УДК 004.8

ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ БПЛА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Жмуровский К.В. – аспирант,
Тютиков А.Н. – магистрант,
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
Россия, г. Кемерово

В связи с ростом частоты и масштабов лесных пожаров и необходимостью управления огромными лесными территориями возникает вопрос о необходимости внедрения передовых информационных технологий в области мониторинга. Беспилотные летательные аппараты, они же БПЛА, представляют собой ключевой элемент для решения подобных вопросов.

Своевременные вызовы о возникновении пожара и оценки последствий стихийных бедствий – все это требует быстрого и масштабного подхода к сбору данных. БПЛА, которые оснащены мультиспектральными камерами, лидарами и тепловизорами, идеально подойдут для решения подобных задач, но одна из основных проблем – пилотирование дронов вручную над большими территориями лесных ландшафтов. Она появляется из-за ограничений человеческих возможностей.

Требованеия к системе и ее архитектура

Автономная система планирования маршрутов призвана решить проблему с ограничением человеческого фактора, превращая беспилотник в полноценного автономного агента, который может самостоятельно принять решение об оптимальном пути выполнения поставленной задачи.

Ключевые требования к системе. Эффективная система должна учитывать комплекс взаимосвязанных факторов:

● *Полное покрытие области*. Маршрут должен обеспечивать съемку всей лесной территории без пропусков каких-либо точек [1].

● *Учет рельефа и препятствий*. Лесной ландшафт неоднороден. Система для автономного планирования маршрутов БПЛА должна анализировать цифровые данные моделей рельефа и учитывать высоту деревьев для безопасного полета дрона.

● *Оптимизация по времени и энергии*. Продолжительность полета беспилотника ограничена, поэтому необходим алгоритм, который должен минимизировать общее время полета и энергопотребление, что напрямую влияет на площадь, которую покрывает один вылет.

● *Адаптивность к изменяющимся условиям*. В случае возникновения пожара или других чрезвычайных ситуаций, система должна, помимо отправки данных в необходимые службы, перестроить свой маршрут, учитывая данные о направлении и скорости ветра, распространения дыма и огня, и все это в реальном времени.

● *Мультиагентность*. Для мониторинга огромных лесных территорий требуется использование нескольких БПЛА. Вся система должна распределять зоны ответственности между всеми дронами, минимизировать пересечения между ними и обеспечить безопасное взаимодействие [3].

Архитектура системы автономного планирования. Разработка данной системы предполагает создание многоуровневой архитектуры:

Уровень данных и моделирования:

● *ГИС-данные*. Загрузка всех необходимых карт, ЦМР, границ лесных территорий, данные о дорогах и инфраструктуре [2].

● *Метаданные*. Интеграции с источниками информации о погоде (скорость и направление ветра, температура воздуха, видимость).

● *Модель БПЛА*. Необходим учет летно-технических характеристик дрона (скорость, время полета, радиус разворота, характеристики сенсоров).

Уровень планирования миссии:

● *Постановка задачи*. Государственные спасательные структуры определяют цель и задачи (поиск очагов возгорания, ортофотоплана), целевую область мониторинга и приоритет выполнения задач.

● *Генерация базового маршрута*. На данном этапе выбирается метод генерации маршрутов. Существует два алгоритма: «**Змейка**» – стандартный метод для полного покрытия площади и **алгоритм на основе клеточного разбиения** – разделение всей территории на области и их последовательный мониторинг.

● *Оптимизация маршрута*. Для преодоления ограничений простых методов используются продвинутые алгоритмы. **Генетические алгоритмы** – они позволяют найти оптимальное решение для сложных маршрутов, учитывающих множество факторов. **Муравьиные колонии и методы роя частиц** – они эффективны для построения кратчайшего пути на основе ключевых точек.

Предлагаемый алгоритмический подход и эксперимент

Для решения задачи автономного планирования маршрутов в условиях сложного лесного ландшафта предлагается гибридный алгоритм, комбинирующий достоинства детерминированных и метаэвристических методов. Алгоритм состоит из трех основных этапов:

● *Предобработка и сегментация области.* На основе загруженных ГИС-данных и ЦМР производится построение карты высот и выделение зон с однородной растительностью. Территория разбивается на элементарные ячейки (клетки) с учетом радиуса действия сенсоров БПЛА и требуемого разрешения съемки. Для каждого кластера ячеек рассчитывается приоритет облета на основе таких факторов, как пожарная опасность (по данным растительности) и близость к инфраструктуре.

● *Генерация первоначального маршрута.* Для каждого кластера генерируется путь полного покрытия по методу «Змейка». Это обеспечивает гарантированное сканирование всей выделенной зоны. Последовательность облета кластеров определяется с помощью модифицированного генетического алгоритма (ГА). В качестве минимизируемой целевой функции ГА используется

длина общего пути с учетом энергопотребления, которое моделируется на основе данных о ветре и рельефе.

● *Адаптивная оптимизация в реальном времени.* Сгенерированный маршрут передается на уровень исполнения. В процессе полета, при поступлении данных о возникновении очага пожара или резком изменении погодных условий, активируется модуль репланирования на основе метода роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO). PSO оперативно перестраивает маршрут, перенаправляя БПЛА к целевым точкам для детального обследования, минимизируя при этом общее время миссии.

Для проверки эффективности предложенного подхода было проведено имитационное моделирование в среде MATLAB. Моделировался участок лесной территории площадью 50 км² с переменным рельефом и различными типами лесного покрова. В качестве БПЛА рассматривалась модель с временем полета 45 минут и набором сенсоров (оптическая камера, тепловизор).

Уровень исполнения и адаптации (в реальном времени):

● *Обратная связь с датчиков*. Система собирает все необходимые данные с бортовых сенсоров.

● *Репланирование*. При обнаружение какой-либо цели, будь то пожар или возникновения препятствий, алгоритм оперативно вычисляет новый оптимальный маршрут для детального обследования территории.

Основные технические вызовы. При разработке системы автономного планирования маршрутов можно столкнуться с некоторыми сложностями:

● *Вычислительная сложность*. Планирование оптимального маршрута для нерегулярной лесной территории. Требуются эффективные алгоритмы решения поставленной задачи.

● *Неопределенность и динамическая среда*. Погода, поведение пожара, наличие диких животных – это вносит элемент случайности, с которым должна справляться система автономного планирования маршрутов [3].

● *Навигация в условиях отказа GPS*. Под густыми кронами леса GPS-сигнал может пропасть на некоторое время, поэтому необходима интеграция альтернативных систем навигации на основе компьютерного зрения и данных с инерциальных измерительных модулей.

● *Обеспечение связи*. На больших расстояниях и в сложном рельефе требуется использование ретрансляторов или каналов связи с большей дальностью [3].

Ключевым направлением для будущих исследований является углубление интеграции искусственного интеллекта (ИИ). В частности, перспективным видится применение сверточных нейронных сетей (CNN) для прогнозирования вероятности возникновения пожаров на основе многолетних данных о состоянии растительности и погодных условиях. Это позволит системе не просто реагировать на события, но и проактивно назначать зоны с высоким риском для приоритетного мониторинга.

Другим важным направлением является развитие координации гетерогенных групп БПЛА. Для увеличения зоны покрытия и продолжительности

мониторинга целесообразно использовать совместную работу мультироторных дронов (для детальной съемки в сложном рельефе) и беспилотников самолетного типа (для патрулирования обширных площадей). Алгоритмы распределения задач в такой гетерогенной группе требуют отдельной разработки.

Наконец, для преодоления проблемы слабого GPS-сигнала под лесным пологом необходима более тесная интеграция данных инерциальной навигации (IMU) и систем одновременной локализации и картографирования (SLAM) на основе лидара и камер. Создание точных карт подлеска в реальном времени позволит обеспечить полную автономность БПЛА в любых условиях.

Разработка системы автономного планирования маршрутов для БПЛА – это не просто удобство в решении возникающих проблем на лесных территориях для спасательных подразделений, но и необходимые условия для создания высокоэффективных систем мониторинга этих лесных территорий. Такие системы позволяют перейти от кратковременного мониторинга к созданию непрерывного, адаптивного и многофакторного «цифрового двойника» лесного ландшафта.

Будущее развитие связано с интеграциями искусственного интеллекта и машинного обучения. Искусственный интеллект способен прогнозировать распространение пожара для быстрого реагирования, автоматически классифицировать типы растительности для оптимизации детальности съемки, а также способен самостоятельно принимать решения в полностью недетерминированных сценариях. Данная разработка откроет новую эру в автономном лесном хозяйстве.

Список литературы:

1. Развитие инновационных процессов в интегрированных промышленных структурах. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/uskorennoe-innovatsionnoe-razvitie-tehnologiy-aerokosmicheskogo-monitoringa-lesa-sredstvami-rossiyskoy-kosmicheskoy-sistemy-dzz-i/viewer (дата обращения: 15.111.2025).

2. Инструкция по подготовке ресурсов геопортала. – URL: https://gis.krasn.ru/blog/guide/prepare (дата обращения: 16.11.2025).

3. Использование искусственного интеллекта в системах автоматизации: возможности и перспективы. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-iskusstvennogo-intellekta-v-sistemah-avtomatizatsii-vozmozhnosti-i-perspektivy?ysclid=m21n1zbhnz804092644 (дата обращения: 15.11.2025).