

УДК 004.942; 631.3

<https://www.doi.org/10.47813/nto.5.2024.2004>

EDN [CGGOHK](#)

Анализ режимов совместной навигации при роевом применении БПЛА в системах точного земледелия

Д.И. Ковалев^{1,2}, Е.В. Туева¹, С.Р. Кузьмик^{3*}

¹Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

²Национальный исследовательский университет "Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства", Ташкент, Узбекистан

³Федеральный исследовательский центр Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия

*E-mail: seregagg111@mail.ru

Аннотация. В статье представлен анализ режимов совместной навигации при роевом применении БПЛА в системах точного земледелия с учетом особенностей существующих методов управления роем БПЛА. Групповое применение сельскохозяйственных БПЛА эффективно для систем точного земледелия, и получило развитие на различных этапах агротехнологических операций для точного внесения удобрений и пестицидов при обработке полей. Такое применение способствует как высокой эффективности систем точного земледелия, так и экологической устойчивости и безопасности. Для роевого применения БПЛА рассмотрены режимы совместной навигации на основе связи и режимы визуальной совместной навигации. Целесообразно выполнять анализ режимов совместной навигации при роевом применении БПЛА в системах точного земледелия, оценивая опыт реализации передовых технологий навигации и инновационного развития в сфере автономного и точного земледелия. Опыт реализации и уровень развития режимов совместной навигации при роевом применении БПЛА в точном земледелии позволяет выявить пути повышения эффективности взаимодействия БПЛА в рое с учетом внедрения систем точного земледелия в современных условиях.

Ключевые слова: роевое применение БПЛА, точное земледелие, экологическая устойчивость, безопасность.

Analysis of collaborative navigation modes in swarm application of UAVs in precision farming systems

D.I. Kovalev^{1,2}, E.V. Tueva¹, S.R. Kuzmik^{3*}

¹Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

²National Research University "Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers", Tashkent, Uzbekistan

³Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Krasnoyarsk, Russia

*E-mail: seregagg111@mail.ru

Abstract. The article presents an analysis of collaborative navigation modes in the swarm application of UAVs in precision farming systems, taking into account the features of existing UAV swarm management methods. Collaborative use of agricultural UAVs is effective for precision farming systems, and has been developed at various stages of agro-technological operations for precise application of fertilizers and pesticides during field processing. Such application contributes to both high efficiency of precision farming systems and environmental sustainability and safety. For the swarm application of UAVs, communication-based collaborative navigation modes and visual collaborative navigation modes are considered. It is advisable to analyze the collaborative navigation modes in the swarm application of UAVs in precision farming systems, assessing the experience of implementing advanced navigation technologies and innovative development in the field of autonomous precision farming. The experience of implementation and the level of development of collaborative navigation modes in the swarm application of UAVs in precision farming allows us to identify ways to improve the efficiency of UAV interaction in a swarm, taking into account the introduction of precision farming systems in modern conditions.

Keywords: UAV swarm applications, precision farming, environmental sustainability, safety.

1. Введение

Для анализа режимов совместной навигации при роевом применении БПЛА в системах точного земледелия необходимо выделить особенности существующих методов управления роем БПЛА [1-6]. Ряд авторов показывает, что организация совместной навигации существенно зависит от транспортно-технологических циклов (ТТЦ), выполняемых различными БПЛА в рое [7-13]. Необходимо осуществить согласованность ТТЦ каждого БПЛА и оптимизировать затраты на их реализацию [13-19]. В работе [20] методологии навигации роя БПЛА разделяются на две основные категории: абсолютная навигация и относительная навигация. Абсолютная навигация подразумевает сегментацию цели, поставленной перед роем БПЛА (миссии) на несколько более мелких задач. Такая сегментация выполняется наземным комплексом управления либо до, либо во время полета роя БПЛА [22-24]. Эти задачи создаются с использованием соответствующих алгоритмов управления / планирования траектории и передаются на каждый БПЛА, который затем выполняет назначенные задачи в рамках роевого применения группы БПЛА [25-27]. Этот режим можно далее подразделить на режим совместной работы по назначению задач и режим совместной работы по планированию траектории.

Относительная навигация, неотъемлемая часть обеспечения навигации роя БПЛА, реализуется на базе бортовых датчиков, которые фиксируют информацию об относительном положении, ориентации и условиях полета соседних или основного БПЛА во время полета роя. Каждый БПЛА в рое имеет возможность корректировать свое состояние и статус полета, а также положение на основе предварительно установленных ограничений, тем самым облегчая относительную позиционную навигацию роя БПЛА [20, 28-30]. Этот режим подразделяется на режим совместной навигации связи и режим визуальной совместной навигации.

2. Материалы и методы

В качестве материалов исследования выступали такие источники, как базы данных Google Scholar, ScienceDirect, Elibrary (РИНЦ), Scopus, IEEE Xplorer и Wiley. Объектами рассмотрения были методы и режимы совместной навигации при роевом применении БПЛА в системах точного земледелия. Материал исследований по технологии совместной навигации БПЛА отражает две основные методологии,

фокусирующиеся на режимах абсолютной навигации и относительной навигации. Для них выполняется обобщение методологий с учетом актуальной информации из анализируемых источников. Отметим, что сопоставление различных методологий навигации с различными эксплуатационными особенностями БПЛА, присущими их применению в системах точного земледелия, проводится на основе экспериментальных результатов. Это позволит определить наиболее перспективные режимы совместной навигации при роевом применении БПЛА в системах точного земледелия.

3. Результаты анализа режимов совместной навигации БПЛА

В настоящее время режим совместной навигации при роевом применении БПЛА в точном земледелии на основе средств связи является основным, как отмечают авторы [20]. Это относится к процессу, при котором рой БПЛА в полете не полагается исключительно на наземные станции или спутниковый сегмент для организации управления [13, 30-33]. В этом случае каждый БПЛА, используя высокоточную информацию, полученную с датчиков (местоположение и ориентация), рассматривает себя как узел связи [34]. С помощью модулей беспроводной передачи Bluetooth, ZigBee или WiFi внутри роя БПЛА для обмена информацией устанавливается беспроводная коммуникационная сеть. Такое сетевое взаимодействие способствует эффективному сотрудничеству различных БПЛА [35]. Такая совместная навигация на основе связи позволяет эффективно повысить общую эксплуатационную способность роя БПЛА и позволяет масштабировать систему, и она эффективно помогает другим методам связи.

Однако, с ростом количества БПЛА в рое растет и объем генерируемых ими данных. Существующая архитектура роя БПЛА, характеризующаяся протоколами MAC и алгоритмами маршрутизации, сталкивается с трудностями при обработке этого большого объема данных, что влияет на общее качество работы всей системы, так как снижается микропроцессорная производительность роя БПЛА за счет роста внутри- и межпроцессорных накладных расходов [16-18]. С целью преодоления указанных трудностей в работе [20] представлена модель глубокого Q-обучения (DQN), разработанная для оптимизации производительности всей сети с учетом динамической топологии роя и изменяющихся во времени условий связи. В исследовании [36] была предложена многометодная комбинированная стратегия связи БПЛА, которая помимо использования традиционной архитектуры БПЛА-к-БПЛА (U2U) для формирования

сети также интегрировала стратегию сотовой связи БПЛА, рассматривая каждый БПЛА как релейный узел для передачи данных. Для такой стратегии авторами представлена иллюстрация метода управления роем БПЛА на основе беспроводного маршрутизатора.

Режим совместной навигации на основе связи при роевом применении БПЛА позволяет строить сеть независимо от других заранее установленных сетевых объектов. Использование данного режима позволяет автоматически формировать сеть в любом рабочем сценарии и динамически изменять структуру сети в соответствии с конкретными эксплуатационными требованиями. Это способствует тому, что совместная навигация связи БПЛА в рое становится надежной и обладает способностью к помехоустойчивости [26, 27, 37]. Кроме того, для данного режима характерна высокая интеллектуальность и универсальность функционала. Однако можно отметить ряд недостатков, приведенных ниже.

Сетевые протоколы нуждаются в совершенствовании. В настоящее время скорость БПЛА при совместной навигации в режиме связи в основном находится в диапазоне от 5 м/с до 15 м/с. На более высоких скоростях быстрое перемещение БПЛА приводит к частым изменениям в топологии сети связи, увеличивая накладные расходы на сеть связи и способствуя перегрузке по обрабатываемым данным. Это существенно отражается на скорости передачи данных в режиме реального времени.

Безопасность связи обеспечивается на недостаточном уровне. Беспроводные соединения и мобильная топология в сети роя БПЛА в различной степени уязвимы по безопасности. Кроме того, при кооперативном навигационном полете роя БПЛА из-за сложности операционной среды системы точного земледелия могут возникнуть проблемы безопасности из-за возникающих радиочастотных помех и ряда прочих факторов.

Значительная информационная нагрузка приводит к ухудшению производительности в реальном времени. Во время полета БПЛА в рое на уровне всей системы кооперации генерируется значительный объем избыточной информации каждым БПЛА. Учитывая ограниченную существующую полосу пропускания беспроводной сети передачи данных, она не может быстро обрабатывать информацию. Это критично влияет на эффективность передачи информации, что приводит к значительной задержке при взаимодействии между БПЛА в группе.

Следует отметить также режим визуальной совместной навигации БПЛА, так как недавние достижения в области алгоритмов распознавания, связанных с машинным зрением, выдвинули визуальную навигацию в центр внимания как важную тему исследований, что отмечается как в отечественных, так и в международных публикациях, посвященных данной области навигации БПЛА [15, 38]. По сравнению с обычными радиодатчиками визуальные датчики обладают преимуществом компактности и экономической эффективности. В частности, изображения, собранные визуальными датчиками, содержат большой объем информации, что в сочетании со все более сложными визуальными алгоритмами делает визуальную навигацию высокоэффективным методом.

Во время визуальной совместной навигации в рое БПЛА «захватывают» информацию о характеристиках других БПЛА с помощью визуальных датчиков. Затем эта информация обрабатывается с помощью алгоритмов на основе заранее разработанных моделей, методов фильтрации и других методов для визуального отслеживания объектов с учетом соответствующих требований системы точного земледелия [1, 17, 21-23]. Оценивая свое состояние движения на основе положения в воздухе, БПЛА корректируют такие параметры, как направление полета или скорость, чтобы придерживаться заданных ограничений и корректно выполнять, а также завершать навигационный полет в рамках роевого взаимодействия БПЛА.

В режиме визуальной совместной навигации для роя БПЛА основная информация управления для БПЛА полностью формируется из обрабатываемой информации о характеристиках, полученных бортовыми визуальными датчиками. Таким образом, результаты визуального анализа оказывают непосредственное влияние на качество и безопасность полета БПЛА. Ключевая технология визуальной кооперативной навигации для роев БПЛА включает в себя извлечение информации о характеристиках БПЛА на основе изображений, собранных визуальными датчиками, а также координацию этой извлеченной информации с инерциальными навигационными данными БПЛА. Это обеспечивает возможность выполнения полета с визуальным отслеживанием БПЛА в рое. Режим визуальной кооперативной навигации для роевого применения БПЛА разделяется на три типа: визуально управляемая навигация, визуальная навигация, объединяющая информационные потоки из нескольких источников, и визуальная навигация типа V-SLAM.

Визуальная одновременная локализация и картирование (V-SLAM) — это технология, которая использует визуальные датчики для одновременного выполнения локализации и картирования. Этот метод успешно используется для наземных роботов, но он также имеет важные приложения для локализации и навигации беспилотных летательных аппаратов [39]. Компоненты V-SLAM: данные с датчиков, визуальная одометрия, нелинейная оптимизация и построение карты [40].

4. Заключение

Рассматривая режимы совместной навигации при роевом применении БПЛА в системах точного земледелия, отметим, что существующие методологические подходы обладают как сильными, так и слабыми сторонами. Обобщая проанализированные различные реализации системы взаимодействия БПЛА в рое на текущем этапе разработки, отметим следующее, касаясь анализа режимов совместной навигации БПЛА на основе систем связи. В данном режиме система демонстрирует возможность автоматического построения сети, динамически корректирует структуру сети в соответствии с конкретными эксплуатационными требованиями и обладает высокой помехоустойчивостью. Система демонстрирует высокую степень интеллекта и предлагает разнообразные функциональные возможности. Однако требуется повышение пропускной способности сети и сетевых протоколов и в настоящее время демонстрируется слабая производительность в режиме реального времени из-за высоких информационных нагрузок.

Для режима визуальной совместной навигации БПЛА характерно то, что такая система при роевом применении БПЛА может эффективно работать в зонах, где отсутствует GPS, тем самым расширяя область своего применения. При этом визуальный датчик отличается компактным размером и доступной стоимостью. Однако визуальная навигационная система может допускать ошибки отслеживания, что требует высокой надежности как визуального датчика, так и алгоритма визуального распознавания.

В связи со сложностью операционной среды и особенностей использования роя БПЛА в пределах системы точного земледелия требуется дальнейшее обобщение и анализ практических сценариев роевого применения БПЛА в различных режимах совместной навигации на текущем этапе разработки.

Список литературы

1. Kovalev I. Digitalization of UAV transport and technological cycles in smart agriculture / I. Kovalev, D. Kovalev, K. Astanakulov et al. // E3S Web of Conferences: VIII International Conference on Advanced Agritechologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023), Krasnoyarsk, 29–31 March 2023. – Vol. 390. – EDP Sciences: EDP Sciences. – 2023. – P. 03014.
<https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202339003014>
2. Каштанов В.В. Анализ организации связи с применением беспилотных летательных аппаратов малой дальности / В.В. Каштанов, В.А. Немтинов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2022. – Vol. 28(4). – P. 606-614.
3. Kartsan I.N. Applying filtering for determining the angular orientation of spinning objects during interference / I.N. Kartsan, A.E. Goncharov, P.V. Zelenkov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, 11–15 April 2016. – Vol. 155. – Krasnoyarsk: Institute of Physics Publishing, 2016. – P. 012020.
<https://www.doi.org/10.1088/1757-899X/155/1/012020>
4. Довгаль В.А. Анализ систем коммуникационного взаимодействия дронов, выполняющих поисковую миссию в составе группы / В.А. Довгаль, Д.В. Довгаль // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2020. – Vol. 4(271). – P. 87-94.
5. Смолин М.С. Исследование модели системы связи для "роя" БПЛА / М.С. Смолин, Ю.С. Хило, А.М. Голиков // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2018. – № 1-1. – С. 8-10. – EDN DXOYQJ.
6. Kovalev I.V. Model of the reliability analysis of the distributed computer systems with architecture "client-server" / I.V. Kovalev, P.V. Zelenkov, M.V. Karaseva et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: XVII International Scientific Conference "Reshetnev Readings", Krasnoyarsk, 12–14 November 2014. –Vol. 70. – Krasnoyarsk: Institute of Physics Publishing, 2015. – P. 012009.
<https://www.doi.org/10.1088/1757-899X/70/1/012009>
7. Ковалев И.В. Возможности использования инновационных космических технологий в прогрессивном растениеводстве / И.В. Ковалев, Н.В. Титовская, С.Н. Титовский // Проблемы современной аграрной науки: Материалы международной научной

- конференции, Красноярск, 15 октября 2019 года / Ответственные за выпуск: Валентина Леонидовна Бопп, Жанна Николаевна Шмелева. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2019. – С. 200-204.
8. Kovalev I. Conceptual basis for digitalization of specifications of transport and technological cycles of agricultural UAVs / I. Kovalev, D. Kovalev, K. Astanakulov et al. // E3S Web of Conferences: II International Conference on Environmental Technologies and Engineering for Sustainable Development (ETESD-II 2023), Tashkent, 13–15 September 2023. – Vol. 443. – Tashkent: EDP Sciences, 2023. – P. 06014. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202344306014>
 9. Ковалев И.В. Мультиверсионный метод повышения программной надежности информационно-телекоммуникационных технологий в корпоративных структурах / И.В. Ковалев, Р.В. Юнусов // Телекоммуникации и информатизация образования. – 2003. – № 2. – С. 50-55.
 10. Ковалев И.В. Анализ средств спецификации транспортно-технологических циклов БПЛА в умном сельском хозяйстве / И. В. Ковалев, Д. И. Ковалев, В. А. Подоплелова, М. Ф. Иконникова // Системы управления и информационные технологии. – 2023. – № 2(92). – С. 80-85.
 11. Engel E.A. Intelligent control system of autonomous objects / E.A. Engel, N.E. Engel, I.V. Kovalev et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 5th International Workshop on Mathematical Models and their Applications 2016, IWMMMA 2016, Krasnoyarsk, 07–09 November 2016. – Vol. 173. – Krasnoyarsk: Institute of Physics Publishing, 2017. – P. 012024. <https://www.doi.org/10.1088/1757-899X/173/1/012024>
 12. Kovalev I.V. GERT analysis of UAV transport technological cycles when used in precision agriculture / I.V. Kovalev, D.I. Kovalev, A.A. Voroshilova et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 1076, No. 1. – P. 012055. <https://www.doi.org/10.1088/1755-1315/1076/1/012055>
 13. Карцан И.Н. Проблемы анализа и синтеза структур сложных систем сетевого взаимодействия наземных пунктов управления космическими аппаратами / И.Н. Карцан, И.В. Ковалев, С.В. Ефремова // Решетневские чтения. – 2017. – Т. 1. – С. 390-391.
 14. Kovalev D.I. Analysis of technologies for using the CE20 UAV as part of unmanned aerial plant protection systems / D.I. Kovalev, K.D. Astanakulov, I.V. Kovalev // Modern

- Innovations, Systems and Technologies. – 2024. – Vol. 4(1). – P. 0301-0311.
<https://doi.org/10.47813/2782-2818-2024-4-1-0301-0311>
15. Mikhailov I.R. Methods of remote sensing of the earth in the forest industry / I.R. Mikhailov, N.A. Abramov, S.N. Dolmatov // Modern Innovations, Systems and Technologies. – 2023. – Vol. 3(3). – P. 0301–0310.
<https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-3-0301-0310>
16. Kovalev D.I. Review of system parameter specifications for microprocessor performance analysis of UAV swarm applications / D.I. Kovalev // Modern Innovations, Systems and Technologies. – 2024. – Vol. 4(3). – P. 0101-0120.
<https://doi.org/10.47813/2782-2818-2024-4-3-0101-0120>
17. Kovalev D.I. Use of UAV in precision farming: a review of Agras MG-1S octocopter test results / D.I. Kovalev, K. D. Astanakulov, E.V. Tueva // Informatics. Economics. Management. – 2024. – Vol. 3(3). – P. 0201–0214. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2024-3-3-0201-0214>
18. Losev V.V. Overview of promising projects in the field of sustainable territorial development and global cyber-physical systems / V.V. Losev, D.I. Kovalev, A.A. Voroshilova, E.V. Tueva // Informatics. Economics. Management. – 2023. – Vol. 2(2). – P. 0401-0413. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2023-2-2-0401-0413>
19. Kovalev D.I. GERT-analysis of transport technological cycles of unmanned aerial vehicles / D.I. Kovalev, V.A. Podoplelova, T.P. Mansurova // Informatics. Economics. Management. – 2022. – Vol. 1(1). – P. 0110-0120.
<https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0110-0120>
20. Ming R. Comparative Analysis of Different UAV Swarm Control Methods on Unmanned Farms / R. Ming, R. Jiang, H. Luo, T. Lai, E. Guo, Z. Zhou // Agronomy. – 2023. – Vol. 13(10). – P. 2499. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102499>
21. Yablokova A. Environmental safety problems of swarm use of UAVs in precision agriculture / A. Yablokova, D. Kovalev, I. Kovalev et al. // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 471. – P. 04018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447104018>
22. Kovalev I.V. Productivity analysis of agricultural UAVs by field crop spraying / I.V. Kovalev, D.I. Kovalev, K.D. Astanakulov et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2023. – Vol. 1284, No. 1. – P. 012026.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1284/1/012026>

23. Ковалев И.В. К вопросу формирования блочно-модульной структуры системы управления беспилотных летательных объектов / И.В. Ковалев, В.В. Лосев, М.В. Сарамуд и др. // Современные инновации, системы и технологии. – 2021. – Т. 1, № 3. – С. 54-71. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2021-1-3-48-64>
24. Saramud M.V. Software interfaces and decision block for the execution environment of multi-version software in real-time operating systems / M.V. Saramud, I.V. Kovalev, V.V. Losev, M.O. Petrosyan // International Journal on Information Technologies and Security. – 2018. – Vol. 10, No. 1. – P. 25-34.
25. Kovalev I.V. Analysis of system parameters in a microprocessor performance model of a swarm of agricultural spraying UAVs / I.V. Kovalev, D.I. Kovalev, K.D. Astanakulov et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2023. – Vol. 1284, No. 1. – P. 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1284/1/012030>
26. Русаков М.А. Многоэтапный анализ архитектурной надежности в сложных информационно-управляющих системах: специальность 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Русаков Михаил Александрович. – Красноярск, 2005. – 168 с.
27. Ковалев И.В. Использование метода роя частиц для формирования состава мультиверсионного программного обеспечения / И.В. Ковалев, Е.В. Соловьев, Д.И. Ковалев и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 3. – С. 1-6.
28. Zhang Y. Research on Evolutionary Impetus and Path of Unmanned Farm / Y. Zhang, L. Liu, D. Li, M. Niu // Shandong Agric. Sci. – 2020. – Vol. 52. – P. 160-166.
29. Kovalev I.V. Analysis of the current situation and development trend of the international cargo UAVs market / I.V. Kovalev, A.A. Voroshilova, M.V. Karaseva // Journal of Physics: Conference Series : International Scientific Conference "Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019", Krasnoyarsk, 25–27 September 2019 / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. – Vol. 1399. – Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. – P. 55095. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055095>

30. Wu H. Cognitive WSN Control Optimization for Unmanned Farms Under the Two-Layer Game / H. Wu, X. Han, H. Zhu // IEEE Sens. J. – 2022. – Vol. 22. – P. 1775-1785.
31. Yuronen Y.P. The concept of creation of information system for environmental monitoring based on modern GIS-technologies and earth remote sensing data / Y.P. Yuronen, E.A. Yuronen, V.V. Ivanov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific and Research Conference on Topical Issues in Aeronautics and Astronautics (Dedicated to the 55th Anniversary from the Foundation of SibSAU), Krasnoyarsk, 06–10 April 2015. – Vol. 94. – Krasnoyarsk: Institute of Physics Publishing, 2015. – P. 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/94/1/012023>
32. Liu W. Multi-UAV Cooperative Task Assignment Based on Orchard Picking Algorithm / W. Liu, X. Zheng, H. Garg // Int. J. Comput. Int. Syst. – 2021. – Vol. 14. – P. 1461.
33. Kovalev I. Cost-effectiveness analysis of the implementation of transport and technological cycles in the swarm use of agricultural UAVs / I. Kovalev, D. Kovalev, K. Astanakulov et al. // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 471. – P. 04017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447104017>
34. Li D. System Analysis and Development Prospect of Unmanned Farming / D. Li, L. Zhen // J. Agric. Mach. – 2020. – Vol. 51. – P. 1-12.
35. Wang T. From Smart Farming towards Unmanned Farms: A New Mode of Agricultural Production / T. Wang, X. Xu, C. Wang, Z. Li, D. Li // Agriculture. – 2021. – Vol. 11. – P. 145.
36. Gao S. Multi-UAV reconnaissance task allocation for heterogeneous targets using grouping ant colony optimization algorithm / S. Gao, J. Wu, J. Ai // Soft Comput. – 2021. – Vol. 25. – P. 7155-7167.
37. Meng K. Multi-UAV Collaborative Sensing and Communication: Joint Task Allocation and Power Optimization / K. Meng, X. He, Q. Wu, D. Li // IEEE Trans. Wirel. Commun. – 2023. – Vol. 22. – P. 4232-4246.
38. Ivanov L.I. Review of Modern UAV Detection Algorithms Using Methods of Computer Vision / L.I. Ivanov, N.A. Obukhova, P.S. Baranov // In Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIcon Rus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 27–30 January 2020. – P. 322-325.

39. Bala J.A. Advances in Visual Simultaneous Localisation and Mapping Techniques for Autonomous Vehicles: A Review / J.A. Bala, S.A. Adeshina, A.M. Aibinu // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – P. 8943.
40. Bala J.A. A Modified Visual Simultaneous Localisation and Mapping (V-SLAM) Technique for Road Scene Modelling / J.A. Bala, S. Adeshina, A.M. Aibinu // In Proceedings of the 2022 IEEE Nigeria 4th International Conference on Disruptive Technologies for Sustainable Development (NIGERCON), Lagos, Nigeria, 5–7 April 2022.