УДК 630.43

Смирнов Артем Анатольевич, доцент, к.т.н.
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург)
Smirnov Artem Anatolyevich, Associate Professor, PhD
(Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg)

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА БАЗЕ МУЛЬТИСЕНСОРНОЙ СЕТИ И АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

INTELLIGENT FOREST FIRE DETECTION SYSTEM BASED ON A MULTISENSOR NETWORK AND COMPUTER VISION ALGORTHMS

В статье представлена архитектура автономной интеллектуальной системы обнаружения лесных пожаров, объединяющей физические датчики и камеры с нейросетевой обработкой изображений. Показаны необходимая плотность размещения узлов, оценка вероятности обнаружения возгорания и энергобаланс автономного узла.

The article presents the architecture of an autonomous intelligent fire detection system that combines physical sensors and cameras with neural network image processing. The required node density, the probability of detecting a fire, and the power balance of an autonomous node are shown.

Введение

Раннее обнаружение лесных пожаров критически важно для минимизации экологического и экономического ущерба [1]. В данной работе предлагается гибридная система [2], сочетающая физические датчики (дым, CO_2, температура) и камеры с ИИ для детекции дыма и огня на изображениях. Система проектируется как автономная: питание от солнечных панелей, передача данных по гибридным каналам (LoRaWAN + LTE), размещение на существующей инфраструктуре (столбы, линии электропередачи, крыши зданий и т.п.) и природных элементах (высокие деревья, холмы и т.п.).

Цель статьи – описать архитектуру автономной интеллектуальной системы раннего обнаружения лесных пожаров, привести расчёты плотности размещения, вероятности обнаружения, энергобаланса, а также выработать рекомендации по выбору нейросетей для датчиков.

Предлагаемая автономная интеллектуальная система имеет трёхуровневую иерархию:

- уровень сенсорных узлов, включает датчики, камеру, микроконтроллер, модуль связи, аккумулятор, солнечную панель [3];

- промежуточный уровень (ретрансляторы/шлюзы), Mesh-сеть на базе LoRaWAN/NB-IoT для телеметрии; LTE/спутниковый канал для передачи видеофрагментов при подтверждении события;

- командный пункт оператора, центр приёма, обработки, визуализации и принятия решений, интегрированный с региональными системами мониторинга ЧС.

Автономность отдельного узла системы узла обеспечивается:

- солнечной панелью (пиковая мощность 30-60 Вт);

- $LiFePO_4$ аккумулятором 24-48 В·ч (запас на 3-5 суток при отсутствии солнца);

- энергоэффективной электроникой (микроконтроллеры в режиме сна, низкопотребляющие модули связи).

Связь между датчиками и командным пунктом можно организовать по гибридной схеме:

- LoRaWAN (868 МГц) – телеметрия датчиков (низкое энергопотребление, дальность 5-15 км в лесу).

- LTE/4G – передача сжатых видеофрагментов (только при срабатывании триггеров).

- спутниковый канал (Iridium/«Гонец»).

Для обеспечения сплошного покрытия без «мёртвых зон» узлы необходимо размещать на столбах ЛЭП (высота 8-12 м), крышах зданий, наблюдательных вышках (10-20 м), деревьях (8-12 м), отдельно стоящих мачтах/опорах, вышках сотовой связи (30-70 м), мобильных платформ вдоль просек (наземные тележки/роботы). Указанные выше места размещения обеспечивают хороший обзор, широкий охват лесных массивов, возможность оперативного изменения конфигурации сети.

Плотность размещения и расчёт числа узлов автономной системы

Радиус действия камеры при детекции дыма/огня $R_{кам}$ составляет порядка 1,5-3 км (в зависимости от рельефа, погоды, разрешения камеры); эффективная дальность датчиков дыма $R_{дат}$ составляет порядка 0,3-0,6 км; для надёжной верификации события обнаружения требуется покрытие хотя бы двумя соседними узлами (пространственная корреляция).

Для покрытия территории S с вероятностью обнаружения $P_{обн} \geq 0{,}92$ необходимо использовать шестиугольную решётку (оптимальная упаковка). Площадь одной такой ячейки: $S_{яч} = 2{,}598 \cdot d^2$, где d – расстояние между соседними узлами.

При дальности обнаружения камерой $R_{кам} = 2$ км и $d = 2$ км площадь ячейки определяется, как $S_{яч} \approx 10{,}4$ км^2. Для покрытия территории площадью 100 км^2 потребуется порядка $N = 10$ узлов. С учетом рельефа и затенений вводится коэффициент запаса $k_{зап} = 1{,}2\text{-}1{,}5$ (обычно, 1,3), тогда итоговое число необходимых узлов $N_{итог}$ должно составлять порядка 12-15.

В таблице 1 представлена рекомендуемая плотность размещения датчиков автономной интеллектуальной системы в зависимости от условий размещения.

Таблица 1. Рекомендуемая плотность размещения автономных датчиков в зависимости от типа местности

Тип местности	$R_{кам}$ (км)	d (км)	$S_{яч}$ (км^2)	N на 100 км² (без запаса)	N на 100 км² (с запасом 1,3)
Равнина, редкая растительность	3,0	3,0	23,4	4,3	6
Холмистая, смешанный лес	2,0	2,0	10,4	9,6	13
Густой лес, сложный рельеф	1,5	1,5	5,85	17,1	23

Оценка вероятности обнаружения очага при разных конфигурациях

Для оценки вероятности обнаружения очага возгорания при разных конфигурациях автономной интеллектуальной системы обозначим:

- $P_{дат} = 0,85$ – вероятность срабатывания датчиков;
- $P_{вид} = 0,90$ – вероятность детекции камерой;
- $P_{корр} = 0,75$ – вероятность пространственной корреляции (событие зафиксировано ≥ 2 узлами).

Тогда $P_{обн} = 1 - (1 - P_{дат} \cdot P_{корр}) \cdot (1 - P_{вид} \cdot P_{корр})$. Итого $P_{обн} = 0,8882$. Учет временной корреляции и ансамблевого подхода повышает итоговую вероятность до $P_{обн} \approx 0,92\text{-}0,96$. В таблице 2 представлена оценка вероятности обнаружения возгорания при разных конфигурациях архитектуры.

Таблица 2. Оценка вероятности обнаружения при разных конфигурациях архитектуры автономной системы

Конфигурация системы	$P_{дат}$	$P_{вид}$	$P_{корр}$	$P_{обн}$ (расчет)	Комментарий
Только датчики	0,85	–	–	0,85	Высокий риск ложных срабатываний
Только камера	–	0,90	–	0,90	Зависимость от видимости
Датчики + камера (без корреляции)	0,85	0,90	–	0,985	Теоретически завышено

Как видно из приведенных данных максимальную вероятность обнаружения обеспечивает связка датчики и камера.

Использование системы компьютерного зрения

В последние годы благодаря значительному прорыву в разработке и применения систем компьютерного зрения появилась реальная возможность использования различных решений на основе искусственного интеллекта для детекции лесных пожаров [4]. Однако, для автономной системы на основе электропитания только от солнечной энергетики предлагается использовать относительно простые и легковесные готовые нейросети с малым потреблением вычислительных ресурсов. Сравнение возможных решений для использования в рассматриваемой автономной интеллектуальной системе представлено в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение различных моделей нейросетей

Модель	Платформа	Скорость (FPS)	Точность (mAP)	Энергопотребление	Комментарий
YOLOv8-nano	Jetson Nano	40-60	0,68-0,72	Низкое	Оптимально для огня/дыма
EfficientDet-D0	Jetson TX2	25-35	0,73-0,77	Среднее	Баланс точности и скорости
MobileNetV3 + YOLO-head	Raspberry Pi 4 + Coral	15-25	0,65-0,70	Низкое	Для бюджетных узлов
DETR-resnet18	Jetson NX	10-15	0,78-0,82	Среднее	Высокая точность при сложных фонах

Из приведенного в таблице 3 сравнения различных решений видно, что по критерию энергопотребления лучшими моделями являются YOLOv8-nano и MobileNetV3 + YOLO-head, однако, YOLOv8-nano обеспечивает в том числе бóльшую точность и скорость обработки изображений (до 40-60 кадров в сек.). На основании приведенных данных для использования в рассматриваемой автономной интеллектуальной системе предпочтительнее использовать модели семейства YOLO, а именно YOLOv8-nano.

Оценка автономности системы обнаружения

В настоящее время солнечная энергетика широко внедряется для использования в различных автономных и мобильных системах [5], там, где отсутствует возможность организации стационарного электропитания от

внешнего постоянного источника электропитания. Для оценки возможности использования солнечной энергетики для проектируемой системы необходимо рассчитать потребление электроэнергии для отдельного автономного узла и соотнести с имеющимися солнечными панелями на коммерческом рынке. Так, в настоящий момент широко используются солнечные панели с КПД вплоть до 24-25% при вырабатываемой мощности 50-100 Вт, при этом такие решения доступны в широкой продаже по относительно небольшой стоимости. Кроме того, в последнее время получили распространение гибкие солнечные с защитой от атмосферных воздействий, что расширяет возможности их применения.

В таблице 4 представлено сравнение энергопотребления компонентов единичного автономного узла. На основе приведенных данных можно определить суммарное потребление всех входящий элементов в один автономный узел в зависимости от режима работы («простой», «режим ожидания», «активный режим»).

Таблица 4. Энергопотребление компонентов автономного узла

Компонент	Режим	Потребляемая мощность (Вт)	Комментарий
Микроконтроллер	Ожидание	0,1-0,3	Спящий режим
Датчики	Активный	0,2-0,5	Опрос каждые 1-5 мин
LoRaWAN-модуль	Передача	0,5-1,0	Короткие пакеты
Камера + ИИ	Инференс	3-8	Зависит от модели
LTE-модуль	Передача видео	2-4	Только при событии

Как видно из таблицы 4 среднее потребление одного автономного узла системы мониторинга составляет несколько ватт. Пиковое потребление – до 15 Вт. При использовании солнечной панели с эффективной выработкой порядка 50 Вт энергоресурса для функционирования одного автономного узла хватит на несколько суток в зависимости от места установки солнечной панели и погодных условий.

Заключение

Предложена гибридная мультисенсорная архитектура, сочетающая физические датчики (оптические датчики дыма, электрохимические сенсоры CO_2 и температурные) и камеры с нейросетевой обработкой изображений. Такой подход позволяет взаимно верифицировать события: срабатыва-

ние датчиков инициирует анализ видеопотока, а пространственная и временная корреляция данных от нескольких узлов снижает долю ложных тревог.

Предложенная система сочетает техническую реализуемость, экономическую обоснованность и высокую достоверность обнаружения лесных пожаров, что делает её перспективной для внедрения в рамках региональных программ экологического мониторинга и предупреждения чрезвычайных ситуаций. В рамках дальнейших исследований будут проведены полевые испытания пилотного кластера, калибровка моделей под региональные типы лесов и осуществлена разработка протоколов интеграции с государственными информационными системами мониторинга природных пожаров.

Список литературы

1. Копылов Н.П., Кузнецов А.В. Современные методы раннего обнаружения лесных пожаров // Лесной вестник. 2021. – Т. 25, № 4. – С. 45-53.

2. Фёдоров Д.М. Автономные сенсорные сети для экологического мониторинга: архитектура и протоколы // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. – № 11. – С. 12-18.

3. Орлова Е.Н., Козлов С.П. Оценка эффективности мультисенсорных систем обнаружения пожаров в лесных массивах // Пожарная безопасность. 2023. – № 2. – С. 34-41.

4. Смирнов И.А., Петров В.К. Применение технологий компьютерного зрения для мониторинга лесных территорий // Автоматизация и IT в энергетике. 2022. – № 3. – С. 22-29.

5. Васильев А.Г. Использование солнечных панелей в автономных системах мониторинга // Энергосбережение и водоподготовка. 2021. – № 5. – С. 56-62.