

Итоговый отчет по проекту № 18-58-76001 ЭРА_а «Стратегии совместной деятельности гетерогенных роботов, контролируемой с помощью интуитивно понятных человеко- машинных интерфейсов, при решении сельскохозяйственных задач», 2018-2020 гг.

Основной целью проекта является моделирование сельскохозяйственной роботизированной системы, способной минимизировать усилия и травмы людей при проведении аграрных работ; расширить сферу автоматизации сельского хозяйства; уменьшить количество применяемых удобрений посредством использования БПЛА и принципов точного земледелия. Для достижения поставленной цели в ходе проекта международным коллективом исполнителей были разработаны модели и алгоритмы совместной работы групп гетерогенных беспилотных робототехнических средств.

На первом этапе в 2018 году был проведен обзор современных решений в области сельскохозяйственной робототехники, который показал, что наименее исследованной областью является взаимодействие различных автономных систем в сельского хозяйства. Также были разработаны конструктивные и функциональные модели мобильной платформы, оборудованной контейнером для полезной нагрузки, транспортировки и подзарядки БПЛА. Данные модели обеспечивают взаимодействие БПЛА и мобильных робототехнических платформ, что позволяет улучшить качество мониторинга и обслуживания сельскохозяйственных угодий.

В 2019 году в ходе работы над проектом было предложено решение задачи локальной навигации мобильных робототехнических платформ (МРП), основанное на использовании беспроводных сетей с ячеистой топологией, организованных на базе радиомодулей, установленных на группе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Был разработан подход к организации такой сети на базе технологии LoRa, а также алгоритм локализации МРП при помощи радиомаяков, установленных на БПЛА.

В ходе выполнения проекта были разработаны методы взаимодействия между платформой и набором БПЛА, внесенных в рабочую зону, и сценарии их функционирования. В рамках этой задачи был предложен общий сценарий функционирования робототехнических средств для решения сельскохозяйственных задач, а также сформированы прикладные сценарии совместного использования МРП и БПЛА. В частности, были разработаны: сценарий мониторинга состояния агропромышленного пространства и построения картограмм с пространственной изменчивостью, основанный на использовании БПЛА; сценарий сбора камней и других объектов на полях, с учетом картограмм загрязнения, полученных за счет анализа результатов мониторинга сельскохозяйственных земель в видимом и инфракрасном спектрах; сценарий совместного использования БПЛА и МРП для внесения удобрений с учетом агрохимических картограмм плодородия почв, запланированного объема урожая, уровня предыдущего урожая, наличия влаги, рельефа местности, агрофизических свойств почвы и других факторов; сценарий автоматизированного сбора плодов посредством робототехнических средств с учетом картограмм урожайности территорий. В рамках проекта совместно с зарубежными коллегами на базе предложенного сценария автоматизированного сбора плодов была разработана модель, направленная на сбор яблок на сельскохозяйственном участке за счет коллаборативного использования группы БПЛА и наземных МРП. Разработанные сценарии могут быть модифицированы для выполнения различных сельскохозяйственных задач.

В 2020 году на основе разработанных сценариев были выделены критерии для оценки эффективности функционирования роботов при решении сельскохозяйственных задач. Для оценивания качества мониторинга сельскохозяйственных земель и построения картограмм необходимо оценить качество полученного ортофотоплана и количество

детектированных на карте объектов интереса. В первую очередь, для этого требуется оценить качество полученного изображения ортофотоплана и точность склейки изображений. Для этого предлагается использовать метод BRISQUE, что позволяет выбрать лучший из методов склейки изображений. Для детектирования на карте объектов интереса с учетом специфики рассматриваемых сценариев предложена методика на основе мультиспектральной оценки индекса растительности NDVI.

В качестве критерия эффективности выполнения сценария по сбору камней и прочих инородных объектов предлагается критерий, в соответствии с которым робототехническим средствам необходимо обнаружить и собрать наибольшее число камней за время операции, то есть максимизировать число собираемых камней в единицу времени.

В качестве критерия эффективности выполнения сценария внесения удобрений на плантации колоновидных яблонь считается общее количество удобренных деревьев при условии попадания удобрений в заданный радиус окружности с центром в области ствола дерева.

В качестве критерия эффективности выполнения сценария по сбору плодов с колоновидных яблонь предлагается критерий, в соответствии с которым робототехническим средствам необходимо обнаружить и собрать наибольшее число плодов за время операции, то есть максимизировать число собираемых плодов в единицу времени.

В ходе выполнения проекта была разработана компьютерная модель, включающая разработанные решения для совместной деятельности гетерогенных роботов при решении задач сельского хозяйства, управляемых с помощью интуитивно понятных интерфейсов «человек-робот», а также методика тестирования и эксперимента в компьютерной модели. Предложенное решение разработано в среде моделирования Gazebo с использованием программных библиотек фреймворка ROS. Разработанная компьютерная модель позволяет реализовать предложенные сценарии совместного функционирования групп гетерогенных робототехнических средств при решении сельскохозяйственных задач, а именно: задачи мониторинга сельскохозяйственных земель и построения ортофотоплана местности; сбора камней и прочих инородных объектов на поле; внесения удобрений и сбора плодов на плантации колоновидных яблонь. Разработанные сценарии могут быть модифицированы для выполнения различных сельскохозяйственных задач.

На основе рассмотренных решений в области человеко-машинных интерфейсов для обеспечения группового взаимодействия наземных роботов и беспилотных летательных аппаратов были выделены критерии оценки качества человеко-машинного интерфейса для постановки и выполнения групповых задач сельскохозяйственной робототехники. С учетом выделенных критериев был предложен технический облик человеко-машинного интерфейса для группового управления гетерогенными роботами при выполнении сельскохозяйственных задач. Предложенное решение обеспечивает оперативную постановку решаемой группой робототехнических средств прикладной задачи в области сельского хозяйства и последующий контроль ее исполнения со стороны оператора и может использоваться для разработки программного обеспечения агропромышленных роботов, отличающегося высокой степенью автоматизации и удобства работы оператора.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке программных и аппаратных средств для обеспечения совместной деятельности гетерогенных роботов, контролируемой с помощью интуитивно понятных человеко-машинных интерфейсов, при решении сельскохозяйственных задач, что позволит удешевить этапы проектирования, производства и эксплуатации подобных систем.

Важнейшие результаты, полученные при реализации Проекта

В ходе реализации проекта был выполнен обзор современных решений в области сельского хозяйства, робототехники, человеко-машинного взаимодействия и совместной работы гетерогенных роботов. Сбор урожая роботом имеет большой потенциал применения в точном земледелии, однако сильно ограничен реальными условиями произрастания сельскохозяйственных культур. Разработка устройства для сбора урожая является сложной технической задачей, так помимо сохранения целостности самого плода необходимо избежать механическое повреждение листьев и стеблей растений. Кроме того, для успешного предвидения робота при прополке сорняков, пересадке рассады и сбора урожая необходимо учитывать схему посадки растений на территории фермерского хозяйства. Несмотря на существование большого количества исследований в области сельскохозяйственной робототехники задача разработки многофункционального автономного устройства для точного земледелия является актуальной. Использование БПЛА в качестве альтернативы аэрокосмическому зондированию повышает скорость получения изображений местности и снижает экономические затраты фермеров. Основные требования, предъявляемые сельскохозяйственному робототехническому устройству, могут быть сформулированы следующим образом: автономность работы; мультифункциональность; способность работать в различных погодных условиях; малые габариты и массы составных компонентов. Анализ изображений при помощи фотограмметрии и позволяет получить точные данные о фенотипе растений и составе почвы, а также построить карту трехмерную карту местности для перемещения мобильных робототехнических платформ. Определение вегетационных индексов при помощи бортовых мультиспектральных камер дает возможность контролировать процесс созревания плодов сельскохозяйственных культур и выявлять заболевания растений. Помимо мониторинга состояния земельных участков БПЛА могут быть оборудованы системами распыления пестицидов и внесения удобрений в почву, которые позволят более рационально использовать имеющиеся ресурсы. Все это повышает производительность работы фермерского хозяйства, увеличивает экономическую прибыль, автоматизируя такие процессы, как химическая обработка растений, высадка рассады в открытый грунт, прополка сорняков, сбор и транспортировка урожая. На основании проведенного обзора можно сделать вывод, что подобные разработки способны не только улучшить положение отдельных фермерских хозяйств, но всего сельского хозяйства в целом. Также из обзора следует, что перспективной областью развития сельского хозяйства является взаимодействие мультиагентных робототехнических систем. Совместная работа и данные, накопленные такими системами, смогут повысить качество выращивания и сбора произрастающих на поле культур. Наиболее востребованными в данной области являются БПЛА с бортовыми системами мультиспектральной съемки и мобильные робототехнические комплексы, оснащенные манипуляторами для взаимодействия с окружающей средой.

В ходе выполнения проекта была разработана конструктивная и функциональная модели мобильной платформы, оборудованной контейнером для полезной нагрузки, а также для транспортировки и подзарядки БПЛА. Основываясь на данных, приведенных в обзоре, в ходе реализации первого этапа проекта были разработаны конструктивная и функциональная модели двух вариантов наземных робототехнических платформ для сельскохозяйственного применения. Обе платформы имеют одинаковые элементы конструкции: 1) шасси, обеспечивающие передвижение платформы по сельскохозяйственным угодьям; 2) мультисенсорная система для определения локальных препятствий при перемещении платформы; 3) система энергопитания, обеспечивающая необходимую мощность для потребления самой платформой; 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 задачи с использованием радионавигационных данных от БпЛА; 5) коммуникационная система, реализующая связь подвижной платформой с БпЛА и базовой станцией. Предложенные модели обеспечивают простоту и независимость смены аккумуляторов на БпЛА от других задач, которые выполняет вторая платформа. Модульная система также позволяет повысить проходимость платформ при их совместном использовании, особенно это важно на сложно проходимых участках фермерских угодий. Оснастив данную мобильную платформу системой полива или точечного опрыскивания пестицидами/удобрениями растений, а также механизмом посева семян, можно получить первоклассного полевого помощника, который заменит человеческий ресурс на тяжелой утомительной работе. Его координатором является автономный БпЛА, который ведет анализ местности и отправляет команды мобильной платформе с координатами для перемещения. Данный комплекс роботов позволяет экономить ресурсы и время, повышая уровень дохода, что является основной задачей в любом экономически затратном производстве.

В ходе выполнения проекта были разработаны математическая и алгоритмическая модели локальной навигации мобильной платформы и БпЛА на основе радиомаяков, установленных на БпЛА, занимающих места экстремальных точек на рабочей площадке до начала текущей задачи.

Решение задачи локальной навигации мобильных робототехнических платформ (МРП), основано на использовании беспроводных сетей с ячеистой топологией, организованных на базе радио-модулей, установленных на группе беспилотных летательных аппаратов (БпЛА). Был разработан подход к организации такой сети на базе технологии LoRa, а также алгоритм локализации МРП при помощи радиомаяков, установленных на БпЛА.

В ходе выполнения проекта были разработаны методы взаимодействия между платформой и набором БпЛА, внесенных в рабочую зону, и сценарии их функционирования. В рамках этой задачи был предложен общий сценарий функционирования робототехнических средств для решения сельскохозяйственных задач, а также сформированы прикладные сценарии совместного использования МРП и БпЛА. В частности, были разработаны: сценарий мониторинга состояния агропромышленного пространства и построения картограмм с пространственной изменчивостью, основанный на использовании БпЛА; сценарий сбора камней и других объектов на полях, с учетом картограмм загрязнения, полученных за счет анализа результатов мониторинга сельскохозяйственных земель в видимом и инфракрасном спектрах; сценарий совместного использования БпЛА и МРП для внесения удобрений с учетом агрохимических картограмм плодородия почв, запланированного объема урожая, уровня предыдущего урожая, наличия влаги, рельефа местности, агрофизических свойств почвы и других факторов; сценарий автоматизированного сбора плодов посредством робототехнических средств с учетом картограмм урожайности территорий. В рамках проекта совместно с зарубежными коллегами на базе предложенного сценария автоматизированного сбора плодов была разработана модель, направленная на сбор яблок на сельскохозяйственном участке за счет коллаборативного использования группы БпЛА и наземных МРП. Разработанные сценарии могут быть модифицированы для выполнения различных сельскохозяйственных задач.

В ходе выполнения проекта были разработаны критерии для оценки эффективности функционирования роботов для разработанных сценариев сельскохозяйственных операций.

На основе рассмотренных решений в области человеко-машинных интерфейсов для обеспечения группового взаимодействия наземных роботов и беспилотных летательных аппаратов были выделены критерии оценки качества человеко-машинного интерфейса для постановки и выполнения групповых задач сельскохозяйственной робототехники. Выделены наиболее эффективные из них: среднее время, необходимое пользователю для

решения задачи по методике KLM-GOMS, оценка сложности системы по методике Т. Комбера и Дж. Мэлтби, правильность выполнения задачи, частота успешного выполнения задачи, время выполнения задачи, степень осведомленности о ситуации, количество управляющих действий, точность диагностики ситуации, время обнаружения и диагностики ситуации, поведение контролируемого технологического параметра, рабочая нагрузка, функциональное состояние оператора. С учетом выделенных критериев был предложен технический облик человеко-машинного интерфейса для группового управления гетерогенными роботами при выполнении сельскохозяйственных задач. Предложенное решение обеспечивает оперативную постановку решаемой группой РТС прикладной задачи в области сельского хозяйства и последующий контроль ее исполнения со стороны оператора и может использоваться для разработки программного обеспечения РТС, отличающегося высокой степенью автоматизации и удобства работы оператора. Это позволяет создать эффективный инструмент человеко-машинного взаимодействия для управления группой автономных сельскохозяйственных роботов. Кроме того, были выделены критерии для оценки эффективности функционирования роботов для разработанных сценариев, а именно: качество полученного ортофотоплана для задачи мониторинга сельскохозяйственных территорий; количество собранных камней за единицу времени; общее количество удобренных деревьев при условии попадания удобрений в заданный радиус окружности с центром в области ствола дерева; количество собранных плодов в единицу времени. Предложенные критерии позволяют параметризовать и оценить успешность выполнения группой гетерогенных РТС поставленных задач в области сельского хозяйства, а также в дальнейшем оценить долговременный экономический эффект от внедрения робототехнических средств в область сельского хозяйства.

В ходе выполнения проекта была разработана компьютерная модель совместной деятельности гетерогенных роботов при решении задач сельского хозяйства, управляемых с помощью интуитивно понятных интерфейсов человек-робот. Предложенное решение разработано в среде моделирования Gazebo с использованием программных библиотек фреймворка ROS. Разработанная компьютерная модель позволяет реализовать предложенные сценарии совместного функционирования групп гетерогенных робототехнических средств при решении сельскохозяйственных задач, а именно: задачи мониторинга сельскохозяйственных земель и построения ортофотоплана местности; сбора камней и прочих инородных объектов на поле; внесения удобрений и сбора плодов на плантации колоновидных яблонь. Разработанные сценарии могут быть модифицированы для выполнения различных сельскохозяйственных задач.

Кроме того, была разработана методика тестирования разработанных решений в компьютерной модели. Предложенная методика предполагает проведение экспериментов по оценке качества полученного ортофотоплана местности на основе оценки качества изображений, полученных посредством аэрофотосъемки группой БПЛА по методу BRISQUE и выбрать наиболее подходящий метод сшивания изображений (SIFT, ORB, SURF, BRIEF). Также предложенная методика позволяет оценить эффективность выполнения предложенных сценариев функционирования групп гетерогенных роботов при решении сельскохозяйственных задач с точки зрения максимизации выделенных критериев эффективности, а именно: сбора камней и прочих объектов на поле, внесения удобрений, сбора плодов на плантации колоновидных яблонь. Данная методика не зависит от типа РТС и может быть адаптирована для других типов сценариев выполнения сельскохозяйственных задач.

Важнейшие результаты проекта были освещены в рецензируемых журналах, индексируемых в WoS/Scopus, РИНЦ, а также апробированы на международных конференциях в области робототехники и человеко-компьютерного взаимодействия.

Сопоставление результатов, полученных при реализации, с мировым уровнем

Сегодня автономные робототехнические средства (РТС) используются в качестве доступных инструментов для мониторинга, разведки, доставки грузов, а также выполнения работ в труднодоступных и опасных для человека местах [Перспективные направления применения робототехники в бизнесе. – URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/presentations/20200325idoklad.pdf/> (дата обращения 2021-14-01)].

В ходе обзора были выделены ведущие производители робототехнических комплексов для сельского хозяйства в России: Agro Robotic Systems, Aurora Robotics, Агрополис, Cognitive Technologies, Р.СЕРТ, УрФУ, ЮРГИ, ГЕОСКАН, ЦНИИ РТК; а также за рубежом: 3D Robotics Inc. (США), Abundant Robotics Inc. (США), AeroVironment, Inc. (США), AGCO Corporation (США), AgEagle LLC (США), Agribotix LLC (США), Autonomous Tractor Corporation (США), Blue River Technology (США), Boumatic Robotics (Нидерланды), Bowery Farming (США), CLAAS Group (Германия), Clearpath Robotics (Канада), CNH Industrial (Великобритания), Dairymaster (Ирландия), Deepfield Robotics (Германия), Deere & Company (США), Delaval International (Швеция), Eagle UAV Services (США), ecoRobotix Ltd. (Швейцария), FarmWise (США), Fullwood Ltd. (Великобритания), GEA Group (Германия), Harvest Automation Inc. (США), Harvest Croo Robotics (США), Honey Comb Corp (США), iFlight Technology Company Limited (ДJI) (Китай), Iron Ox (США), Kubota Corporation (Япония), Lely (Нидерланды), Naio Technologies (Франция), Parrot SA (Франция), PrecisionHawk Inc. (США), Robotics Plus (Новая Зеландия), S.A. Christensen Co (SAC) (Дания), Smart AG (США), SZ DJI Technology Co. Ltd. (Китай), Trimble Inc. (США), Yamaha Motor Co. Ltd. (Япония), Yanmar Co. Ltd. (Япония).

Как показывает анализ решений, предлагаемых данными производителями, большинство из них предлагает узкоспециализированных роботов для решения прикладных задач в сельском хозяйстве. Данные решения являются дорогостоящими и зачастую не предполагают возможности автономного выполнения сложных миссий. Кроме того, зачастую комплексные и масштабные задачи невозможно выполнить с помощью одного аппарата. В таких случаях применяется группа РТС, что позволяет сократить время выполнения задач и расширить функциональность устройств. Среди современных тенденций использования РТС особенно актуальным является вопрос создания систем группового управления РТС, в том числе на открытом грунте. Существуют отечественные решения в этой области, однако, как правило, они рассматривают общие случаи и не специализированы под задачи сельского хозяйства, например [Городецкий В.И., Бухвалов О.Л. Модель и архитектура инфраструктуры системы группового управления роботами // Робототехника и техническая кибернетика. – 2017. – №. 1. – С. 33-44.; Козов, А. В. (2021). Модели и методы проектирования динамически реконфигурируемой системы группового управления мобильными роботами. Автоматизация процессов управления, (1), 130-139.; Градецкий, В. Г., Ермолов, И. Л., Князьков, М. М., Лапин, Б. С., Семенов, Е. А., Собольников, С. А., & Суханов, А. Н. (2020). Система группового транспортного управления мобильными наземными роботами на различных грунтах. Робототехника и техническая кибернетика, 8(1), 61-71.; Болдырев, А. С., Вережкин, А. Л., Пшихопова, К. В., & Вережкина, Л. С. (2020). Методика и моделирование надежности системы группового управления роботизированными платформами. Известия Южного федерального университета. Технические науки, (3 (213)).].

При этом следует учитывать, что группы могут быть однородными (включать в себя только аппараты одного типа) и смешанными (включать РТС различного типа, например, наземные и БПЛА). Для организации управления группой автономных РТС необходимо обеспечить наиболее эффективные, доступные, эргономичные и гибкие средства человеко-

машинного взаимодействия и разработать соответствующие средства: модели роботов, алгоритмы и сценарии поведения, человеко-машинный интерфейс оператора, управляющего группой автономных РТС, с учетом особенностей типов РТС и их назначения. Рассмотрим некоторые существующие решения в данной области, учитывая функциональность РТС, их назначение, параметры и технические характеристики, тип и способ управления РТС, инструменты, доступные оператору в человеко-машинном интерфейсе (ЧМИ), функциональные возможности ПО, особенности архитектуры ЧМИ, а также особенности его настройки. Указанные аспекты позволят сформировать адекватное представление о существующих на сегодня решениях в области стратегий совместного поведения и организации человеко-машинного взаимодействия с автономными робототехническими средствами, а также сравнить с ними решения, разработанные в ходе выполнения проекта.

В [Ju C., Son H.I. A distributed swarm control for an agricultural multiple unmanned aerial vehicle system // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. – 2019. – Vol. 233. – No. 10. – P. 1298-1308] исследователи из Национального университета Чоннам, Южная Корея, предложили решение для дистанционного управления группой беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), обследующих сельскохозяйственные территории. Система имеет два уровня управления: 1) дистанционный, на котором оператор с помощью тактильного устройства с 3 степенями свободы вводит команды удаленного управления; 2) уровень, на котором движение БПЛА регулируется распределенным алгоритмом управления роем. На уровне дистанционного управления оператор регулирует желаемую скорость полета БПЛА, манипулируя тактильным устройством, и одновременно получает тактильную обратную связь. На уровне управления БПЛА распределенное управление роем состоит из трех управляющих входов: 1) управление скоростью БПЛА с помощью команды дистанционного управления, 2) управление группой для получения желаемой формации, 3) предотвращение столкновений. Прототип реализован в Gazebo с использованием операционной системы Robot Operating System (ROS) для создания систем управления роботами (рисунок 1).

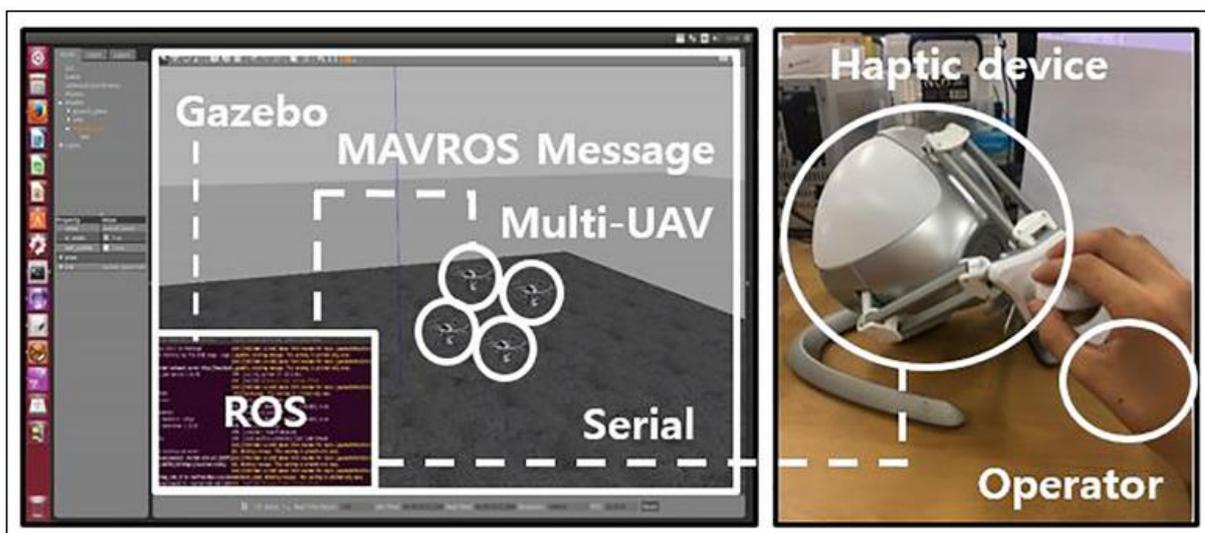


Рисунок 1 – Взаимосвязь элементов системы дистанционного управления БПЛА [Ju C., Son H.I. A distributed swarm control for an agricultural multiple unmanned aerial vehicle system // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. – 2019. – Vol. 233. – No. 10. – P. 1298-1308]

Отметим, что предложенное решение рассчитано только на гомогенную группу БПЛА и не предусматривает управление гетерогенными группами РТС. Результаты,

полученные в ходе выполнения проекта РФФИ 18-58-76001 ЭРА_А отличаются большей универсальностью и более широким кругом выполняемых задач.

В работе [Uryasheva A. et al. DroneGraffiti: autonomous multi-UAV spray painting // ACM SIGGRAPH 2019 Studio. – 2019. – P. 1–2.] предложена система управления и ЧМИ для группы БПЛА, использующихся для нанесения граффити на вертикальные поверхности. В разработанной системе используется централизованный подход с одним диспетчерским сервером. Такая архитектура позволяет управлять системой в реальном времени, включая настройку параметров рисования, генерацию и настройку изображений, управление задачами, расширенными режимами управления. Серверный графический интерфейс также включает визуализацию плана задачи в реальном времени и возможность моделирования для автономного тестирования и проверки плана полета. Данное решение интересно с точки зрения предлагаемых алгоритмов управления группой БПЛА и может быть адаптировано, к примеру, для распыления агрохимикатов на некоторые сельскохозяйственные культуры, однако не предусматривает управления группой гетерогенных РТС и требует существенной доработки для адаптации к решаемым в проекте РФФИ 18-58-76001 ЭРА_А задачам.

В работах [Roldán J. J. et al. Bringing Adaptive and Immersive Interfaces to Real-World Multi-Robot Scenarios: Application to Surveillance and Intervention in Infrastructures // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 86319–86335.; Roldán J.J. et al. Analyzing and improving multi-robot missions by using process mining // Autonomous Robots. – 2018. – Vol. 42. – No. 6. – P. 1187–1205.; Roldán J.J. et al. Multi-robot interfaces and operator situational awareness: Study of the impact of immersion and prediction // Sensors. – 2017. – Vol. 17. – No. 8. – P. 1720.] зарубежные инженеры представили ряд версий алгоритмов группового управления и ЧМИ для группы БПЛА, занимающихся разведкой, наблюдением и тушением лесных пожаров. В качестве экспериментальных прототипов использовалось два квадрокоптера Parrot AR.Drone 2.0, в качестве управляющих команд – команды скорости (линейной и угловой), которые генерируются контроллерами. Эти контроллеры представляют собой пропорционально-интегрально-дифференцирующие регуляторы (ПИД), использующие текущую и целевую позиции для генерации соответствующих команд скорости. Интуитивно понятный интерфейс может отображать в реальном времени информацию о БПЛА, а также изображения с их камер. Для управления оператор может воспользоваться одним из двух режимов: задать точки маршрута, которые должен пролететь БПЛА одну за другой или команду задачи, например наблюдение, разведка, а система сама составит точки маршрута. Разработанный ЧМИ предполагает автоматическое распределение задач между агентами группы с учетом потенциальных коллизий. Аналогично классическому интерфейсу рассматриваются варианты интерфейса виртуальной реальности (Virtual reality, VR), включающие наголовный шлем и два джойстика. Так, в работе [Roldán J. J. et al. Bringing Adaptive and Immersive Interfaces to Real-World Multi-Robot Scenarios: Application to Surveillance and Intervention in Infrastructures // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 86319–86335.] авторами предложено решение для управления группой мобильных робототехнических средств на основе иммерсивного VR интерфейса. Среди рассматриваемых управляемых устройств представлены мобильные наземные роботы, оснащенные манипулятором, и беспилотные летательные аппараты. Роботы предназначены для спасательных операций, помощи в устранении последствий природных или техногенных катастроф. При этом роботы при выполнении задачи могут действовать, как автономно, так и в группе. Человеко-машинное взаимодействие в системе построено с применением средств виртуальной реальности. В приложении, разработанном с применением технологии Unity 3D, строится трёхмерная модель окружающего пространства. Оператор через VR-гарнитуру наблюдает за роботом со стороны, отдавая ему при этом команды. Изображение, получаемое с камеры робота, транслируется в пользовательском интерфейсе. Внутри виртуального окружения появляются подсказки в виде возможной позиции робота для помощи оператору в управлении. Данное решение также может быть адаптировано к задачам сельского хозяйства, однако не предусматривает

автономного выполнения сценариев и требует активного участия оператора в процессе решения задачи.

Auterion Mission Control [Auterion Enterprise PX4. – URL: <https://auterion.com/drone-manufacturers/enterprise-px4/> (дата обращения 2021-14-09).] – коммерческая программа, созданная компанией из США для работы с различными типами беспилотных РТС, включая наземные, воздушные и водные аппараты. Она позволяет получать телеметрию с аппарата, осуществлять предварительную настройку контроллера и систем управления, создавать и редактировать план миссии, анализировать выполненные задания, получать и обрабатывать видеоданные с аппарата в режиме реального времени, предотвращать и предупреждать аварийно-опасные ситуации, а также управлять полезной нагрузкой. При подготовке полетного задания оператор задает основные входные данные: место взлета и посадки, план полета (точки на карте или территорию и высоту прохождения). В данном ПО предусмотрены дополнительные функции по предотвращению столкновений или иных аварийных ситуаций. Для корректной работы системы оповещений на борту РТС должны быть установлены датчики. При выполнении миссии на базовую станцию оператора поступает информация с борта РТС в виде телеметрии и видеопотока. С помощью Auterion Mission Control можно производить управление не только одним РТС, но и группой. Данное решение отличается высокой стоимостью и требует наличия РТС и значительной адаптации к задачам проекта.

В исследовании Австралийского университета RMIT School of Engineering [Lim Y. et al. Human-machine interfaces and interactions for multi UAS operations // Proceedings of the 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2018), Belo Horizonte, Brazil. – 2018. – P. 9–14.] представлен ЧМИ для управления БпЛА с наземной станции. Основное назначение данных БпЛА – тушение лесных пожаров. Данный ЧМИ предусматривает как единичное, так и групповое управление. В интерфейсе информация представлена в виде иконок и шкал с ползунками для изменения параметров (рисунок 2). Такая идея позволяет компактно и наглядно отобразить информацию на экране, выделив максимальную площадь под карту. Карта является основным элементом при работе оператора РТС с интерфейсом. На ней он корректирует маршруты движения РТС, изменяет операции и добавляет информационные метки.

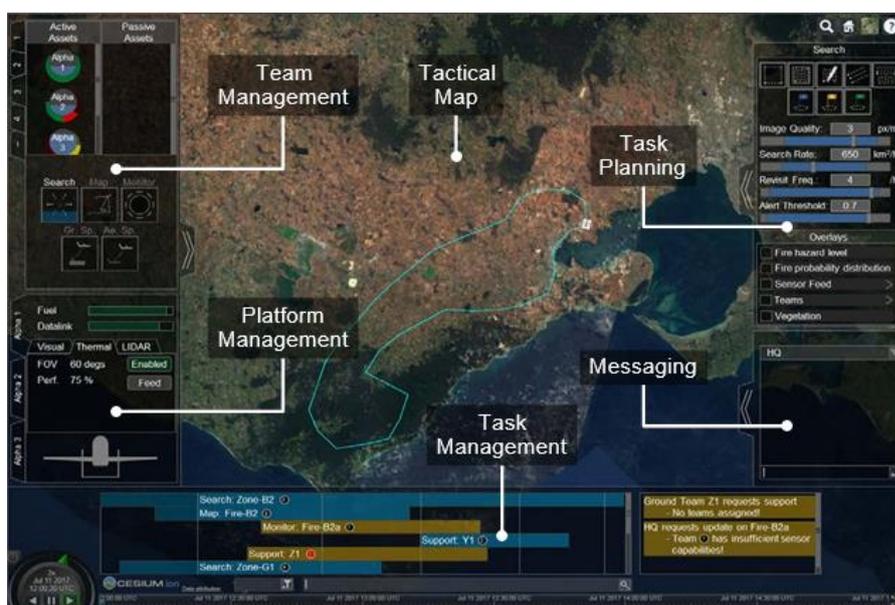


Рисунок 2 – Графический интерфейс для управления БпЛА от Австралийского университета RMIT School of Engineering [Lim Y. et al. Human-machine interfaces and interactions for multi UAS operations // Proceedings of the 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2018), Belo Horizonte, Brazil. – 2018. – P. 9–14.]

Операторы могут сортировать/фильтровать задачи по их типам, местоположению или команде, а также выполнять их поиск по ключевым словам. Основными функциональными возможностями данного ЧМИ являются: поддержка оператора в определении необходимых действий для достижения целей миссии; приоритизация различных задач для максимизации эффективности миссии; возможность внесения изменений в параметры задачи; отслеживание прогресса и производительности во всех активных задачах; определение оптимальных конфигураций групп БпЛА и назначение задач для них; перераспределение БпЛА между различными группами; выбор оптимальных траекторий для групп для выполнения возложенной на них задачи наиболее эффективным образом. При этом предлагаемое авторами решение не предусматривает полностью автономного выполнения миссии.

Интерфейс MiR [MiR Robot Interface Reference guide. – URL: <https://www.mobile-industrial-robots.com/media/2806/mir-robot-interface-20-reference-guide-v13-en.pdf> (дата обращения 2020-11-29).] (коммерческое решение компании Mobile Industrial Robots) предназначен для управления мобильными наземными роботами. Интерфейс поддерживает групповое неавтономное управление. Подключение каждого робота осуществляется через Wi-Fi. Интерфейс выполнен в виде веб-интерфейса, что позволяет использовать его как на мобильных устройствах и планшетах, так и на стационарном ПК. Его основными достоинствами являются возможность глубокой настройки системы, редактирование маршрутов робота, редактирование зон на карте робота, мониторинг и анализ данных, создание и редактирование обратной связи робота. Также плюсом данного интерфейса является распределение ролей пользователей по управлению какими-либо отдельными функциями робота или отдельными группами роботов. Возможно переключение между различными картами местности, а также предусмотрено перемещение робототехнического средства между различными окружениями. Данный ЧМИ может быть использован в сложных системах группового управления РТС, однако отличается высокой стоимостью и требует существенной адаптации к задачам сельского хозяйства.

Как показывают результаты проведенного обзора, наиболее популярным типом мобильных роботов в агропромышленном комплексе являются устройства для сбора фруктов и овощей. Так, авторы статьи [Li B., Zhou A., Yang C., Zheng S. The Design and Realization of Fruit Harvesting Robot Based on IOT // 2016 International Conference on Computer Engineering, Information Science & Application Technology (ICCIA 2016). Atlantis Press. 2016. P. 261-264.] разработали систему для сбора и транспортировки фруктов. Для выполнения этих задач мобильная платформа оборудована элементами для сбора плодов: манипулятором с захватным устройством, транспортерной лентой и корзиной. Система работает на основе машинного зрения и интеллектуального модуля, отвечающего за построение маршрутов движения и работу платформы. Аналогичные системы проектируются под конкретную культуру: яблоки [Bechar A., Vigneault C. Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems // Biosystems Engineering. 2017. V. 153. N? P. 110 – 128.]; перец [C.W. Bac, Hemming J., B.A.J. van Tuijl, R. Barth, E. Wais, E.J. van Henten. Performance evaluation of a harvesting robot for sweet pepper // Journal of Field Robotics. 2017. V. 34. N. 6. P. 1123 – 1139.] и др., что не предусматривает адаптации данных моделей робототехнических средств под другие задачи. Кроме того, следует отметить, что данные модели не полностью автономны и не подходят для выполнения сложных сценариев.

Авторы статьи [Soil sampling automation using mobile robotic platform / E. Väljaots, H. Lehiste, M. Kiik, T. Leemet // Agronomy Research. 2018. V. 16. N. 3. P. 917 – 922.] разработали мобильную сельскохозяйственную робототехническую платформу, предназначенную для сбора образцов почвы и их анализа. Авторы адаптировали для решения этой задачи мобильную платформу тракторного типа массой 470 кг, разработанную Эстонским университетом естественных наук. Блок забора и анализа почвы находится в отдельном корпусе и включает в себя бур, трубчатый зонд, гидравлический насос, устройство для ввода проб и плотномер. Управление устройством для ввода проб осуществляется на основе

данных кругового датчика положения вала и индуктивного датчика. По результатам испытаний в реальных условиях, предложенная мобильная платформа позволяет сократить время сбора образцов почвы для анализа до 50% по сравнению с традиционным подходом. Адаптированная к задачам анализа состава почвы сельскохозяйственная мобильная платформа не является универсальной, в связи с чем не представляется возможным применять ее для решения задач из другой предметной области без изменения конструкции.

Проведенный анализ позволяет сделать выводы о том, что существующие на рынке решения, как правило, узкоспециализированы, обладают низкой степенью автономности, а также требуют существенной доработки для применения в сельском хозяйстве. Коммерческие решения, как правило, отличаются высокой стоимостью внедрения. Таким образом, в отличие от существующих сегодня аналогов, полученные в ходе выполнения проекта теоретические результаты закладывают основу для разработки сельскохозяйственных робототехнических средств, которые способны решать широкий спектр разноплановых задач, обладают более высокой степенью универсальности и автономности, а также более дешевы в производстве и обслуживании.

Наиболее востребованным и удобным типом человеко-машинного интерфейса для рассматриваемых типов РТС на сегодняшний день является цифровое приложение с графическим интерфейсом. Разработанный в ходе выполнения проекта технический облик ЧМИ обладает следующими достоинствами: 1) интуитивно понятный; 2) гибкий в настройке; 3) адаптивный; 3) имеется возможность подключения дополнительных интерфейсов для управления группой РТС посредством голосовых команд (разработка зарубежных партнеров [Jokisch O., Strutz T., Leipnitz A., Siegert I., Ronzhin A.: Audio And Video Processing Of Uav-Based Signals In The Harmonic Project In book: Elektronische Sprachsignalverarbeitung 2021. Tagungsband der 32. Konferenz (2021). http://www.essv.de/essv2021/pdfs/41_jokisch.pdf]). Существующие адаптивные системы управления РТС не всегда способны справиться с отработкой нештатных ситуаций без непосредственного активного участия оператора, поэтому в разработанных в ходе проекта решениях предусмотрена возможность переключения между ручным и автоматическим режимами. Для выполнения сложных сценариев человеко-машинного взаимодействия в предлагаемом ЧМИ могут использоваться комбинации из нескольких способов взаимодействия, включая средства виртуальной реальности, распознавание жестов, голосовые команды.

Конструктивная и функциональная модели мобильной платформы, оборудованной контейнером для полезной нагрузки, а также для транспортировки и подзарядки БПЛА, обеспечивают простоту и независимость смены аккумуляторов на БПЛА от других задач. Модульная система также позволяет повысить проходимость платформ при их совместном использовании, особенно это важно на труднопроходимых участках фермерских угодий.

Предложенные математическая и алгоритмическая модели локальной навигации наземных мобильных платформ и БПЛА, отличаются высокой степенью надежности и универсальности за счет использования беспроводных сетей с ячеистой топологией, организованных на базе радио-модулей, установленных на группе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Разработанный подход к организации такой сети на базе технологии LoRa, а также алгоритм локализации МРП при помощи радиомаяков, установленных на БПЛА, позволяет применять предложенные модели в условиях частичного или полного отсутствия связи с системами глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС), что актуально для сельской местности. Разработанные методы взаимодействия между МРП и набором БПЛА, внесенных в рабочую зону, и сценарии их функционирования, включая метод обеспечения взаимодействия между мобильными робототехническими платформами и БПЛА, необходимый для внедрения процесса беспроводной подзарядки автономной батареи БПЛА, не имеют аналогов среди существующих решений.

В ходе выполнения данного проекта была разработана компьютерная модель совместной деятельности гетерогенных роботов при решении задач сельского хозяйства, управляемых с помощью интуитивно понятных интерфейсов «человек-робот», а также методика тестирования и эксперимента в компьютерной модели. Полученные результаты могут быть использованы при разработке программных и аппаратных средств для обеспечения совместной деятельности гетерогенных роботов, контролируемой с помощью интуитивно понятных человеко-машинных интерфейсов, при решении сельскохозяйственных задач, что позволит удешевить этапы проектирования, производства и эксплуатации подобных систем.

Стратегии совместной деятельности групп гетерогенных роботов при решении сельскохозяйственных задач

На сегодняшний день большинство техники, применяемой в сельском хозяйстве, является автоматизированной, т.е. её управление и контроль осуществляется человеком. Это обусловлено тем, что рабочее пространство робототехнических систем (РТС) представляет собой сложную изменчивую среду, в которой всегда существует некоторая неопределенность условий выполнения рабочих операций. Следовательно, для работы в такой среде роботы должны быть адаптивными, т.е. обладать способностью автоматически приспосабливаться к заранее неизвестным и меняющимся условиям эксплуатации, а человеко-машинный интерфейс (ЧМИ) подобных роботов в полной мере должен учитывать особенности выполняемых группой РТС задач.

В литературе всё большее внимание находят исследования по разработке роботов для сбора плодов на открытых сельскохозяйственных территориях [Bechar A., Vigneault C. *Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems // Biosystems Engineering. 2017. V. 153. P. 110 – 128*]. Это вызвано необходимостью снизить производственные затраты при сборе урожая с плодовых деревьев или овощных культур. Наиболее распространенными видами плодовых деревьев в центральной России и южных регионах являются: яблони, груши, слива, абрикос, персик. Овощные культуры, выращиваемые на полях, преимущественно в Краснодарском крае и соседних регионах: томат, огурец, сладкий перец, баклажан, капуста. Проектирование универсальных РТС для выполнения сбора плодов и автоматизация данной операции осложнено тем, что все плоды различны по размерам, форме и окрасу. При этом необходимо также учесть сложное рабочее пространство робота, в котором потенциальный плод может быть плотно окружен препятствиями: листвой или другими органами растения, и обеспечить безопасный сбор плодов предотвращая повреждения соседних органов. Для облегчения сбора урожая селекционеры вывели особый тип яблонь без боковых ветвей – колонновидные яблони. У таких деревьев ветви растут вдоль ствола, который обрастает плодами. Из-за небольшой высоты в 1-2 метра и отсутствия раскидистых ветвей, данные деревья занимают меньше места, чем яблони с классической морфологией.

Авторы статьи [Silwal, A., Davidson, J. R., Karkee, M., Mo, C., Zhang, Q., Lewis, K. (2017). *Design, integration, and field evaluation of a robotic apple harvester. Journal of Field Robotics, 34(6), 1140–1159. doi:10.1002/rob.21715*] предложили робототехническое устройство для сбора урожая плодов с колонновидных яблонь, высаженных в два ряда в виде буквы V со средней высотой 366 см. Предварительные исследования показали, что средняя плотность плодов составляет 19 яблок на ветке между двумя соседними деревьями. При тестировании роботом было собрано 127 из 150 фруктов со средним временем сбора одного плода 6,0 с.

В качестве тестовых сценариев совместной работы мобильной платформы и БПЛА были выбраны следующие задачи аграрной робототехники:

- 1) мониторинг сельскохозяйственных земель и построение картограмм с пространственной изменчивостью;
- 2) сбор камней и других объектов на полях, с учетом картограммы загрязнения;
- 3) внесение удобрений с учетом агрохимических картограмм плодородия почв, запланированного объема урожая, уровня предыдущего урожая, наличия влаги, рельефа местности, агрофизических свойств почвы и других факторов;
- 4) сбор плодов с учетом картограмм урожайности.

Каждая задача может быть рассмотрена как отдельная модель взаимодействия робототехнических средств для решения сельскохозяйственных задач.

Пусть имеются следующие РТС:

- группа мобильных наземных робототехнических платформ (МРП), оснащенных резервуарами (для удобрений/плодов/камней) G1;
- группа мобильных наземных робототехнических платформ, осуществляющая замену аккумуляторов на БпЛА, G2;
- группа БпЛА, оснащенных мультиспектральными камерами, A1;
- группа БпЛА, оснащенных манипуляторами, A2.

Каждый тип робота отвечает за выполнение определенной задачи. Взаимодействие с другими роботами во время выполнения действия позволяет повысить вероятность успешного решения поставленной перед группой РТС задачи. Критерии успешности исхода операции задаются в качестве входных условий при формализации каждого отдельного сценария. В общем случае, в рассматриваемых сценариях, в первую очередь, группе A1 назначается область, где необходимо провести аэрофотосъемку в инфракрасном спектре для оценки состояния территории на основе индекса NDVI. Также эти данные используются для детектирования препятствий при навигации мобильных робототехнических платформ [Astapova M.A., Aksamentov E.A. Ispol'zovanie spektral'nyh landshaftnyh indeksov dlja detektirovaniya prepjatstvij v zadachah navigacii mobil'nyh robototekhnicheskikh platform na sel'skohozjajstvennyh territorijah. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2021; 25(1): 66–81. DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-1-66-81.]. A1 осуществляет облет необходимой территории, фото- и видеофиксацию данных и возвращается на исходную позицию. Полученные изображения поступают для обработки в единую систему управления (базовую станцию), где принимается решение о необходимости проведения сельскохозяйственных работ. Обработанные данные проецируются на координатную сетку, где отмечаются участки, которым необходимо уделить внимание. Группам G1, A2 назначаются задачи о внесении удобрений/сборе плодов/сборе камней в соответствии с полученной картограммой. Схема взаимодействия групп РТС представлена на рисунке 3. РТС G1 в данном сценарии выполняют роль заправочной станции для A2. В случае больших территорий к выполнению задачи привлекаются также станции G2 для замены аккумуляторов БпЛА.



Рисунок 3 – Взаимодействие групп РТС при выполнении типовой задачи

Ход выполнения миссии контролирует оператор с базовой станции. Реализация сценариев осуществляется в автоматическом или полуавтоматическом режиме. Вмешательство оператора в ход выполнения задачи возможно в случае возникновения нештатных ситуаций удаленно с помощью человеко-машинного интерфейса. Оператор может взять управление под свой контроль или программно проверить состояние системы каждого отдельного аппарата и внести необходимые корректировки.

Сценарий №1. Мониторинг сельскохозяйственных земель и построение картограмм с пространственной изменчивостью

Основной задачей Сценария №1 является проведение воздушного обследования сельскохозяйственной местности с целью сбора информации об её состоянии и культур, произрастающих на ней. Типовой сценарий мониторинга сельскохозяйственных земель состоит из следующих этапов:

- 1) облет БПЛА исследуемой территории с параллельной аэросъёмкой местности;
- 2) обработка полученных изображений;
- 3) программный анализ полученных данных;
- 4) составление картограмм с пространственной изменчивостью в зависимости от типа объектов интереса.

В первую очередь, в модели задаются параметры исследуемой территории: координаты вершин выпуклого многоугольника, которые ограничивают исследуемый участок, координаты препятствий (если имеются), тип объекта интереса (камни, мусор, плоды и тд), характеристики и количество доступных РТС. Предполагается, что количество РТС каждого типа достаточно для выполнения поставленной задачи. Исходя из введенных параметров, рассчитывается необходимый состав группы РТС, тип необходимых для выполнения миссии РТС, а также строятся маршруты движения РТС.

В случае, если площадь исследуемой с/х территории превышает площадь, которую способен обработать 1 БПЛА, данная территория разбивается на количество секторов, площадь каждого из которых доступна для обработки одним БПЛА. Тогда на задание назначается группа БПЛА, каждому из которых присваивается свой сектор для обработки. В случае, если площадь исследуемой с/х территории превышает площадь, которую способна обработать группа БПЛА А1 без замены аккумуляторов, для реализации данного сценария на поле заблаговременно выезжают наземные МРП группы G2. Каждая платформа группы G2 работает как стационарная базовая станция для замены аккумуляторов БПЛА. Целевые координаты для каждой платформы G2 определяются как барицентр многоугольника, образованного координатами секторов тех БПЛА, которым потребуется замена аккумуляторов исходя из данных предварительного расчета.

После этого БПЛА группы А1, каждый из которых оснащен мультиспектральной камерой с RGB-сенсором, вылетают из стартовых координат к точкам входа в назначенный ему сектор исследуемой территории. Предварительно в системы навигации каждого БПЛА загружается полетное задание, в котором определена траектория движения, время вылета, а также параметры съемки: положение камеры, частота кадров, процент перекрытия снимков. Вылет каждого следующего БПЛА осуществляется с задержкой, чтобы в случае окончания заряда аккумулятора БПЛА мог осуществить его замену на свободной базовой станции. Траектории полета БПЛА рассчитываются автоматически, таким образом, чтобы при съемке перекрытие между соседними кадрами было не менее 40%. Такой процент перекрытия обеспечивает достаточное количество опорных объектов на сцене для наиболее полного восстановления модели местности [Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P.: Assessment of photo-grammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using un-manned aerial vehicle. Measurement 98, 221–227 (2017).].

Для постоянной связи с центром управления все РТС оснащены радио-модулями. Данный подход позволяет организовать беспроводную сеть для передачи данных [Denisov A., Sivchenko O. Modeling Wireless Information Exchange Between Sensors and Robotic Devices // Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings” (ER(ZR) 2020). – Springer, Singapore, 2021. – P. 317-326. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0_26; Denisov A., Shabanova A., Sivchenko O. Data Exchange Method for Wireless UAV-Aided Communication in Sensor Systems and Robotic

Devices // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – Springer, Cham, 2020. – С. 45-54. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3_5] в командный центр без использования наземных ретрансляторов.

При достижении целевой точки БПЛА начинает проводить аэросъемку местности назначенного ему сектора. В случае достижения критического уровня заряда аккумулятора БПЛА летит к наземной МРП для его замены. После того как все БПЛА группы совершили облет местности, данные с каждого аппарата передаются на сервер центра управления для их дальнейшей обработки. Для построения трехмерной модели местности и картограмм с пространственной изменчивостью, которые будут использованы в других сценариях, на сервере с помощью алгоритма [Aksamentov E., Zakharov K., Tolopilo D., Usina E. Approach to Robotic Mobile Platform Path Planning Upon Analysis of Aerial Imaging Data // Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings” (ER(ZR) 2020). – Springer, Singapore, 2021. – P. 93-102. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0_7] на полученной серии снимков осуществляется поиск особых точек, которые показывают соответствие последовательно снятых изображений друг другу. Данные точки позволяют создать ортофотоплан. Для построения трехмерных моделей местности (рисунок 4) из двумерных изображений используется метод фотограмметрии.

На данном этапе полученная трехмерная карта местности носит лишь иллюстрационный характер. На её основе можно выделить объекты, с которыми может произойти столкновение РТС, но нельзя локализовать эти участки на местности. Для локализации таких областей необходимо привязать полученную полигональную модель к геодезической системе координат. Каждая особая точка ортофотоплана имеет GPS-координату. Сопоставление координат особых точек трёхмерной модели местности с геодезическими координатами двумерной карты местности позволяет привязать трехмерную модель местности к GPS-координатам.

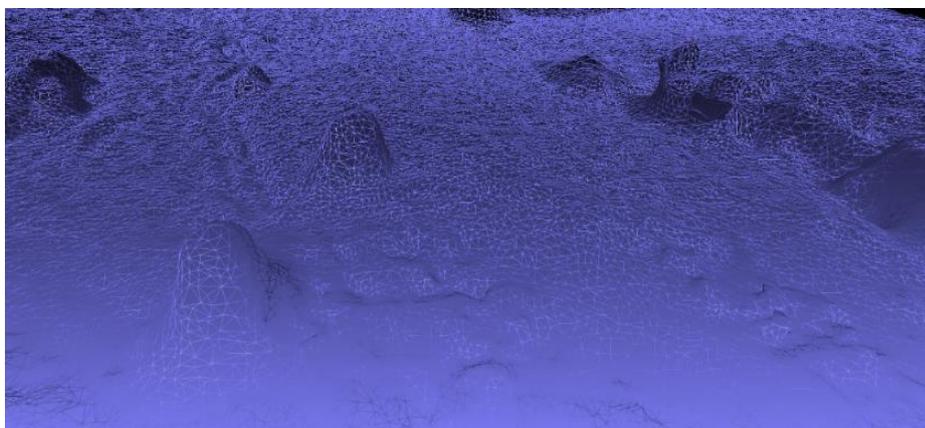


Рисунок 4 – Рельеф местности, полученный посредством фотограмметрии

Генерируемая в результате работы алгоритма трехмерная модель является цифровой копией рельефа исследуемой местности, а все рельефные особенности локализуются за счет автоматической привязки модели к геодезической системе координат.

На полученном ортофотоплане при помощи специализированных технологий распознавания образов могут быть найдены различные объекты, в частности, границы земельных участков, хозяйственные постройки, дорожки, деревья, кустарники, водоемы, и т.д. Также с помощью данных технологий можно определить количество целевых объектов: плодов, висящих на дереве, камней на поле и т.д. На основе данных о плотности расположения объектов различного типа на исследуемом участке можно построить картограмму требуемого масштаба, что позволяет не только рассчитать сложность выполнения задачи (по сбору объектов, точечному внесению удобрений и т.д.), и требуемое для этого количество робототехнических средств, но и снизить объем передаваемых между

ними данных в процессе актуализации информации об обрабатываемой территории. Для выполнения следующих сценариев на данном шаге необходимо построить картограммы: загрязнения для сбора камней, состояния растений для внесения химикатов, количества урожая для сбора яблок.

Каждую из картограмм составляют на основании соответствующих показателей, как правило, на ограниченный срок. При составлении картограммы для каждого показателя целесообразно установить шкалу градации в зависимости от интенсивности каждого конкретного показателя. Так, для целей проекта целесообразно подразделять территорию на картограмме на 5 типов участков (групп), обозначая их от 0 до 4 в зависимости от интенсивности показателя. Так, например, картограмму загрязнения целесообразно разбить на следующие группы:

- 0 – загрязнения нет;
- 1 – незначительное загрязнение;
- 2 – средний уровень загрязнения;
- 3 – сильное загрязнение;
- 4 – очень сильное загрязнение.

Интенсивность загрязнения I_d для каждого участка в данном случае определяется количеством камней и прочих инородных предметов N_d относительно допустимого показателя I_{perm} из расчета на 1 кв.м. территории S :

$$I_d = (N_d / I_{perm} \cdot S).$$

Полученные картограммы объектов также, как и трёхмерная модель местности загружаются на бортовые компьютеры наземных роботов. На основе этих данных рассчитываются траектории движения наземных РТС для выполнения назначенных ей задач, в частности, для сбора камней и урожая.

Для оценивания качества мониторинга сельскохозяйственных земель и построения картограмм необходимо оценить качество полученного ортофотоплана и количество детектированных на карте объектов интереса. В первую очередь, для этого требуется оценить *качество полученного изображения ортофотоплана и точность склейки изображений*.

Оценку изобразительного качества можно проводить в части структурометрических и градационных (фотографических) характеристик [Аникеева И. А. Факторы, критерии и требования к изобразительному качеству материалов аэрофотосъемки, получаемой для целей картографирования // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2020. – Т. 25. – №. 4.].

К структурометрическим характеристикам относятся:

- фотографическая резкость (четкость);
- фактическая разрешающая способность.

К градационным характеристикам относятся:

- правильность цветопередачи;
- показатели уровня случайного шума;
- показатели радиометрического разрешения;
- показатели полноты информации – потеря в светах/тенях.

Для целей проекта достаточно оценить резкость (четкость полученного ортофотоплана, воспользовавшись одной из известных методик [Ватаманюк И.В. Оценивание размытости изображений на предварительном этапе анализа цифровых фотографий // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2014). 2014. С.671-675.]. Например, можно воспользоваться методом BIBS (Blind Image Blur Score) [Bong D. B. J., Khoo B. E. Blind Image Blur Assessment by Using Valid Reblur Range and Histogram Shape Difference. Signal Processing-Image Communication. 2014.], основанном на повторном размытии изображения и оценивании влияния повторного размытия на исследуемое изображение. В случае изначально резкого изображения

повторное размытие ведет к существенным изменениям в значениях яркости пикселей изображения. Изначально размытые изображения менее восприимчивы к повторному размытию. Для оценивания влияния повторного размытия строятся гистограммы исходного и повторно размытого изображения и сравниваются так называемые «хвосты» гистограмм. Поскольку натуральные неискаженные размытием изображения следуют закону нормального распределения, аномальная ФРТ приведет к снижению резкости и отклонению от данного закона. Чтобы оценить влияние ФРТ на исследуемое изображение, оно повторно размывается при помощи свертки с двумерным гауссовым фильтром. Оцениваемая разница в значениях весов «хвостов» гистограмм будет меньшей при изначально размытом изображении. Коэффициент размытости B показывает разницу между оригинальным и повторно размытым изображением, оценивая и сравнивая веса «хвостов» графиков гистограмм (1):

$$B = \frac{e^{RG \times (S_2 - S_1)}}{e^{RG}}, \quad (1)$$

где RG – допустимый размер повторного размытия, S_1 и S_2 – коэффициенты, показывающие абсолютную разницу между весами хвостов (2):

$$S_1 = \frac{\sum_{i=1}^P (\Delta\omega_{lowG1}(i) + \Delta\omega_{uppG1}(i))}{P}, \quad (2)$$

$$S_2 = \frac{\sum_{i=1}^P (\Delta\omega_{lowG2}(i) + \Delta\omega_{uppG2}(i))}{P},$$

где P – общее количество участков, на которые разбивается изображение для оценивания, $\Delta\omega_{low}(i)$ и $\Delta\omega_{upp}(i)$ – локальные разности весов «хвостов» гистограмм слева и справа соответственно для двух шагов повторного размытия $G1$ и $G2 = G1 + 1$. Шаг повторного размытия $G1$ определяет минимальное значение дисперсии σ двумерного гауссова фильтра, которое вызывает изменения на изображении. Шаг $G2$ увеличивает значение σ на $\Delta\sigma = 0.01$, данное соотношение было найдено эвристическим путем. Метод VIBS работает в пространственной области и не требует обучения или дополнительных данных об изображении, а также обладает высокой корреляцией с восприятием размытых изображений зрительной системой человека.

Критерии оценивания точности склейки изображений. Создание ортофотоплана из последовательных изображений, полученных с БПЛА, является частным случаем построения панорамного снимка из набора произвольных изображений путем склейки. Склейка (сшивание) изображений — это процесс объединения нескольких изображений с перекрывающимися полями обзора для создания сегментированной панорамы или изображения с высоким разрешением. Ортофотоплан панорамных изображений составляется путем получения большого количества снимков с обычной камеры и объединения их вместе, чтобы сформировать составное изображение с гораздо большим полем обзора [Lowe, D. G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision, 60, 91-110.]. Сшивание изображений можно разделить на три основных компонента: калибровка камеры, регистрация изображения и смещение [K. Shashank, N. G. (MarCh 2014). A Survey and Review over Image Alignment and Stitching Methods. The International Journal of Electronics & Communication Technology (IJECT), ISSN: 2230-7109 (Online)].

Регистрация изображения определяется как процесс совмещения двух или более изображений, снятых с разных ракурсов. Для получения бесшовного панорамного изображения (ортофотоплана) используется смешивание изображений, оно, как правило, является необходимым после построения панорамного снимка в связи с возникающими

локальными артефактами освещенности, рассогласования текстурной мозаики. Существует два основных метода смешивания изображений. Один из них называется альфа-смешиванием «растушевка», которое принимает средневзвешенное значение двух изображений. Другим популярным подходом является пирамида Гаусса [Mrs. Hetal M. Patel, A. P. (November- 2012). Comprehensive Study and Review of Image Mosaicing Methods. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 1 Issue 9, ISSN: 2278-0181.]. Этот метод, по сути, объединяет изображения в разных частотных диапазонах и соответствующим образом фильтрует их. Чем ниже полоса частот, тем больше она размывает границу. Пирамида Гаусса размывает границу, сохраняя пиксели вдали от границы.

В статье [Dissanayake, V., Herath, S., Rasnayaka, S., Seneviratne, S., Vidanaarachchi, R., Gamage, C. (2015, November). Quantitative and qualitative evaluation of performance and robustness of image stitching algorithms. In 2015 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA) (pp. 1-6). IEEE.] представлены два показателя качества: один для оценки геометрического качества сшивки, а другой - для оценки фотометрического качества изображения.

1) Оценка геометрического качества. Оно отражает геометрическое выравнивание и плавное перетекание в структуру сшитого изображения. При оценке используются два исходных несшитых изображения и конечный результат сшивания. В методе используется индекс SSIM [A.S. Bovik. Universal index of image quality. IEEE Signal Processing Letters 9 (3): 81–84, March 2002.] и вейвлет-фильтр A-trous [Jean-Luc Starck and Fionn Murtagh. Image restoration with noisepression using the wavelet transform. Astronomy and Astrophysics, 288:342–348, August 1994.] для оценки структурного сходства.

2) Фотометрическая оценка качества. Фотометрическое качество отражает сходство цвета и интенсивности, а также отсутствие швов на сшитом изображении. Авторами были предложены два показателя цвета и интенсивности. Индекс оценки качества цвета использует индекс SAM [Lucien Wald. Data Fusion: Definitions and Architectures : Fusion of Images of Different Spatial Resolutions. Presses des MINES, 2002], чтобы найти угол между соседними цветовыми векторами пикселей и использовать его в качестве индикатора качества цвета сшивания (3):

$$SAM = \arccos\left(\frac{\langle p_1, p_2 \rangle}{|p_1| |p_2|}\right), \quad (3)$$

где p_1 и p_2 соответствуют векторам соседних пикселей.

Основные шаги для реконструкции сшитого изображения включают: извлечение характерных точек, сопоставление извлеченных точек между изображениями, фильтрацию совпадающих точек для удаления совпадений, которые не соответствуют модели преобразования между изображениями, глобально оптимизированную оценку параметров внешней ориентации камеры во время экспозиции, проекцию изображений в одно сшитое изображение и смешивание перекрывающихся областей для получения визуально однородного изображения [Moussa, A., nEl-Sheimy, N. (2016). A FAST APPROACH FOR STITCHING OF AERIAL IMAGES. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 41.].

Смешивание изображений может скрыть швы и уменьшить разницу в цвете между входными изображениями, чтобы создать панораму. Методы оценки качества (смешивания) изображений могут быть разделены на следующие категории [Pertuz S., Puig D., Garcia M. A. Analysis of Focus Measure Operators for Shape-from-focus // Pattern Recognition. 2013. vol. 46. no. 5. pp. 1415–1432.].

1. Методы на основе оценки градиента (GRA), где градиент или первая производная изображения служит показателем более резких яркостных переходов на границах объектов, присутствующих на изображении.

2. Методы на основе оценки лапласиана (LAP), где лапласиан или вторая производная изображения могут служить для определения количества резких границ на изображении.

3. Методы на базе вейвлет-преобразований (WAV), где изменение коэффициентов дискретного вейвлет-преобразования используется для описания частотной и пространственной областей изображения.

4. Методы, основанные на изучении статистических характеристик изображения (STA), оценивающие отклонение от нормального распределения, которому, как правило, следуют неискаженные изображения.

5. Методы на основе дискретных косинусных преобразований (DCT), где подобно вейвлет-преобразованиям коэффициенты дискретного косинусного преобразования служат оценкой резкости изображения в частотной области.

6. Методы комплексной оценки (MIS).

Качество сшивания измеряется сходством между двумя соседними сшитыми изображениями, которые образуют составное изображение. Кроме того, необходимо удалить видимость швов между входными перекрывающимися изображениями. Существует два основных подхода к сшиванию изображений: прямой подход и подход, основанный на функциях. Цель прямого подхода состоит в том, чтобы свести к минимуму прямое несоответствие между пикселями [Adel, E., Elmogy, M., & Elbakry, H. (2015). Image stitching system based on ORB feature based technique and compensation blending. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 6(9)]. Подходы, основанные на функциях, начинаются с установления сходства между точками входных изображений. В компьютерном зрении используется много методов на основе функций, таких как детектор HARRIS, масштабно-инвариантное преобразование признаков (SIFT), анализ основных компонентов SIFT (PCA-SIFT), набор функций (BOF), функции ускоренного тестирования сегмента (FAST), детектор надежных функций ускорения (SURF), а также ориентированный FAST и повернутый BRIEF (ORB). Для сшивания изображений и распознавания образов наилучшим выбором является детектор, инвариантный к масштабу и повороту, такие как методы ORB, SURF и SIFT (таблица 1).

Таблица 1 – Основные параметры методов нахождения особых точек

Метод	Обнаружение	Соответствие	Размер	Порог ошибки	Оптимизация
SIFT	DOG	Евклидово	128-dimensional	3 pixels	RANSAC
SURF	Hessian	Евклидово	64-dimensional	3 pixels	RANSAC
BRIEF	FAST	Хэмминга	32 bytes	3 pixels	RANSAC
ORB	FAST	Хэмминга	32 bytes	3 pixels	RANSAC

SIFT основан на операторе разности гауссианов (DoG), который является приближением лапласиана гауссиана (LoG). Характерные точки обнаруживаются путем поиска локальных максимумов с использованием DoG в различных масштабах изображений предмета. Метод описания извлекает окрестность 16x16 вокруг каждой обнаруженной особенности и дополнительно сегментирует область на подблоки, отображая в общей сложности 128 значений ячеек. SIFT устойчиво инвариантен к поворотам изображения, масштабу и ограниченным аффинным вариациям, но его основным недостатком является высокая стоимость вычислений. Уравнение показывает свертку разности двух гауссианов (вычисленных в разных масштабах) с изображением « $I(x, y)$ » (4):

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) \quad (4)$$

где «G» представляет функцию Гаусса.

Метод SURF основан на определителе матрицы Гессе и использует интегральные изображения для повышения скорости обнаружения признаков. 64-биновый дескриптор SURF описывает каждую обнаруженную особенность с распределением вейвлет-ответов Хаара в определенной окрестности. Функции SURF инвариантны к вращению и масштабированию, но они обладают небольшой аффинной инвариантностью. Однако дескриптор может быть расширен до 128 значений ячеек. Основное преимущество SURF перед SIFT - низкая вычислительная стоимость. Уравнение представляет матрицу Гессе в точке « $x = (x, y)$ » в масштабе « σ » (5):

$$\mathcal{H}(x, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(x, \sigma) & L_{xy}(x, \sigma) \\ L_{xy}(x, \sigma) & L_{yy}(x, \sigma) \end{bmatrix} \quad (5)$$

где $L_{xx}(x, \sigma)$ - свертка гауссовой производной второго порядка с изображением I в точке x , и аналогично для $L_{xy}(x, \sigma)$ и $L_{yy}(x, \sigma)$.

Дескриптор ORB представляет собой комбинацию детектора ключевых точек FAST и бинарных дескрипторов BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features), получение которых состоит в следующем. Изображение разбивается на патчи. Пусть патч P имеет размеры $S \times S$ пикселей. Из патча выбирается некоторым образом множество пар пикселей $\{(X, Y), \forall X, Y \text{ в окрестности}\}$, для которых строится набор бинарных тестов (6):

$$\tau(P, X, Y) = \begin{cases} 1, & I(X) < I(Y) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (6)$$

где $I(Y), I(X)$ – интенсивность пикселей Y, X соответственно. Для каждого патча выбирается множество, содержащее n_d пар точек, которые однозначно определяют набор бинарных тестов. Далее на основании этих тестов строится бинарная строка (7):

$$f_{n_d}(P) = \sum_{1 \leq i \leq n_d} 2^{i-1} \tau(P, X_i, Y_i) \quad (7)$$

Дескриптор BRIEF. Данный дескриптор представляется в виде вектора длиной 256, состоящего из результатов бинарных тестов вокруг особой точки. В окрестности 31×31 пиксель сравниваются средние значения яркостей между x и y , где x, y – области 5×5 пикселей (8):

$$\tau(I; x, y) := \begin{cases} 1 & : I_x < I_y \\ 0 & : I_x \geq I_y \end{cases}; \quad I - \text{средняя яркость выбранной области.} \quad (8)$$

Для достижения инвариантности к вращению область вычисления дескриптора ориентируется по ориентации особой точки θ . Все $n = 256$ наборов x_i и y_i формируют матрицу S размерностью $2 \times n$. Далее S с помощью матрицы поворота R_θ ориентируется в соответствии с углом θ (9):

$$S_\theta = R_\theta S. \quad (9)$$

А сам вектор дескриптора записывается как (10):

$$g_n(I, \theta) := f_n(I) | (x_i, y_i) \in S_\theta, \\ \text{где } f_n(I) := \sum_{1 \leq i \leq n} 2^{i-1} \tau(I; x_i, y_i). \quad (10)$$

Оценка качества ортофотоплана местности. Методы оценки качества изображения включают субъективные методы и объективные методы [Wu, Q., et al.: A perceptually weighted rank correlation indicator for objective image quality assessment. IEEE Trans. Image Process. 27(5), 2499–2513 (2018)]. При субъективной оценке необходимы

эксперименты для того, чтобы испытатели оценили изображение, в то время как при объективной оценке применяются алгоритмы для оценки качества изображения.

Алгоритмы оценки качества делятся на две группы. В первую группу входят эталонные алгоритмы, которые работают относительно оригинала, результаты сравнивают с изображением оригинала по различным показателям. Во второй группе собраны неэталонные (безэталонные, неререференсные, *noreference*) алгоритмы и методы, которые напрямую работают с искаженными изображениями.

Среди существующих методов эталонной оценки качества изображений следует отметить UQI, SSIM, MSE, PSNR, FSIM, NAE, EME. Далее рассмотрим некоторые из них.

Однако, для целей проекта, эталонные критерии не подойдут, поскольку в данном случае нет оригинальной панорамы, а, следовательно, не с чем ее сравнивать. Поэтому необходимо использовать безэталонные критерии качества. Известные и популярные безэталонные критерии качества: BRISQUE [Mittal, A. No-Reference Image Quality Assessment in the Spatial Domain [Text] / A. Mittal, A. Moorthy, A. Bovik // IEEE Transactions on Image Processing. – 2012. – Vol. 21, no. 12. – P. 4695-4708.], SSEQ [No-reference image quality assessment based on spatial and spectral entropies [Text] / L. Liu, B. Liu, H. Huang, A. Bovik // Signal Processing: Image Communication. – 2014. – Vol. 29, no. 8. – P. 856-863.], BIQI [Moorthy, A. K. A Two-Step Framework for Constructing Blind Image Quality Indices [Text] / A. K. Moorthy, A. C. Bovik // IEEE Signal Processing Letters. – 2010. – Vol. 17, no. 5. – P. 513-516.], NIQE [Mittal, A. Making a “Completely Blind” Image Quality Analyzer [Text] / A. Mittal, R. Soundararajan, A. C. Bovik // IEEE Signal Processing Letters. – 2013. – Vol. 20, no. 3. – P. 209-212.]. Далее рассмотрим процесс сшивания изображения для создания панорамы (ортофотоплана).

Процесс сшивания изображения для создания панорамы (ортофотоплана). Модель сшивания изображений состоит из пяти этапов: получение изображений, обнаружение и сопоставление признаков, оценка RANSAC, глобальное выравнивание и смешивание изображений.

RANSAC является недетерминированным алгоритмом, поскольку он не гарантирует получение приемлемых результатов. Он используется для оценки параметров гомографии математической модели по набору наблюдаемых данных. Цикл RANSAC включает выбор четырех пар функций (случайным образом); вычисление гомографии H (точную); вычисление выборки, сохраняет наибольший набор выборок и, наконец, повторно вычисляет оценку H методом наименьших квадратов для всех выборок.

Критерии алгоритмов объединения изображений: компенсация экспозиции, альфа-смещение, смещение градиентной области и смещение лапласовской пирамиды. Оценка производительности (качества) выполняется по следующим параметрам: PSNR, FSIM, NAE, MI и EME. Таким образом, алгоритм сшивания изображений состоит из следующих шагов:

1. Обнаружение ключевых точек (метод различия Гаусса «DoG») и извлечение локальных инвариантных дескрипторов (метод SIFT). Первым шагом является определение интересующей области для выявления ключевых точек на изображении. Поскольку задачей является выделить инвариантные особенности, поэтому ключевые точки на одном изображении должны соответствовать ключевым точкам на другом изображении (того же объекта), снятом в других условиях. Этого можно достичь, выполнив поиск функций во всех возможных масштабах (также называемых масштабным пространством) при помощи фильтра Гаусса (DOG). Используя DOG фильтр, получаем пространство масштаба для изображения, в виде: $f(x, y, \sigma)$. Теперь, чтобы идентифицировать ключевые точки, нужно найти пиковые значения или точки экстремума. Далее необходимо определить векторы признаков для каждой ключевой точки.

2. Сопоставление дескрипторов между изображениями;

3. Использование алгоритма RANSAC для оценки матрицы гомографии. Роль RANSAC заключается в нахождении правильных точек данных без точек шума. Алгоритм

RANSAC нужен для удаления несоответствующих точек из 128-мерных дескрипторов признаков, сгенерированных алгоритмом SIFT.

4. Применение деформационного преобразования с использованием матрицы гомографии.

Все шаги процесса сшивки изображений представлены на следующем графике (рис. 5). Алгоритм программного кода для получения сшитого изображения представлен на рис. 6.

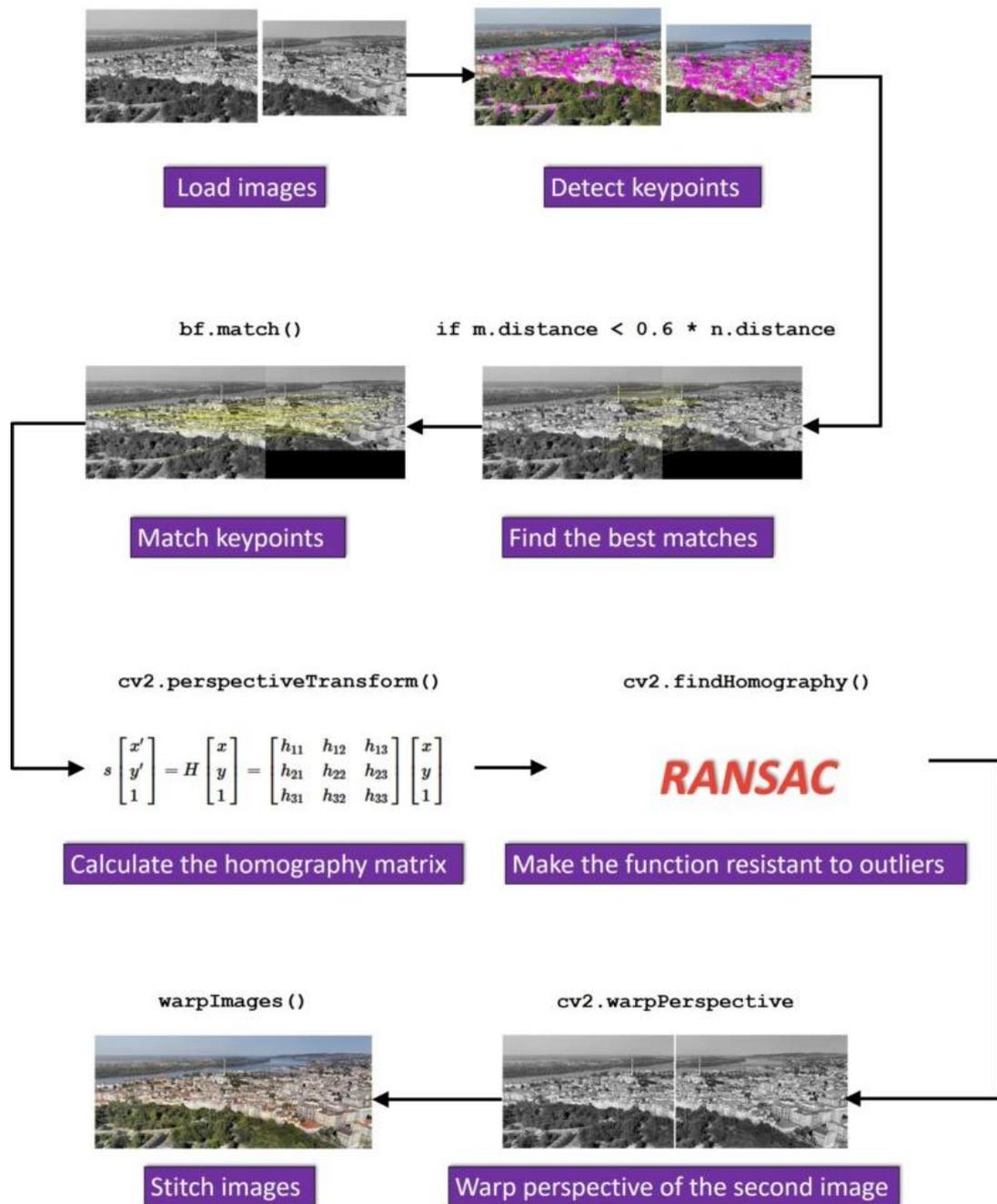


Рисунок 5 – Процесс создания панорамного изображения [<http://datahacker.rs/005-how-to-create-a-panorama-image-using-opencv-with-python/>]

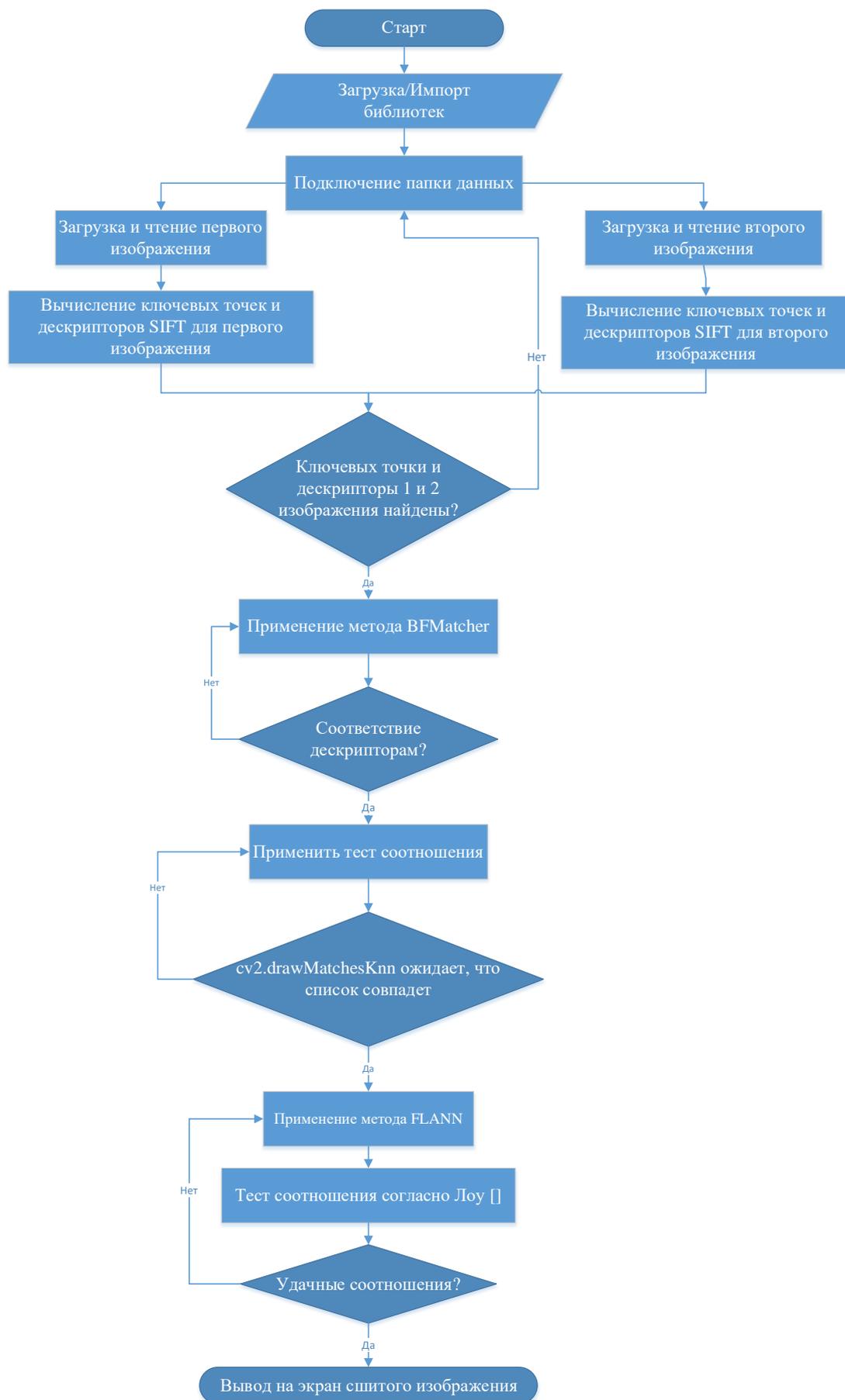


Рисунок 6 – Алгоритм программного кода для получения сшитого изображения

Существует две библиотеки с открытым исходным кодом для получения панорамного изображения - OpenCV и PanoTools. Скорость у PanoTools выше, чем у OpenCV. Однако, для реализации данного алгоритма была выбрана библиотека OpenCV, учитывая значительную пользовательскую базу. Также в библиотеке OpenCV уже реализовано вычисление следующих методов нахождения дескрипторов ключевых точек: SIFT, SURF, ORB [Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF. IEEE International Conference on Computer Vision, 2011.]. Далее представлено описание процесса создания панорамного изображения с использованием OpenCV на языке программирования Python.

Для каждой обнаруженной ключевой точки есть один дескриптор. Эти дескрипторы представляют собой массивы чисел, которые определяют ключевые точки. Для этого необходимо создать объект `BFMatcher` с помощью функции `cv2.BFMatcher_create()`. Она состоит из параметра `normType`, который определяет расстояние, как меру сходства между двумя дескрипторами. Для алгоритма SIFT часто используется тип `cv2.NORM_L1`. Следующим шагом является определение функции, `draw_matches()`, которая будет использоваться для сопоставления перекрывающихся ключевых точек. Эта функция состоит из следующих параметров.

- **img1, img2** - входные изображения;
- **keypoints1** - ключевые точки, обнаруженные на первом изображении;
- **keypoints2** - ключевые точки, обнаруженные во втором изображении;
- **matches** - перекрывающиеся ключевые точки.

Чтобы сохранить только «хорошие» совпадения, используется критерий отношения Дэвида Лоу. Лоу предложил этот критерий отношения, чтобы повысить надежность алгоритма SIFT. Для вычисления гомографии применяется функция `cv2.warpImages()`, которая состоит из параметров `img1`, `img2` и `H`. Первый и второй параметры - это два изображения и `H` матрица гомографии. Чтобы найти матрицу нужно извлечь координаты минимум 4 точек на первом изображении и соответствующих 4 точек на втором изображении. Первый вызываемый список `list_of_points_1` представляет координаты эталонного изображения, а второй список `temp_points` представляет координаты второго изображения, которое необходимо преобразовать. Затем применяется функцию `cv2.perspectiveTransform()`, которая нужна для вычисления матрицы преобразования (гомографии). Эта функция требует двух аргументов: списка точек на втором изображении и матрицы `H`. Наконец, можно деформировать второе изображение с помощью функции `cv2.warpPerspective()`. В качестве параметров этой функции нужно передать второе изображение, матрицу преобразования, а также ширину и высоту выходного изображения. После того, как применена функция, `cv2.warpImages()` можно сшивать изображения. Для начала, устанавливается условие минимального количества совпадений (желательно как минимум 10 совпадений, чтобы найти объект). Теперь, когда рассчитана матрица гомографии, можно сшить изображения вместе с помощью функции `cv2.warpImages()`. Качество сшивания изображений измеряется по сходству сшитого изображения с каждым из входных изображений, и по видимости шва между сшитыми изображениями [Szeliski, R. (2010). Computer Vision: Algorithms and Applications (1st Ed.). New York, NY, USA: Springer- Verlag New York, Inc.]. Для целей проекта достаточно оценить резкость (четкость полученного ортофотоплана), воспользовавшись одним из известных критериев качества сшивки изображений. Среди них BRISQUE, SSEQ, BIQI и NIQE.

Сценарий №2. Сбор камней и других объектов на полях, с учетом картограммы загрязнения

Основной задачей Сценария №2 является сбор инородных объектов, мешающих проезду наземных роботов с поля на основе картограммы загрязнения. Типовой сценарий предполагает наличие следующих ключевых этапов:

1. Построение картограмм загрязнения территории инородными объектами;
 - a. Идентификация потенциальных регионов интереса на основе значений NDVI индекса;
 - b. Контроль временной изменчивости значений NDVI индекса в рамках потенциальных регионов интереса (секторов);
 - c. Оценка уровней загрязнения секторов инородными объектами;
2. Приоритезация операций по сбору камней на исследуемой территории;
3. Исполнение операций по сбору камней с использованием наземных РТС.

При значительной удаленности фиксирующей видеокамеры (аэрофотосъемка), непосредственное детектирование инородных объектов и, в частности, камней, является крайне затруднительным, поскольку в случае, например, пахотных земель такие объекты, как правило, характеризуются относительно малыми размерами. Таким образом, в рамках данного сценария на первом этапе с использованием БПЛА осуществляется идентификация потенциальных регионов интереса и локализация зон предполагаемого загрязнения инородными объектами.

Реализация данного этапа базируется на разделении базового ортофотоплана местности на сектора заданного масштаба. Таким образом, формируется n независимых секторов A_i с площадями S_i ($i=1..n$) соответственно.

Далее средствами технического зрения БПЛА осуществляется оценка усредненных значений NDVI индекса $NDVI_i$ для каждого сектора A_i . В общем случае $NDVI_i = \frac{\iint NDVI dA_i}{S_i}$.

Однако, с учетом заданной высоты пролета БПЛА и ограниченной разрешающей способности сенсорных устройств, представленное выражение может быть аппроксимировано следующим образом (11):

$$NDVI_i = \frac{\sum_{j=1}^m P_{ij}}{m}, \quad (11)$$

где P_{ij} – j -й сегмент сектора A_i для которого было получено собственное значение NDVI индекса, m – число сегментов, входящих в состав сектора A_i . Для оценки значений NDVI индекса используется собственный метод, представленный в [Astapova M., Saveliev A., Markov Y. Method for Monitoring Growth of Microgreens in Containers Using Computer Vision in Infrared and Visible Ranges. Agriculture Digitalization and Organic Production. Smart Innovation, Systems and Technologies, 2022, vol. 245, pp. 383-394. DOI: 10.1007/978-981-16-3349-2_32.]. Таким образом, для каждого сектора A_i исследуемой местности могут быть получены оценочные значения NDVI индекса в заданный момент времени.

Идентификация потенциальных регионов интереса основана на анализе динамики изменения значений NDVI индекса для различных секторов с течением времени. В контексте решения задачи детектирования инородных тел и, в частности, камней, наибольшую ценность представляет весенний вегетационный период, когда плотность зеленой массы еще не достигла высоких значений. Соответственно, в течение заданного периода времени T в отношении каждого сектора A_i формируется набор ассоциированных с ним усредненных значений NDVI индекса $NDVI_{iT}$ (12):

$$NDVI_{iT} = \{NDVI_{it} | t = \overline{1, T}\}. \quad (12)$$

На основе полученных значений может быть проведена оценка темпов роста NDVI индекса для каждого из сегментов A_i (13):

$$r_i = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} (NDVI_{i(t+1)} - NDVI_{it})}{T-1}, \quad (13)$$

где r_i – усредненный темп роста NDVI индекса для сектора A_i .

По результатам проведенной оценки, вывод о принадлежности сектора A_i к набору потенциальных регионов интереса Reg может быть сделан на основе (14):

$$A_i \in Reg, \text{ если } \begin{cases} r_i < r_{mean} \\ NDVI_{iT} < NDVI_{meanT}, \\ NDVI_{iT} < NDVI_{ibase} \end{cases} \quad (14)$$

где r_{mean} – медианное значение темпов роста NDVI индекса по секторам, $NDVI_{meanT}$ – медиана конечных значений NDVI индекса по секторам, $NDVI_{ibase}$ – усредненное по годам историческое значение NDVI индекса для сектора A_i за аналогичный период (если доступно).

Таким образом, в отношении каждого сегмента A_i исследуемой местности формируется вывод о его принадлежности к набору потенциальных регионов интереса (областей, загрязненных инородными объектами) Reg . Для каждого сектора A_k вошедшего в состав набора Reg повторно иницируется процесс мониторинга данного сектора средствами БПЛА, но уже на более низких высотах, что позволяет получить более подробную информацию о значениях NDVI индекса в различных участках данного сектора. По результатам такой детализированной оценки формируется набор P_k значений индекса NDVI, ассоциированных с различными сегментами исследуемого сектора A_k (15):

$$P_k = \{NDVI_{km} | m = \overline{1, M}\}, \quad (15)$$

где M – число сегментов сектора A_k , формируемое по результатам детализированного анализа данного сектора средствами БПЛА ($M > m$), $NDVI_{km}$ – значение NDVI индекса, связанное с m -ым сегментом сектора A_k .

На следующем шаге, для каждого сектора A_k из набора Reg осуществляется построение гистограммы распределения значений NDVI индекса, полученных для сегментов данного сектора. Оценка дисперсии распределения значений NDVI индекса в данном случае может быть получена следующим образом (16):

$$D(P_k) = \frac{\sum_{m=1}^M (NDVI_{km} - E(P_k))^2}{M}. \quad (16)$$

Высокое значение полученной оценки $D(P_k)$ свидетельствует о значительной вариабельности полученных значений NDVI индекса между отдельными сегментами исследуемого сектора и сигнализирует о повышенной вероятности наличия инородных объектов на исследуемой местности. Согласно полученным оценкам $D(P_k)$, все сектора A_k из набора Reg могут быть разделены на следующие группы G с точки зрения предполагаемого уровня загрязнения: 0 – загрязнения нет; 1 – незначительное загрязнение; 2 – средний уровень загрязнения; 3 – сильное загрязнение; 4 – очень сильное загрязнение. Таким образом, отнесение некоторого сектора A_k к одной из представленных выше групп может быть реализовано в соответствии со следующим выражением (17):

$$\begin{aligned} A_k \in G_0, \text{ если: } & \left| \sqrt{D(P_k)} \right| \cong 0; \\ A_k \in G_1, \text{ если: } & 0 < \left| \sqrt{D(P_k)} \right| \leq 0.1; \\ A_k \in G_2, \text{ если: } & 0.1 < \left| \sqrt{D(P_k)} \right| \leq 0.2; \\ A_k \in G_3, \text{ если: } & 0.2 < \left| \sqrt{D(P_k)} \right| \leq 0.35; \\ A_k \in G_4, \text{ если: } & \left| \sqrt{D(P_k)} \right| > 0.35. \end{aligned} \quad (17)$$

Предложенная группировка позволяет составить картограмму загрязнения территории, т.е. не только идентифицировать зоны потенциального загрязнения инородными объектами, но и оценить уровень предполагаемого загрязнения, а также соответствующим образом приоритизировать задачи по их устранению.

С точки зрения локализации зон предполагаемого загрязнения в рамках каждого целевого сектора A_k в качестве таких зон следует, в первую очередь, рассматривать

сегменты, значение индекса NDVI для которых меньше, чем $E(P_k)$. При этом, чем ниже значение индекса для некоторого сегмента, тем выше вероятность наличия в нем загрязнений. Таким образом, в рамках данного этапа формируется секторальная картограмма загрязнений исследуемой местности с указанием предполагаемых уровней загрязнения отдельных секторов.

Следующий этап в рамках рассматриваемого сценария посвящен приоритизации операций по сбору камней на исследуемой территории. Базовая приоритизация на уровне секторов достигается за счет ранжирования секторов в соответствии с присвоенными им группами G , исходя предполагаемого уровня загрязнения. В общем случае задачи по сбору камней являются условно независимыми на уровне секторов, однако, в случае необходимости ранжирование внутри каждой отдельной группы может осуществляться на основе средневзвешенных значений NDVI индекса, полученных для данных секторов на предыдущем этапе: предпочтение следует отдавать секторам, где оценка $E(P_k)$ является наименьшей.

Далее рассмотрим вопрос приоритизации операций по сбору камней на уровне каждого отдельного сектора A_i . В данном контексте приоритизация операций предполагает определение наиболее приоритетных для сбора камней сегментов сектора A_i . В общем случае приоритет того или иного сегмента напрямую зависит от предполагаемого уровня его загрязнения (предполагаемого числа камней на его территории), который возрастает при снижении NDVI индекса для данного сегмента. Однако, на данном этапе при формировании приоритетов следует учитывать не только целесообразность выполнения операции на некотором сегменте, но и энергетические и временные затраты РТС на достижение указанного сегмента обслуживаемого сектора. Таким образом, вопрос приоритизации операций по сбору камней на уровне отдельного сектора можно представить как многокритериальную оптимизационную задачу, где в качестве критериев эффективности ее решения выступают:

1. Максимизация числа собранных камней в единицу времени;
2. Минимизация совокупной траектории РТС, осуществляющего соответствующие операции.

Дадим формальную трактовку представленным выше критериям. Максимизация числа собранных камней в единицу времени может без потери смысла быть интерпретирована как минимизация удельного времени сбора камней T' (18):

$$T' = \frac{\Delta T}{\Delta Q} \rightarrow \min, \quad (18)$$

где ΔT - время проведения операции по сбору камней, ΔQ – ожидаемое число собранных камней за время ΔT .

В свою очередь, минимизация совокупной траектории РТС в процессе выполнения операции может быть представлена следующим образом (19):

$$S' = \frac{\Delta S}{\Delta T} \rightarrow \min, \quad (19)$$

где ΔT - время проведения операции по сбору камней, ΔS – протяженность совокупной траектории РТС. При этом в качестве базового алгоритма генерации траекторий РТС рассматривается метод покрывающей траектории CPP (Coverage Path Planning) для построения пути в каждом отдельном сегменте [Vasquez-Gomez, J. I., Marciano-Melchor, M., Valentin, L., & Herrera-Lozada, J. C. (2019). Coverage Path Planning for 2D Convex Regions. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. doi:10.1007/s10846-019-01024-y] и собственный метод RRT (Rapidly-Exploring Random Trees) для построения глобальной траектории между точками выхода и входа разных сегментов, а также стартовыми и конечными координатами LRLHD-A* [Захаров К.С., Савельев А.И. Сглаживание кривизны траектории движения наземного робота в трехмерном пространстве. *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2020;24(4):107-125. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125>].

Таким образом, задача приоритизации операций по сбору камней на уровне отдельного сектора может быть представлена следующим образом (20):

$$H(T', S') \rightarrow \min. \quad (20)$$

Поиск одного из парето-оптимальных решений данной задачи может быть осуществлен с использованием широкого инструментария методов целевого программирования.

Как было указано ранее, для каждого сектора строится так называемая покрывающая траектория [Vasquez-Gomez, J. I., Marciano-Melchor, M., Valentin, L., & Herrera-Lozada, J. C. (2019). Coverage Path Planning for 2D Convex Regions. Journal of Intelligent & Robotic Systems. doi:10.1007/s10846-019-01024-y] таким образом, чтобы все целевые сегменты сектора по мере следования РТС по назначенному пути были в зоне достижимости его рабочего органа. Разработанный алгоритм построения покрывающей траектории представлен на рисунке 7.

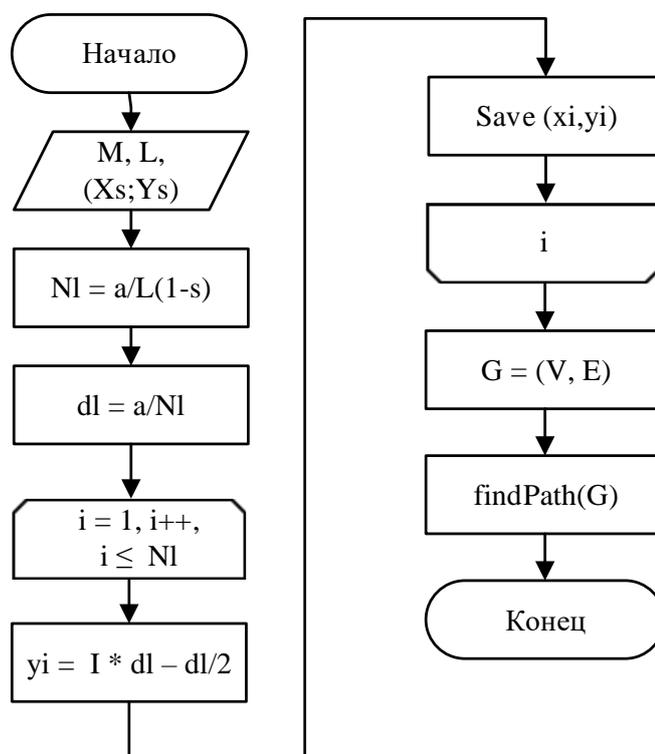


Рисунок 7. Алгоритм расчета покрывающей траектории

На вход алгоритма расчета покрывающей траектории подаются стартовая $X_s Y_s$ и конечная $X_t Y_t$ координата РТС (примем $X_s Y_s = X_t Y_t$), координаты вершин исследуемого участка $M = [X_1 Y_2; \dots; X_4 Y_4]$ и шаг покрытия L (ширина рабочей зоны РТС). Далее вычисляется количество линий покрытия N_l по формуле (21):

$$N_l = a/L(1 - s), \quad (21)$$

где a – наименьшая сторона прямоугольника для оптимального направления покрытия [Gustavo S. C. Avellar, Multi-UAV Routing for Area Coverage and Remote Sensing with Minimum Time, Sensors 2015, 15(11), 27783-27803; <https://doi.org/10.3390/s151127783>]; $s \in (0,1)$ – доля перекрытия между двумя рабочими зонами. Расстояние в метрах между двумя рядами определяется по формуле (22):

$$d_l = a/N_l. \quad (22)$$

Линии покрытия могут быть определены двумя точками (x, y) с координатами y , заданными как (23):

$$y_i = i \times d_l - 0.5d_l, i = 1, \dots, N_l. \quad (23)$$

Координаты x определяются точками, в которых горизонтальная прямая с координатой y_i пересекает границы области, которая должна быть покрыта. Крайние точки рядов покрытия вместе с координатами стартовой позиции РТС, представляются набором узлов V графа $G = (V, E)$. Каждый узел графа пронумерован так, чтобы стартовая позиция получила номер 1, узлы, относящиеся к первому ряду покрытия, получили номера 2 и 3, те, что связаны со вторым рядом, помечены как 4 и 5 и так далее. В конце каждая строка покрытия связывается с последующими четными и нечетными узлами. Набор ребер E состоит из всех линий, соединяющих N узлов графа, таким образом образуя полный граф,

Для того, чтобы найти путь на данном графе для решения задачи планирования покрывающей траектории воспользуемся методом на основе возвратно-поступательного движения, представленном в работе [Vasquez-Gomez, J. I., Marciano-Melchor, M., Valentin, L., & Herrera-Lozada, J. C. (2019). Coverage Path Planning for 2D Convex Regions. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. doi:10.1007/s10846-019-01024-y]. На выходе формируется массив координат, который составляет траекторию, вдоль которой необходимо двигаться РТС для исследования области интереса. Примеры результатов работы алгоритма представлены на рисунке 8.

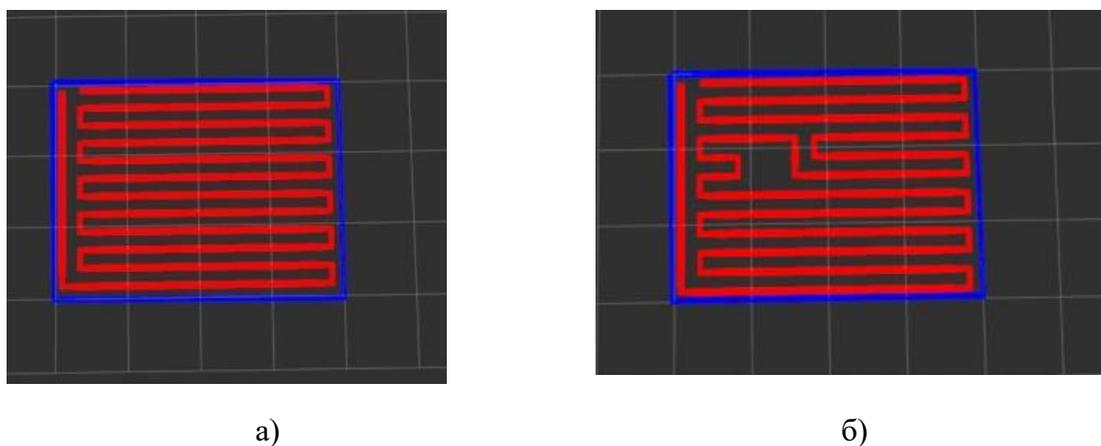


Рисунок 8 – Построенная локальная траектория: а) без препятствий, б) с препятствием

Таким образом, по результатам выполнения данного этапа осуществляется определение суб-оптимальной траектории движения РТС в процессе исполнения операции по сбору камней в заданном секторе A_i .

На заключительном этапе рассмотрим непосредственно сами операции по сбору камней. Во время выполнения операций по сбору камней РТС, перемещаясь по определенной на предыдущем этапе траектории, производит анализ окружающего пространства с целью детектирования инородных объектов. Процесс детектирования может быть реализован за счет использования решения для детектирования объектов на изображениях, полученных с камеры РТС [<https://github.com/tensorflow/tpu/tree/master/models/official/detection>]. В рамках данного решения нейросетевая модель SpineNet используется в качестве архитектурной основы, а нейросетевая модель Mask R-CNN в качестве детектора объектов [<https://arxiv.org/pdf/1912.05027v3.pdf>]. По результатам детектирования инородного объекта (камня) в окружающем пространстве, РТС производит оценку пространственного положения данного объекта.

На следующем шаге на основе данных, полученных средствами технического зрения и бортовыми сенсорами РТС, осуществляется поиск ключевых точек захвата данного объекта в соответствии с решением, представленным в работе [Яковлев Р. Н., Рубцова Ю. И., Ерашов А. А. Сравнительная оценка подходов к определению точек захвата объектов робототехническим средством //Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – Т. 22.

– №. 2. – С. 83-93. DOI: 10.17587/mau.22.83-93]. Полученная информация в отношении оптимальных точек захвата объекта передается системе управления захватным механизмом РТС, которая осуществляет расчет траектории движения манипулятора для достижения им указанных точек захвата объекта. Процесс захвата выполняется с использованием системы обратной связи, реализованной за счет применения тактильных сенсоров [Erashov A., Krestovnikov K. Algorithm for controlling manipulator with combined array of pressure and proximity sensors in gripper. Electromechanics and Robotics. Smart Innovation, Systems and Technologies, 2022, vol. 232, pp. 61-71. DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6_6.], установленных на захватном механизме РТС. По результатам успешного захвата целевого объекта, манипулятор РТС перемещает данный объект в корзину, расположенную на борту, после чего РТС продолжает исполнение операции и поиск инородных объектов в окружающем пространстве.

В качестве критерия эффективности выполнения рассматриваемого сценария в рамках модельных экспериментов предлагается критерий, в соответствии с которым РТС необходимо обнаружить и собрать наибольшее число камней за время операции, то есть максимизировать число собираемых камней в единицу времени (24):

$$K_{сб} = \frac{\Delta Q}{T_{сб} \cdot (Q - \Delta Q)} \rightarrow \max, \quad (24)$$

где $T_{сб}$ – время проведения сбора камней; Q – число камней на территории сектора, заданное в рамках моделируемой среды; ΔQ – число собранных камней в процессе выполнения операции.

Сценарий №3. Внесение удобрений с учетом различных факторов

В рамках Сценария №3 основной задачей является внесение удобрений средствами РТС на территории поля. В настоящем исследовании под сельскохозяйственной территорией понимается участок земли, используемый для выращивания колонновидных яблонь и занимающий площадь в несколько гектаров. Яблони высажены в ряды с расстоянием между ними не менее 1 метра, что достаточно для свободного перемещения к яблоне как наземных, так и воздушных РТС.

Базовый сценарий включает в себя следующие основные этапы:

1. Идентификация потенциальных регионов интереса, на которых требуется осуществить внесение удобрений, исходя из анализа данных о значениях NDVI индекса на исследуемой территории;
2. Группировка и приоритезация задач по внесению удобрений на исследуемой территории;
3. Выполнение задач по внесению удобрений с использованием группы гетерогенных РТС.

В данном случае процесс идентификации потенциальных регионов интереса во многом аналогичен Сценарию №2. Идентификация регионов интереса также основана на анализе динамики изменения значений NDVI индекса для различных секторов A_i исследуемой территории с течением времени. Однако, в контексте данного сценария процессы исследования местности следует проводить циклически в течение всего активного вегетационного периода растений, поскольку объемы и темпы прироста зеленой массы являются одними из ключевых показателей, по которым можно определить потребность во внесении удобрений. Соответственно вегетационный период следует разделить на несколько пересекающихся временных участков, в рамках которых анализ исследуемой территории будет производиться независимо. Таким образом, в течение каждого заданного периода времени T в отношении каждого сектора A_i будет формироваться соответствующий набор усредненных значений NDVI индекса $NDVI_{iT}$ (25):

$$NDVI_{iT} = \{NDVI_{it} | t = \overline{1, T}\}. \quad (25)$$

На основе полученных значений может быть проведена оценка темпов роста NDVI индекса для каждого из сегментов A_i в рамках заданного периода времени T (26):

$$r_i = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} (NDVI_{i(t+1)} - NDVI_{it})}{T-1}, \quad (26)$$

где r_i – усредненный темп роста NDVI индекса для сектора A_i .

По результатам проведенной оценки, вывод о принадлежности сектора A_i к набору потенциальных регионов интереса Reg может быть сделан на основе следующего выражения (27):

$$A_i \in Reg, \text{ если } \begin{cases} r_i < r_{mean} \\ NDVI_{iT} < NDVI_{ibase} \end{cases}, \quad (27)$$

где r_{mean} – медианное значение темпов роста NDVI индекса по секторам, $NDVI_{ibase}$ – усредненное по годам историческое значение NDVI индекса для сектора A_i за аналогичный период (если доступно).

После того, как был определен набор потенциальных целевых секторов Reg , для каждого из секторов A_j , входящих в состав данного набора, реализуется процесс мониторинга данного сектора средствами БПЛА группы А1 на более низких высотах, чем обычный мониторинг, что позволяет получить более подробную информацию о значениях NDVI индекса в различных участках данного сектора. По аналогии со сценарием №2 по результатам такой детализированной оценки формируется набор P_j значений индекса NDVI, ассоциированных с различными сегментами исследуемого сектора A_j (28):

$$P_j = \{NDVI_{jm} | m = \overline{1, M}\}, \quad (28)$$

где M – число сегментов сектора A_j , формируемое по результатам детализированного анализа данного сектора средствами БПЛА ($M > m$), $NDVI_{jm}$ – значение NDVI индекса, связанное с m -м сегментом сектора A_j .

На следующем шаге, для каждого сектора A_j из набора Reg осуществляется оценка выборочного среднего по данному сектору $E(A_j)$, исходя из значений NDVI индекса, полученных для сегментов данного сектора. Оценка выборочного среднего в данном случае осуществляется в соответствии со следующим выражением (29):

$$E(A_j) = E(P_j) = \frac{\sum_{m=1}^M NDVI_{jm}}{M}. \quad (29)$$

В целях дальнейшего анализа для каждого сектора A_j определим разностную матрицу M_j следующим образом (30):

$$M_j = \begin{bmatrix} NDVI_{11} - E(A_j) & \dots & NDVI_{1K} - E(A_j) \\ \dots & \dots & \dots \\ NDVI_{L1} - E(A_j) & \dots & NDVI_{LK} - E(A_j) \end{bmatrix} = [m_{lk}]^{LK}, \quad (30)$$

где L, K – число сегментов в составе сектора A_j по вертикальному и горизонтальному направлениям соответственно ($L \cdot K = M$), $NDVI_{lk}$ – значение NDVI индекса в некотором сегменте P_{lk} ($P_{lk} \in A_j$).

Данная матрица определена с соблюдением относительного расположения сегментов P_{lk} сектора A_j , а каждая ее ячейка отражает отклонение значения NDVI индекса в некотором сегменте P_{lk} от среднего значения NDVI индекса по данному сектору.

На следующем шаге осуществляется оценка вариабельности значений NDVI индекса в окрестностях каждого сегмента исследуемого сектора A_j . Соответствующие матрицы оценок вариабельности V_j в отношении каждого сектора A_j могут быть получены следующим образом (31):

$$V_j = \begin{bmatrix} v_{11} & \dots & v_{1K} \\ \dots & v_{lk} & \dots \\ v_{L1} & \dots & v_{LK} \end{bmatrix}, v_{lk} = \left| \sqrt{(m_{lk} - \frac{\sum_{a=l-1}^{l+1} \sum_{b=k-1}^{k+1} m_{ab})^2}{9}} \right|. \quad (31)$$

Высокая вариабельность значений NDVI индекса вокруг некоторого сегмента P_{lk} в совокупности с низкими значениями NDVI для данного сегмента в рамках настоящего сценария рассматриваются как признаки необходимости внесения удобрений на данном

сегменте. Таким образом, отнесение некоторого сегмента P_{lk} к группе сегментов N_j , требующих внесения удобрений, может быть реализовано в соответствии со следующим выражением (32):

$$P_{lk} \in N_j, \text{ если: } \begin{cases} m_{lk} \leq 0 \\ v_{lk} \geq 0,15 \end{cases} \quad (32)$$

где N_j – группа сегментов сектора A_j , для которых, согласно результатам проведенной оценки динамики изменения NDVI индекса, требуется провести операцию по внесению удобрений. Объединяя результаты, полученные для каждого сектора в отдельности, может быть получен набор N , включающий в себя все сегменты по всем секторам, где требуется провести операции по внесению удобрений (33):

$$N = N_1 \cup \dots \cup N_j \cup \dots \cup N_J. \quad (33)$$

Полученный набор, а также вся информация в отношении входящих в него сегментов передаются на рассмотрение оператору, который принимает конечное решение в отношении необходимости полива каждого из представленных сегментов исследуемой территории. По результатам решения оператора, формируется конечный набор регионов интереса N , включающий в себя I сегментов, на которых необходимо выполнить задачи по внесению удобрений.

Следующий этап в рамках рассматриваемого сценария посвящен группировке и приоритизации задач по внесению удобрений. С учетом потенциально большего числа сегментов, требующих внесения удобрений, а также относительно высокой ресурсоемкости соответствующих операций (для реализации задачи по внесению удобрений требуется целая группа гетерогенных РТС, как наземного, так и воздушного типов) необходимо:

1. Осуществить группировку задач по внесению удобрений на отдельных участках территории (сегментах) с целью оптимизации временных и энергетических затрат на проведение операций;

2. Определить приоритет выполнения сформированных групп задач.

Рассматривая вопрос группировки задач по внесению удобрений с целью снижения ресурсоемкости выполнения соответствующих операций, в качестве базовой метрики для выполнения группировки была выбрана евклидова мера расстояния между сегментами. Данный подход потенциально позволяет не только снизить число операций с участием РТС, но и сократить конечную протяженность траекторий РТС при выполнении соответствующих задач. Таким образом, для решения задачи по группировке сегментов предлагается выполнить кластеризацию результирующего набора N , полученного на предыдущем этапе. В качестве основных алгоритмов кластеризации следует рассматривать метод DBSCAN [Schubert, E., Sander, J., Ester, M., Kriegel, H. P., & Xu, X. (2017). DBSCAN revisited, revisited: why and how you should (still) use DBSCAN. ACM Transactions on Database Systems (TODS), 42(3), 1-21.] и EM-алгоритм [Yan, Z., Liang, J., Pan, W., Li, J., & Zhang, C. (2017). Weakly-and semi-supervised object detection with expectation-maximization algorithm. arXiv preprint arXiv:1702.08740.], которые не требуют априорных знаний о предполагаемом числе кластеров.

По результатам выполнения кластеризации набора N , формируется W непересекающихся кластеров C_w , каждый из которых включает в себя Q_w независимых сегментов. В зависимости от состава группы гетерогенных РТС, участвующих в выполнении задач по внесению удобрений, каждой такой группе в рамках отдельно взятой операции может быть доступна обработка лишь ограниченного числа сегментов P_{max} . В таком случае полученные кластеры следует разделить таким образом, чтобы число сегментов в каждом конечном кластере не превосходило заданной величины P_{max} . Для решения задачи по разбиению кластеров можно воспользоваться методом кластеризации K-means, где в качестве целевого числа кластеров задавать, значение, определяемое в соответствии со следующим выражением (34):

$$num = \left\lfloor \frac{Q_w}{P_{max}} \right\rfloor + 1. \quad (34)$$

Таким образом, по результатам выполнения данного шага формируется K непересекающихся групп задач по внесению удобрений, представленных кластерами C_k (35):

$$C_k = \{P_{ki} | i = \overline{1, Q_k}\}, \quad (35)$$

где Q_k – число сегментов в k -м кластере.

Следующий шаг в рамках рассматриваемого сценария посвящен приоритизации групп задач по внесению удобрений. В данном контексте наибольший приоритет следует отдавать тем группам задач C_k , для которых выборочное среднее значений индекса NDVI по группе является наименьшим. Таким образом, по результатам выполнения данного этапа осуществляется группировка и приоритизация групп задач по внесению удобрений посредством РТС на исследуемой территории.

Отметим, что рассмотренные выше этапы данного сценария подходят для любых культур, для которых применима оценка NDVI индекса в качестве критерия для принятия решения о необходимости внесения удобрений.

На заключительном этапе рассмотрим непосредственно сами операции по внесению удобрений применительно к случаю плантации колоновидных яблонь. В состав базовой группы РТС для выполнения соответствующей операции входят: четыре БпЛА и две наземных платформы. Одна наземная платформа в данном сценарии выполняет роль дозправочной станции (G1), а вторая – станции для замены аккумуляторов БпЛА (G2). По умолчанию предусматривается, что размеры сегментов и расстояние между ними рассчитаны таким образом, чтобы одной такой гетерогенной группы РТС хватило на обслуживание от одного до трех сегментов.

Во время выполнения задания наземные платформы передвигаются между рядами деревьев в соответствии с маршрутом, рассчитанным посредством RRT-алгоритма. БпЛА в рамках данной операции в свою очередь имеют два назначения. Два БпЛА оборудуются бортовыми баками для транспортировки, а также механизмом внесения удобрений (группа A2). Два других БпЛА (группа A1) оборудуются расширенным набором средств технического зрения и модулями коммуникации для реализации функций контроля за проведением операции.

Каждый сегмент, в отношении которого поставлена задача по внесению удобрений, представляет собой некоторый участок поля длиной L и шириной B и содержит K рядов яблонь по N деревьев в каждом ряду. Объем удобрений на одно дерево составляет v . В процессе проведения операции наземное РТС движется между двух рядов деревьев, в то время как БпЛА непосредственно осуществляют внесение удобрений.

За один полет каждый профильный БпЛА способен удобрить x_n деревьев, $n=1, N$. За время реализации данного процесса, наземная платформа G1 продвигается вдоль рядов к дереву x_{n+1} . Далее БпЛА пополняет запас удобрений и при необходимости производит замену аккумуляторных батарей.

Через время t после начала операции к рабочей области направляются БпЛА группы A1, реализующие функции контроля, с целью фиксации выполненных работ. Внесение удобрений считается успешно выполненным, если удобрения внесены в границах окружности радиусом r вокруг ствола.

Конечным критерием эффективности в контексте данного сценария следует считать долю успешно удобренных деревьев. Операция в сегменте считается успешно выполненной, если по ее результатам, удобренными оказываются более 85% деревьев обрабатываемого сегмента ($\forall P_{ki} \in C_k$). В случае обнаружения средствами контролирующих БпЛА неудобренных деревьев, система передает оператору соответствующее оповещение с координатами указанных объектов и продолжает выполнение текущей операции.

Сценарий №4. Сбор плодов с учетом картограмм урожайности

Основной задачей Сценария №4 является сбор плодов с колонновидных яблонь с помощью взаимодействующих между собой наземных РТС и БпЛА.

Типовой сценарий (этапы):

- 1) Детектирование и определение местоположения плодов. Построение картограммы урожайности;
- 2) Группировка задач по сбору плодов;
- 3) Выполнение операций по сбору плодов с использованием группы гетерогенных РТС;

Колонновидная яблоня — естественный клон яблони, у которой не образуется боковых ветвей. Ствол и вертикальные скелетные ветви колонновидной яблони обрастают короткими плодовыми образованиями. Высота дерева, как правило, не превышает 3.5 м. Количество яблок на 1 дереве обычно находится в диапазоне от 10 до 50 штук. Соответственно первой критически важной задачей в рамках рассматриваемого сценария является детектирование и определение местоположения плодов на исследуемой местности.

Реализация данного этапа базируется на использовании БпЛА, оснащенных системами технического зрения. Для каждого БпЛА, задействованного на данном этапе, формируется некоторая непересекающаяся покрывающая траектория, при движении по которой БпЛА осуществляет детектирование плодов и фиксацию их пространственного положения. В процессе формирования данных траекторий исследуемая местность разбивается на N непересекающихся секторов, для каждого из которых строится собственная покрывающая траектория с использованием метода CPP (Coverage Path Planning) [Vasquez-Gomez, J. I., Marciano-Melchor, M., Valentin, L., & Herrera-Lozada, J. C. (2019). Coverage Path Planning for 2D Convex Regions. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. doi:10.1007/s10846-019-01024-y].

Процесс детектирования плодов в пространстве может быть реализован за счет использования решения для детектирования объектов на изображениях, полученных с камеры РТС [<https://github.com/tensorflow/tpu/tree/master/models/official/detection>]. В рамках данного решения нейросетевая модель SpineNet используется в качестве архитектурной основы, а нейросетевая модель Mask R-CNN в качестве детектора объектов [<https://arxiv.org/pdf/1912.05027v3.pdf>]. По результатам детектирования целевого объекта (яблока) в окружающем пространстве, БпЛА производит оценку пространственного положения данного объекта при помощи бортовых сенсоров, исходя из оценки собственного положения и относительного расположения целевого объекта.

Таким образом, по результатам выполнения данного этапа может быть получена картограмма урожайности в отношении исследованной местности. В качестве единичной ячейки для данной картограммы целесообразно принять участки поверхности, площадью 1-2 м² в таком случае полученная картограммы с высокой степенью достоверности будет отражать число плодов на каждом конкретном дереве.

Следующий этап в рамках рассматриваемого сценария посвящен группировке задач по сбору плодов. Для выполнения такого рода задач в рамках настоящего сценария предполагается использовать группу гетерогенных РТС, представленных: БпЛА, оснащенными системами технического зрения и захватными механизмами (манипуляторами); наземными РТС, оснащенными корзинами для сбора и транспортировки сорванных плодов; наземными РТС, реализующими операции по замене аккумуляторов БпЛА.

В процессе выполнения задания РТС, оборудованная корзиной для транспортировки плодов перемещается в заданную точку остановки. БпЛА, в свою очередь, осуществляют сближение с плодами, срывают плоды и обеспечивают их транспортировку до точки

остановки (место базирования наземной РТС), после чего помещают их в корзину, расположенную на наземном РТС. Заданный алгоритм действий повторяется вплоть до критического снижения уровня заряда аккумулятора БпЛА. В случае критического снижения уровня заряда БпЛА временно прекращает процесс сбора плодов и отправляется на базовую станцию для смены аккумулятора.

В рамках представленной концепции, группировка задач по сбору плодов должна быть ориентирована на минимизацию совокупного срока исполнения соответствующих задач. Определим ключевые ограничения, присутствующие при решении данного рода задач. В первую очередь, отметим, что грузоподъемность наземной РТС является ограниченной: каждая наземная РТС способна одновременно транспортировать не более F_m плодов. Средняя скорость движения наземной РТС R_k составляет v_r . В контексте БпЛА следует учитывать ограниченный запас аккумуляторов БпЛА: при движении без груза средний расход энергии БпЛА составляет E_e %/ч, а при движении с грузом (плодом) расход энергии увеличивается до E_f %/ч, время исполнения операции по замене аккумулятора БпЛА составляет T_{ch} . Крейсерская скорость движения БпЛА в рабочем пространстве в отсутствии значимых возмущений внешней среды составляет v_q . Кроме того, на скорость выполнения задачи также существенно влияют временные затраты на сближение и срез каждого отдельно взятого плода посредством БпЛА. Определим среднее оценочное значение данной величины как t_c .

Таким образом, оценка временных затрат на сбор некоторого плода F_i посредством БпЛА q_j может быть определена на основе следующего выражения (36):

$$t(F_i, q_j) = \frac{2r(F_i, q_j)}{v_q} + t_c, \quad (36)$$

где $r(F_i, q_j)$ – протяженности пути от текущего местоположения БпЛА q_j (точка остановки) до места расположения плода F_i .

Расход энергии БпЛА на выполнение соответствующей операции может быть определен следующим образом (37):

$$E_t(F_i, q_j) = \left(\frac{r(F_i, q_j)}{v_q} + t_c \right) E_e + \left(\frac{r(F_i, q_j)}{v_q} \right) E_f. \quad (37)$$

Согласно представленным выше выражением, ключевым методом снижения времени исполнения отдельной операции является минимизация протяженности пути между точкой остановки b_k и местоположением плода F_i . Кроме того, минимизации пути также способствует снижению удельных энергетических затрат БпЛА на выполнение операции. Таким образом, для достижения минимального значения совокупного срока исполнения задач в рамках заданной концепции необходимо определить оптимальные точки остановки наземных РТС и обеспечить привязку операций по сбору плодов к данным точкам с учетом представленных выше ограничений.

В таком случае с каждой точкой остановки b_k будет связан набор операций по сбору плодов F_i ($i=1..I_k$). Оценка временных затрат на выполнение соответствующей группы операций может быть произведена в соответствии со следующим выражением (38):

$$T_k = \frac{2r(S_k, b_k)}{v_r} + \sum_{i=1}^{I_k} t(F_i, b_k) + \frac{\sum_{i=1}^{I_k} E_t(F_i, b_k)}{100\% * n_q}, \quad (38)$$

где $r(S_k, b_k)$ – протяженность пути от места начала операции до точки остановки, n_q – число БпЛА, участвующих в выполнении рассматриваемой группы задач по сбору плодов.

Таким образом, задача минимизации совокупного срока исполнения операций по сбору плодов может быть представлена в следующем виде (39):

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{k=M} T_k \rightarrow \min \\ \forall I_k > F_m \end{cases}, \quad (39)$$

где M – число точек остановки (групп задач), определенное с учетом ограничения на грузоподъемность наземного РТС. Метод поиска точек остановки и определения связанных наборов задач по сбору плодов представлен в исследовании зарубежных участников

данного проекта [Guzey, A., Akinci, M. M., & Guzey, H. M. (2021). Smart Agriculture With Autonomous Unmanned Ground and Air Vehicles: Approaches to Calculating Optimal Number of Stops in Harvest Optimization and a Suggestion. In Artificial Intelligence and IoT-Based Technologies for Sustainable Farming and Smart Agriculture (pp. 151-174). IGI Global.]. Представленное в работе решение позволяет определить оптимальное число и координаты точек остановки и основано на кластеризации задач по сбору плодов, исходя из оценок местоположения последних.

Таким образом, по результатам выполнения данного этапа осуществляется: определение суб-оптимального числа точек остановки наземных РТС, определение местоположения данных точек остановки, а также привязка задач по сбору плодов к полученным точкам остановки.

На заключительном этапе в рамках представленного сценария осуществляется независимое выполнение групп задач по сбору плодов с колонновидных яблонь в соответствии с представленной выше концепцией.

Конечным критерием эффективности в контексте данного сценария следует считать долю успешно собранных плодов. Операция по сбору группы плодов считается успешно выполненной, если по ее результатам, собранными оказываются более 75% яблок на обрабатываемом участке местности. В случае невозможности осуществить сбор задетектированного средствами технического зрения БпЛа плода, система передает оператору соответствующее оповещение с координатами указанного объекта и продолжает выполнение текущей операции.

Общие критерии оценки качества человеко-машинного интерфейса сельскохозяйственных роботов при выполнении совместных задач

Несмотря на обилие и существенный технический прогресс средств построения различных интерфейсов, таких как регистраторы движений человека, манипуляторы, робототехнические средства, задача оценки качества функционирования ЧМИ остается слабо формализуемой и зачастую решается приближенными методами, поскольку сильно зависит от субъективных факторов. Чтобы ЧМИ был востребован, он должен выполнять не только свои прямые функции, но и быть удобным и интуитивно понятным в использовании. Таким образом, проблема оценки качества ЧМИ на сегодняшний день остается открытой.

Отталкиваясь от рассмотренного выше сценария, введем следующие требования оценки качества ЧМИ сельскохозяйственных роботов. Разрабатываемый ЧМИ для сельскохозяйственного комплекса РТС, описанного выше, должен обеспечивать: 1) полноту и достоверность информации обо всех РТС, входящих в G1, G2, A1, A2, которую получит оператор; 2) возможность гибкой настройки миссии с учетом всех особенностей выполнения рассмотренного сценария; 3) анализ хода выполнения миссии на основании данных телеметрии РТС с учетом заложенного критерия эффективности выполнения сценария; 4) возможность планирования, ввода, корректировки и анализа маршрута движения и действий всех РТС; 5) возможность ввода альтернативных и аварийных маршрутов движения и действий РТС в случае непредвиденных обстоятельств. Для соблюдения этих требований при разработке возможных вариантов ЧМИ необходимо определение соответствующих критериев оценки качества ЧМИ.

Рассмотрим также некоторые общепринятые критерии оценки качества ЧМИ, которые можно применить к описанной задаче. Среди наиболее популярных в литературе и используемых на практике способов оценки качества интерфейса можно выделить следующие: анкетирование пользователей, экспериментальная проверка системы пользователями, экспертная оценка, определение среднего времени, необходимого пользователю по методике GOMS, KLM-GOMS, оценка качества интерфейса на основе

методики оценки сложности системы Т. Комбера и Дж. Мэлтби, метод эвристической оценки с участием потенциальных операторов [Sauro J. Measuring Task Times without Users. 2011. Available at: <http://www.measuringusability.com/predicted-times.php> (accessed 2020-12-14); Mayhew D.J. Keystroke level modeling as a cost justification tool. Cost-Justifying Usability. Morgan Kaufmann, 2005; 465-XV. DOI: 10.1016/B978-012095811-5/50016-X; Comber T., Maltby J. R. Investigating Layout Complexity. CADUI. 1996; 209–228.; Nielsen J. Heuristic evaluation. Usability inspection methods. John Wiley & Sons, Inc., 1994; 25–62.]. Среди наиболее эффективных инструментов оценки качества интерфейсов можно выделить следующие:

- определение времени выполнения заданий опытными пользователями для различных вариантов решения поставленной задачи по методике KLM-GOMS;
- оценка качества интерфейса на основе методики оценки сложности системы Т. Комбера и Дж. Мэлтби. Метод позволяет получить количественную оценку сложности рассматриваемой системы.
- анкетирование операторов и экспертов во время тестирования ЧМИ по ряду параметров: функциональность, гибкость, защищенность, доступность, комфортность взаимодействия с системой.

Существуют также дополнительные количественные меры прямой и косвенной оценки ЧМИ, основывающиеся на оценке выполняемой задачи (Таблица 2).

Таблица 2 – Показатели для прямой и косвенной эмпирической оценки качества ЧМИ

Фактор	Критерий
Эффективность управления	Правильность выполнения задачи
	Частота успешного выполнения задачи
Качество управления	Время выполнения задачи
	Степень осведомленности о ситуации
	Количество управляющих действий
	Точность диагностики ситуации
	Время обнаружения и диагностики ситуации
	Поведение контролируемого технологического параметра
Рабочие условия	Рабочая нагрузка
	Функциональное состояние оператора

Эти показатели могут использоваться для косвенной оценки качества интерфейса, однако их применение в существенной мере зависит от характера регулируемого процесса, ситуации, опыта оператора и ряда других факторов. Их рассмотрение на этапе разработки позволяет сформировать требования к техническому облику проектируемого ЧМИ на основе рассмотренного сценария использования сельскохозяйственных РТС.

Требования к человеко-машинному интерфейсу для группового управления гетерогенными роботами при выполнении сельскохозяйственных задач

Развитие сложных систем, использующих наземных мобильных роботов для выполнения различных задач на открытой местности, привело к росту числа исследований способов обеспечения человеко-машинного взаимодействия в подобных системах. Представленные в работах последних лет ЧМИ наземных роботов различаются по способу

взаимодействия оператора с робототехническими средствами, по типу поддерживаемых устройств и их назначению, по типу управления устройствами.

Среди способов взаимодействия оператора с наземными роботами можно выделить следующие: а) взаимодействие посредством цифрового приложения с графическим интерфейсом, б) взаимодействие с использованием средств виртуальной или дополненной реальности, в) взаимодействие посредством набора предопределённых жестов, г) взаимодействие посредством голосовых команд, д) взаимодействие с использованием нейрокомпьютерного интерфейса. Современные ЧМИ, обеспечивающие выполнение сложных сценариев человеко-машинного взаимодействия, чаще всего используют комбинацию из нескольких способов взаимодействия.

По типу управления различают: ручное управление (оператор управляет передвижением робототехнического средства вручную), полуавтоматическое (роботы выполняют миссию автоматически, получив необходимые для начала работы данные, при этом оператор может вмешаться в их работу на различных этапах выполнения миссии для корректировки задачи), автономное (после назначения миссии роботы работают полностью автономно, оператор не вмешивается в ход миссии). Кроме того, различают ЧМИ для управления одним роботом и группой. Единичное управление происходит за счет передачи целевой точки или заранее определенной миссии конкретной робототехнической платформе. В противоположность единичному управлению, групповое подразумевает объединение нескольких РТС в одну группу или разбиение большой группы на несколько групп, после чего команды управления поступают управляющему ПО, которое в свою очередь распределяет задачи по группам.

Взаимодействие оператора с наземными мобильными роботами при автономном управлении группой устройств главным образом сосредоточено вокруг контроля за выполнением назначенной миссии. Из передаваемых с роботов данных с установленных сенсоров и датчиков оператор получает информацию о статусе выполнения миссии и состоянии робота. Наглядность представления данной информации – важный критерий, который необходимо учитывать при проектировании ЧМИ, поскольку она обеспечивает простое взаимодействие оператора с роботами и упрощает анализ данных и принятие решений. Лучше всего с этой задачей справляются ЧМИ, в которых в качестве основного способа взаимодействия с робототехническими средствами используется цифровое приложение с графическим интерфейсом. При совместном использовании БПЛА и наземных роботов можно отказаться от присутствия человека на месте проведения операции, а также произвести разведку при помощи БПЛА и в дальнейшем использовать собранные данные для управления уже наземным РТС. В случае если система рассчитана на полуавтоматическое управление, в ЧМИ могут быть предусмотрены функции редактирования миссий, либо полное вмешательство в работу системы. При необходимости непосредственного наблюдения и контроля за наземными РТС, могут быть использованы ЧМИ на основе жестового управления. Они могут применяться при совместном выполнении миссий роботом и человеком. Беспроводная связь ЧМИ с РТС может быть установлена при помощи различных протоколов связи, например, ZigBee. Выбор средств беспроводного соединения ограничивается только предполагаемой рабочей дистанцией между РТС и оператором.

Для управления группой разнородных РТС интерфейс оператора должен включать в себя следующие инструменты:

- построение траектории перемещения к заданной точке;
- построение траектории перемещения по массиву точек;
- автоматическое построение траектории перемещения для мониторинга объекта заданной площади (например, обследования рельефа дна с заданным шагом);
- выбор различных режимов (патрулирование, удержание позиции, слежение за объектом и т.д.);

–выбор необходимого действия в заданной точке или на всем протяжении пути (например, сброс груза в определенной точке, съемка с заданной частотой, передача какого-либо сигнала с заданной частотой и т.д.);

–выбор режима взаимодействия внутри группы;

–выбор режима взаимодействия между группами;

–возможность ручной корректировки траектории;

–возможность выделить роботов в какую-либо группу и вынести их на отдельный слой.

Помимо основных параметров необходимо заранее прописать алгоритм действий при внештатных ситуациях, будь то проблемы с питанием, потеря ориентации или проблемы с навесным оборудованием. Для снижения вероятности возникновения таких ситуаций предварительно необходимо провести проверку работоспособности всех систем РТС, без которой невозможно получить доступ к выполнению основной миссии. Данная функция может содержать различные пункты, например проверку всех основных узлов, проверку наличия фиксаторов, проверку целостности конструкции и т.д.

Для отслеживания роботов и их параметров во время выполнения миссии удобно выделить специальное окно, которое бы имело гибкую настройку. Например, рабочее поле может содержать следующие окна:

–поле с картой, где можно наблюдать за перемещением роботов;

–выбор слоя с необходимыми группами или типами роботов;

–вывод сразу нескольких карт, например физической карты и карты глубины;

–вывод данных с радара;

–вывод параметров связи (качество, потери, скорость соединения);

–вывод запаса аккумулятора/топлива, а также вывод прогнозируемого остаточного времени работы;

–вывод значений с необходимых датчиков и сенсоров (температура, скорость и прочее);

–курс РТС, а также виртуальный прогноз на перемещение;

–дерево выполнения миссии;

–блок предупреждений;

–некий блок с функциями для ручного управления, например вход в режим паузы (аппарат бы остановился и удерживал позицию), возврат на базу, переход в полностью ручное управление;

–блок вывода изображения с возможных камер.

Также для удобства работы оператора необходимо вывести звуковое оповещение, например звуковой вывод об ошибках, информирование о возможном столкновении, тревога. Данная функциональность необходима для того, чтобы снизить влияние человеческого фактора на ход миссии, а именно снизить вероятность ситуации, в которой оператор из-за усталости, невнимательности и прочих обстоятельств пропустит важное сообщение от системы. Например, при выполнении долгой миссии оператор не всегда может визуально следить за параметрами, и звуковое оповещение необходимо для привлечения внимания. Для удобства можно выделить отдельную вкладку в интерфейсе приложения, где можно было бы просматривать после завершения миссии файлы регистрации всех систем, данные с сенсоров, привязанные к координате и времени и прочее.

Что касается общих тенденций в разработке РТС, в настоящее время существует три приоритетных типа архитектуры человеко-машинных систем, которые пользуются популярностью в управлении роботами: адаптивные [Chaikalis D., Khorrami F., Tzes A. Adaptive Control Approaches for an Unmanned Aerial Manipulation System. 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). – IEEE, 2020. – P. 498–503], надзорные

(супервизорные) и распределенные [Tzafestas S. G. Supervisory and Distributed Control in Automation. Human and Nature Minding Automation. – Springer, Dordrecht, 2010. – P. 83–108.]. В адаптивной системе ЧМИ призван предоставить средства для восприятия больших объемов информации и операций над ними, с учетом таких ограничивающих факторов, как время, когнитивная нагрузка на оператора, имеющееся оборудование, т.д. [Zhang P. Human-machine interfaces. Advanced Mchine Interface: Elsevier Science & Technology. – 2010. – P. 527–55]. Искусственный интеллект, интегрированный в человеко-машинный интерфейс, повышает гибкость системы управления, помогает улучшить ее адаптируемость. Адаптивный интерфейс подстраивается под определенные действующие ограничения, чтобы в наибольшей степени отвечать им всем, а также варьирует средства и способы обеспечения этой адаптации [Motlagh F.Y., Göhner P. Adaptive Human-Machine-Interface of Automation Systems. Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. – P. 175–182.].

Адаптивный интерфейс может помочь оператору в получении информации в доступной форме. В любой системе, предназначенной для управления, принимаются во внимание две основные составляющие: система, генерирующая информационный поток, и оператор, для которого эта информация предназначена. Система и оператор объединены общей целью, контролировать процесс и решать возникшие проблемы. Роль интерфейса – интегрировать эти различные цели, обладающие разными приоритетами и учитывать ограничения. Цель адаптации – оптимизировать представление информационных элементов, согласно текущему состоянию процесса и логически выведенному состоянию оператора. Для этого используются следующие средства в адаптивном ЧМИ:

- подсвечивать важные элементы информации. Важность конкретного информационного фрагмента зависит от его релевантности в соответствии с конкретными целями и ограничениями каждой из сущностей, участвующих в коммуникации между системой и оператором;

- оптимизировать использование пространства. Согласно текущему уровню использования ресурсов, может оказаться необходимым реорганизовать пространство дисплея, чтобы соответствовать новым ограничениям и параметрам;

- выбрать наилучшее представление. В соответствии с каждым информационным элементом, его важностью, доступными ресурсами, для коммуникации с оператором должен применяться медиаканал наиболее подходящий из доступных;

- своевременность подачи информации. Каждый информационный элемент должен выводиться вовремя, с точки зрения процесса и оператора. Адаптация должна следовать за эволюцией процесса во времени, но также адаптироваться к хронометражу отображаемой информации в соответствии с логически выведенными потребностями оператора;

- варианты представления. В традиционных интерфейсах оператору приходится самостоятельно решать, какую именно информацию и каким именно образом требуется представить.

Надзорный (супервизорный) ЧМИ может использоваться в системах, где центр управления и рабочая область РТС расположены на значительном удалении друг от друга. Супервизорный режим подразумевает наблюдение оператором за выполнением РТС передвижения в заданную точку и введение поправок и дополнительных указаний при необходимости.

Во многих практических случаях такой ЧМИ подходит тогда, когда любые изменения параметров и статус системы должны отслеживаться мгновенно, что обеспечивается интерактивной конфигурацией и удобством настройки ЧМИ. Интерфейс строится в соответствии с открытой архитектурой, в которой предлагаются все функции и варианты, необходимые для сбора и представления данных. Система предоставляет доступ к базе данных и, опираясь на измерения, выполненные в режиме реального времени, можно получить доступ к данным об истории состояний системы, а также их анализу.

Распределенный ЧМИ строится на основе компонентного подхода. В системе, использующей такой подход, интерфейс может обращаться непосредственно к любому управляющему компоненту. Поскольку все компоненты системы являются территориально-независимыми, ЧМИ может связываться с любым – локальным или удаленным. В случае с РТС имеет место удаленная связь, поскольку ЧМИ и контроллеры РТС находятся на разных платформах. В такой конфигурации обычно используется несколько серверов, обеспечивающих системе гибкость и мощность. У каждого контроллера свой сервер, предоставляющий человеко-машинное взаимодействие. Сервер, присвоенный контроллеру, либо прокси-сервер, обладает достаточной мощностью, чтобы управлять расширением системы, частыми изменениями в ней, технической поддержкой и репликацией автоматизированных линий как в одной локации, так и в нескольких. Основным недостатком децентрализованных компонентов является неопределенность, присущая контроллеру, работающему в режиме реального времени. Обычно такая неопределенность возникает из-за плохо спроектированной схемы использования прокси. Например, человеко-машинный интерфейс может слишком часто запрашивать новые данные с контроллера. Такая архитектура вполне подходит для развертывания сети связи между группой РТС и базовой станцией.

В настоящее время РТС применяются для автономной и полуавтономной работы для решения различных прикладных задач, в частности, военных, строительных, геологоразведочных, обзорных. Главный аспект работы подобных систем заключается в значительной автономности аппаратов и необходимости программирования их взаимодействия со средой без непосредственного управления человеком. Отмечается [Шугаев А. Актуальные тенденции в развитии средств человеко-машинного интерфейса в производственной сфере, 2015. – URL: <https://controlengrussia.com/cheloveko-mashinny-j-interfejs-hmi/magelis-gtu/> (дата обращения 2020-12-14)], что проектирование пользовательских интерфейсов в промышленности все активнее переходит от физических к виртуальным реализациям. Создаются графические пользовательские интерфейсы (GUI) для управления автономными роботами. В последнее время одним из трендов на рынке ЧМИ стала возможность контролировать производственные процессы не только с помощью стационарных панелей (пульт управления, ПК), но и с помощью мобильных устройств (смартфон, планшет). Поскольку мобильные устройства оснащаются сенсорным экраном, такой GUI активно применяется не только для считывания информации, но и для ввода данных, и для программирования РТС. Можно выделить следующие общие требования к ЧМИ, характерные для процессной автоматизации:

- простая настройка и легкая адаптация под нужды заказчика;
- возможность создания собственных, в том числе динамических, объектов и их тиражирования;
- четкое и ясное отображение информации, независимое от условий окружающей среды и других факторов;
- предоставление оператору возможности быстро и четко производить управление системой, независимо от ее текущего состояния, условий окружающей среды и других факторов.

Данным требованиям отвечают наилучшим образом два типа интерфейсов: графические (GUI) и веб-ориентированные (WUI). Графический пользовательский интерфейс принимает информацию через устройство ввода и выдает упорядоченное графическое изображение на устройстве вывода. Веб-ориентированные пользовательские интерфейсы принимают ввод и выдают вывод, генерируя веб-страницы, которые передаются по интернету и просматриваются пользователем в веб-браузере. Графические интерфейсы стали важнейшими компонентами современных промышленных систем, интерфейсов SCADA, экранов-навигаторов, авиационных и аэрокосмических приборных щитков, мониторов медицинского оборудования и т.д.

Компьютерная модель совместной деятельности гетерогенных роботов, контролируемой с помощью интуитивно понятных человеко-машинных интерфейсов, при решении сельскохозяйственных задач

В рамках проекта была разработана компьютерная модель, включающая разработанные решения для совместной деятельности гетерогенных роботов при решении задач сельского хозяйства, управляемых с помощью интуитивно понятных интерфейсов человек-робот. Данная модель разработана посредством языков программирования C++ и Python на базе симулятора Gazebo. Также используются ROS и MAVROS для связи взаимодействия отдельных программных модулей в модели. Модель функционирует на базе операционной системы Linux Ubuntu 18.04.

Для моделирования внешней среды в разработанной модели учитываются параметры рельефа, погодных условий и суточной освещенности. Также в разработанном ЧМИ есть возможность ручного редактирования карты местности для указания препятствий, непроходимых для РТС областей, областей интереса и так далее.

Разработанная компьютерная модель включает в себя следующие модули (Рис. 9):

- модуль графического интерфейса пользователя;
- модуль распределения задач между РТС;
- модуль системы технического зрения;
- модуль расчета траектории A1;
- модуль расчета траектории A2, G1, G2;
- модуль навигации и связи;
- модули контроллеров БПЛА и МРП.

Использование PX4 совместно с ROS позволяет проводить имитационное моделирование в среде Gazebo. ROS сообщается с PX4 через MAVROS. Обмен данными происходит через протокол MAVLink, используя пакет MAVROS для соединения топиков (topics) ROS с MAVLink. MAVROS обеспечивает связь MAVLink между компьютерами под управлением ROS с поддержкой данного интерфейса. Полетный контроллер PX4 управляет различными типами РТС, включая БПЛА и наземные МРП. ПО, разрабатываемое на базе PX4 и MAVROS, может быть перенесено на физических роботов. Кроме того, PX4 содержит множество контроллеров, которые учитывают динамику БПЛА: контроллер угловой скорости, контроллер ориентации, контроллер скорости, контроллер удержания фиксированного положения, полная система контроля энергии. Режимы полета определяют, как PX4 реагирует на действия оператора и управляет движением БПЛА. Оператор может переключить режимы функционирования РТС посредством специальных управляющих команд. В разработанной модели используются следующие автоматические режимы PX4:

- AUTO_LOITER (удержание точки): БПЛА зависает в текущем положении на заданной высоте; наземная платформа остается на месте.
- AUTO RTL (возврат к точке запуска): БПЛА следует по наикратчайшей прямой на текущей высоте к точке приземления, затем автоматически приземляется; наземная платформа следует по наикратчайшему пути к финишным координатам в обход препятствий.
- AUTO_MISSION (миссия): РТС выполняет запрограммированную миссию.
- Подрежим OFFBOARD: в этом режиме заданное значение положения, скорости или ориентации РТС обеспечивается компьютером, подключенным через кабель и MAVLink.

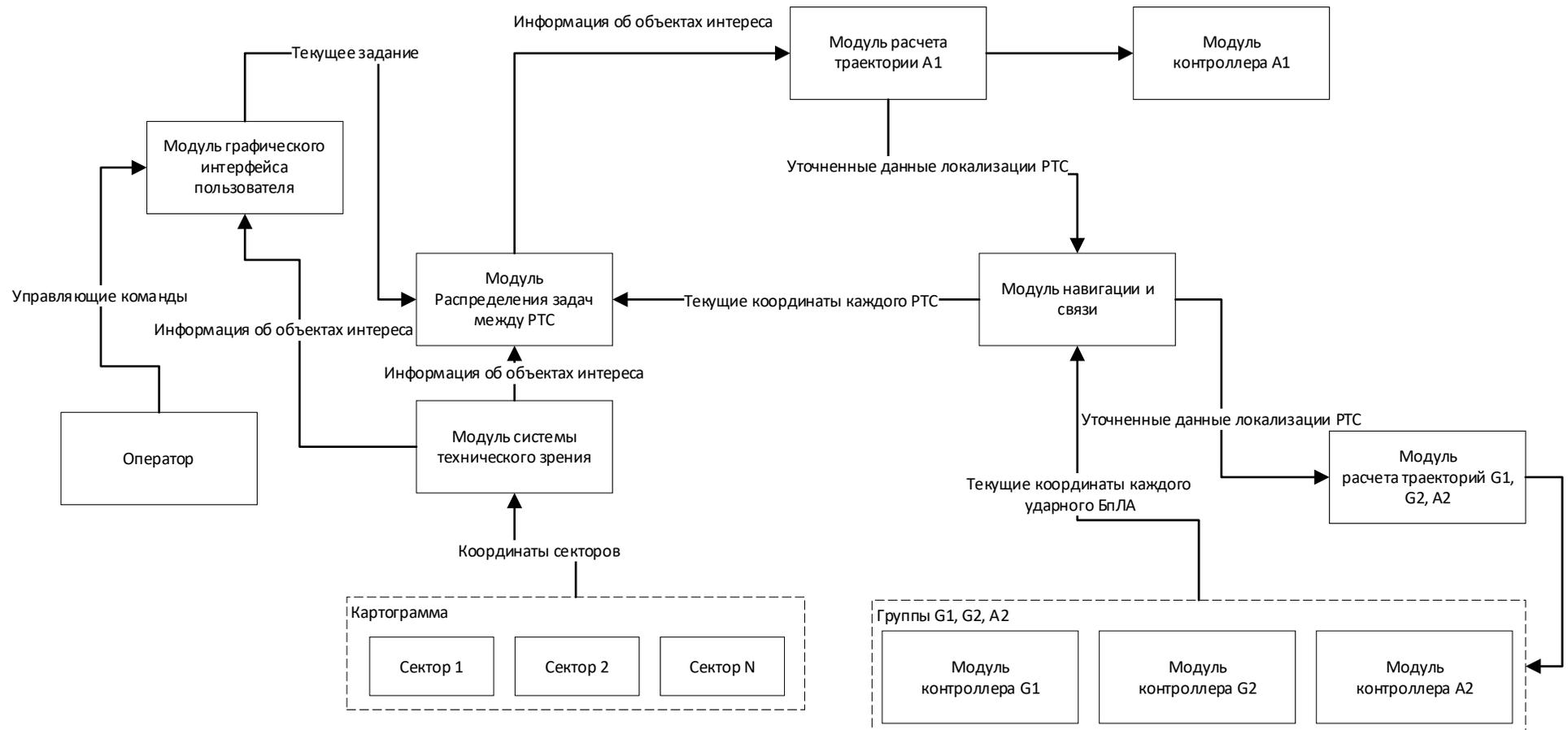


Рисунок 9 – модель совместной деятельности гетерогенных роботов при решении задач сельского хозяйства, управляемых с помощью интуитивно понятных интерфейсов человек-робот

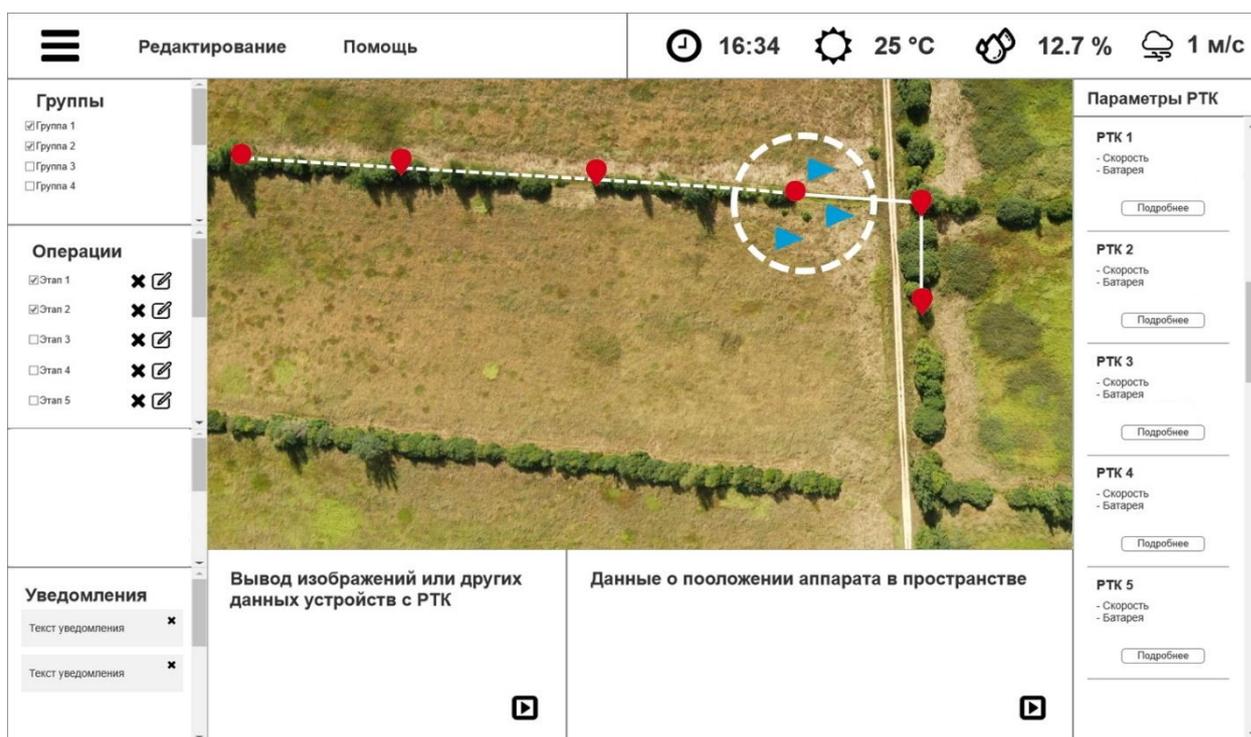


Рисунок 11 – Технический облик ЧМИ оператора группы РТК при выполнении сельскохозяйственных задач

Методика тестирования и экспериментальная проверка функционирования групп гетерогенных роботов при решении сельскохозяйственных задач

Для тестирования предлагаемой компьютерной модели была разработана соответствующая методика экспериментов, состоящая из следующих пунктов:

1. Тестирование сценария проведения мониторинга сельскохозяйственных земель и построение ортофотоплана местности.
3. Тестирование совместного выполнения сценария сбора камней группой РТС.
4. Тестирование совместного выполнения сценария внесения удобрений группой РТС.
5. Тестирование совместного выполнения сценария сбора плодов группой РТС.

Методика тестирования и экспериментальная проверка сценария проведения мониторинга сельскохозяйственных земель и построения ортофотоплана местности

Опишем методику эксперимента (тестирования) оценки качества сшитого изображения ортофотоплана местности. В данном эксперименте будем использовать метод сшивки SIFT, а для оценки качества полученных изображений, снятых с БПЛА, и полученной сшитой панорамы – метод BRISQUE. Для реализации использованного алгоритма были взяты 20 изображений одной местности, снятых с БПЛА, чтобы получить панорамное изображение. Пример изображений представлен на рисунке 12.



Рисунок 12 – Пример изображений, снятых с БПЛА.

Первым шагом является обнаружение ключевых точек и локальных дескрипторов для сшивания по методу SIFT. Это можно сделать за один шаг, используя функцию OpenCV – `sift = cv.SIFT_create()`. SIFT возвращает 128-мерный вектор признаков для каждой ключевой точки. Результат представлен на рисунке 13.

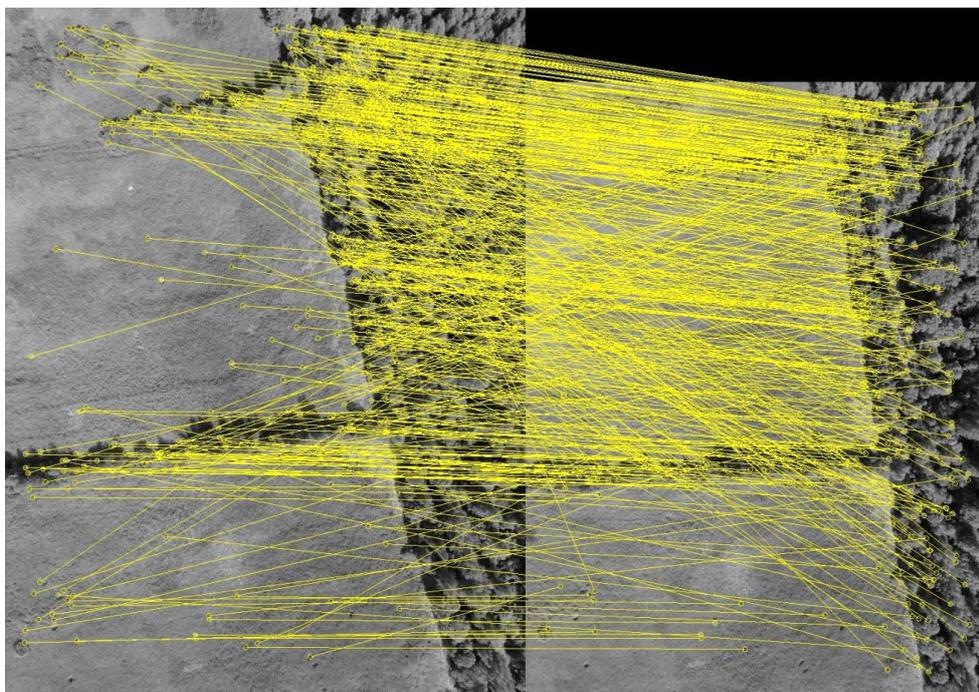


Рисунок 13 – Обнаружение ключевых точек и локальных дескрипторов для сшивания.

Теперь нужно сравнить 2 набора функций и придерживаться тех пар, которые показывают большее сходство. В OpenCV для сопоставления функций требуется объект `Matcher`. Учитывая 2 набора функций (из изображения А и изображения В), каждый объект из набора А сравнивается со всеми функциями из набора В. По умолчанию `BF Matcher` вычисляет евклидово расстояние между двумя точками. После применяется алгоритм RANSAC и получается сшитое панорамное изображение (рис. 14).

В качестве проверки сшивки изображений (20 изображений) необходимо использовать критерий оценки качества изображения. Для эксперимента был выбран критерий BRISQUE, так как он имеет открытую программную реализацию, подробную документацию и открытую библиотеку на языке Python (`Pybrisque`). Алгоритм BRISQUE использует модель регрессии опорных векторов (SVR), обученную в базе данных изображений с соответствующими значениями дифференциальной средней оценки (DMOS). База данных содержит изображения с известными искажениями, такими как артефакты сжатия, размытие и шум, и содержит нетронутые версии искаженных изображений. Изображение для оценки должно иметь, по крайней мере, одно из искажений, которым обучалась модель.

Все изображения со значениями BRISQUE ниже заданного порогового значения будут отсортированы как хорошие, а изображения выше - как плохие соответственно. Значения критерия BRISQUE находятся в диапазоне от 0 (очень хорошее качество) до 100 (очень плохое качество). Некоторые чистые изображения могут иметь высокие значения BRISQUE в зависимости от характера изображения [Chandni, P. R. R. (2021). *Anomaly Prognostication of Retinal Fundus Images Using EALCLANE Enhancement and Classifying with Support Vector Machine*. In *Machine Learning, Deep Learning and Computational Intelligence for Wireless Communication* (pp. 605-617). Springer, Singapore.]

Чтобы определить адекватную шкалу оценивания качества сшитых панорамных снимков, рассмотрим исследования, где использован критерий BRISQUE для оценки качества изображений местности, снятых с БПЛА, с целью сравнить полученные результаты и сделать вывод о характере исходного качества снимка.



Рисунок 14 – Сшитое панорамное изображение

В статье [Burdziakowski, P. (2020). Increasing the geometrical and interpretation quality of unmanned aerial vehicle photogrammetry products using super-resolution algorithms. Remote Sensing, 12(5), 810.] была проведена оценка качества BRISQUE для изображений, снятых с БПЛА Mavic Pro и Phantom 4. Показатели для оригинальных изображений составили 25,6103 и 24,8537 соответственно.

В статье [Doukari, M., Batsaris, M., & Topouzelis, K. (2021). UASea: A Data Acquisition Toolbox for Improving Marine Habitat Mapping. Drones, 5(3), 73.] авторы получили изображения морской поверхности с БПЛА в оптимальных условиях и оценили их качество с помощью критерия качества изображения. При съемке оценка BRISQUE составила 28,85.

Из приведенного выше анализа существующих исследований можно сделать вывод о том, что для оригинальных изображений местности, снятых с БПЛА, критерий BRISQUE принимает значения в диапазоне от [24;100] (рис. 15). В итоге, зададим начальное значение критерия 24, исходя из полученных данных и результатов других исследований. Примем это значение как «отличное».

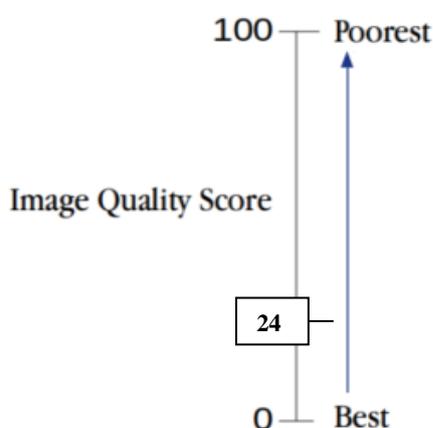
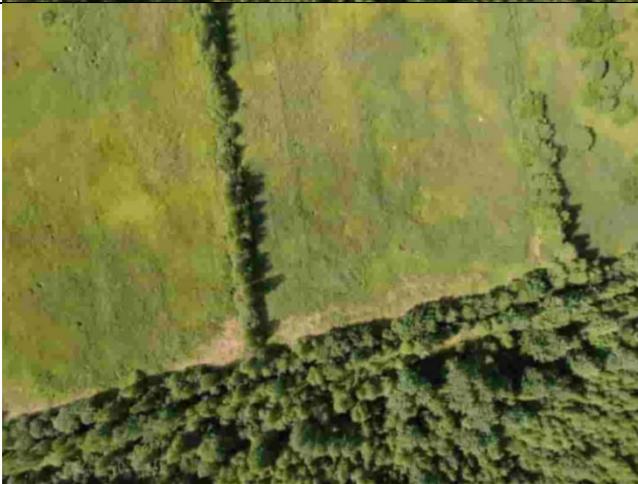


Рисунок 15 – Масштабирование показателя качества изображения

Далее рассмотрим примеры изображений с различным значением критерия для визуальной и субъективной оценки. Для этого был взят один из 20 снимков и искусственно ухудшен (добавлен эффект размытия и зашумления), так чтобы каждое полученное изображение соответствовало значению критерию BRISQUE. В таблице 3 представлены примеры изображений с разным значением критерия BRISQUE.

Таблица 3 – Изображения с различным значением критерия BRISQUE

Значение BRISQUE	Изображение
30	

35	
40	
45	

55	
65	
70	

85	
95	

Таким образом, для приемлемых изображений в качестве «отлично» и «хорошо», зададимся значениями критерия в диапазоне от 24 до 40. В итоге примем пороговое значение критерия $24 \leq \text{BRISQUE} \leq 49$.

По аналогии с исследованием [Burdziakowski, P. (2020). Increasing the geometrical and interpretation quality of unmanned aerial vehicle photogrammetry products using super-resolution algorithms. *Remote Sensing*, 12(5), 810.] была составлена таблица 4 шкалы BRISQUE с приблизительным диапазоном оценок.

Таблица 4 – Шкала BRISQUE

Шкала качества	Диапазон оценок
Отлично	24-31
Хорошо	32-49
Плохо	50-85
Очень плохо	85-100

В ходе эксперимента было использовано 20 изображений для получения панорамного снимка с БПЛА. В таблице 5 представлены результаты расчета критерия BRISQUE для выявления четкости сшивки (оригинального, сшитого и искусственно ухудшенного изображения панорамы). Эксперименты проводились в программной среде Jupyter Notebook. Программный код использует следующие библиотеки: image-quality, imquality.brisque, PIL.Image, Numpy и skimage. Image-quality – это программная библиотека с открытым исходным кодом для автоматической оценки качества изображения (IQA). Все пакеты и библиотеки являются общедоступными и размещены в репозитории PyPi.

Таблица 5 – Оценка качества изображений по BRISQUE

Номер изображения	Оригинальное изображение	Сшитая панорама	Искусственно ухудшенное изображение панорамы
1	26.932	32.381	82.642
2	27.408		
3	25.701		
4	30.920		
5	28.115		
6	29.774		
7	30.136		
8	29.668		
9	28.580		
10	28.151		
11	28.081		
12	28.269		
13	28.217		
14	28.785		
15	29.548		
16	29.871		
17	29.417		
18	29.183		
19	28.794		
20	28.109		
Итого (средний результат)	28,682		

Результат критерия BRISQUE для оригинальных изображений в среднем равен BRISQUE = 28,682. Сшитая панорама имеет критерий качества BRISQUE = 32,381. Далее найдем процент искажения изображения в диапазоне от 24 до 100. Отсюда можно сделать вывод, что качество при сшивке 20 изображений ухудшилось на 11,03%.

Критерий BRISQUE искусственно ухудшенного (зашумленного) изображения панорамы составил 82,642. Качество изображения по сравнению со сшитым снимком ухудшилось на 77,16%. В рамках проекта были рассмотрены другие методы сшивки. В качестве сравнения был применен алгоритм по методу ORB. Результат сшивки представлен на рисунке 16.

Значение критерия BRISQUE по алгоритму ORB получилось равным 53,059. Данное значение находится в шкале качества «плохо». Для точности эксперимента сшитое изображение по методу SIFT (рис. 14) было конвертировано в черно-белое. Значение BRISQUE составило 32,339. Качество изображения по методу ORB (рис. 16) на 30,62% хуже, по сравнению с первоначально сшитой панорамой по методу SIFT.

Для целей проекта достаточно оценить резкость (четкость полученного ортофотоплана), воспользовавшись одним из известных критериев качества сшивки изображений. Среди них BRISQUE, SSEQ, BIQI и NIQE.

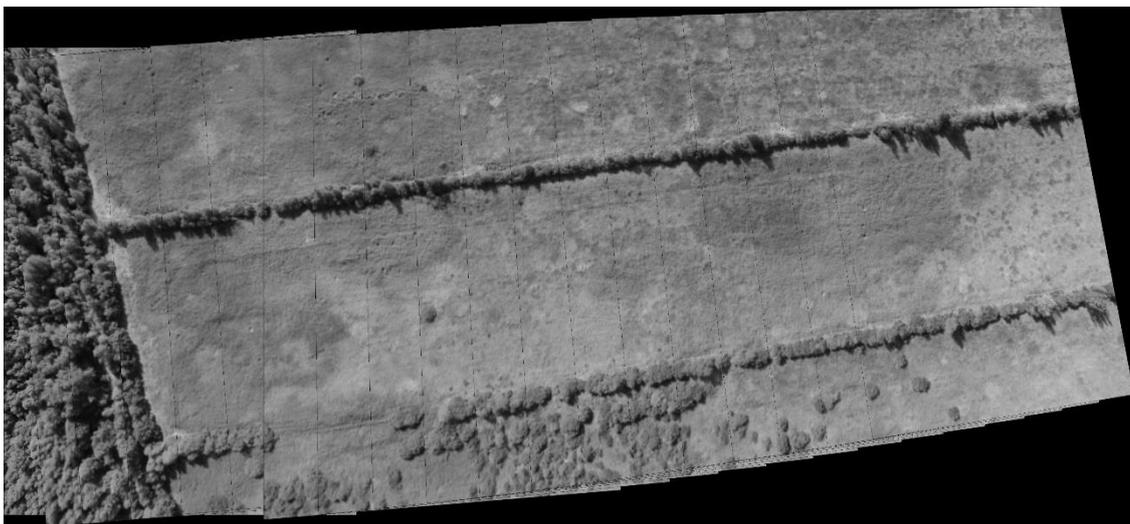


Рисунок 16 – Панорамное изображение по методу ORB

Для проверки реализованного алгоритма сшивки изображений (20 изображений) был использован критерий оценки качества BRISQUE. В итоге было получено пороговое значение критерия $24 \leq \text{BRISQUE} \leq 49$. Из полученных результатов эксперимента можно сделать вывод о том, что данный критерий применим в задаче оценивания точности склейки изображений, полученных с БПЛА, для создания ортофотоплана. Также, наиболее распространенные подходы к сшиванию изображений требуют точного перекрытия изображений и идентичных экспозиций для получения бесшовных результатов. Качество сшивания изображений измеряется по сходству сшитого изображения с каждым из входных изображений, и по видимости шва между сшитыми изображениями [Szeliski, R. (2010). *Computer Vision: Algorithms and Applications* (1st Ed.). New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc.]. Результаты критерия BRISQUE качества сшивки изображений (ортофотоплана) по методу SIFT составил 32,381 (ЧБ изображение 32,339), а по методу ORB = 53,059. Результат критерия по методу SIFT расположен в шкале качества «хорошо», а по методу ORB «плохо». Таким образом, эксперимент показал, что качество сшивки также зависит от выбранного метода (SIFT, ORB, SURF, BRIEF).

Методика тестирования и экспериментальная проверка совместного выполнения сценария сбора камней группой РТС

Рассмотрим методику эксперимента по оценке качества выполнения задачи сбора камней средствами РТС. Данная методика базируется на моделировании серии операций по сбору камней в виртуальной среде. Результаты выполнения данных операций служат основой для оценки эффективности выполнения сценария, которая производится в соответствии с заданным ранее критерием.

Для проведения эксперимента с использованием компьютерной модели осуществляется генерация некоторой местности на различных временных отрезках в течение раннего вегетационного периода. После чего, средствами виртуальной среды обеспечивается внесение на нее инородных объектов (камней). Пример полученной таким образом территории представлен на рисунке 17.



Рисунок 17 – Пример результатов генерации территории средствами моделирующего комплекса

На данном рисунке отображена сгенерированная территория, а также отмечен определяемый оператором регион интереса (синяя рамка), в рамках которого будет осуществляться выполнение сценария. Заданный оператором регион интереса разделен на 16 секторов равной площади. В таблице 6 представлена информация о числе камней, внесенных в каждый из таких секторов в процессе моделирования местности, где каждая ячейка соответствует секторам, выделенным в рассматриваемом сегменте (Рис. 17).

Таблица 6 – Распределение моделируемых камней по секторам в соответствии с рис. 17

455	7 640	58	374
73	517	749	2 142
692	1 373	17 632	115
399	481	6 318	1 769

В условиях моделируемой среды величины, характеризующие значения NDVI индекса в отдельных секторах региона интереса задаются обратно пропорционально числу камней, внесенных на соответствующий сектор, с учетом нормирующего коэффициента. Сформированная таким образом картограмма загрязнений для области, отмеченной на рисунке 17, представлена на рисунке 18.

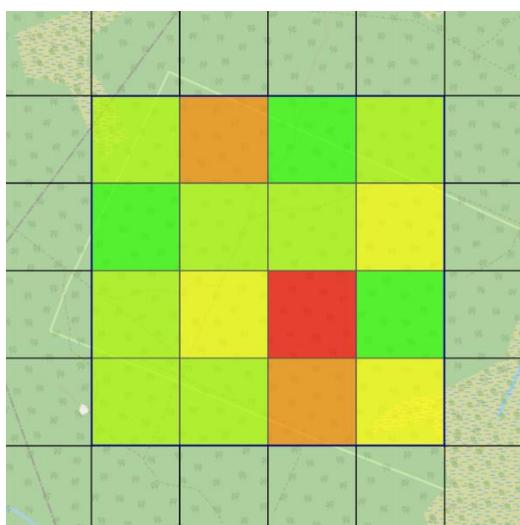


Рисунок 18 – полученная картограмма загрязнений

Как можно заметить, по данным картограммы загрязнений из 16 выделенных секторов: на 3 загрязнениях инородными объектами не обнаружено вовсе, 7 секторов отнесены к категории незначительного уровня загрязнений, 3 сектора имеют средний уровень загрязнения, 2 – высокий и 1 очень высокий. Таким образом, согласно разработанному сценарию, операции по сбору камней будут независимо инициированы в отношении 6 секторов с наивысшим уровнем загрязнения.

Далее в рамках эксперимента проведем оценку эффективности отдельно взятой операции по сбору инородных объектов на примере сектора с высоким уровнем загрязнения. Информация в отношении распределения инородных объектов между 12 сегментами исследуемого сектора представлена в таблице 7.

Таблица 7 – распределение инородных объектов в рассматриваемом сегменте

456	913	865	324
505	985	902	467
673	445	516	589

Соответствующие имитационные значения NDVI индекса в данных сегментах рассматриваемого сектора представлены на рисунке 19.

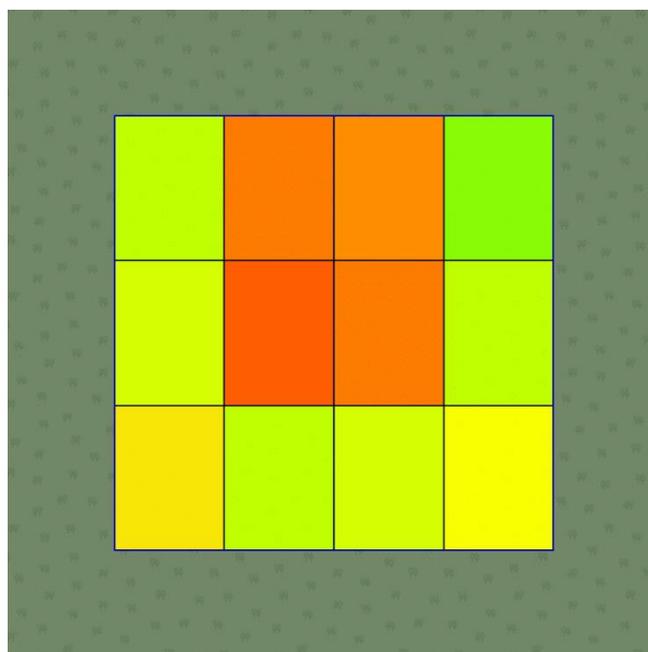


Рисунок 19 – Усредненные по сегментам значения NDVI индекса

Отталкиваясь от значений NDVI индекса по сегментам рассматриваемого сектора, можно сделать вывод, что, согласно заданному сценарию, высокая концентрация инородных объектов характерна для 6 сегментов.

Далее, рассмотрим вопрос формирования суб-оптимального маршрута операции по сбору камней в данном секторе. С использованием метода покрывающей траектории CPP (Coverage Path Planning) для построения пути в каждом отдельном сегменте [Vasquez-Gomez, J. I., Marciano-Melchor, M., Valentin, L., & Herrera-Lozada, J. C. (2019). Coverage Path Planning for 2D Convex Regions. Journal of Intelligent & Robotic Systems. doi:10.1007/s10846-019-01024-y] и собственный метод RRT (Rapidly-Exploring Random Trees) для построения глобальной траектории между точками выхода и входа разных сегментов, а также стартовыми и конечными координатами LRLHD-A* [Захаров К.С., Савельев А.И. Сглаживание кривизны траектории движения наземного робота в трехмерном пространстве. Известия Юго-Западного государственного университета. 2020;24(4):107-

125. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125>], был осуществлен поиск парето-оптимального решения задачи минимизации функции $H(T', S')$ (40):

$$H(T', S') = T' * S', \forall T', S' \quad (40)$$

Для решения данной задачи в рамках настоящего эксперимента была использована арбитражная схема Нэша. В рамках полученного решения выполнение операции по сбору камней будет включать в себя обход лишь 4 сегментов (1.2, 1.3, 2.2, 2.3), характеризующихся наименьшими значениями NDVI индекса в данном секторе. Результирующая траектория движения РТС при реализации соответствующей операции представлена на рисунке 20.

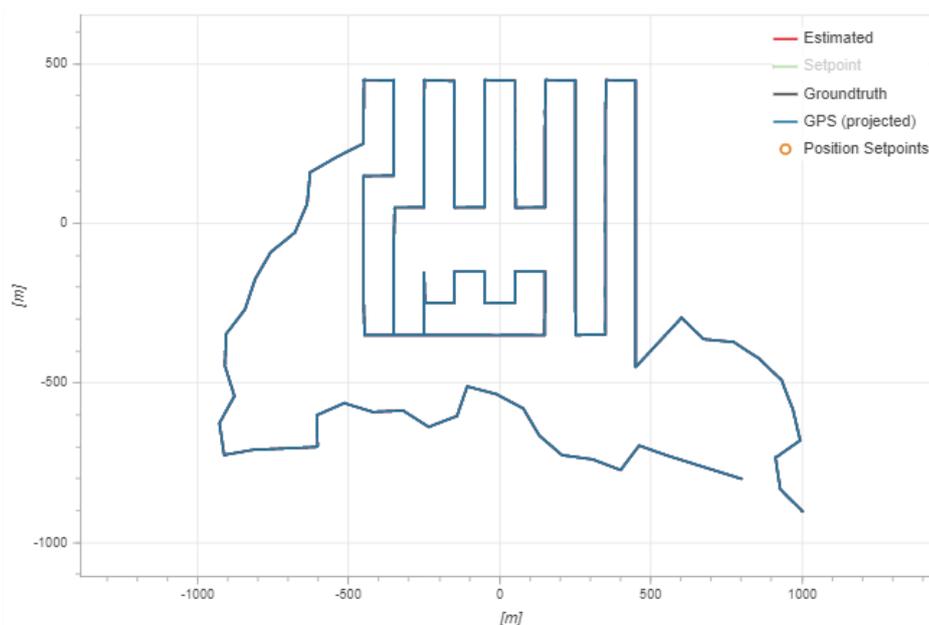


Рисунок 20 – Результирующая траектория наземного РТС в процессе выполнения операции сбора камней

Как можно заметить, несмотря на использование метода покрывающей траектории, в рамках эксперимента не было достигнуто полное покрытие ряда сегментов. Отличие в результирующей траектории движения РТС обусловлены наличием локальных препятствий на пути следования РТС по расчетному маршруту. Тем не менее стоит отметить, что, несмотря на наличие препятствий и ограниченную проходимость наземного РТС, итоговый коэффициент покрытия целевых сегментов составил более 81%. Отдельно стоит отметить, что траектории выхода на стартовую и конечную точки исполнения операции имеют существенные отличия от траекторий движения в рамках целевых сегментов, поскольку вне целевых сегментов при движении РТС ключевым критерием генерации траектории является оптимизация энергетических затрат с учетом локальных перепадов высот и рельефа сектора.

На заключительном этапе эксперимента осуществляется конечная оценка эффективности проведенных операций по сбору камней. В рамках рассматриваемой операции был выполнен сбор камней на целевых сегментах сектора. Численные результаты проведенной операции представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты эксперимента по сбору камней

	Исходное число камней	Число собранных камней
Сегмент №1.2	913	542
Сегмент №1.3	865	599
Сегмент №2.2	985	837
Сегмент №2.3	902	791

Усредненная доля обнаруженных и собранных камней на обработанных сегментах составила в среднем 76%. Общее время выполнения операции до момента выхода за пределы рабочей зоны составило 252 минуты. Таким образом, значение критерия эффективности выполнения данной операции на секторе составляет (41):

$$K_{сб} = \frac{\Delta Q}{T_{сб} \cdot \frac{(Q-\Delta Q)}{Q}} = \frac{2769}{252 \cdot \frac{(7640-2769)}{7640}} = 17,23. \quad (41)$$

Итоговая консолидированная оценка эффективности предложенного сценария может быть получена путем усреднения оценок эффективности операций, проведенных в отношении всех целевых секторов исследуемом местности.

Методика тестирования и экспериментальная проверка совместного выполнения сценария внесения удобрений группой РТС

Рассмотрим методику эксперимента по оценке качества выполнения задачи внесения удобрений средствами РТС. В качестве входных данных в рамках данной методики рассматривается сгенерированная моделью местность – сад с колонновидными яблонями (рис. 21).

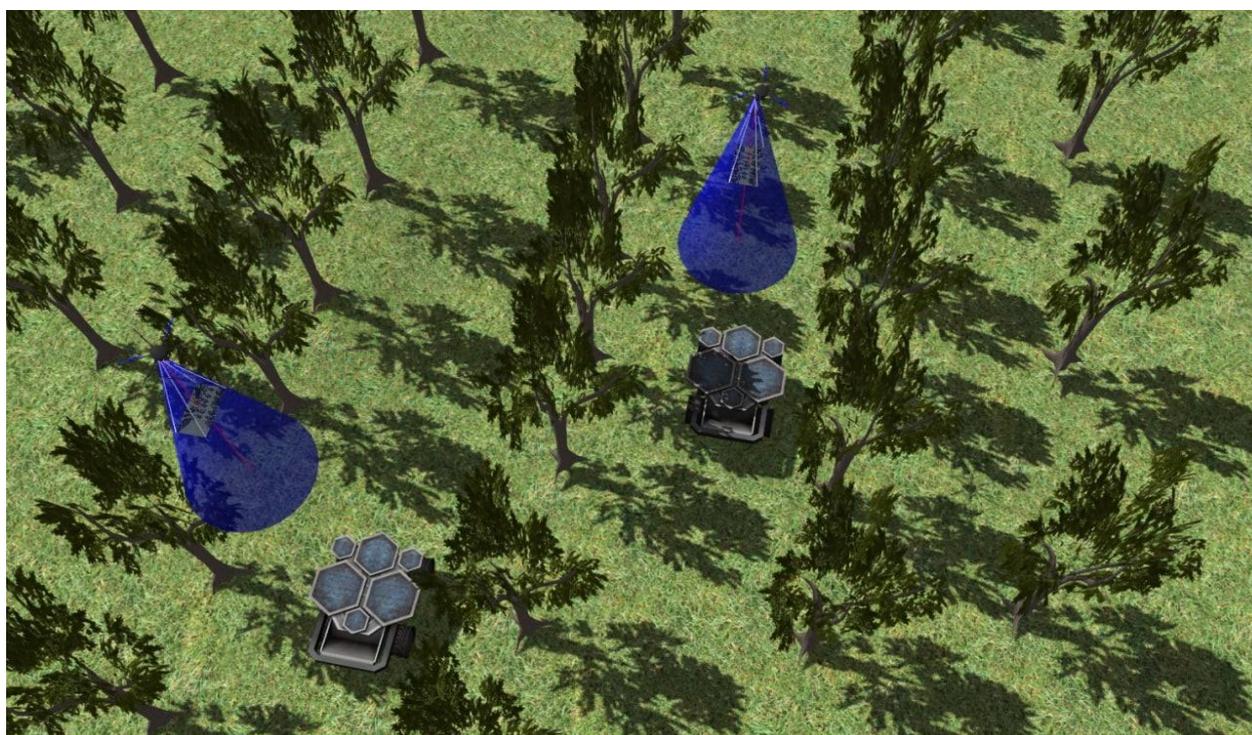


Рисунок 21 – Вид модели сада колонновидных яблонь

В условиях моделируемой среды величины, характеризующие значения NDVI индекса по секторам и составляющим их сегментам, определялись в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Для каждого сектора A_i исследуемой местности задается случайное базовое значение NDVI индекса M_i в диапазоне $[0.3, 0.6]$, а также степень вариабельности значений в пределах сектора – $\sigma_i \in [0.05, 0.20]$.
2. Каждый сектор A_i включает в себя по 16 равных сегментов в формате 4x4. В отношении каждого сектора осуществляется процесс генерации следующих случайных величин:
 - a. Размеров суб-секторов R в диапазоне от 1x1 до 3x3;
 - b. Центров суб-секторов C в диапазоне от (1,1) до (4,4);
 - c. Коэффициентов отклонения v в диапазоне от 0 до 2;

Исходя из размера и положения центра суб-сектора, определяется набор сегментов сектора A_i , принадлежащих данному суб-сектору. Значение NDVI индекса по сегментам P_{lk} такого суб-сектора, определяется согласно следующему выражению (42):

$$NDVI(P_{lk}) = M_i + (-1)^{sign} \sigma_i * f(x) * v, \quad (42)$$

где $sign$ – случайная величина, равновероятно принимающая одно из следующих значений $[1,2]$, $f(x)$ – нормальное распределение с параметрами ($\mu = 0, \sigma^2=0.2$), x – случайная величина в диапазоне от $[-1, 1]$.

3. Процесс генерации суб-секторов и реализуется до тех пор, пока для каждого сегмента сектора A_i не будет определено значение NDVI индекса. В отношении сегментов, которым уже присвоено некоторое значение NDVI, переопределение данного значения не производится.

Сформированное таким образом распределение NDVI индекса, детализированное до уровня сегментов, представлено на рисунке 22.

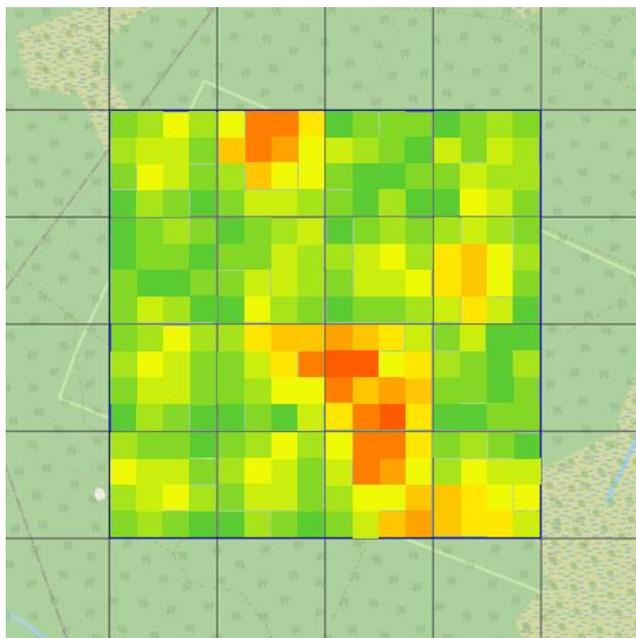


Рисунок 22 – Посегментное распределение значений NDVI индекса в рамках исследуемой местности

Далее осуществляется анализ исследуемой местности в соответствии с заданным в рамках сценария алгоритмом. Все сегменты, в рамках данной симуляции отнесенные к группе сегментов, требующих внесения удобрений, представлены на рисунке 23.

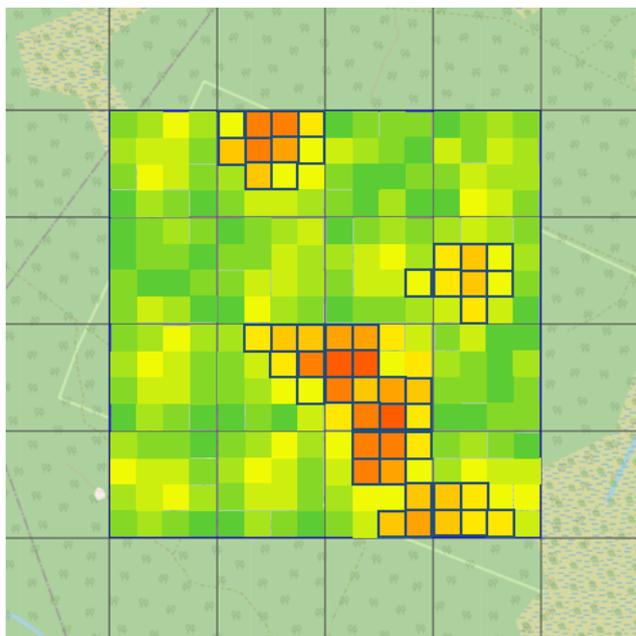


Рисунок 23 – Сегменты, отнесенные в рамках эксперимента к группе, требующей внесения удобрений

Далее, в соответствии с предложенным сценарием осуществляется группировка и приоритезация операций по внесению удобрений. В процессе эксперимента в качестве метода кластеризации сегментов, требующих внесения удобрений, был использован метод DBSCAN. По результатам применения данного метода с параметрами ($R=\sqrt{2}$, $N = 4$), была выполнена группировка задач по внесению удобрений. Полученные кластеры представлены на рисунке 24.

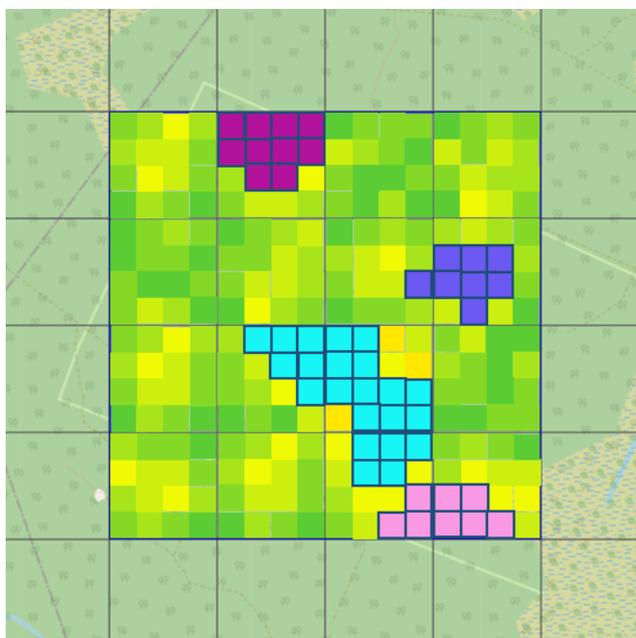


Рисунок 24 – Полученные группы задач по внесению удобрений, представленные 4 кластерами

Важно отметить, что с учетом площади каждого отдельно взятого сегмента, в рамках выполнения операции по внесению удобрений, группа гетерогенных РТС способна обработать не более 12 сегментов. В данном случае для кластера, отмеченного бирюзовым цветом, данное условие не выполняется: число сегментов, входящих в данные кластер

превосходит предельное число сегментов P_{max} . Согласно условию, определенном в настоящем сценарии данный кластер должен быть разделен на несколько независимых кластеров. Для реализации соответствующей операции в рамках эксперимента использовался метод кластеризации K-means, а целевое число кластеров в соответствии с выражением, определенным в рамках сценария, составило 2. Конечный вид группировки задач по внесению удобрений представлен на рисунке 25.

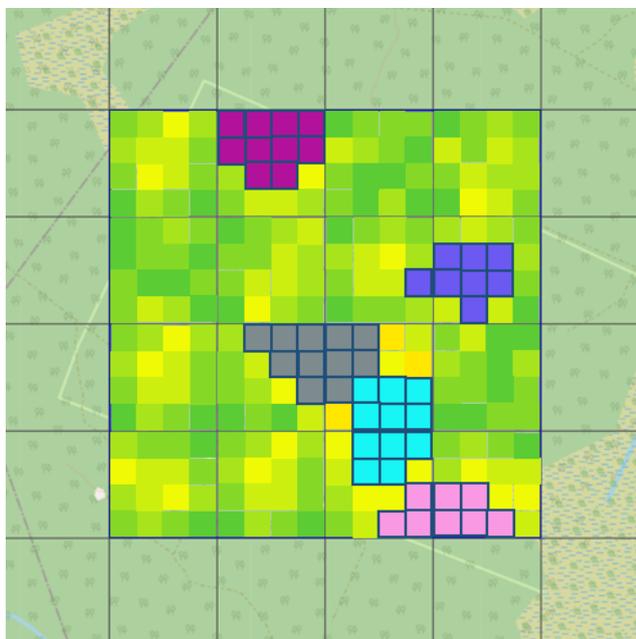


Рисунок 25 – Итоговый результат группировки задач по внесению удобрений на исследуемой местности

В рамках заключительного этапа эксперимента осуществлялось моделирование реализации операций по внесению удобрений для каждой выделенной группы сегментов. В качестве примера приведем результат выполнения операции для кластера №3 (выделен серым цветом), характеризующегося самым высоким уровнем приоритета. В рамках настоящего эксперимента в каждом сегменте расположено по K колонновидных яблонь ($K = 45$). В таблице 9 представлены данные о числе успешно удобренных деревьев по каждому сегменту, входящему в состав рассматриваемой группы.

Таблица 9 – Результаты эксперимента по внесению удобрений

Сегмент	Число успешно удобренных деревьев	Задетектировано случаев неуспешного внесения удобрений
Сектор 3.2, Сегмент 1.2	40	1
Сектор 3.2, Сегмент 1.3	38	3
Сектор 3.2, Сегмент 1.4	39	3
Сектор 3.2, Сегмент 2.3	41	0
Сектор 3.2, Сегмент 2.4	43	0
Сектор 3.2, Сегмент 3.4	41	2
Сектор 3.3, Сегмент 1.1	40	3
Сектор 3.3, Сегмент 1.2	42	1
Сектор 3.3, Сегмент 2.1	37	3
Сектор 3.3, Сегмент 2.2	39	4
Сектор 3.3, Сегмент 3.1	37	1
Всего	436	21

Таким образом, из общего числа деревьев, успешно внесение удобрений было реализовано в 88,3% случаев. Медианная оценка доли успешных внесений удобрений по сегментам в свою очередь составила: 88,9%. В то же время, в рамках операции контролирующими БПЛА был выявлен 21 случай неуспешного внесения удобрений (4,2%), доля пропущенных в рамках эксперимента деревьев составила: 7,5%.

Таким образом, результирующая доля успешных операций по внесению удобрений в соответствии с определенным в рамках сценария критерием составила 72,7% в разрезе рассмотренной группы. Итоговая консолидированная оценка эффективности предложенного сценария может быть получена путем усреднения оценок эффективности операций, проведенных в отношении всех выделенных групп задач по внесению удобрений на исследуемой местности.

Методика тестирования и экспериментальная проверка совместного выполнения сценария сбора плодов группой РТС

Рассмотрим методику эксперимента по оценке качества выполнения задачи сбора плодов посредством набора гетерогенных РТС. В качестве входных данных в рамках данной методики рассматривается сгенерированная моделью местность – сад с колонновидными яблонями (рис. 26).

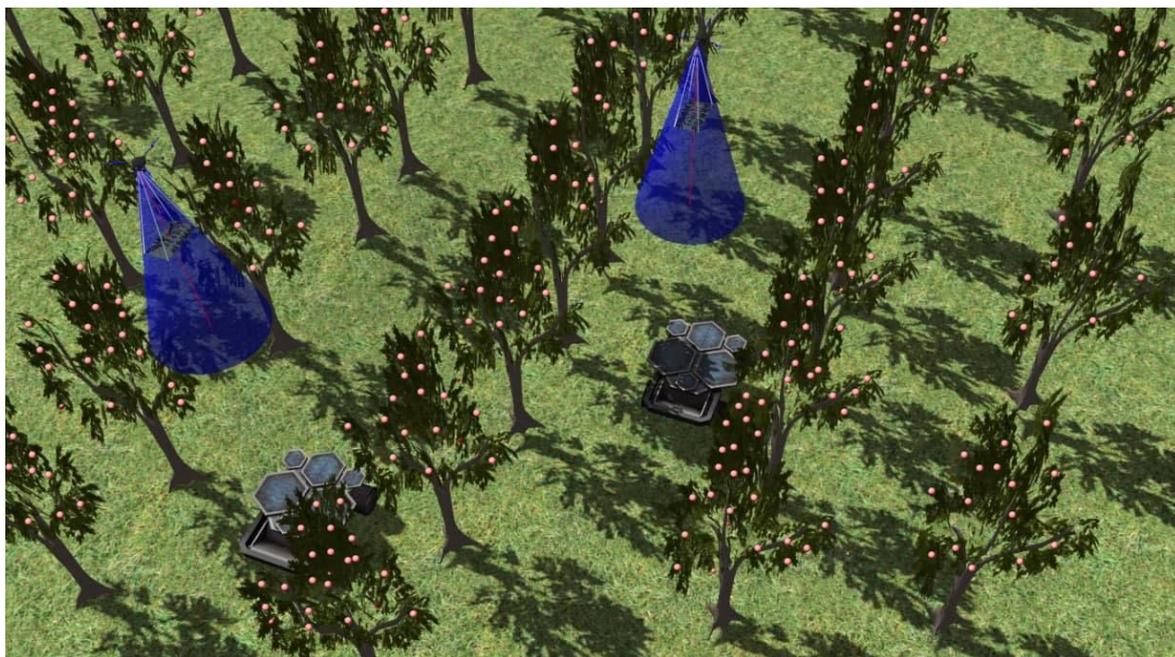


Рисунок 26 – Пример модели сада колонновидных яблонь в сценарии сбора плодов

В процессе моделирования на моделируемом участке местности было размещено 180 колонновидных яблонь со случайным числом плодов на каждой в диапазоне от 10 до 50 штук. Пространственное положение плодов также определялось случайным образом при этом учитывалось невозможность размещения более чем 1 плода в одних и тех же координатах. Таким образом, на основе результатов генерации местности и плодовых деревьев в соответствии с разработанным сценарием была сформирована картограмма урожайности исследуемого участка местности, представленная на рисунке 27.

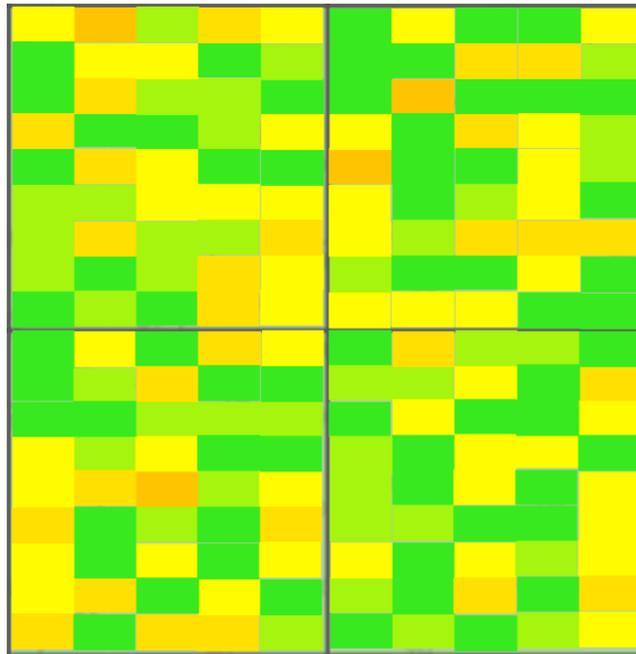


Рисунок 27 – Картограмма урожайности исследуемого участка местности

Далее, в рамках модельного эксперимента с использованием метода, разработанного зарубежными партнерами [Guzey, A., Akinci, M. M., & Guzey, H. M. (2021). Smart Agriculture With Autonomous Unmanned Ground and Air Vehicles: Approaches to Calculating Optimal Number of Stops in Harvest Optimization and a Suggestion. In Artificial Intelligence and IoT-Based Technologies for Sustainable Farming and Smart Agriculture (pp. 151-174). IGI Global.], был произведен поиск субоптимальных точек остановки и определены наборы задач по сбору плодов, связанные с данными точками. Полученные результаты представлены на рисунке 28.

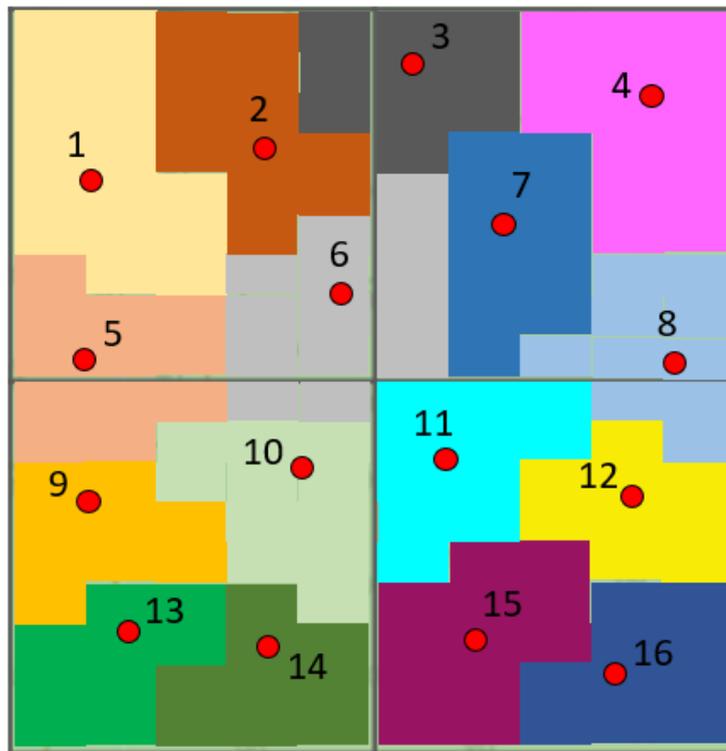


Рисунок 28 – Итоговый результат группировки задач по сбору плодов, с указанием координат точек останова, связанных с полученными группами

Как можно заметить, в результате применение указанного выше метода все задачи по сбору плодов были разделены на 16 групп различного объема. Важно отметить, что для ряда групп задач рекомендуемые положения точек остановки РТС в значительной степени отличаются от геометрических центров соответствующих участков исследуемой местности. Данное обстоятельство обусловлено отличающейся плотностью распределения плодов на местности в рамках настоящего эксперимента.

На заключительном этапе эксперимента было проведено моделирование исполнения операций по сбору плодов с использованием гетерогенных групп РТС. Результаты выполнения соответствующих операций для всех определенных ранее групп задач представлены в таблице 10.

Как можно заметить, из общего числа плодов, успешно процесс сбора был реализован в 77,0% случаев. Медианная оценка доли успешных операций сбора плодов по группам в свою очередь составила: 76,9%. В то же время, в процессе выполнения задач в 93 случаях сбор наблюдаемых плодов средствами БпЛА осуществить не удалось (1,6%), доля пропущенных в рамках эксперимента плодов составила: 21,4%.

Таблица 10 – Результаты экспериментов по сбору плодов

№ группы	Число успешно собранных плодов	Зарегистрировано случаев неудачного сбора	Фактическое число плодов
Группа №1	372	7	454
Группа №2	364	11	414
Группа №3	297	4	338
Группа №4	301	15	495
Группа №5	395	3	488
Группа №6	246	6	324
Группа №7	318	2	393
Группа №8	264	4	315
Группа №9	168	1	248
Группа №10	323	8	376
Группа №11	320	8	401
Группа №12	242	5	347
Группа №13	186	6	282
Группа №14	250	1	298
Группа №15	315	9	445
Группа №16	218	3	331
Всего	4 579	93	5 949

По результатам проведенного эксперимента в соответствии с заданным в рамках рассматриваемого сценария критерием, была произведена оценка результирующей доли успешных операции по сбору групп плодов. Итоговая доля успешных операций по сбору групп плодов посредством набора гетерогенных РТС составила 62,5%. Результирующая доля успешных операций по внесению удобрений в соответствии с определенным в рамках сценария критерием составила 72,7% в разрезе рассмотренной группы.

Заключение

Задачи точечного земледелия характеризуются высокой степенью вариативности и бросают вызов современной робототехнике. Каждый сценарий может быть рассмотрен как отдельная модель взаимодействия робототехнических средств для решения

сельскохозяйственных задач. При этом модель подобного комплекса должна обеспечивать возможность задания и гибкой настройки миссии, а также получения оператором своевременной обратной связи о состоянии каждого входящего в комплекс РТС. На основе рассмотренных сценариев совместной деятельности гетерогенных роботов, контролируемой с помощью интуитивно понятных человеко-машинных интерфейсов, при решении сельскохозяйственных задач определены критерии для непосредственной и косвенной оценки качества ЧМИ и выделены наиболее эффективные из них. В рамках проведенного исследования был выполнен анализ состояния и приоритетных направлений развития подходов к построению комплексных систем управления группой различных типов РТС. Существующие адаптивные системы управления РТС не всегда способны справиться с отработкой внештатных ситуаций без непосредственного активного участия оператора. Для выполнения сложных сценариев человеко-машинного взаимодействия применяются модели автоматического и полуавтоматического выполнения миссии. При работе РТС в группе важным параметром является обеспечение надежной связи между аппаратами и с базовой станцией. Оптимальным таким вариантом связи, когда каждая единица техники может обмениваться информацией с другой единицей. Такой тип связи позволяет производить управление группой неограниченного размера. Кроме того, при данном варианте легче всего реализовать систему защиты от столкновений. Для реализации подобного типа связи было предложено решение, основанное на использовании беспроводных сетей с ячеистой топологией, организованных на базе радио-модулей, установленных на группе беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Был разработан подход к организации такой сети на базе технологии LoRa, а также алгоритм локализации МРП при помощи радиомаяков, установленных на БЛА.

Также в процессе исследования был разработан технический облик ЧМИ оператора РТС на основе сформулированных ранее требований к его архитектуре. Предложенные решения обеспечивают оперативную постановку решаемой группой РТС прикладной задачи и последующий контроль ее исполнения со стороны оператора и могут использоваться для разработки программного обеспечения ЧМИ РТС, отличающегося высокой степенью автоматизации и удобства работы оператора. Это позволит создать эффективный инструмент человеко-машинного взаимодействия для управления группой автономных РТС различного типа и назначения.