G, Bai D, Lin H, et al. 2024. Fire ViT Net: A hybrid model integrating ViT and CNNs for forest fire segmentation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 218108722-.

Wei Z, Hui B T, Wei Z H, et al. 2024. Identification of forest fire points under clear sky conditions with Himawari-8 satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 45(1):214-234.

Xiao Z, Wan F, Lei G, et al. 2023. FL-YOLOv7: A Lightweight Small Object Detection Algorithm in Forest Fire Detection. *Forests*, 14(9):

Ye J, Cui Z, Zhao F, et al. 2022. Automated Extraction of Forest Burn Severity Based on Light and Small UAV Visible Remote Sensing Images. *Forests*, 13(10):1665-1665.

Zhan J L, Hu Y W, Zhou G X, et al. 2022. A high-precision forest fire smoke detection approach based on ARGNet. *Computers and Electronics in Agriculture*, 196.

Zhang F, Zhao P, Xu S, et al. 2020. Integrating multiple factors to optimize watchtower deployment for wildfire detection. *Sci. Total Environ.*, 737, 139561.

Zheng S, Zou X, Gao P, et al. 2024. A Forest Fire Recognition Method Based on Modified Deep CNN Model. *Forests*, 15(1):