

На правах рукописи

Крылов Иван Геннадьевич

**РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОРГАНИЗАЦИИ
СОГЛАСОВАННЫХ ДЕЙСТВИЙ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ПОИСКЕ МОБИЛЬНЫХ НАЗЕМНЫХ
ОБЪЕКТОВ**

Специальность 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации
(Авиационная и ракетно-космическая техника)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2012 г.

Работа выполнена на кафедре 704 «Информационно-управляющие комплексы летательных аппаратов» Московского авиационного института (национального исследовательского университета, МАИ).

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Ким Николай Владимирович

Официальные оппоненты: Брусов Владимир Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры 106 «Динамика и управление летательных аппаратов» Московского авиационного института (национального исследовательского университета, МАИ);

Таргамадзе Реваз Чолаевич, кандидат технических наук, заместитель начальника центра беспилотной авиационной техники Федерального государственного унитарного предприятия научно-производственного объединения имени С.А. Лавочкина (ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина)

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ФГУП "ГосНИИАС, Россия, 125319, г. Москва, ул. Викторенко, 7)

Защита состоится “29” ноября 2012 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете, МАИ) по адресу: 125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета, МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

Автореферат разослан “ 26 ” октября 2012 г.

Отзывы, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.12,
к.т.н., доц.

В.В.Дарнопов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В последние годы широкое распространение получают беспилотные летательные аппараты (БЛА) различных классов, предназначенные для мониторинга земной или водной поверхности, разведки и т.д. При этом круг решаемых БЛА задач постоянно расширяется за счет увеличения радиуса их действия, совершенствования целевой аппаратуры и пр.

Одной из наиболее важных и востребованных областей применения БЛА является поиск наземных объектов. Сложность организации поиска мобильных наземных объектов определяется рядом факторов, в частности, неопределенностью и изменяемостью условий наблюдения, неопределенностью исходного положения искомых объектов и маршрутов их движения и пр. Решение об обнаружении объекта принимается на основании анализа принимаемых изображений оператором или системой технического зрения (СТЗ).

В настоящее время поиск наземных объектов в основном ведется оператором с помощью передачи ему видовой информации, принимаемой на борту БЛА. В этом случае решение об обнаружении искомого объекта (объекта интереса) принимает оператор. Передача информации может быть реализована в реальном времени (для этого используется соответствующий канал связи) или после возвращения БЛА в конечный или заданный промежуточный пункт маршрута (КПМ, ППМ) – в режиме послеполетной обработки (постобработки). При непосредственном участии оператора в процессе поиска оператор может в реальном времени корректировать полет БЛА.

К недостаткам данной технологии поиска следует отнести:

- ограниченную производительность поиска, связанную с ограниченностью поля зрения системы наблюдения (СН) одиночного БЛА;
- ограниченность дальности действия БЛА каналом связи при дистанционном управлении БЛА оператором;
- сложные условия работы оператора, приводящие к повышению ошибок обнаружения;
- существенная задержка во времени при реализации обнаружения в режиме постобработки;
- снижение производительности поиска при оперативном изменении условий наблюдения и пр.

Одним из направлений, позволяющих существенно повысить производительность поиска, является групповое применение автономных БЛА. Реализация методов автономного применения БЛА, которые могут адаптироваться к изменениям условий полета и наблюдения, позволит существенно расширить круг решаемых БЛА задач и повысить эффективность их применения. Однако методы автоматического принятия решений по коррекции целевых задач, перепланированию маршрутов и пр. в условиях поиска, а также методы управления БЛА в составе группы в различных режимах полета в настоящее время не разработаны.

Таким образом, вопрос реализации группового поиска наземных мобильных объектов является актуальной и практически важной задачей.

Целью диссертационной работы является повышение производительности поиска наземных мобильных объектов за счет использования автономной группы беспилотных летательных аппаратов (БЛА).

Для достижения поставленной цели необходимо разработать технологию организации согласованных действий группы беспилотных летательных аппаратов (БЛА) при поиске мобильных наземных объектов.

Разрабатываемая технология должна включать:

1. Сценарий поиска наземных мобильных объектов группой БЛА;
2. Комплексный алгоритм решения целевых задач группой БЛА;
3. Алгоритмы автоматического принятия решений для корректировки целевых задач и способов их решений в изменяемых условиях поиска;
4. Алгоритмы автоматического управления группой и отдельными БЛА на различных этапах выполнения решаемых целевых задач.

Объект исследования – автономная группа БЛА, осуществляющая поиск наземных мобильных объектов.

Предмет исследования – технология формирования алгоритмов управления автономной группой БЛА, обеспечивающих поиск наземных малоразмерных объектов за счет использования методов анализа ситуаций и организации управления на основе типовых операций.

В работе **использованы методы** математического моделирования, теории вероятностей, математической статистики, компьютерного зрения.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложена и разработана структура комплексного алгоритма решения целевых задач группой БЛА, включающего процедуры:
 - выделения областей интереса на основе анализа ситуации;
 - распределения БЛА на подгруппы;
 - планирование маршрутов для подгрупп БЛА;
 - организация полета до области поиска;
 - проведение поиска объектов;
 - организация возврата в область ожидания.
2. Предложена и разработана методика формирования описаний целевых задач, основанная на использовании баз данных и описаний уникальных атрибутов объектов и условий поиска;
3. Предложены и разработаны алгоритмы и программное обеспечение для организации управления группой БЛА на основе использования типовых операций;
4. Получены результаты исследования, подтверждающие возможность реализации разработанных алгоритмов в реальном времени на перспективных бортовых вычислителях, в т.ч. для малоразмерных БЛА.

Практическая значимость заключается в том, что подтверждена возможность реализации частных алгоритмов принятия решений и управлений, входящих в комплексный алгоритм решения целевых задач группой БЛА, в реальном времени на существующих цифровых сигнальных процессорах.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Информационно-управляющие комплексы летательных аппаратов» МАИ и рабочей деятельности ФГУП «Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха». Имеются соответствующие акты внедрения от кафедры 704 МАИ и ФГУП «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха».

Достоверность результатов, полученных в работе, подтверждается результатами математического и полунатурного моделирования процессов принятия решений, обработки изображений и управления группой БЛА в различных режимах выполнения целевой задачи.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались и докладывались на 2-ой научно-технической конференции «Комплексы с беспилотными летательными аппаратами России. Современное состояние и перспективы развития». Москва, 2008., VIII – ой Всероссийской юбилейной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов». Москва, 2010, 9-ой Международной конференция «Авиация и космонавтика 2010». Москва 2010 г., Шестой Всероссийской научно - практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и Третьей молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». Таганрог, 2011, IX-й Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов», Москва, 2012 г.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в трех статьях [1-3] в журналах, входящих в рекомендованный ВАКом Минобрнауки России перечень изданий, и в семи работах [4-10] в сборниках тезисов докладов на научно-технических конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 143 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок, 13 таблиц и 66 наименований литературных источников.

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Сценарий поиска мобильных наземных объектов автономной группой БЛА, основанный на анализе текущей ситуации, определяющей условия поиска;
2. Методика формирования описаний целевых задач, основанная на использовании баз данных и описаний уникальных атрибутов объектов и условий поиска;
3. Методика анализа ситуаций для выделения областей интереса, основанная на использовании баз данных и набора продукционных правил;
4. Методика и алгоритм планирования наблюдений, реализуемых с БЛА при наличии априорной неопределенности относительно областей интереса;

5. Алгоритмы и программное обеспечение для организации управления группой БЛА на основе использования типовых операций;
6. Комплексный алгоритм решения целевых задач группой БЛА, основанный на использовании методик и алгоритмов по пунктам 1-5.
7. Результаты исследований, подтверждающие работоспособность предлагаемых решений и возможность реализации разработанных алгоритмов в реальном времени на перспективных бортовых вычислителях, в т.ч. для малоразмерных БЛА.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследуемой темы, проводится анализ литературы, приводится краткое содержание диссертационной работы.

В первой главе диссертации рассматриваются основные особенности поиска наземных объектов, приводятся критерии эффективности поиска, рассматриваются вопросы, связанные с принятием решения об обнаружении или распознавании объекта. Описываются проблемы, ограничивающие применение БЛА в условиях сложного рельефа местности, приводится класс БЛА, подходящий для решения задач, рассматриваемых в работе, обосновывается повышение эффективности применения группы БЛА в задачах поиска.

В рамках исследуемых задач, рассмотрены различные варианты оценки эффективности поиска, заключающегося в обследовании области поиска (области интереса) системой наблюдения (СН), расположенной на борту БЛА, и автоматическом обнаружении искомых объектов.

Процесс обнаружения заключается в принятии решения о наличии одного из двух возможных исходов $X = (x_1, x_2)$: обнаружении (не обнаружении) искомых объектов на каждом такте обработки получаемых на борту БЛА изображений земной поверхности.

Решения принимаются на основе выделения на изображениях, оценки и анализа значений признаков y_n . Векторы $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n, \dots, y_N)$ в пространстве признаков носят название векторов-реализаций.

В качестве базовых критериев эффективности поиска наземных объектов в работе используются известные критерии:

1. Критерий теоретической производительности:

$$W_T = Ш_{\text{ЭФ}} V_{\text{БЛА}}, \quad (1)$$

где $Ш_{\text{ЭФ}}$ - эффективная ширина поиска; $V_{\text{БЛА}}$ - земная скорость БЛА.

При заданной площади S_n области поиска теоретическое время поиска равно $T_T = S_n / W_T$.

2. Критерий обнаружения Неймана-Пирсона:

$$W_{об} = \min \alpha \text{ (или } \min \beta), \text{ при } \beta \leq \beta_0 \text{ (или } \alpha \leq \alpha_0), \quad (2)$$

где α - вероятность ложной тревоги, β - вероятность пропуска цели, α_0, β_0 - заданные (предельно допустимые) значения ошибок.

При этом первый критерий характеризует эффективность обследования области интереса, а второй учитывает качество принятия решений, связанных с обнаружением объектов поиска.

Критерий теоретической производительности (1) обычно используется на этапе планирования поисковых операций. Эффективная ширина поиска и скорость БЛА определяются исходя из задаваемых параметров СН и БЛА, а также предполагаемых внешних условий. Критерий Неймана – Пирсона (2) в основном служит для настройки параметров СН и алгоритмов обнаружения в процессе поиска с учетом текущих условий наблюдения.

В некоторых ситуациях при организации поиска возможно совместное использование критерия теоретической производительности и ошибок обнаружения, например:

- минимизация критерия Неймана – Пирсона производится с учетом заданных ограничений на критерий производительности $W_m \geq W_{m0}$, где W_{m0} – заданная теоретическая производительность поиска;
- максимизация критерия теоретической производительности $\max W_m$ рассчитывается при заданных ограничениях на вероятности ошибок $\alpha \leq \alpha_0$ или $\beta \leq \beta_0$.

Необходимо отметить, что одновременное выполнение условий $\alpha \leq \alpha_0$ и $\beta \leq \beta_0$ может быть реализовано в рамках метода последовательного анализа (минимальной длительности эксперимента Вальда). При поиске объектов одиночным БЛА данный подход трудно реализуем, т.к. требует организации разноракурсного наблюдения на каждом подозрительном участке поиска.

Динамические характеристики известных БЛА весом более 20 кг затрудняют их использование в ряде оперативных разведывательных задач, например, при слежении за маневренной целью в городских условиях. В подобных задачах, с точки зрения необходимых динамических характеристик и габаритных размеров, более перспективными являются малоразмерные БЛА. Например: БЛА «ГранТ» со стартовым весом 20 кг и весом целевой нагрузки 3 кг; БЛА «Иркут-10» со стартовым весом 8.5 кг и весом целевой нагрузки 1.5 кг; БЛА «Aerosonde» со стартовым весом 14 кг и весом целевой нагрузки 5 кг и др. У представленных БЛА постоянная времени $T_{ЛА}$ около 1с и минимальный радиус разворота составляет несколько десятков метров.

Как показывает ряд исследований, существенное повышение эффективности поиска наземных мобильных объектов может быть получено при групповом применении БЛА.

Возможности группового применения БЛА позволяют решить задачу одновременного ограничения ошибок ложной тревоги и пропуска цели $\alpha \leq \alpha_0$ и $\beta \leq \beta_0$. В этом случае на основе идеологии последовательного анализа для принятия решений вычисляются два значения порогов:

$$\lambda_{\min} = \beta_0 / (1 - \alpha_0), \quad \lambda_{\max} = \alpha_0 / (1 - \beta_0).$$

При $\lambda_{\min} < \lambda < \lambda_{\max}$ (где $\lambda = p(Y/x_1) / p(Y/x_2)$; $p(Y/x_1)$, $p(Y/x_2)$ – условные вероятности получения вектора признаков Y при наличии исходов x_1 или x_2 , соответственно) принимается решение об обследовании подозрительного участка следующим БЛА. В противном случае принимается решение о принадлежности исхода к соответствующему классу (x_1 – объект, x_2 – фон).

Существует множество факторов, которые могут изменять текущие поисковые ситуации и поэтому требуют оперативной перепланировки действий БЛА.

Например, изменение погодных условий, ограничивающих возможности передвижения искомого объекта (с точки зрения его проходимости), позволяет уточнить (уменьшить) области его возможного присутствия. Получение дополнительной оперативной информации, определяющей целевые задачи объекта или возможные траектории его движения, также может потребовать перепланирования действий БЛА.

В этих условиях БЛА должен самостоятельно принимать соответствующие решения, в частности, планировать свои действия на основе анализа текущей ситуации, с учетом поставленной ЦЗ.

Предлагаемая методика анализа ситуации реализуется на основе использования:

1. Баз данных (БД), формируемых заранее и содержащих сведения о возможных объектах (явлениях, процессах) интереса и их атрибутах, в т.ч. карт местности;

2. Баз знаний (БЗ), формируемых заранее и содержащих продукции, описывающие пространственно-временные и каузальные отношения между объектами (явлениями, процессами);

3. Описаний (моделей):

- целевой задачи (ЦЗ);
- состояния БЛА, включая бортовое оборудование и СН;
- обстановки, учитывающей априорную и текущую информацию.

При этом, на основании анализа описаний ЦЗ и обстановки определяются области интереса, а информация, содержащаяся в описании состояния СТЗ, позволяет оценить возможные ограничения на решение ЦЗ.

БЗ формируется на основе набора продукций вида:

$$(j) S; L; A \Rightarrow B; Q,$$

где j – номер продукции, S – класс ситуации, L – условие актуализации, A , B – левая и правая части продукции, Q – указание, вводимые после реализации данной продукции.

Цель использования продукций состоит в определении областей, в которых:

- возможно присутствие объекта поиска;
- невозможно присутствие объекта поиска;
- возможно присутствие объекта поиска, но определенные атрибуты наблюдения могут быть не идентифицируемы;
- возможно присутствие объекта поиска, но он может быть частично или полностью скрыт от наблюдения.

Выделение областей интереса, в которых предполагается присутствие объектов поиска, позволяет разделять исходную группу БЛА на подгруппы и планировать маршруты полета каждой подгруппы к областям интереса и в процессе их обследования.

Анализ различных сценариев поиска показывает, что для отработки технологии поиска наземных мобильных объектов автономной группой БЛА необходимо:

- разработать комплексный алгоритм поиска наземных мобильных объектов группой БЛА;
- определить состав частных задач (в дальнейшем, будем их условно называть: задачами принятия решений), которые могут быть решены на основе использования технологии анализа ситуаций;
- разработать частные алгоритмы принятия решений;
- определить состав и разработать алгоритмы автоматического управления группой БЛА;
- оценить работоспособность разработанных алгоритмов и возможность реализации поиска наземных мобильных объектов автономной группой БЛА на перспективных вычислителях, построенных на существующих процессорах.

Вторая глава диссертации посвящена разработке сценария решения задачи поиска мобильных наземных объектов автономной группой БЛА. На основании анализа решаемых целевых задач предложена и разработана структура комплексного алгоритма поиска наземных объектов, представлен вариант описания целевой задачи, рассмотрена процедура определения областей интереса. Приведены алгоритмы распределения БЛА по подгруппам и планирования маршрутов. Описан алгоритм поиска наземных объектов.

Анализ решаемых задач показал, что сценарий поиска объектов группой БЛА, функционирующей в автономном режиме, должен включать:

1. Прием и анализ условий решения целевой задачи (в рассматриваемом случае – задачи поиска наземных мобильных объектов);
2. Определение областей интереса. В частном случае данная процедура может решаться на основе оценки вероятности присутствия объекта (или объектов) поиска в различных подобластях исходной области поиска;
3. Распределение группы БЛА на подгруппы и постановка подгруппам частных целевых задач. Процедура реализуется, если сравнительный анализ различных стратегий поиска показывает преимущества данного подхода;
4. Планирование согласованных маршрутов полета к областям интереса каждой подгруппе БЛА;
5. Реализация управлений согласованными полетами подгрупп БЛА к областям интереса с облетом препятствий и предотвращением возможных столкновений со стационарными и мобильными объектами;
6. Выполнение целевой задачи, в частности, поиска объектов в областях интереса;
7. Выход и полет в области ожидания с облетом препятствий и предотвращением столкновений.

В соответствии с данным сценарием был разработан комплексный алгоритм поиска наземных мобильных объектов автономной группой БЛА. Структура алгоритма представлена на рис. 1

Целевая задача, передаваемая ведущему группы БЛА, представляется в формализованном виде, позволяющем в бортовых вычислителях БЛА планировать и реализовать дальнейшие действия группы, подгрупп и отдельных БЛА.

В результате проведенных исследований был сформирован состав описания типовых целевых задач поиска:

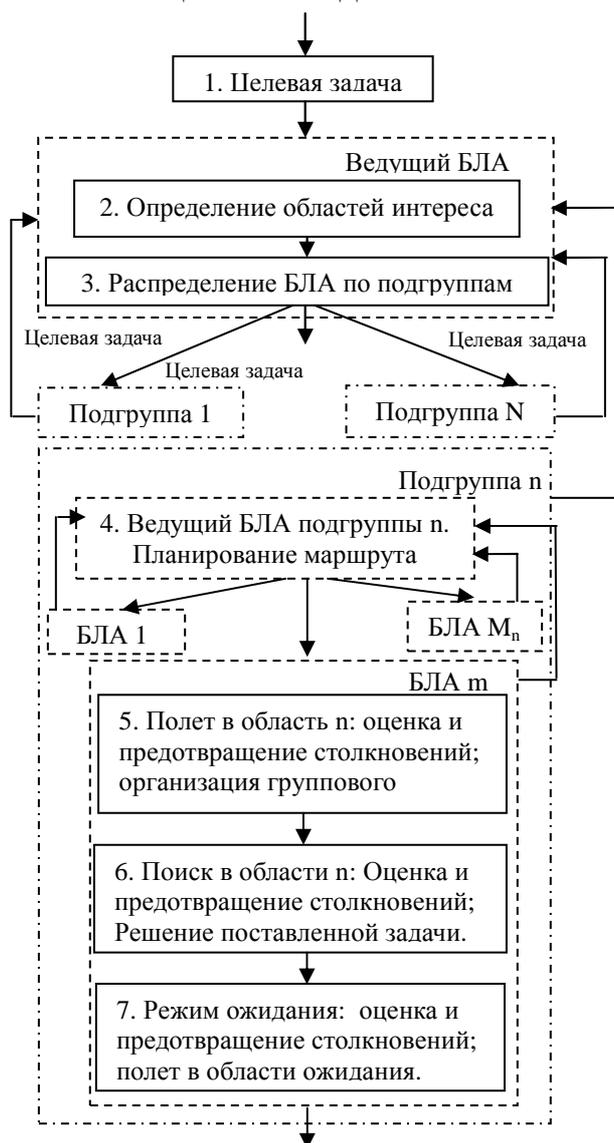


Рис. 1 Структура алгоритма

- вид требуемого поиска: на площади, по линии, вторичный поиск (поиск по вызову), слежение;
- описание объектов поиска;
- описание области поиска;
- требования к оценке эффективности поиска;
- дополнительные требования.

Кроме того, в задании на выполнения ЦЗ указываются:

А. Атрибуты объекта поиска:

- предполагаемая стратегия действий объекта поиска;
- типовые и уникальные атрибуты объектов поиска (в т.ч. предельные характеристики для мобильных объектов);
- типовые и уникальные атрибуты наблюдения;
- методы противодействия обнаружению.

Б. Атрибуты области поиска:

- расстояние области поиска от точки старта БЛА;
- конфигурация области поиска;
- предполагаемые рельеф и текстура подстилающей поверхности.

В. Уникальные требования к прохождению маршрута (опасные участки

маршрута, высота, скорость и т.д.).

Г. Условия поиска:

- требования к выполнению поиска;
- дополнительные требования и ограничения.

В соответствии с приведенным составом требуемой информации, была выбрана форма представления ЦЗ в виде набора записей следующего вида:

1. Общее описание ЦЗ.

ЦЗ: вид поиска (на площади – код 01, по линии - 02, вторичный поиск (поиск по вызову) - 03, слежение - 04) ^ объект поиска: вид объекта (стационарный - 01, мобильный - 02) ^ область поиска: вид описания (координаты угловых точек - 01, номера участков на цифровой карте местности (ЦКМ) - 02, координаты начальной точки и размеры области - 03, пр. – 04, ...);

2. Описание объекта.

Объект (*Ob*): тип (грузовой автомобиль – 01, легковой автомобиль – 02 и т.д.) ^ марка (01, ... ВАЗ 2109 – 05, ...) ^ цвет (красный – 01, зеленый – 02 и т.д.) ^ уникальные атрибуты; Вид описания стратегии поведения (*Str*) (вероятностные характеристики - 01, возможная ЦЗ – 02 и т.д.) ^ возможные методы противодействия (маскировка - 01, уклонение – 02 и т.д.).

3. Описание области поиска.

В качестве основы описания используются ЦКМ с векторным описанием объектов: дорог, жилых массивов и пр. (*Dm*). На ЦКМ обозначаются особенности рельефа, типы подстилающих поверхностей и их проходимость для различных типов транспортных средств.

4. Уникальные требования к прохождению маршрута (*RT*), определяемые на основе информации, не передаваемой БЛА.

5. Требования к эффективности поиска.

Критерий производительности (*P*) (теоретическая производительность - 01, время поиска - 02, пр. – 03, ...) ^ вид (минимизация - 01, максимизация - 02, ограничение снизу (\geq) – 03, ограничение сверху (\leq) - 04); критерий надежности (*R*) (вероятность правильного обнаружения - 01, ошибка пропуска цели - 02, ошибка ложной тревоги - 03, пр. – 04, ...).

Описания и значения атрибутов всех типовых объектов и областей поиска хранятся в подготовленных заранее базах данных (БД). Данные в БД соответствуют типовым значениям атрибутов (параметров, характеристик, признаков).

Уникальные значения атрибутов помещаются в специальные разделы описания ЦЗ. Подобными атрибутами могут быть, например, повышенная (для данной марки) проходимость транспортного средства, необычная раскраска и т.д.

Рассмотрим на примере процесс определения областей интереса на основе анализа ситуации. Допустим, в некоторой области находится объект (автомобиль марки ВАЗ 2109, цвет красный), который требуется обнаружить.

Общее описание ЦЗ включает заголовок и соответствующие коды: *SG* (заголовок): 01(поиск на площади)^ 02 (мобильный объект)^ 02 (номера участков на ЦКМ);

Аналогично формируются остальные описания.

Описание объекта: *Ob*: 02^05^01^*N*; *Str(N)*^*N*; Описание области поиска: *Dm*: 10; Уникальные требования: *RT(N)*.

Для выделения областей интереса на основе анализа ситуации используются данные из БД о проходимости объекта на местности. В работе принимается, что типовая проходимость легкового автомобиля оценивается условным показателем $R = 1$ ($1 \leq R \leq 5$).

Анализ ситуации проводится, на основе использования заранее составленного набора правил, например:

- если лес, то объект не пройдет;
- если поле и требуемая проходимость выше проходимости объекта, то объект не пройдет;
- если водоем, то объект не пройдет и пр.

Обследование исходной ЦКМ (с использованием набора правил) производится до начала поиска на основании сопоставления показателя проходимости объекта и возможной проходимости отдельных участков с известной текстурой: лес, поле и пр.

В результате реализации данной процедуры, выделяются области возможного



Рис. 2 Выделенные области интереса

нахождения объекта (области интереса). Примеры выделенных областей интереса представлены на рис. 2.

После выделения областей интереса БЛА распределяются на подгруппы для исследования этих областей. При этом для каждой n -й области интереса ($n = 1, 2, \dots, N$) выделяется n -я подгруппа БЛА.

Количество БЛА в каждой подгруппе должно соответствовать площади S_n данной области интереса.

Примем, что производительности всех БЛА равны W_T . Тогда производительность n -й подгруппы будет равна $m_n W_T$, где m_n – количество БЛА в n -й подгруппе ($m = 1, 2, \dots, M$).

В общем случае для распределения БЛА по подгруппам рассчитывается теоретическое время, затрачиваемое каждой n -й подгруппой на выполнение ЦЗ (полет до соответствующей n -й области поиска, исследование области, возврат) при некотором распределении БЛА по подгруппам:

$$T_n = t_{1n} + \frac{S_n}{W_T \cdot m_n} + t_{2n},$$

где t_{1n} – время полета до n -й области, S_n – площадь n -й области, t_{2n} – время возврата из n -й области.

Будем считать, что наилучшим является распределение БЛА по подгруппам, которое удовлетворяет критерию:

$$T_0 = \min_{i \in I_{\max}} \max_{n \in N} \{T_n[m_n(i)]\}, \quad (3)$$

где $T_n[m_n(i)]$ – теоретическое расчетное время, необходимое для выполнения ЦЗ подгруппой n с количеством БЛА m_n при i – м варианте распределения БЛА по подгруппам ($i = 1, 2, \dots, I_{\max}$).

БЛА распределяются по подгруппам на основе использования метода перебора и оценки критерия (3).

Для планирования маршрутов каждой подгруппы БЛА в работе используется алгоритм Ли. Разработанный алгоритм и программное обеспечение позволяют планировать маршруты с обходом опасных зон. Параметры маршрута корректируются с учетом динамических характеристик БЛА.

Следующей задачей исследования является оценка возможности реализации разработанных алгоритмов в реальном времени на существующих процессорах.

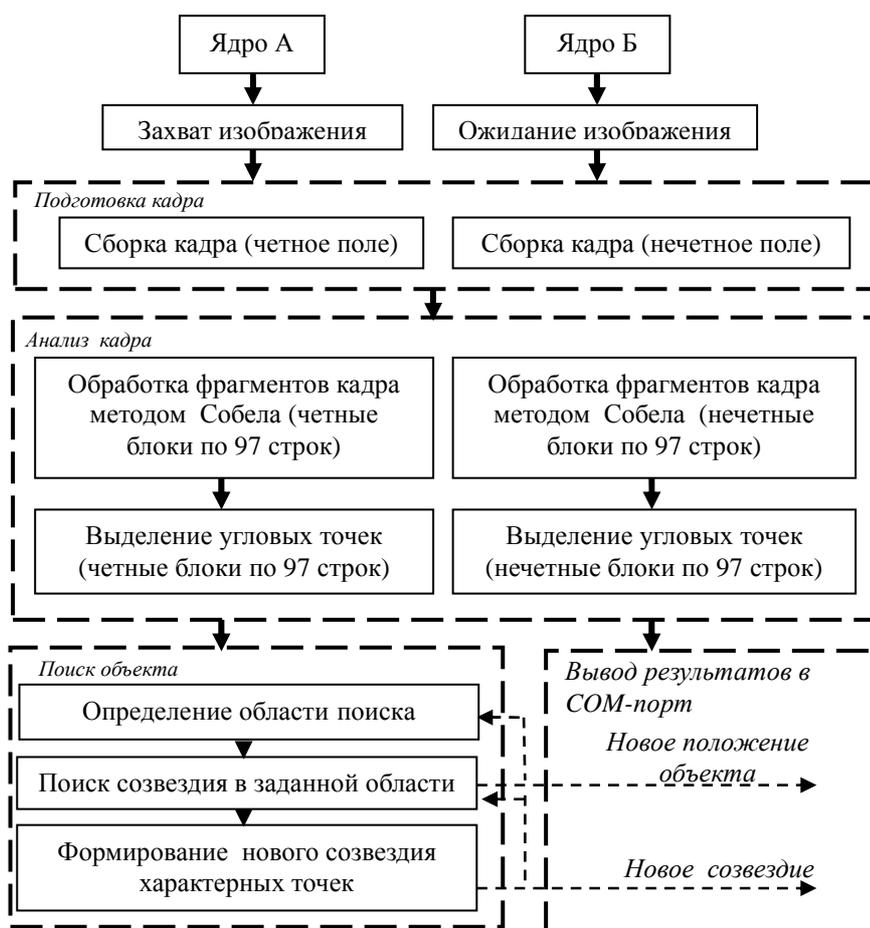


Рис. 3 Алгоритм поиска и слежения

Известно, что сложность реализации алгоритмов поиска и слежения, ориентированных для работы в условиях реального масштаба времени, определяется необходимостью выполнения большого объема вычислений. Поэтому при разработке алгоритмов предполагалось, что в бортовом вычислителе БЛА будет использован некоторый высокопроизводительный двудерный цифровой сигнальный процессор, например, типа BF-561 (Analog Devices). На рис. 3 изображена структурная схема реализации алгоритма поиска и

слежения на двудерном процессоре.

В третьей главе рассматриваются вопросы формирования алгоритмов управления БЛА. Определены набор типовых режимов полета БЛА, обеспечивающих решение задач поиска, и комплекс алгоритмов, обеспечивающих реализацию управления БЛА в типовых режимах. Представлено описание разработанных унифицированных программных модулей, реализующих управление БЛА.

В данной работе на основе анализа задач поиска были определены типовые режимы полета и в комплексе алгоритмов управления реализованы соответствующие частные алгоритмы:

1. Автоматический полет по заданной траектории (по маршруту). В частности, по заданным промежуточным пунктам маршрута;
2. Полет строем с заданным интервалом и дистанцией;
3. Полет по типовым траекториям наблюдения (круг, восьмерка);
4. Автоматический возврат в строй или в заданный (конечный) пункт маршрута;
5. Определение и предотвращение столкновений БЛА во время полета.

Приведенные алгоритмы позволяют реализовать управления на всех этапах выполнения ЦЗ.

В качестве примеров на рис. 4 представлены блок-схемы некоторых частных алгоритмов. Указанные алгоритмы разработаны с учетом того, что в состав бортового оборудования входят: навигационная система (спутниковая

навигационная система, инерциальная навигационная система), средства связи, обеспечивающие обмен информацией между БЛА в группе, система автоматического управления, целевая нагрузка (видео камера и др.).

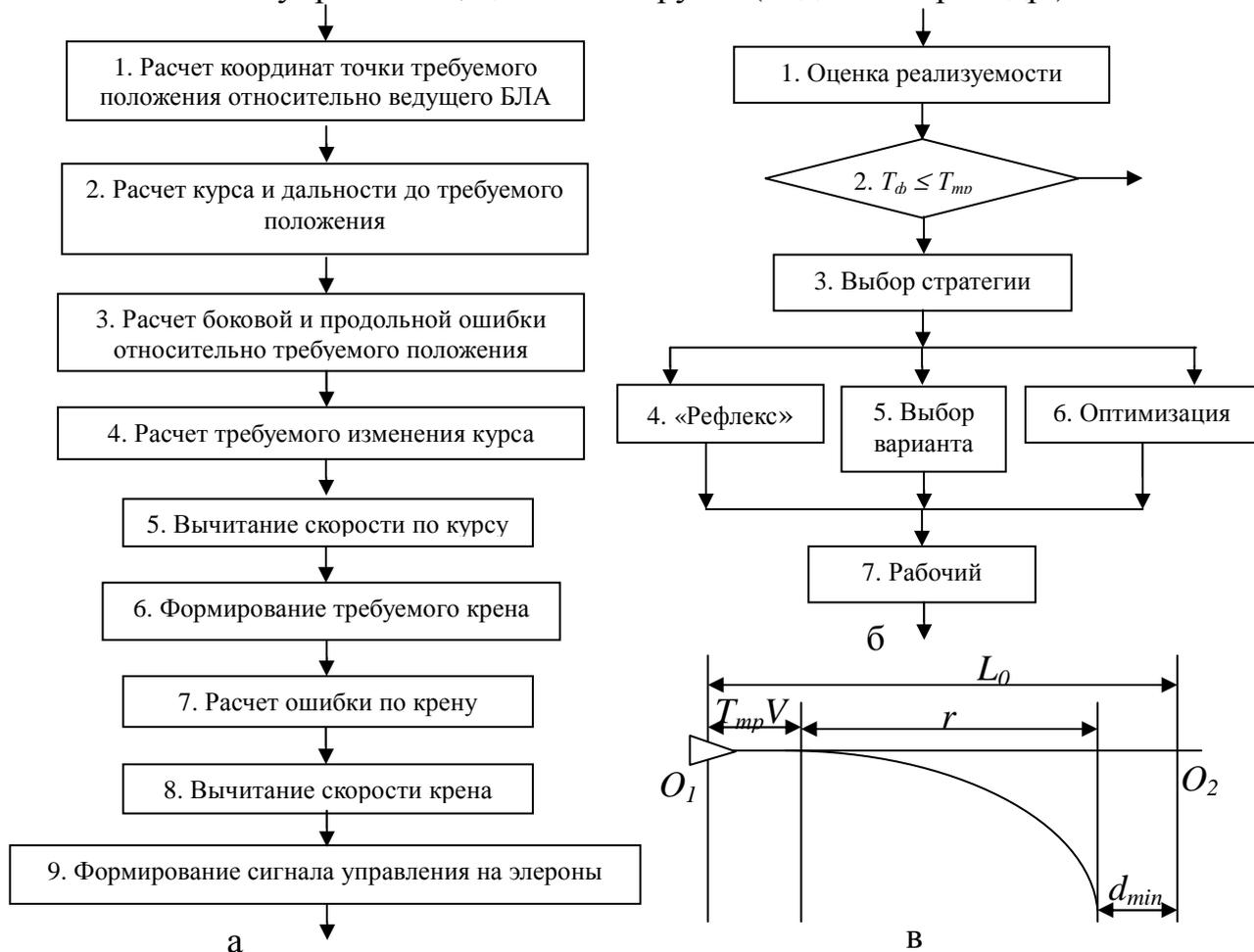


Рис. 4 Блок-схемы частных алгоритмов

На рис. 4, а изображена блок-схема алгоритма удержания строя при заданных значениях интервала и дистанции до ведущего БЛА.

На рис. 4, б изображена блок-схема алгоритма оценки реализуемости предотвращения столкновения с препятствием. Оценка реализуемости производится на основе расчета времени, оставшегося до столкновения, и динамических характеристик БЛА. На рис. 4, в показана схема маневра БЛА в горизонтальной плоскости, где O_1 – БЛА, O_2 – объект (препятствие), d_{min} – минимально допустимое безопасное расстояние пролета, r – радиус разворота, L_o – расстояние до препятствия.

Радиус разворота БЛА равен:

$$r = \frac{V_{БЛА}}{\dot{\Psi}},$$

где $\dot{\Psi}$ - угловая скорость по курсу.

Например, для $V = 50 \text{ м/с}$, $\dot{\Psi} = 0.087 \text{ рад./с. (5}^{\circ}/\text{с.)}$, $r = 50/0.087 = 576 \text{ м}$.

Требуемое время с момента обнаружения препятствия до принятия окончательного решения (включая распознавание типа препятствия) будет равно:

$$T_{mp} = (L_o - r_m - d_{min}) / V.$$

Условием реализуемости маневра уклонения является: $T_{\phi} \leq T_{mp}$.

Четвертая глава работы содержит результаты экспериментальных исследований реализованных алгоритмов. Исследования проводились для оценки работоспособности алгоритмов:

- поиска наземных объектов;
- выделения областей интереса;
- распределения БЛА по подгруппам;
- планирование маршрута;
- полета строем;
- предотвращения возможных столкновений;
- управления согласованным полетом группы БЛА.

Работоспособность алгоритмов определялась выполнением некоторых условий, зависящих от назначения конкретных алгоритмов.

Методика проведения экспериментов по оценке работоспособности алгоритмов была следующей:

1. Определение условий, определяющих работоспособность исследуемого алгоритма;
2. Подготовка моделирующей среды;
3. Определение диапазонов изменения переменных параметров;
4. Разработка плана эксперимента;
5. Оценка выполнения условий работоспособности.

В частности, при исследовании алгоритма поиска наземных объектов оценивались следующие параметры, определяющие требования к работоспособной системе:

1. Точность работы алгоритма:

$$\Delta_{n_{\max \text{ реал}}} \leq \Delta_{n_{\text{ зад}}} , \quad (4)$$

где $\Delta_{n_{\max \text{ реал}}}$ - максимальная ошибка определения положения объекта алгоритмом в плоскости изображения (в пикселях); $\Delta_{n_{\text{ зад}}}$ - допустимая ошибка определения положения объекта в пикселях.

2. Быстродействие алгоритма:

$$\bar{T}_{\text{ реал}} \leq \bar{T}_{\text{ треб}} , \quad (5)$$

где $\bar{T}_{\text{ реал}}$ - среднее время затрачиваемое алгоритмом на обработку одного кадра; $\bar{T}_{\text{ треб}}$ - требуемое среднее время на обработку одного кадра.

В эксперименте, в соответствии с реальными условиями поиска, были заданы следующие требования: $\Delta_{n_{\text{ зад}}} = 10$ пикс, $\bar{T}_{\text{ треб}} = 0.1$ с.

Экспериментальные исследования алгоритма поиска наземных объектов проводились на прототипе бортового вычислителя - плате ADZS-BF-561-EZLITE.

Движение объекта поиска имитировалось методами математического моделирования.

В результате полунатурного моделирования работы алгоритма была рассчитана средняя ошибка определения положения объекта поиска в реальном времени $\Delta_{\text{тикс}_{\text{реал}}} = 3$ пикс., что удовлетворяет условию (4).

Среднее время, затрачиваемое алгоритмом поиска объекта на обработку одного кадра $\bar{T}_{\text{реал}} = 0.04$ сек, что удовлетворяет условию (5).

Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили работоспособность алгоритма поиска наземных объектов.

Для оценки работоспособности алгоритма предотвращения столкновения была построена модель в среде Матлаб Simulink (рис. 5).

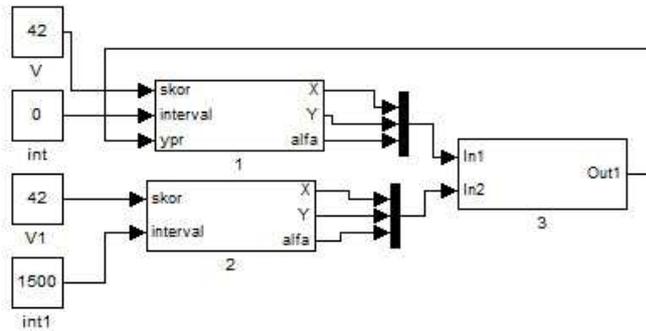


Рис. 5 Модель БЛА

В блоке 1 находятся модель БЛА1 (боковой канал) со своей системой автоматического управления (САУ). БЛА1 выполняет маневр уклонения от столкновения. В блоке 2 находится модель БЛА2 (боковой канал) со своей САУ. БЛА2 выполняет полет по заранее заданной траектории без маневрирования. В блоке 3 находится система определения и

предотвращения столкновений, формирующая управление для выполнения маневра уклонения БЛА1.

Характеристики БЛА: постоянная времени $T = 0.7$ с.; скорость полета $V = 42$ м/с.; минимальный радиус разворота $r_{\text{min}} = 35$ м.

Сценарий предотвращения столкновения включает этапы: обнаружения объекта, с которым возможно столкновение, расчета области возможных столкновений, выполнения маневра уклонения. В процессе исследований каждому БЛА задавалась индивидуальная траектория

полета. Моделирование проводилось с различными дальностями обнаружения столкновения. В таблице 1 приведены дальности разлета БЛА в зависимости от дальности обнаружения возможного столкновения.

Таблица 1

$D_{\text{об, м}}$	$D_{\text{разл, м}}$
200	101,1
100	27,3
50	5,2
0	2,3

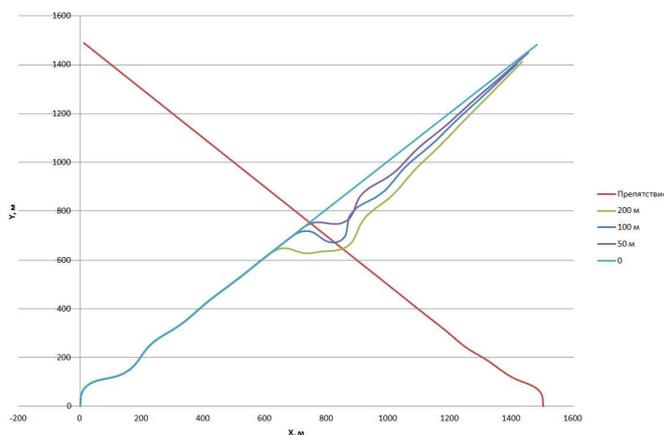


Рис. 6 Траектории разлета БЛА

На рис. 6 представлены траектории разлета БЛА в зависимости от дальности обнаружения столкновения.

Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность алгоритма предотвращения столкновения.

Исследования алгоритмов выделения областей интереса и распределения БЛА на подгруппы подтвердило повышение производительности поиска за счет уменьшения теоретического времени поиска. Например при заданной общей площади $S_{об} = 361,8 * 10^6 \text{ м}^2$ было выделено три области возможного нахождения объекта $S_1 = 2.1 * 10^6 \text{ м}^2$, $S_2 = 1.2 * 10^6 \text{ м}^2$, $S_3 = 2.6 * 10^6 \text{ м}^2$. Коэффициент повышения производительности поиска на основе теоретического времени поиска составил: $K_{эфп} = 13.3$.

Для проверки совместной работы алгоритмов: распределения БЛА по подгруппам, планирования маршрутов, полета строем, а также оценке влияния частоты обмена информацией между БЛА в группе на точность удержания строя были проведены экспериментальные исследования на моделях Microsoft Flight Simulator X.

В качестве исследуемых БЛА была выбрана модель по техническим характеристикам соответствующая самолету Цессна-172.

В качестве входных параметров были использованы следующие показатели: интервал между БЛА 100м; дистанция 0; высота полета 300 м; количество БЛА в группе 9 шт; скорость полета 40 м/с; угол зрения камеры 60^0 .

Было задано три области интереса размером $4000*4000 \text{ м}$. Удаление областей относительно точки старта: $X_1=3000 \text{ м}$, $Y_1 = 6000 \text{ м}$; $X_2=4000 \text{ м}$, $Y_2 = 5000 \text{ м}$; $X_3=-2000 \text{ м}$, $Y_3 = 7000 \text{ м}$.

Первоначально было выполнено автоматическое распределения БЛА по трем подгруппам, согласно количеству областей интереса. В каждую подгруппу было

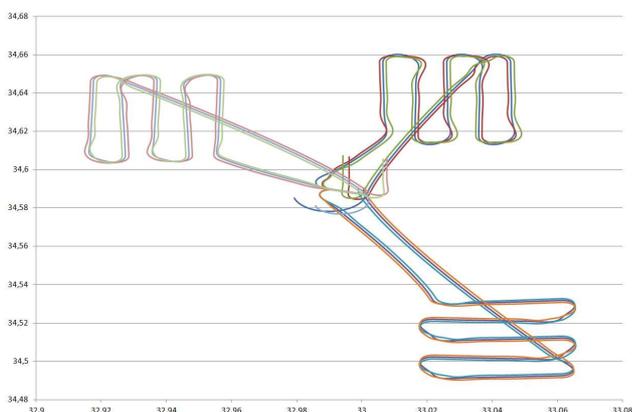


Рис. 7 Групповой полет БЛА

включено по три БЛА. Для подгрупп были построены маршруты, включающие участок полета до области интереса, маршрут обследования области интереса и возврат в точку старта. На рис. 7 представлен результат полета группы БЛА.

При оценке влияния частоты обмена информацией между БЛА были заданы ограничения на ошибки удержания строя:

1. СКО удержания интервала $СКО_{I_{тр}} = 10\text{м}$;
2. СКО удержания дистанции $СКО_{D_{тр}} = 10 \text{ м}$.

В таблице 2 приведены значения СКО и математического ожидания ошибок удержания интервала и дистанции в зависимости от частоты обмена информацией.

Таблица 2

Частота, Гц	Ошибка удержания интервала		Ошибка удержания дистанции	
	Мат. ожидание	СКО	Мат. ожидание	СКО
10	1.2	5	12.5	8.3
5	-1	29	16.9	3.9
1	1.6	48	33.4	9.4

В целом, результаты экспериментов подтвердили работоспособность всех разработанных алгоритмов принятия решений и управлений БЛА и показали, что работа алгоритмов может быть реализована в реальном времени на существующих процессорах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенных исследований предложена и разработана информационная технология организации согласованных действий БЛА при поиске наземных мобильных объектов, основанная на анализе ситуации. Разработанная технология включает:

1. Сценарий поиска мобильных наземных объектов автономной группой БЛА, основанный на анализе текущей ситуации, определяющей условия поиска [8, 9,10];
2. Методика формирования описаний целевых задач, основанная на использовании баз данных и описаний уникальных атрибутов объектов и условий поиска [10];
3. Методика анализа ситуаций для выделения областей интереса, основанная на использовании баз данных и набора продукционных правил [10];
4. Методика и алгоритм планирования наблюдений, реализуемых с БЛА при наличии априорной неопределенности относительно областей интереса [2,3];
5. Алгоритмы и программное обеспечение для организации управления группой БЛА на основе использования типовых операций [1,4,5], реализующие:
 - автоматический полет по заданной траектории (по маршруту). В частности, по заданным промежуточным пунктам маршрута;
 - полет строем с заданным интервалом и дистанцией;
 - полет по типовым траекториям наблюдения (круг, восьмерка);
 - автоматический возврат в строй или в заданный (конечный) пункт маршрута;
 - определение и предотвращение опасного сближения БЛА.
6. Комплексный алгоритм решения целевых задач группой БЛА [2,3,6,10], основанный на использовании методик и алгоритмов по пунктам 1-5. Алгоритм включает процедуры:
 - выделения областей интереса на основе анализа ситуации;
 - распределения БЛА на подгруппы;

- планирование маршрутов для подгрупп БЛА;
- организация полета до области поиска;
- проведение поиска объектов;
- организация возврата в область ожидания.

Результаты исследований, проведенные с помощью математического и полунатурного моделирования подтверждают работоспособность предлагаемых решений и возможность реализации разработанных алгоритмов на перспективных бортовых вычислителях, в т.ч. для малоразмерных БЛА [7].

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из рекомендованного ВАК Минобрнауки России перечня:

1. Шеваль В.В., Крылов И.Г. Сравнительные экспериментальные и имитационные исследования автоматической посадки беспилотного летательного аппарата. Вестник Московского авиационного института, 2009, №6, с. 150-154.
2. Ким Н.В., Кузнецов А.Г., Крылов И.Г. Применение систем технического зрения на беспилотных летательных аппаратах в задачах ориентации на местности, Вестник Московского авиационного института, 2010, №3, с. 46-49.
3. Ким Н.В., Крылов И.Г., Лебедев А.В. Восстановление 3D поверхности по видовой информации, принимаемой группой БПЛА. Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН, 2011, №1, с. 137-141.

Другие публикации:

4. Ким Н.В., Кузнецов А.Г., Крылов И.Г., Шеваль В.В. Повышение эффективности наблюдения наземных объектов группой беспилотных летательных аппаратов. Тезисы докладов второй всероссийской научно-технической конференции «Комплексы с беспилотными летательными аппаратами России. Современное состояние и перспективы развития» ак. Им. Н.Е. Жуковского, 2008, с. 50.
5. Ким Н.В., Кузнецов А.Г., Крылов И.Г., Шеваль В.В. Предварительная оценка составляющих ошибки управления полетом малоразмерных БЛА в режиме автоматической посадки. Тезисы докладов второй всероссийской научно-технической конференции «Комплексы с беспилотными летательными аппаратами России. Современное состояние и перспективы развития». ак. Им. Н.Е. Жуковского, 2008, с. 51.
6. Кузнецов А.Г., Крылов И.Г., Лебедев А.В. Система ориентации мобильного робота относительно внешних ориентиров на основе обработки изображений. Труды 18 международного научно-технического семинара, Алушта, 2009, с. 69.
7. Крылов И.Г. Особенности реализации алгоритмов обработки изображений на процессоре VF-561 в реальном времени. Сборник докладов VIII –й Всероссийской юбилейной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнической и интеллектуальных систем летательных аппаратов», Москва, МАИ, 2010, с. 115-118.

8. Ким Н.В., Крылов И.Г., Лебедев А.В. К вопросу согласованного применения двух БПЛА. 9-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2010». Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2010, с. 140-141.

9. Ким Н.В., Крылов И.Г., Лебедев А.В. Согласованное применение группы БЛА. // Материалы Шестой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и Третьей молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011, стр. 11-14.

10. Ким Н.В., Крылов И.Г. Групповое применение БЛА в задачах наблюдения. Сб. докл. IX-й Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов», Мова: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2012, с. 59-62.

Тираж: 100 экз. Заказ № 375
Отпечатано в типографии «Реглет»
119526, г. Москва, ул. Фридриха Энгельса, д.3/5, стр. 2
(495) 661-60-89; www.reglet.ru