УДК 004.896

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ВИЗУАЛЬНОГО SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОСТИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Сафин А.М. – студент 2 курса направления подготовки
“Программная инженерия”
Лукоянов И.С. – студент 2 курса направления подготовки
“Программная инженерия”
Гагарин Ю.Е. – Научный руководитель, кандидат технических наук,
доцент, заведующий кафедрой
Калужский филиал Московского Государственного Технического
Университета имени Н.Э. Баумана
Россия, г. Калуга

Эффективная работа автономных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в значительной степени определяется надежностью и точностью их навигационных систем. В современной практике ключевую роль в обеспечении позиционирования играют глобальные спутниковые навигационные системы (ГНСС), к которым относятся GPS, ГЛОНАСС и их зарубежные аналоги. Однако подобный подход имеет фундаментальный недостаток — зависимость от приема спутниковых сигналов. В условиях их отсутствия, экранирования или намеренного подавления применение ГНСС становится невозможным. Подобные ситуации возникают внутри помещений, в подземных сооружениях, тоннелях, густо застроенных городских районах, а также в зонах активной радиоэлектронной борьбы [1]. Это существенно ограничивает эксплуатацию автономных дронов в критически важных областях — от инспекции промышленных объектов и инфраструктуры до проведения поисково-спасательных миссий, логистических операций на складах и разведки при чрезвычайных ситуациях. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка и исследование альтернативных или дополняющих навигационных методов, не зависящих от внешних источников сигналов. Среди них наиболее активно развивающимся направлением является визуальная навигация, основанная на анализе данных с бортовых камер, и, в частности, методы одновременной локализации и построения карты (SLAM) [2].

Целью данного исследования стало комплексное изучение эффективности, особенностей и применимости технологии визуального SLAM (vSLAM) для обеспечения автономной навигации БПЛА в условиях отсутствия стабильных сигналов GPS/ГЛОНАСС. Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи: провести анализ теоретических основ и архитектурных особенностей современных алгоритмов vSLAM; выполнить сравнительную оценку производительности открытых реализаций, включая ORB-SLAM3 и OpenVSLAM, на стандартных публичных наборах данных [3, 4]; определить

точность построения карт окружающего пространства и корректность восстановления траектории движения в сценариях, характерных для полетов дронов; выявить сильные и слабые стороны технологии, определяющие границы её практического использования.

Исследование опиралось на сочетание аналитических и экспериментальных методов. В качестве основных инструментов были выбраны две современные open-source библиотеки: ORB-SLAM3 [5] и OpenVSLAM [4], отличающиеся широкой функциональностью (поддержка монокулярных, стерео и RGB-D камер, а также интеграция с инерциальными датчиками). Для объективного сравнения использовались признанные в научном сообществе эталонные наборы данных EuRoC MAV [2] и TUM VI [6]. Датасет EuRoC MAV содержит синхронизированные записи со стереокамер и инерциального измерительного блока (IMU), полученные с борта микродрона, движущегося в лабораторных помещениях. В свою очередь, TUM VI предоставляет разнообразные последовательности, снятые в офисных и промышленных интерьерах, и также включает данные IMU. Основными метриками оценки выступали абсолютная ошибка траектории (Absolute Trajectory Error, ATE), отражающая точность локализации относительно эталона, и полнота карты (Point Cloud Completeness), характеризующая степень детализации реконструированного окружения.

Результаты экспериментов показали, что современные реализации vSLAM, такие как ORB-SLAM3, обеспечивают высокую точность позиционирования и построения карты в средах, насыщенных визуальными особенностями (highly-textured). В таких условиях ошибка ATE не превышает 1% от пройденного пути, что подтверждает высокую точность системы [5]. Однако в визуально бедных или однородных пространствах (например, белые стены, длинные пустые коридоры), а также при быстрых движениях камеры, вызывающих размытость изображения, точность существенно снижается [5, 7]. Анализ полученных данных позволил выявить основные технологические трудности: накопление ошибки (drift) при длительных миссиях из-за итеративного характера оценки поз, а также высокие вычислительные затраты на извлечение и сопоставление признаков, оптимизацию графа поз и прочие процессы. Эти факторы ограничивают применение подобных алгоритмов на маломощных вычислительных платформах, типичных для компактных БПЛА [3, 7].

В целом, проведенные исследования подтвердили, что визуальный SLAM является зрелой и надежной технологией для навигации в неизвестных, но преимущественно статических средах. Тем не менее, для устойчивой работы в реальных условиях необходимо решить ряд проблем. К наиболее существенным относятся: чувствительность к динамическим объектам (люди, транспорт), способным вносить искажения в карту; отсутствие устойчивых механизмов повторной локализации после потери трека; необходимость интеграции визуальных данных с показаниями инерциальных датчиков для компенсации кратковременных потерь изображения и повышения общей надежности системы [5]. В перспективе развитие данной области связано с внедрением методов глубокого обучения, направленных на формирование устойчивых

дескрипторов и автоматическую семантическую сегментацию сцены, что позволит отделять статичные элементы от движущихся и повышать стабильность картографирования [7]. Особое внимание также уделяется созданию оптимизированных реализаций SLAM, способных функционировать в режиме реального времени на ограниченных аппаратных ресурсах, что является необходимым условием для коммерческого внедрения технологии в серийных БПЛА.

Результаты проведённой работы подтвердили возможность и высокую эффективность использования визуального SLAM для автономной навигации беспилотных аппаратов в условиях недоступности спутниковых сигналов. Были обобщены ключевые преимущества технологии: независимость от внешней инфраструктуры, способность формировать детализированные трёхмерные модели окружения в реальном времени и относительная доступность сенсорного оборудования. Одновременно были выявлены основные ограничения, включая зависимость от условий освещения и текстуры, вычислительную сложность и уязвимость к динамическим изменениям сцены [1, 3]. Эти результаты определяют направления дальнейших исследований: разработка легковесных алгоритмов, адаптированных для встроенных систем; интеграция мультисенсорных данных (видео + IMU + лидар); повышение семантической осведомленности SLAM-систем для надежной работы в динамичных и непредсказуемых средах. Реализация данных направлений позволит преодолеть существующие барьеры и приблизить массовое применение автономных БПЛА в экономически и технологически значимых областях.

Список литературы:

1. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous localization and mapping: part I. *IEEE* Robotics & Automation Magazine, 2006, vol. 13(2), pp. 99-110. [Электронный ресурс] // URL: https://doi.org/10.1109/MRA.2006.1638022 (Дата обращения 20.11.2025)

2. Burri M., Nikolic J., Gohl P., Schneider T. The EuRoC micro aerial vehicle datasets. The International Journal of Robotics Research, 2016, vol. 35(10), pp. 1157-1163.

[Электронный ресурс] // URL: https://www.researchgate.net/publication/291954561 (Дата обращения 20.11.2025)

3. Mur-Artal R., Tardós J.D. ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo and RGB-D Cameras. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, vol. 33(5), pp. 1255–1262. [Электронный ресурс] // URL: https://doi.org/10.1109/TRO.2017.2705103 (Дата обращения 21.11.2025)