

УДК 004.896

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ И АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СОВМЕСТНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ И НАБОРА БЛА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ АГРАРНЫХ ОПЕРАЦИЙ

А.Л. Ронжин (*ronzhin@iias.spb.su*)

Санкт-Петербургский институт информатики и
автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург

Д.К. Ву (*vuquyenntk@gmail.com*)

В.В. Нгуен (*nguyenvanhvkt@gmail.com*)

О.Я. Соленая (*osolenaya@list.ru*)

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург

Аннотация. Рассмотрены проблемы проектирования подвижной роботизированной платформы, несущей набор беспилотных летательных аппаратов и содержащей контейнер для полезной нагрузки. Обсуждаются вопросы транспортировки роботов и совместной деятельности роботов с различным функционалом при решении аграрных задач. Приведена концептуальная модель конструкции подвижной платформы. Описаны основные этапы алгоритмической модели совместной работы подвижной платформы и набора привезенных беспилотных летательных аппаратов на рабочей территории.¹

Ключевые слова: коллаборативные роботы, агроботы, БЛА, групповое взаимодействие, навигация, манипуляторы.

Введение

Совместное функционирование групп гетерогенных роботов, а также их доставка/транспортировка к месту непосредственного решения прикладных задач являются одними из основных нерешенных проблем в области робототехники. Существующие решения в области группового управления роботизированных средств в основном решают задачи аддитивного усиления функционала гомогенных роботов. Например, увеличение суммарной тяговой мощности нескольких роботов; захват

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант №16-19-00044).

длинномерных объектов несколькими роботами; одновременный контроль распределенных объектов протяженной территории несколькими беспилотными летательными аппаратами (БЛА); ускорение мониторинга и составления картограмм местности за счет использования группы БЛА. Задачи же совместной деятельности роботов с разным функционалом при выполнении параллельных или последовательных операций над объектами рассматриваются еще не так часто и не имеют приемлемых решений.

При проектировании робототехнических средств разработчики в основном ориентируются на функциональные требования, предъявляемые к роботу для решения задач, выполняемых непосредственно в рабочей зоне. Доставка роботов как правило осуществляется не автоматически с привлечением ручного труда. Передвижение с места основного базирования роботов в рабочую зону своим ходом также обычно не предусматривается вследствие ограниченных бортовых энергетических ресурсов и относительно небольших, особенно для наземных робототехнических средств, скоростей передвижения.

В связи с вышеперечисленными двумя проблемами в рамках данного исследования ведется разработка прототипа роботизированной подвижной платформы, использующейся для транспортировки набора БЛА. Среди прочих требований к проектируемой платформе также предъявляется наличие средств контроля, обеспечения энергопитания БЛА для длительной работы и контейнера для полезной нагрузки, например, аграрной продукции или минеральных удобрений. Далее рассмотрим основные направления исследований, проводимые в области аграрной робототехники и группового взаимодействия.

1. Анализ современного состояния

Проблема совместной деятельности группы роботов и операторов сейчас активно обсуждается в России и за рубежом [Ющенко, 2016 и др.; Ronzhin, 2016 et al.]. Во главу угла при этом ставятся вопросы безопасности человеко-машинного взаимодействия, увеличение функциональных возможностей при выполнении операций совместно, за счет устранения влияния человеческого фактора и эмерджентности формируемой системы гетерогенных роботов.

Также робототехника активно внедряется в сельскохозяйственную отрасль, что вызвано во многом социоэкономическими и экологическими факторами. Робототехнические средства становятся особенно востребованными при мелкомасштабном сельском хозяйстве. Беспилотные летательные аппараты сейчас активно начинают использоваться для мониторинга угодий, составления картограмм урожайности земель и планирования зон внесения удобрений. Мультикоптеры, не требуя взлетно-

посадочной полосы, обладают высокой разрешающей способностью и поэтому имеют высокие перспективы широкого применения. В добавление к бортовой видеокамере мультикоптеры могут быть оснащены и другими сенсорными средствами, например: тепловизором, термометром, газовыми датчиками, гидролокаторами, датчиками скорости ветра, датчиками давления, инфракрасными и другими сенсорами.

Отличительной чертой аграрной робототехники является относительно устойчивая регулярность топологии рассадки обрабатываемых культур в отличие от других сфер применения роботов, где обслуживаемые объекты не имеют заранее известных координат и могут перемещаться в пространстве. Сейчас мировой рынок сельскохозяйственных роботов переживает значительный рост [Bechar, 2016 et al.; Holloway, 2014 et al.]. Роботы используются на многих этапах и в различных типах сельского хозяйства: полевые работы, животноводство, производство и сбор продуктов питания [Perez-Ruiz, 2014 et al.; Holloway, 2014 et al.]. Роботизация сельскохозяйственного производства вызвана необходимостью подъема производительности труда; обновление оборудования и техники, избавления работников от физически сложных задач. Наибольший прогресс в роботизации сельскохозяйственного производства в настоящее время виден в области точного земледелия (ТЗ), отличительной чертой которого является локальная дифференциация агротехнических воздействий с учетом пространственной вариабельности почвенных и иных факторов формирования урожая в пределах отдельного сельскохозяйственного поля (агроконтур) [Сидорова, 2012 и др.; Афанасьев, 2016 и др.].

С развитием БЛА начали изучаться задачи их применения не только для мониторинга территорий, но и физического взаимодействия со средой и ее объектами. Технические проблемы проектирования манипулятора для БЛА рассматриваются в ряде современных зарубежных работ [Kondak, 2015 et al.; Baizid, 2017 et al.; Aباunza, 2017 et al.]. Также существует ряд работ, где рассматривается вопрос о взаимодействии или посадке одиночного БЛА на мобильную платформу или судно [Андрейчук, 2016 и др.; Daly, 2015 et al.; Ioannou, 2008 et al.; Sanchez-Lopez, 2014 et al.].

Далее рассмотрим основные направления работ, проводимых в данном исследовании, учитывая полученный ранее задел в области проектирования бортовых вычислителей и робототехнических систем [Гапонов, 2016 и др.; Дашевский, 2015 и др.; Крючков, 2014 и др.; Павлюк, 2016 и др.; Ронжин, 2007 и др.].

2. Моделирование конструкции и функций подвижной роботизированной платформы с набором беспилотных летательных аппаратов

Отличительной особенностью разрабатываемой роботизированной платформы является наличие встроенных парковочных мест для нескольких БЛА. На данном этапе исследований приведем концептуальную модель платформы, учитывающую ее оснащение и конструктивные особенности. Основными конструктивными компонентами платформы являются: 1) шасси, обеспечивающая передвижение платформы по сельскохозяйственным угодиям; 2) мультисенсорная система для определения локальных препятствий при перемещении платформы; 3) система энергопитания, обеспечивающая необходимую мощность для потребления самой платформой и набором БЛА при возникновении необходимости их подзарядки; 4) навигационная система, состоящая из двух подсистем, одна из которых контролирует движение платформы между местом базирования и рабочей территорией на основе средств глобальной навигации, а вторая локальная система разворачивается непосредственно на рабочей территории перед началом проведения аграрной операции с использованием радионавигационных БЛА; 5) коммуникационная система, реализующая связь подвижной платформой с БЛА и базовой станций; 6) кузовная часть платформы, содержащая контейнер для полезной нагрузки, а также парковочные места для набора БЛА. Приведенный перечень основных компонентов обеспечивает функционирование платформы в автономных аграрных миссиях и совместную работу БЛА при обработке сельскохозяйственных объектов.

На текущий момент сформировано множество функций, реализуемых подвижной платформой с учетом ее конструктивных особенностей

$$F_P = \{f_1, f_2, \dots, f_8\}, \text{ где:}$$

f_1 - движение платформы в двух режимах: 1) движение от места базирования к обрабатываемой территории и назад, 2) движение по сельскохозяйственной территории при выполнении текущих заданий;

f_2 - зарядка БЛА с возможной реализацией трех вариантов передачи электрической энергии с использованием системы энергопитания, оснащенной на платформе: 1) контактное соединение аккумулятора БЛА с системой питания платформы; 2) замена аккумулятора БЛА; 3) беспроводная зарядка аккумулятора БЛА;

f_3 - контактное взаимодействие платформы с набором БЛА, включая механизм стыковки БЛА и платформы, предусматривающий безопасное передвижение БЛА на борту платформы, посадку и взлет БЛА;

f_4 - загрузка БЛА полезными ресурсами (например, минеральные удобрения) из контейнера платформы для распределения по обрабатываемой территории.

f_5 - прием грузов (собираемые при уборке плоды, убираемые при чистке камни и другой мусор) с БЛА в контейнер платформы.

f_6 - связь подвижной платформы с БЛА и базовой станцией.

f_7 - навигация подвижной платформы в глобальной системе координат с использованием системы гетерогенных сенсоров.

f_8 - управление планированием и действиями подвижной платформы в кооперации с набором БЛА при решении поставленных аграрных задач.

Для реализации перечисленных функций необходимо применение двух типов БЛА: 1) навигационные БЛА, использующиеся для мониторинга и развертывания системы локальной навигации на обрабатываемой территории; 2) сервисные БЛА, оснащенные захватом или другим инструментом для выполнения операций с полезной нагрузкой.

Далее рассмотрим алгоритмическую модель совместной работы подвижной платформы и набора БЛА, представленную на рисунке 1. Модель укрупненно описывает основные этапы функционирования и совместной работы платформы и БЛА при решении целевой аграрной операции. Первым этапом является планирование маршрута движения и выезд подвижной платформы с находящимся на борту набором БЛА на поле. После достижения платформы заданной точки границы обрабатываемого поля следует этап мониторинга поля, который выполняется с помощью БЛА и бортовых или облачных систем технического зрения с целью составления уточненной цифровой карты местности и при необходимости различных видов картограмм обрабатываемого поля. Затем следует этап развертывания системы локальной навигации. На основе цифровой карты местности посредством БЛА создается сеть опорных станций, размещаемых в точках с известными координатами. Система локальной навигации предназначена для решения основных задач, таких как: обеспечения навигационными данными потребителей (платформы и БЛА) в пределах прямой радиовидимости; формирование навигационного поля для указанных потребителей. Для формирования навигационного поля разворачиваются как минимум три

станции для определения координат потребителей в трехмерном пространстве. Используя созданное навигационное поле, уточненную цифровую карту местности, картограммы БЛА перемещаются по своим траекториям и выполняют целевые задачи, взаимодействуя с передвигающейся платформой. После выполнения целевой задачи БЛА возвращаются к платформе. На следующем этапе платформа с находящимся на борту набором БЛА возвращается на место базирования. Планирование маршрута платформы рассчитывается с учетом текущего места нахождения платформы и системы глобальной навигации.



Рис. 1. Алгоритмическая модель совместной работы подвижной платформы и набора БЛА

Далее рассмотрим несколько процедур из приведенной выше алгоритмической модели. На рисунке 2 приведен блок-схема алгоритма работы платформы и БЛА при мониторинге поля. Вначале проводится определение количества БЛА, необходимых для проведения мониторинга текущей рабочей территории и формирование заданий каждому. Затем производится вылет каждого БЛА с парковочных мест подвижной платформы согласно запланированной траектории полета. В заданных точках БЛА выполняют сбор данных с помощью бесконтактных сенсорных устройств, оснащенных на борту, таких как: видеокамеры, тепловизоры, термометры, инфракрасные и другие сенсоры. Данные могут быть в виде изображений, видео и других показателей окружающей среды. Необработанные данные передаются на платформу с БЛА через беспроводную связь. На следующем этапе проводится обработка данных с целью составления цифровой карты местности, построения картограмм

урожайности, засоренности, агрохимических картограмм и т.д. После мониторинга всей территории в случае недостаточной информации обрабатываемого поля БЛА выполняется повторно сбор данных. После выполнения задачи мониторинга набор БЛА возвращается на платформу.

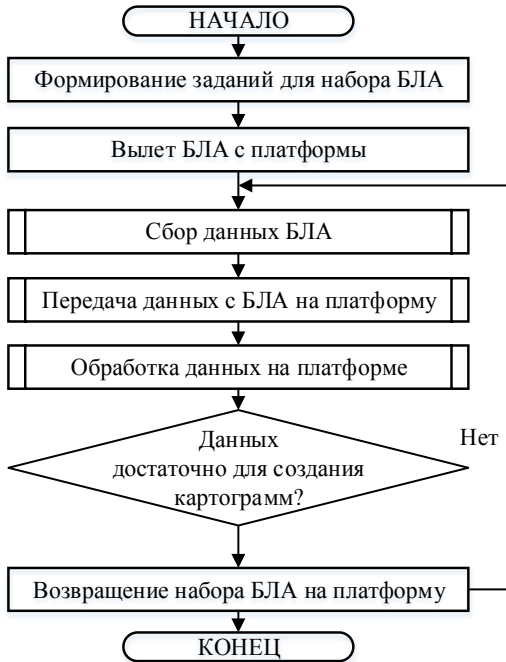


Рис. 2. Блок-схема алгоритма мониторинга поля

На рисунке 3 приведена блок-схема алгоритма развёртывания системы локальной навигации. Основной задачей локальной навигации является определение пространственных координат сервисных БЛА при выполнении заданных операций. Положение сервисных БЛА определяется триангуляционным методом путём измерения расстояний до трёх источников навигационных сигналов, установленных на опорных БЛА. Первым этапом является определение трёх опорных точек, соответствующих трём наиболее удалённым выпуклым вершинам в многоугольнике, описывающим границы поля, вычисленные на предыдущем этапе в ходе мониторинга. После определения координат опорных точек в глобальной навигационной системе производится планирование траекторий БЛА, затем следует этап расстыковки и вылета набора навигационных БЛА с платформы к опорным точкам. В опорных

точках набор БЛА выполняется посадку и фиксацию, чтобы устранить помехи, связанные с ветром, вибрацией и другими внешними факторами. После калибровки и настройки системы локальной навигации, осуществляется назначение координат всем сервисным БЛА запаркованным на подвижной платформе.

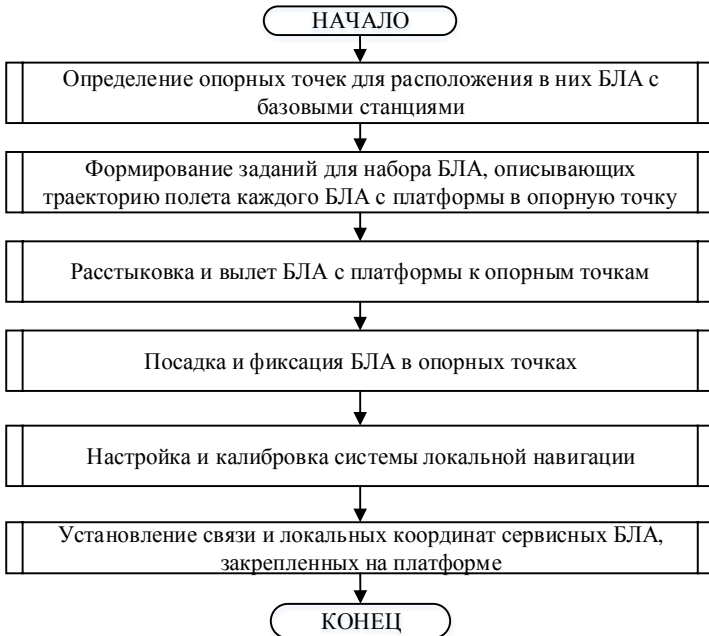


Рис. 3. Блок-схема алгоритма развёртывания системы локальной навигации

В качестве тестовых сценариев совместной работы подвижной платформы и БЛА выбраны задачи аграрной робототехники: 1) мониторинг сельскохозяйственных угодий и построение картограмм с учетом пространственной вариативности; 2) уборка камней и других помех с полей с учетом картограммы засоренности, 3) внесение удобрений с учетом агрохимических картограмм плодородия почвы, планируемой урожайностью культуры, уровня предыдущего урожая, влагообеспеченности, особенностей рельефа полей, агрофизических свойств почвы и других факторов; 4) сбор плодов с учетом картограмм урожайности.

Заключение

В статье проанализированы основные задачи проектирования подвижной роботизированной платформы, отвечающей за транспортировку и совместную работу с беспилотными летательными аппаратами при выполнении сельскохозяйственных операций. Кратко описана концептуальная модель конструкции платформы и алгоритмическая модель основных этапов взаимодействия платформы с БЛА. Дальнейшее исследование будет посвящено разработке алгоритмических моделей отдельных этапов функционирования платформы и БЛА, а также проектных схем и конструкторских моделей подвижной платформы и ее основных отличительных узлов: контейнера для полезной нагрузки и парковочных мест для БЛА.

Список литературы

- [**Андрейчук, 2016 и др.**] Андрейчук А.А., Яковлев К.С. Метод разрешения конфликтов при планировании пространственных Труды конференции беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта, 2016, С. 31-40.
- [**Афанасьев, 2016 и др.**] Афанасьев Р.А, Ермолов И.Л. О перспективах роботизации точного земледелия // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 12. С. 828–833.
- [**Гапонов, 2016 и др.**] Гапонов В.С., Дашевский В.П., Бизин М.М. Модернизация программно-аппаратного обеспечения модельных сервоприводов для использования в антропоморфных робототехнических комплексах // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2016. Т. 19. № 2. С. 41-50.
- [**Дашевский, 2015 и др.**] Дашевский В.П., Бизин М.М. Обзор возможностей бортовых вычислителей на основе SMARK-модулей для робототехнических комплексов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2015. № 3 (37). С. 91-96.
- [**Крючков, 2014 и др.**] Крючков Б.И., Дашевский В.П., Соколов Б.В., Усов В.М. Позиционирование мобильного робота-помощника во внутреннем рабочем пространстве на пилотируемых космических комплексах // Пилотируемые полеты в космос. 2014. № 4 (13). С. 40-56.
- [**Павлюк, 2016 и др.**] Павлюк Н.А., Будков В.Ю., Бизин М.М., Ронжин А.Л. Разработка конструкции узла ноги антропоморфного робота Антарес на основе двухмоторного колена // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1 (174). С. 227-239.
- [**Ронжин, 2007 и др.**] Ронжин А.Л., Карпов А.А., Леонтьева А.Б., Костюченко Б.Е. Разработка многомодального информационного киоска // Труды СПИИРАН. 2007. № 5. С. 227-246.
- [**Сидорова, 2012 и др.**] Сидорова В. А, Жуковский Е. Е, Лекомцев П. В, Якушев В. В. Геоestatистический анализ характеристик почв и урожайности в полевом

- опыте по точному земледелию // *Агрехимия и плодородие почв*. 2012. № 8 . С. 879–888.
- [Ющенко, 2016 и др.]** Ющенко А.С., Ермишин К.В. Коллаборативные мобильные роботы - новый этап развития робототехники. *Экстремальная робототехника*. 2016. Т. 1. № 1. С. 451-459.
- [Abaunza, 2017 et al.]** Abaunza H., Castillo P., Victorino A., Lozano R. Dual Quaternion Modeling and Control of a Quad-rotor Aerial Manipulator. *J. Intell. Robot. Syst.* DOI 10.1007/s10846-017-0519-4
- [Baizid, 2017 et al.]** Baizid K., Giglio G., Pierri F., Trujillo M.A., Antonelli G., Caccavale F., Viguria A., Chiaverini S., Ollero A. Behavioral control of unmanned aerial vehicle manipulator Systems. *Auton. Robot.* 2017, 41, pp. 1203–1220.
- [Bechar, 2016 et al.]** Bechar A., Vigneault C. Agricultural robots for field operations: Concepts and components. *Biosystems Engineering*. 2016. 149. pp. 94–111.
- [Daly, 2015 et al.]** Daly J.M., Ma Y., Waslander S.L. Coordinated landing of a quadrotor on a skid-steered ground vehicle in the presence of time delays. *Auton. Robot.*, 2015, 38, pp. 179–191.
- [Holloway, 2014 et al.]** Holloway L., Bear C., Wilkinson K. Re-capturing bovine life: Robot-cow relationships, freedom and control in dairy farming. *Journal of Rural Studies*. 2014. 33. pp. 131–140.
- [Ioannou, 2008 et al.]** Ioannou S., Dalamagkidis K., Valavanis K.P., Stefanakos E.K. Improving Endurance and Range of a UGV with Gimballed Landing Platform for Launching Small Unmanned Helicopters. *J. Intell. Robot. Syst.* 2008, 53, pp. 399–416.
- [Kondak, 2015 et al.]** Kondak K., Ollero A., Maza I., Krieger K., Albu-Schaeffer A., Schwarzbach M., Laiacker M. Unmanned Aerial Systems Physically Interacting with the Environment: Load Transportation, Deployment, and Aerial Manipulation. K.P. Valavanis, G.J. Vachtsevanos (Eds.), *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, pp. 2755-2785.
- [Perez-Ruiz, 2014 et al.]** Perez-Ruiz M., Slaughter D.C., Fathallah F.A., Gliever C.J., Miller B.J. Co-robotic intra-row weed control system. *Biosystems Engineering*. 2014. 126. pp. 45–55.
- [Ronzhin, 2016 et al.]** Interactive Collaborative Robotics, A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov (Eds.), LNCS/LNAI, Springer International Publishing Switzerland, Vol. 9812, 2016, 264 p.
- [Sanchez-Lopez, 2014 et al.]** Sanchez-Lopez J.L., Pestana J., Saripall S., Campoy P. An Approach Toward Visual Autonomous Ship Board Landing of a VTOL UAV. *J. Intell. Robot. Syst.* 2014, 74, pp. 113–127.
- [Wolfert, 2017 et al.]** Wolfert S., Ge L., Verdouwa C., Bogaardt M.J. Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*. 2017. 153. pp. 69–80.