DOI: 10.58168/IntInfSys2026_111-116
УДК 629.7.052.6

ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА НАВИГАЦИИ БПЛА В УСЛОВИЯХ ОТКАЗА GNSS: КОМБИНАЦИЯ ВИЗУАЛЬНОЙ ОДОМЕТРИИ И ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

И.Н. Занин[1], Е.А. Аникеев[1], А.В. Акименко[1]

[1]ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

Аннотация. В статье рассматривается автономная навигация БПЛА в условиях отсутствия GNSS. Предложена гибридная визуально-инерциальная система на базе расширенного фильтра Калмана. Основной акцент сделан на коррекции масштабного дрейфа монокулярной камеры и повышении робастности алгоритмов. Подход обеспечивает точность, достаточную для городских миссий и поисково-спасательных операций.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, визуальная одометрия, инерциальная навигация, GNSS, расширенный фильтр Калмана, VIO, сенсорная фузия, масштабный фактор.

HYBRID UAV NAVIGATION SYSTEM IN GNSS-DENIED CONDITIONS: COMBINATION OF VISUAL ODOMETRY AND INERTIAL MEASUREMENTS

I.N. Zanin[1], E.A. Anikeev[1], A.V. Akimenko[1]

[1]Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

Abstract. This paper addresses the autonomous navigation of unmanned aerial vehicles (UAVs) in GNSS-denied environments. A hybrid visual-inertial system based on an Extended Kalman Filter is proposed. The primary focus is on correcting the scale drift of a monocular camera and enhancing the robustness of the algorithms. The proposed approach ensures an accuracy level sufficient for urban missions and search-and-rescue operations.

Keywords: unmanned aerial vehicle, visual odometry, inertial navigation, GNSS, Extended Kalman Filter, VIO, sensor fusion, scale factor.

© Занин И. Н., Аникеев Е. А., Акименко А. В., 2026

Широкое внедрение беспилотных летательных аппаратов в различные сферы деятельности, от мониторинга сельскохозяйственных угодий до поисково-спасательных операций в урбанизированных зонах, выявило критическую зависимость большинства коммерческих и промышленных дронов от сигналов глобальных навигационных спутниковых систем, таких как GPS, GLONASS или Galileo. Однако в ряде сценариев использование GNSS оказывается невозможным или неэффективным. К таким сценариям относятся полеты внутри помещений, в плотной городской застройке, вблизи высоковольтных линий электропередач, а также в условиях применения средств радиоэлектронной борьбы, приводящих к глушению или спуфингу навигационных сигналов [1].

В отсутствие внешнего позиционирования БПЛА вынужден полагаться на собственные бортовые сенсоры. Традиционно для решения этой задачи используются инерциальные навигационные системы, состоящие из акселерометров и гироскопов. Однако недорогие микроэлектромеханические системы, устанавливаемые на большинство легких БПЛА, характеризуются значительными шумами и смещениями нуля. Интегрирование зашумленного сигнала акселерометра для получения скорости и позиции приводит к квадратичному накоплению ошибки во времени, что делает чистую инерциальную навигацию непригодной для длительных миссий [2].

Альтернативным или дополняющим подходом является визуальная одометрия (VO), которая оценивает перемещение аппарата путем анализа последовательности изображений с бортовой камеры. VO не подвержена дрейфу в долгосрочной перспективе при наличии достаточного количества визуальных признаков, но страдает от проблем с оценкой абсолютного масштаба и чувствительна к изменениям освещенности, быстрому движению и отсутствию текстуры на поверхностях [3].

Целью данной работы является обзор и систематизация методов построения гибридных систем навигации, объединяющих преимущества визуальной одометрии и инерциальных измерений. В статье анализируются архитектуры тесного и слабого сопряжения сенсоров, рассматриваются методы решения проблемы масштаба и оценивается потенциальная точность таких систем в условиях отказа GNSS.

Инерциальная навигационная система определяет положение объекта путем двойного интегрирования измерений линейного ускорения. Уравнение движения в инерциальной системе координат может быть записано как:

$$p(t)=p_0+v_0t+\int_0^t\int_0^\tau\left(a(\xi)-b_a(\xi)-n_a(\xi)\right)d\xi d\tau$$

где: p(t) – вектор позиции;

v_0 – начальная скорость;

a – измеренное ускорение;

b_a – смещение нуля акселерометра;

n_a – шум измерения [4].

Даже небольшие постоянные смещения b_a приводят к ошибке позиции, растущей пропорционально t^2. Для MEMS-датчиков типичное смещение может составлять десятки миллигравитаций, что приводит к ошибке в несколько метров уже через несколько секунд после потери внешнего сигнала корректировки. Гироскопы, измеряющие угловую скорость, также имеют дрейф, который приводит к ошибке в определении ориентации, что, в свою очередь, неправильно проецирует вектор ускорения в глобальную систему координат, усугубляя ошибку позиции.

Визуальная одометрия решает задачу оценки относительного перемещения камеры между кадрами. В случае использования монокулярной камеры система способна восстановить траекторию только с точностью до неизвестного масштабного коэффициента s. Это фундаментальное ограничение связано с тем, что одно и то же изменение размера объекта на изображении может быть вызвано как приближением камеры, так и использованием объектива с другим фокусным расстоянием, или же движением объекта меньшего размера на том же расстоянии [5].

Математически, если истинное перемещение равно ΔT, то визуальная одометрия оценивает его как $\Delta T_{est}=s\cdot\Delta T$. Без внешней информации определить s невозможно. Кроме того, VO требует наличия достаточного количества контрастных точек интереса на изображении для надежного отслеживания. В условиях однородных поверхностей или при быстром вращении БПЛА трекинг теряется, что приводит к накоплению ошибки или полному отказу системы [6].

Для компенсации недостатков каждого из методов применяется сенсорная фузия. Существует два основных подхода к интеграции данных: слабое сопряжение и тесное сопряжение.

При слабом сопряжении визуальная одометрия и инерциальная навигация работают как независимые модули. VO выдает оценку относительного переме-

щения, которая затем используется как измерение для фильтра Калмана, прогнозирующего состояние на основе данных IMU. Этот подход проще в реализации, но менее точен, так как не учитывает корреляцию ошибок между сенсорами на низком уровне [7].

Тесное сопряжение предполагает совместную обработку сырых данных с камеры и данных IMU в рамках единого оптимизационного процесса или фильтра. Наиболее распространенным математическим аппаратом для этого является Расширенный фильтр Калмана или оптимизация скользящего окна, используемая в таких системах, как OKVIS или VINS-Mono.

В архитектуре тесного сопряжения состояние системы x включает в себя не только позицию p, скорость v и ориентацию q, но и смещения датчиков IMU (b_a,b_g), а также, что критически важно, обратный масштабный фактор или глубину наблюдаемых точек.

$$x=[p,v,q,b_a,b_g,\lambda]$$

где λ – параметр, связанный с масштабом или глубиной точек.

Ключевым преимуществом интеграции IMU с монокулярной камерой является возможность восстановления абсолютного масштаба траектории. Акселерометр измеряет ускорение в физических единицах ($м/с^2$). Сравнивая величину ускорения с показаниями акселерометра, фильтр может оценить масштабный коэффициент s [8].

Процесс инициализации VIO-системы является критическим этапом, который требует от БПЛА выполнение определенных маневров. Данный фактор приводит к затруднению оценки масштабов [8].

Не менее важной проблемой является синхронизация сенсоров, поскольку камеры и IMU часто имеют разные частоты.

Реализация VIO на борту легкого БПЛА ограничена вычислительными ресурсами, так как использование полноценных алгоритмов SLAM, часто избыточно. Поэтому на практике чаще применяются алгоритмы визуальной одометрии без сохранения глобальной карты, либо с использованием локальных карт небольшого размера.

Для снижения нагрузки на процессор применяются методы оптимизации. Это позволяет сохранять точность оценки текущих параметров. Также перспективным направлением является использование нейросетевых подходов которые могут работать эффективнее традиционных геометрических методов, интегрированных в современные бортовые компьютеры.

Гибридные системы навигации, сочетающие визуальную одометрию и инерциальные измерения, представляют собой наиболее перспективное решение для обеспечения автономности БПЛА в условиях отказа GNSS.

Список литературы

1. Чан Ю., Чэн Ю., Манзур У., Мюррей Дж. Обзор автономной навигации БПЛА в условиях отсутствия GPS // Робототехника и автономные системы. – 2023. – №1, том 170. – С. 28–40, DOI: 10.1016/j.robot.2023.104533.
2. Хан М.К., Улла А. Влияние интернета вещей и его воздействие на библиотечные услуги: обзор // Инверж-журнал социальных наук. – 2024. – №2, том 3. – С. 63–72, DOI: 10.63544/ijss.v3i2.94.
3. Али Б., Садеков Р.Н., Цодокова В.В. алгоритмы навигации беспилотных летательных аппаратов с использованием систем технического зрения // Гироскопия и навигация. - 2022. - №4 (119), том 30. - С. 87-105, DOI: 10.17285/0869-7035.00105.
4. Ли Дж.Ч., Чэнь Ч.Ч., Шэнь Ч.Т., Лай Ю.Ч. Оценка масштаба на основе ориентиров и коррекция визуально-инерциальной одометрии для БПЛА вертикального взлёта и посадки в условиях отсутствия GPS // Сенсоры. – 2022. – №24, том 22. – С. 9654, DOI: 10.3390/s22249654.
5. Бывших Д.М., Зеленская С.Г., Перцев Ю.А. Оценка состояния научно-технического и технологического задела для создания комплексов радиоэлектронной борьбы // Моделирование систем и процессов. - 2025. - №3, том 18. - С. 28-40, DOI: 10.12737/2219-0767-2025-18-3-28-40.
6. Корсаков М.П., Гончарова Е.В., Курносов И.А., Замараев И.В. Обзор методов визуальной навигации и алгоритмов планирования пути для беспилотных летательных аппаратов // Главный механик. - 2024. - №6 (250), том 21. - С. 25-33.
7. Степанов Д. Н. Методики сопоставления особых точек в задаче визуальной навигации БПЛА // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Вычислительная математика и информатика». 2015. Т. 4, № 4. С. 32–47.
8. Джаррая И., Аль-Батати А., Кадри М.Б., Абделькадер М., Аммар А., Булила У., Кубаа А. Навигация беспилотных летательных аппаратов в условиях отсутствия GNSS: анализ вычислительной сложности, слияния сенсорных данных и методов локализации // Спутниковая навигация. – 2025. – №1, том 6. – С. 9, DOI: 10.1186/s43020-025-00162-z.

References

1. Chang Y., Cheng Y., Manzoor U., Murray J. A Review of UAV Autonomous Navigation in GPS-Denied Environments // Robotics and Autonomous Systems. – 2023. – No. 1, Vol. 170. – P. 28–40, DOI: 10.1016/j.robot.2023.104533.
2. Khan M.K., Ullah A. Implication of IoT and Its Impact on Library Services: An Overview // Inverge Journal of Social Sciences. – 2024. – No. 2, Vol. 3. – P. 63–72, DOI: 10.63544/ijss.v3i2.94.
3. Lee J.Ch., Chen Ch.Ch., Shen Ch.Te., Lai Y.Ch. Landmark-Based Scale Estimation and Correction of Visual Inertial Odometry for VTOL UAVs in a GPS-Denied Environment // Sensors. – 2022. – No. 24, Vol. 22. – P. 9654, DOI: 10.3390/s22249654.
4. Ali B., Sadekov R.N., Tsodokova V.V. Algorithms for Navigation of Unmanned Aerial Vehicles Using Computer Vision Systems // Gyroscopy and Navigation. – 2022. – No. 4 (119), Vol. 30. – P. 87–105, DOI: 10.17285/0869-7035.00105.
5. Byvykh D.M., Zelenskaya S.G., Pertsev Yu.A. Assessment of the Scientific, Technical and Technological Readiness Level for the Development of Electronic Warfare Systems // Modeling of Systems and Processes. – 2025. – No. 3, Vol. 18. – P. 28–40, DOI: 10.12737/2219-0767-2025-18-3-28-40.
6. Korsakov M.P., Goncharova E.V., Kurnosov I.A., Zamaraev I.V. Review of Visual Navigation Methods and Path Planning Algorithms for Unmanned Aerial Vehicles // Chief Mechanic. – 2024. – No. 6 (250), Vol. 21. – P. 25–33.
7. Stepanov D.N. Methods of Matching Key Points in the Problem of Visual Navigation of UAVs // Bulletin of South Ural State University. Series "Computational Mathematics and Informatics". – 2015. – Vol. 4, No. 4. – P. 32–47.
8. Jarraya I., Al-batati A., Kadri M.B., Abdelkader M., Ammar A., Boulila W., Koubaa A. GNSS-Denied Unmanned Aerial Vehicle Navigation: Analyzing Computational Complexity, Sensor Fusion, and Localization Methodologies // Satellite Navigation. – 2025. – No. 1, Vol. 6. – P. 9, DOI: 10.1186/s43020-025-00162-z.