



На правах рукописи

Бодунков Николай Евгеньевич

**РАСШИРЕНИЕ УСЛОВИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ
ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ АВТОНОМНЫХ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

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 2015 г.

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор Ким Николай Владимирович;

Официальные оппоненты: Андреев Виктор Павлович, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО Московского государственного технологического университета «СТАНКИН»

Овчинников Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники ФГБОУ ВО "Тульский государственный университет";

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», г.Москва

Защита состоится «24» декабря 2015 г. в 13 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 Московского авиационного института (государственного технического университета) - МАИ по адресу: 125993, 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 _____

Отзывы просим отправлять в 2-х экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент



В.В. Дарных

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние годы широкое распространение получают автономные беспилотные летательные аппараты (БЛА), способные функционировать длительное время в неопределенной и изменяемой обстановке в соответствии с поставленной целевой задачей (ЦЗ).

Эффективность выполнения ЦЗ в определяющей степени зависит от работы навигационной системы (НС). Большинство существующих НС обеспечивают достаточную точность определения положения и ориентации аппарата при устойчивой работе спутниковой навигационной системы (СНС). Однако, при отсутствии сигналов СНС, ошибки НС могут оказаться недопустимыми (например, для современной российской НС «КомпаНав-3» через 5 минут работы без СНС ошибка определения положения составит 500 м).

Таким образом, одним из важных направлений модернизации бортового оборудования малоразмерных БЛА является разработка средств навигации, обеспечивающих полет в условиях отсутствия сигналов СНС.

Альтернативным вариантом полетов без СНС является использование обзорно-сравнительного метода навигации, одной из разновидностей которого является визуальная навигация.

Системы визуальной навигации основаны на использовании бортовой системы наблюдения, способной автономно решать задачи наведения и навигации по наземным ориентирам. При этом под визуальной навигацией понимается процесс сопоставления текущего изображения (ТИ), принимаемого бортовой системой наблюдения, и эталонных изображений (ЭИ) ориентиров или сцен (заложенных в память БЛА) с целью идентификации искомого ориентира и определения текущего положения БЛА. В более общем случае для идентификации могут сопоставляться не только изображения, но и другие описания ориентиров, например характеристики текстуры наблюдаемой поверхности и пр.

В реальных условиях при полете автономных БЛА могут возникнуть следующие факторы, затрудняющие работу системы визуальной навигации:

- Изменения условий наблюдения, искажающие параметры описаний наблюдаемых ориентиров.
- Необходимость полета над малоинформативными участками наблюдаемой местности, не позволяющими с требуемой точностью определять положение БЛА.

Данные факторы в существенной степени влияют на условия применения БЛА и ограничивают их автономность. Темой диссертации является исследование и разработка подходов, обеспечивающих функционирование систем визуальной навигации автономных БЛА в условиях действия этих факторов.

Целью работы является расширение условий функционирования автономных БЛА за счет использования алгоритмов визуальной навигации, обеспечивающих поиск ориентиров и оценку координат БЛА с помощью описаний, адаптивных к изменяемым условиям наблюдения, и алгоритмов, способных функционировать на малоинформативных участках местности.

Объектом исследования является автономный БЛА.

Предметом исследования является алгоритмическое обеспечение визуальной навигации, обеспечивающее определение местоположения БЛА в изменяемых или неопределенных условиях наблюдения.

Методы исследования. Исследования выполнены с использованием аппарата математического моделирования, технологий компьютерного зрения, методов теории информации, статистических методов распознавания и методов нечеткой логики.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен подход к обнаружению ориентиров на основе использования эталонных описаний, адаптивных к изменению условий наблюдения.
2. Разработан алгоритм формирования и использования адаптивных описаний ориентиров на основе нейронечетких систем.
3. Предложен подход к решению задачи визуальной навигации БЛА над малоинформативными участками местности, основанный на предварительном определении гипотез положения БЛА, планировании и реализации полета с учетом информативности выбранного направления.
4. Разработан формат иерархического описания сцены для формирования гипотез положения БЛА при навигации над малоинформативными участками.
5. Разработан алгоритм определения информативного направления полета для уточнения положения БЛА при навигации над малоинформативными участками местности.
6. Показано, что использование предлагаемого алгоритма формирования адаптивных описаний ориентиров позволяет уменьшить вероятности ошибок обнаружения в изменяемых условиях наблюдения.
7. Показано, что предлагаемые методики предварительного определения гипотез положения БЛА на основе анализа сцены и планирования полета позволяют проводить визуальную навигацию на малоинформативных участках местности.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, полученных в работе, подтверждается результатами математического и полунатурного моделирования процесса обнаружения ориентиров при изменении условий наблюдения и моделированием процесса навигации по малоинформативным ориентирам.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные методики и алгоритмы формирования адаптивных описаний позволяют обнаруживать ориентиры при изменении условий наблюдения, а предложенные методика и алгоритм навигации по малоинформативным ориентирам позволяют уточнять текущее положение БЛА при полете над малоинформативными участками местности. Предложенные методики существенно повышают эффективность применения автономных БЛА за счет увеличения надежности и расширения условий применения алгоритмов визуальной навигации.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на: Всероссийской науч.-тех. конференции «Экстремальная робототехника», г. Санкт-Петербург, 2012 г.; на науч.-тех. конференции «Техническое зрение в системах управления - 2013», г. Москва, 2013 г.; на международной конференции «Scientific aspects of unmanned mobile objects (SAUMO-2013)», г. Демблин, Польша, 2013 г.; на 7-ом международном симпозиуме «Экстремальная робототехника - робототехника для работы в условиях опасной окружающей среды (7th IARP RISE-ER'2013)», г. Санкт-Петербург, 2013 г.; на IX Всероссийской науч.-тех. конференции «Перспективные системы и задачи управления», г. Таганрог, 2014 г.; на четырнадцатой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием, г. Казань, 2014 г.; на 13-й международной конференции "Авиация и космонавтика-2014", г. Москва, МАИ, 2014 г.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Информационно-управляющие комплексы летательных аппаратов» МАИ.

Публикации

По результатам диссертационной работы опубликовано 13 работ, в том числе 3 научно-технические статьи в изданиях, включённых в перечень ВАК, и 2 - в зарубежных изданиях.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 15 таблиц и 59 наименования литературных источников.

К защите представляются следующие основные положения работы:

1. Методика и алгоритм формирования адаптивных описаний ориентиров, позволяющие существенно расширить диапазон условий применения визуальной навигации.

2. Результаты исследования влияния изменения условий наблюдения на вероятности ошибок обнаружения ориентиров.

3. Методика и алгоритм навигации на малоинформативных участках местности на основе сравнения описаний сцены с описаниями фрагментов цифровой карты местности (ЦКМ), позволяющие формировать гипотезы положения и уточнять их за счет выбора информативного направления полета.

4. Структура и формат иерархического описания сцены на языке ситуационного управления.

5. Программно-математическое обеспечение, позволяющее проводить модельные (полунатурные) эксперименты предложенных алгоритмов.

6. Результаты экспериментов, подтверждающие работоспособность и эффективность применения алгоритмов формирования адаптивных описаний ориентиров и навигации над малоинформативными участками местности (полями).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, проводится анализ литературы, дается общая характеристика работы.

В **первой главе** рассматриваются основные проблемы функционирования систем визуальной навигации автономных БЛА. Проведен анализ подходов, позволяющих расширить условия применения систем визуальной навигации.

Вопросы, связанные с выбором требуемой точности навигационной системы для различных ситуаций и этапов полета БЛА, были исследованы ранее и в данной работе не рассматриваются.

Точность системы визуальной навигации зависит от точности обнаружения и оценки координат ориентира.

Наиболее распространенным подходом к поиску ориентиров является использование корреляционно-экстремальных алгоритмов.

Преимуществами данного подхода, основанного на пространственной фильтрации изображений, являются простота реализации и высокая помехоустойчивость корреляционных алгоритмов к высокочастотным шумам.

Рассматриваемые дестабилизирующие факторы – изменения условий наблюдения, в частности изменения освещенности наблюдаемой сцены, следует отнести к трудно прогнозируемым низкочастотным помехам. Например, изменения освещенности могут существенно сместить математическое ожидание (МО) яркости текущего изображения объекта интереса по сравнению с ЭИ, изменить среднеквадратическое отклонение (СКО) и пр.

В общем случае в корреляционно-экстремальных алгоритмах используются ЭИ, которые следует отнести к наиболее сложным признакам объектов интереса.

Сложность изображений затрудняет формирование ЭИ, адаптивных к изменению условий наблюдения. Необходимо отметить, что к изменяемым условиям наблюдений относится не только изменение освещенности, в частности положение источника света относительно наблюдаемой сцены, но и положение наблюдателя.

Таким образом, для решения проблемы формирования адаптивных описаний предлагается перейти к использованию более простых, но достаточно информативных и устойчивых к помехам признаков объектов интереса.

В этом случае вместо корреляционных алгоритмов следует применять более универсальные методы сопоставления эталонных и текущих описаний.

Наиболее общим подходом при обнаружении или распознавании объектов является использование статистических методов обнаружения и распознавания.

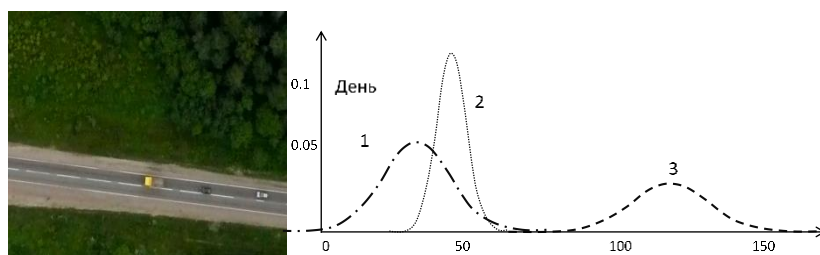
Будем считать, что статистическая связь между полученными значениями признаков и классами объектов определяется условными плотностями распределения $p(Y|x_m)$, где $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n, \dots, y_N)$ - вектор признаков; $X = (x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_M)$ - алфавит классов распознаваемых объектов (ориентиров).

Плотности $p(Y|x_m)$ являются вариантом эталонного описания объектов.

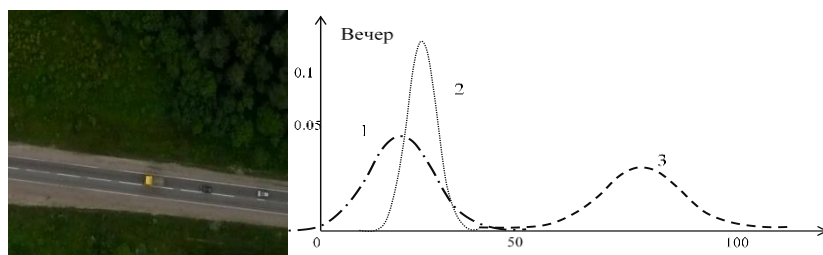
Рассмотрим влияние изменения освещенности сцены (времени суток) на описания объектов «Лес», «Поле», «Дорога».

При изменении условий наблюдения во время полета БЛА могут меняться различные наблюдаемые признаки ориентиров: распределение яркостей и цвета, визуальные характеристики текстуры и пр. Подготовленные ранее эталонные описания (изображения) объектов будут существенно отличаться от принимаемых текущих, что может привести к ошибкам обнаружения ориентиров и соответствующим ошибкам навигации.

Рисунок 1а соответствует условию наблюдения «День» (модель наблюдаемой сцены соответствует 12-00 час.), рисунок 1б – «Вечер» (соответствует 18-00 час.). Справа на рисунках 1а,б представлены соответствующие примеры описаний (по вертикальной оси - плотностей распределения яркостей - $p(Y|x_m)$, по горизонтальной оси отложены значения яркости) объектов «Лес» (1), «Поле» (2), «Дорога» (3) для сцены «День».



а) Сцена «День»



б) Сцена «Вечер»

Рисунок 1. Изображения объектов и плотностей распределения для различных условий наблюдения

Из графиков видно, что при изменении освещенности происходит изменение значений МО и СКО соответствующих плотностей распределения. Очевидно, что в такой ситуации без изменения порогов вероятности ошибок обнаружения будут увеличиваться. Более подробно оценки изменения вероятности ошибок показаны в главе 4.

Решением указанной проблемы может быть

разработка методики формирования эталонных описаний ориентиров, адаптивных к изменению условий наблюдения - $p(Y|x_m, Q_k)$, где $Q_k = (q_{k1}, q_{k2}, \dots, q_{kr}, \dots, q_{kR})$ – вектор условий наблюдения. Под условиями наблюдения, обозначенными индексом $r \in R$, могут пониматься различные факторы, например характеристики освещенности наблюдаемой сцены, время суток, время года, регион и т.п. Примем, что условия наблюдения могут быть дискретизированы с некоторым интервалом дискретизации; индексом k обозначены конкретные текущие условия наблюдения.

Одним из вариантов адаптивных описаний может быть набор плотностей распределения для всех $k = 1, \dots, K$ возможных условий. Однако получение и хранение такого набора является труднореализуемой задачей.

Другим вариантом является подход, основанный на моделировании возможных эталонных описаний искомых объектов на основе известных физических законов. Сложность реализации подхода состоит в том, что необходимо формировать модели визуализации объектов наблюдаемой сцены (на основе известных физических законов) с учетом множества трудно формализуемых факторов, связанных с отражающими свойствами различных текстур, условиями освещенности и пр.

Таким образом, необходимо разработать методику формирования адаптивных описаний, позволяющую:

- рассчитывать условные плотности распределения признаков для различных условий наблюдения;
- использовать ограниченную обучающую выборку эталонов;
- корректировать (дообучать) систему во время работы.

При решении задачи визуальной навигации, на этапе предполетной подготовки производится планирование маршрута и выбор ориентиров, обнаружение которых позволит с некоторой точностью и вероятностью (заданных в ЦЗ) определять текущее положение БЛА.

Автономный БЛА при полете без использования данных СНС может оказаться в ситуациях, когда информативные ориентиры отсутствуют. В этом случае решение навигационной задачи методами визуальной навигации становится затруднительным и необходимо переходить к использованию ориентиров, содержащих меньший объем полезной информации – малоинформативным ориентирам.

В работе навигацию по малоинформативным ориентирам предлагается осуществлять на основе *анализа ситуаций* (рисунок 2). В контексте решаемой задачи под *анализом ситуаций* будем понимать формирование описания текущей сцены, включающее описание присутствующих объектов интереса (ОИ), в частности малоинформативных ориентиров, и отношений между ними. Подобные описания позволят расширить круг решаемых БЛА задач, повысить эффективность наблюдений в сложных, неопределенных и изменяемых условиях. Сравнение описаний текущей наблюдаемой сцены с подобными описаниями фрагментов ЦКМ позволит получить набор оценок возможного положения БЛА – гипотез положения.

Рассмотрим случай нахождения БЛА над малоинформативным участком (рисунок 2). Пусть наблюдается некоторый фрагмент озера, на котором отсутствуют информативные ориентиры.

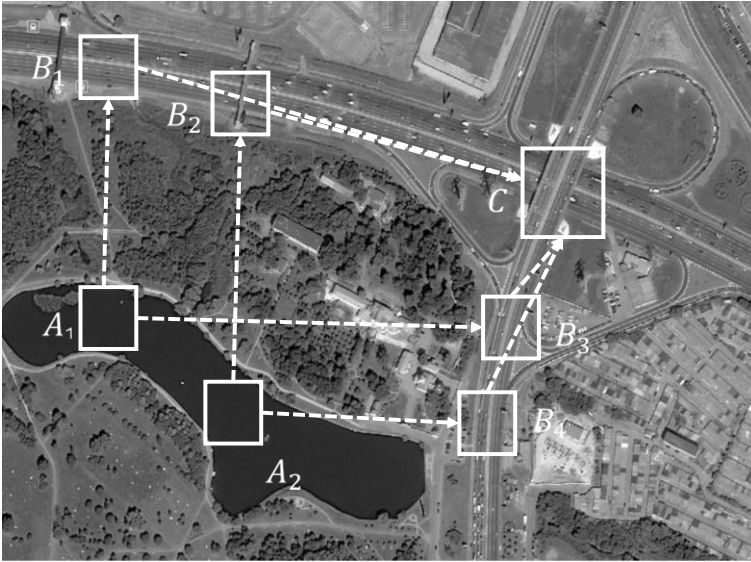


Рисунок 2. Пример навигации по малоинформативным объектам

Будем считать, что анализ принятого изображения и сопоставление с ЦКМ позволили определить гипотезы положения БЛА: например, A_1, A_2 . Изображение, подобное изображениям в прямоугольниках A_1, A_2 , является малоинформативным и не позволяет однозначно определить положение БЛА. Однако на ЦКМ имеются более информативные объекты, например дороги.

Присутствие подобных

ориентиров позволяет проложить несколько вариантов маршрутов: $(A_1 \rightarrow B_1 \rightarrow C)$, $(A_2 \rightarrow B_2 \rightarrow C)$, $(A_1 \rightarrow B_3 \rightarrow C)$, $(A_2 \rightarrow B_4 \rightarrow C)$, которые приведут к достаточно информативному ориентиру – пересечению дорог (C).

Таким образом, в ряде ситуаций поставленная задача получения требуемых навигационных параметров может быть решена даже при условии получения системой наблюдения (СН) БЛА изображений малоинформативных ориентиров.

Для решения задачи визуальной навигации на малоинформативных участках необходимо разработать:

- методику и алгоритм формирования описаний наблюдаемой сцены, обеспечивающих требуемую идентификацию объектов интереса, и их сравнения с ЦКМ;
- методику и алгоритм выбора информативного направления полета.

Вторая глава посвящена проблеме обнаружения ориентиров в изменяемых условиях наблюдения.

В работе предлагается подход, основанный на интерполяции (или аппроксимации) параметров имеющихся эталонных описаний, полученных для известных условий наблюдения. При этом минимальный исходный набор эталонных описаний (необходимых для интерполяции) может быть ограничен двумя эталонами. Увеличение количества используемых эталонов позволит повышать точность интерполяции, в том числе в условиях рабочего функционирования системы визуальной навигации с ее дополнительным обучением.

Реализация предлагаемого подхода позволит формировать адаптивные эталонные описания ориентиров для различных условий наблюдения.

Существует большое количество различных методов интерполяции. Однако неопределенность, «размытость» связей между условиями наблюдений и конкретными значениями искомых параметров и описаний «в целом» затрудняет реализацию указанных методов.

В представленной работе предлагается реализовать интерполяцию на основе использования *нечетких систем*.

Преимуществами подхода являются:

- возможность использования неточных или нечетких связей между условиями наблюдений и описаниями признаков;

- возможность получения описаний в широком диапазоне изменения текущих условий;
- существенное сокращение количества требуемых эталонных описаний по сравнению с подходом на основе набора эталонов;

Основной идеей подхода является использование набора нечетких правил, формирующих базу знаний (БЗ). Например, нечеткое правило может выглядеть следующим образом:

$$Q = \{q_1, \dots, q_N\} \rightarrow \{\text{Условия наблюдения} \rightarrow \text{Описания}\} \rightarrow \text{Адаптивное описание}.$$

Нечеткое правило ставит в соответствие некоторому набору нечетких правил определенные эталонные плотности. Набор нечетких правил формирует базу знаний. Во время работы алгоритма формирования описаний перебираются все правила БЗ и рассчитывается их достоверность. Во время работы системы в реальных условиях наблюдения может сработать одновременно несколько правил и, в итоге, будет сформирована адаптивная плотность распределения, усредняющая плотности, заданные в правилах.

На вход правила поступает посылка, содержащая некоторые конкретные значения условий наблюдения:

$$Q = \{q_1, \dots, q_N\}.$$

Структура посылки выглядит следующим образом:

N	q_1	q_2	\dots	q_N
-----	-------	-------	---------	-------

где N – количество анализируемых условий наблюдения.

Для исследуемого примера принято: q_1 – текущий месяц; q_2 – текущее время; q_3 – текущая широта.

В рассматриваемом случае нечеткое правило ставит в соответствие набору нечетких условий наблюдения конкретные эталонные описания, например эталонные плотности распределения.

Расчет адаптивной плотности в общем случае производится по формуле

$$p_{\text{адапт}}(Y | x_n, q_1, q_2, \dots, q_m) = \sum_{r=1}^R p_r(Y | x_n) \min(\mu_{1l}(q_1), \mu_{2l}(q_2), \dots, \mu_{ml}(q_m)), \quad (1)$$

где $p_{\text{адапт}}(Y | x_n, q_1, q_2, \dots, q_m)$ – значение адаптивной плотности распределения для объекта x_n ; $n = 1, \dots, N$, N – количество искомым объектов; $m = 1, \dots, M$, M – количество рассматриваемых условий; $p_r(Y | x_n)$ – эталонная плотность распределения, соответствующая правилу r ; $\mu_{ml}(q_m)$ – функция принадлежности (ФП) терма l лингвистической переменной m .

Такой подход позволит сократить априорный объем эталонных описаний, объединить различные типы описаний в единую систему, использовать ситуационную информацию при формировании описаний и решении целевых задач.

Методика включает в себя процедуры формирования нечеткой системы и адаптивных описаний.

1. Формирование нечеткой системы:

1.1. Формирование эталонных описаний каждого класса объектов для различных условий ($p(Y | x, q_1, q_2, \dots, q_m)$).

1.2. Определение диапазона возможных условий наблюдения, формирование соответствующих терм и функций принадлежности $\mu(q)$.

1.3. Формирование нечетких правил.

2. Формирование адаптивных описаний:

2.1. Получение текущих значений условий наблюдений Q .

2.2. Перебор всех правил базы знаний и расчет их достоверностей.

2.3. Формирование адаптивной плотности.

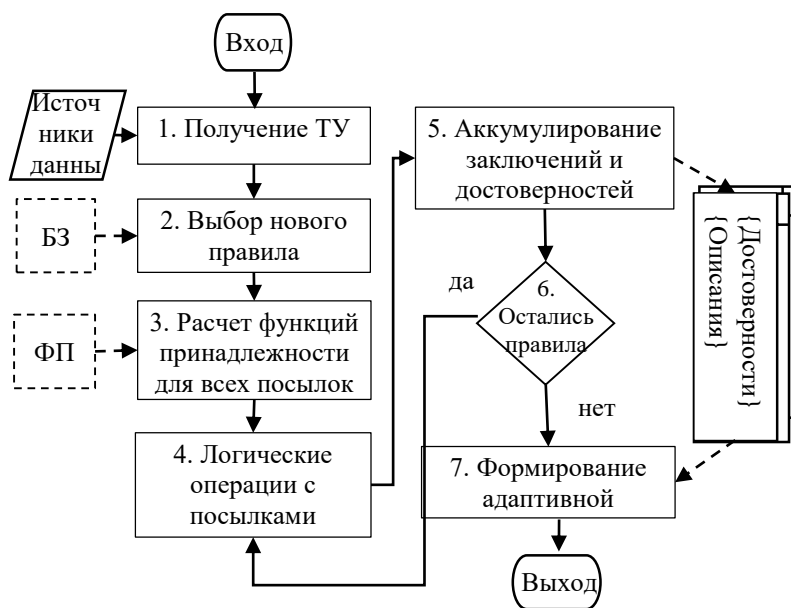


Рисунок 3. Алгоритм формирования адаптивных описаний

Исходные эталонные описания могут получаться (п.1.1 Методики) путем моделирования или в результате реальной съемки различных сцен, содержащих необходимые объекты интереса.

Для формирования БЗ нечетких правил необходимо на основе экспертных или априорных знаний согласно особенностям ЦЗ (условиям функционирования) определить диапазон условий наблюдений (п.1.2). Для всех условий необходимо сформировать функции принадлежности, которые позволяют перевести

значения некоторых точных показателей (например, текущее время) в нечеткое значение («День», «Вечер» и т.п.). Процесс перехода от точных значений параметров к неточным называется *фаззификацией*.

ФП определяет степень достоверности соответствия текущих условий Q некоторым термам. Как было показано, достоверность правила связана с достоверностью заложенных в его условие терм. Таким образом, выбор ФП в существенной степени влияет на качество интерполяции описаний.

В общем случае форма и параметры ФП выбираются на основе экспертных знаний или качественной (оценочной) информации об изменении рассматриваемого признака.

Вид нечетких правил различается в зависимости от способа представления плотностей распределения. Так, если плотность распределения задана в параметрическом виде (например, закон распределения нормальный и известны МО и СКО), то в правила, соответствующие этим плотностям, будут заложены параметры или способы их изменения при изменении условий.

На практике форма плотности распределения (закон распределения) не известна заранее, что делает невозможным использование параметрических методов. В таком случае применяют непараметрические методы.

Если плотность построена непараметрическими методами, то в правилах хранятся плотности распределения в виде матриц, а при изменении условий наблюдения будет производиться взвешенная сумма значений матриц сработавших правил.

Следует отметить, что в базе знаний могут храниться правила обоих типов. Поэтому формирование адаптивной плотности должно производиться в три этапа:

- 1) для плотностей, заданных не параметрически, - получение значений при текущем значении признака,
- 2) для плотностей, заданных параметрически, – расчет значений для текущего значения признака,
- 3) расчет взвешенной суммы всех значений.

Рассмотрим подробнее реализацию п.2 Методики (рисунок 3) с помощью алгоритма формирования адаптивных описаний.

Алгоритм формирования адаптивных описаний состоит из семи блоков. При этом считается, что ФП и БЗ были сформированы и заложены в память БЛА заранее.

В блоке 1 алгоритма производится получение значений анализируемых условий наблюдения – Q .

В блоках 2-6 происходит перебор всех правил БЗ.

В блоке 3 значения условий наблюдения фаззифицируются, т.е. считаются соответствующие ФП ($\mu(q)$). В результате для каждого правила получается набор пар вида

$$\{\text{время года} = \text{"Лето"}; \mu_{\text{лето}} = 0.6\}$$

$$\{\text{время суток} = \text{"Вечер"}; \mu_{\text{вечер}} = 0.4\}.$$

Логические операции над посылками правил производятся в блоке 4.

В заключении цикла обработки правил в блоке 5 рассчитывается достоверность правила, которая вместе с заключением правила (эталонной плотностью соответствующего правила) аккумулируется в памяти.

В блоке 7 происходит формирование адаптивной плотности на основе аккумулированных значений (вычисляется поэлементная взвешенная сумма эталонных плотностей по формуле (1)).

Важным вопросом является проблема построения системы хранения знаний. Классическим решением этой проблемы является использование БЗ, в которых пользователь размещает всю необходимую (с экспертной точки зрения) информацию в наиболее удобном для дальнейшего приложения виде.

Отметим, что поскольку фреймы могут включать в себя процедуру вывода, не требуется отдельной машины логического вывода. То есть логический вывод может быть реализован отдельными фреймами, что обеспечивает гибкость при построении базы знаний.

Само представление заключается в том, что фреймом является каждое отдельное условие наблюдения и ОИ. Каждый фрейм содержит список слотов (атрибутов) фрейма. Слоты фрейма-условия содержат степени достоверности соответствующих условий, полученные методами нечёткого вывода. Фреймы-объекты содержат наборы правил выбора эталона. Также каждый фрейм-объект имеет процедуру, реализующую процедуру нечеткого выбора. В процессе наблюдения определяется принадлежность текущего условия наблюдения к имеющимся фреймам-условиям, и для каждого фрейма-объекта формируется результирующий эталон, адаптированный под конкретные условия.

На рисунке 4 представлен пример набора правил, реализованных в виде фреймов.

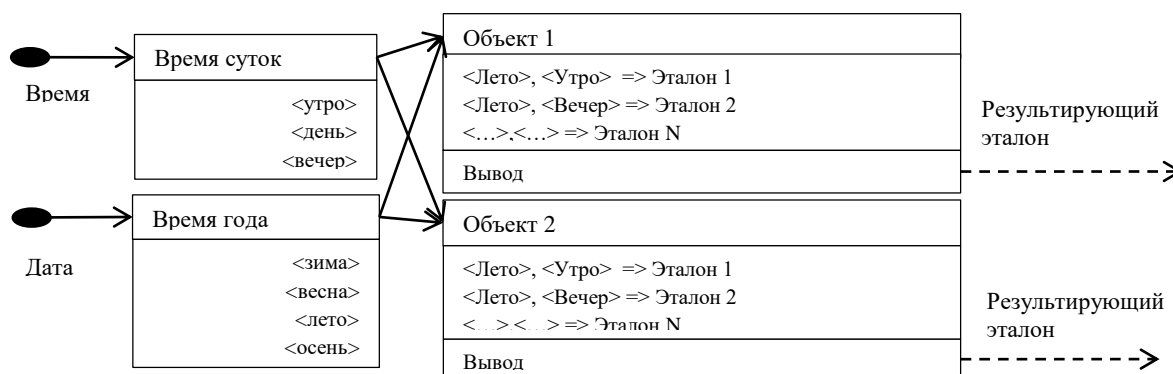


Рисунок 4. Пример применения фреймов для представления адаптивных описаний

В третьей главе рассматривается проблема навигации автономных БЛА на малоинформативных участках местности (малоинформативных полях).

Задача визуальной навигации БЛА решается путем обнаружения на текущих изображениях участков местности или ориентиров $U = (U_1, U_2, \dots, U_n, \dots, U_N)$ с известными координатами и оценки положения системы наблюдения БЛА относительно этих ориентиров.

Малоинформативными могут быть подстилающие поверхности с однородными текстурами (например, лес, поле, водная поверхность и пр.), которые не содержат характерных участков или информативных ориентиров и дают неоднозначную оценку положения.

Информативность ориентира U_n можно рассчитать следующим образом (по Шеннону):

$$I_n = H(r_S) - H(r_S|U_n), \quad (2)$$

где $n = 1, \dots, n, \dots, N$ – индекс рассматриваемого ориентира; $H(r_S)$ – начальная энтропия оценки присутствия БЛА в области r_S ; $H(r_S|U_n)$ – энтропия (конечная) оценки присутствия БЛА в области r_S после привязки к ориентиру U_n .

Так как при сравнительной оценке информативности различных ориентиров предполагается, что начальная энтропия в (2) постоянна, то информативность ориентиров определяется конечной энтропией $H(r_S|U_n)$. В соответствии с некоторой поставленной ЦЗ должна быть задана допустимая конечная энтропия $H^{\text{доп}}(r_S|U_0)$ определения координат БЛА.

С учетом (2) получим следующие условия:

1. Если

$$H^{\text{доп}}(r_S|U_0) \geq H(r_S|U_n), \quad (3)$$

то U_n является информативным (достаточно) ориентиром.

2. Если

$$H^{\text{доп}}(r_S|U_0) < H(r_S|U_n) < H(r_S), \quad (4)$$

то U_n является малоинформативным ориентиром.

3. Если

$$H(r_S|U_n) = H(r_S),$$

то U_n не содержит полезной (с точки зрения решаемой задачи) полезной информации и не может использоваться в качестве ориентира.

Необходимо отметить, что условие

$$H^{\text{доп}}(r_S|U_0) < H(r_S) \quad (5)$$

показывает, что допустимая конечная энтропия меньше начальной, т.е. текущая точность оценки координат БЛА не соответствует (хуже) требуемой.

При выполнении условия

$$H^{\text{доп}}(r_S|U_0) \geq H(r_S), \quad (6)$$

оценка координат БЛА не требуется.

Рассмотрим ситуацию, когда выполняется условие (4). Данная ситуация соответствует полету БЛА над малоинформативной местностью.

Для оценки положения (при наличии малоинформативных ориентиров) предлагается локализовать местоположения БЛА и определить направление полета на более информативные ориентиры.

Методика формирования описаний сцен состоит из следующих этапов:

1. Поиск, обнаружение, распознавание объектов интереса (ОИ).
2. Выделение атрибутов объектов. Атрибутами ОИ могут быть размеры, форма, текстура поверхности и пр.

3. Определение отношений между ОИ. Например, пространственные отношения, характеризующие взаимное расположение объектов; каузальные отношения, определяющие причинно-следственные связи, и др.;

4. Формирование описания исследуемой сцены или фрагментов ЦКМ.

Для определения общей **структуры описаний** предлагается использовать один из видов семантических моделей - онтологию.

В основе данной структуры лежит понятие «Сцена», описывающее текущую наблюдаемую сцену. Непременными классами, входящими в состав «Сцены», являются «Объекты», находящиеся на ней, их «Атрибуты» и «Отношения».

В свою очередь, «Отношения», «Объекты» и «Атрибуты» связаны с текущими условиями наблюдения («Условия наблюдения») отношением «ограничивается». За счет этого в описаниях используется ограниченный набор объектов, атрибутов и отношений, актуальных для текущих условий. Например, для определенных регионов или времени суток использование некоторых объектов не целесообразно.

Таким образом, в классе «Сцена» происходит определение наблюдаемых объектов (по текущему изображению), их свойств и отношений между ними на основе соответствующих классов. Однако процесс описания может быть последовательным, т.е. при описании атрибуты и описания объектов проверяются, согласно некоторой заложенной заранее иерархии (принцип *иерархичности*).

В работе предлагается определенный формат описания.

В качестве примера рассмотрим описание 1-го уровня некоторой сцены, на которой присутствуют следующие классы объектов: дорога - $O(1)$, обочина - $O(2)$, лес - $O(4)$; «1» - индекс объекта в описании:

$$Ds(\langle 1 \rangle (O(1)) \wedge \langle 2 \rangle (O(2)) \wedge \langle 3 \rangle (O(4))).$$

Предикат Ds обозначает начало описания. На данном уровне показано, какие объекты («1», «2», «3») и каких классов (дорога, обочина, лес) присутствуют на сцене. Предикат $O(.)$ указывает на класс объекта. В данном описании рассматриваются только малоинформативные объекты. Класс объекта задается в скобках: 1 – дорога, 2 – обочина, 3 – поле, 4 – лес.

Расширение описания производится за счет добавления предикатов (соответствующих атрибутов) в описание объектов.

Пример описания 2-го уровня:

$$Ds(\langle 1 \rangle (O(3) \wedge G([\langle \text{северо-запад} \rangle]))),$$

где предикат G задает атрибут положения объекта «1» класса 3 (поле).

Далее в работе предлагается алгоритм навигации по малоинформативным объектам, а также алгоритм планирования поиска информативных участков (рисунки 5 и 6).

До запуска алгоритма необходимо произвести предварительный анализ ЦКМ и априорной информации о положении БЛА. На этом этапе строится распределение вероятности нахождения аппарата в различных местах карты. При отсутствии априорной информации о параметрах полета БЛА (и предыдущих координатах) его текущее положение принимается равновероятным для всех участков карты.

На основании оценок вероятностей рассчитывается априорная энтропия положения БЛА $H^0(r_S)$.

В блоке 1 алгоритма производится прием текущего изображения и обнаружение малоинформативных ориентиров (ОИ), обнаружение или необнаружение которых позволит уменьшить энтропию $H^0(r_S)$.

В блоке 2 производится анализ (формирование описаний) наблюдаемой сцены. Описание будет заключаться в выявлении атрибутов и отношений между объектами. Различные наборы атрибутов и отношений соответствуют разному уровню (детализации) описания.

В блоке 3 происходит сравнение описаний текущей сцены с аналогичными описаниями ЦКМ.

В результате сравнения принимается решение о совпадении (похожести) описаний. Если описания похожи, тогда соответствующая гипотеза сохраняется в памяти как возможная гипотеза

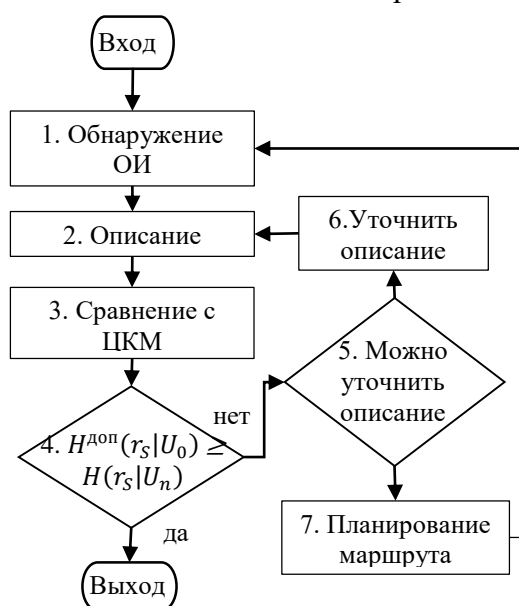


Рисунок 5. Алгоритм визуальной навигации по малоинформативным ориентирам

положения.

Для сравнения описаний в работе предлагается использовать расстояние Хемминга (d), т.е. рассчитывать количество несовпадающих элементов в описаниях сравниваемых сцен по формуле

$$d_i = \sum_{k=1}^N |x_{ik} - x_{jk}|, \quad (7)$$

где i, j – индексы сравниваемых описаний; N – количество параметров в описании; x_{ik}, x_{jk} – сравниваемые параметры описания,

$$|x_{ik} - x_{jk}| = \begin{cases} 1, & \text{если } x_{ik} = x_{jk} \\ 0, & \text{если } x_{ik} \neq x_{jk} \end{cases}$$

Результатом работы блока 3 является набор гипотез возможного положения БЛА и текущий уровень энтропии $H(r_S)$.

В блоках 4 и 5 происходит проверка условий. В блоке 4 проверяется условие выполнения ЦЗ – условие (3).

Если условие выполнено, работа алгоритма завершается. Если условие не выполнено, алгоритм переходит в блок 5. В блоке 5 проверяется возможность уточнения описания. Если описание можно уточнить, алгоритм переходит в блок 6, в котором производится выбор (расширение существующих) атрибутов для дальнейшего описания сцены.

Если более детальное описание невозможно, тогда алгоритм переходит к блоку 7 – планирование маршрута и выбор наиболее информативного направления полета.

Планирование маршрута заключается в формировании дальнейшей стратегии полета БЛА, обеспечивающей гарантированное уменьшение энтропии. Для этого необходимо произвести анализ ЦКМ с учетом уже полученной информации, пересчитать *информативность отдельных фрагментов ЦКМ* и выбрать наиболее информативное направление.

Выбор наиболее информативного направления предлагается проводить на основе расчета информативности по Шеннону аналогично формуле (2). При этом апостериорная энтропия направления полета будет считаться по формуле

$$H(J) = - \sum_{l=1}^{M_{\text{гип}}} P(J | l) \sum_{m=1}^{M_{\text{гип}}} P(m | J, Ds^{Jl}) \log_2 P(m | J, Ds^{Jl}),$$

где J – описание направления полета, $J = [\Delta X \Delta Y]$; ΔX и ΔY – смещения относительно текущего положения; $M_{\text{гип}}$ – количество гипотез положения БЛА; $P(J | l)$ – вероятность успешной реализации полета в направлении J при гипотезе текущего положения l ; Ds^{Jl} – описание фрагмента сцены, расположенного в направлении J относительно гипотезы l . $P(m | J, Ds^{Jl})$ – вероятность гипотезы положения m при смещении J и описании Ds^{Jl} .

В результате расчета данной формулы для каждого возможного направления полета получится поверхность.

Максимальное значение высоты поверхности будет соответствовать наиболее информативному направлению полета.

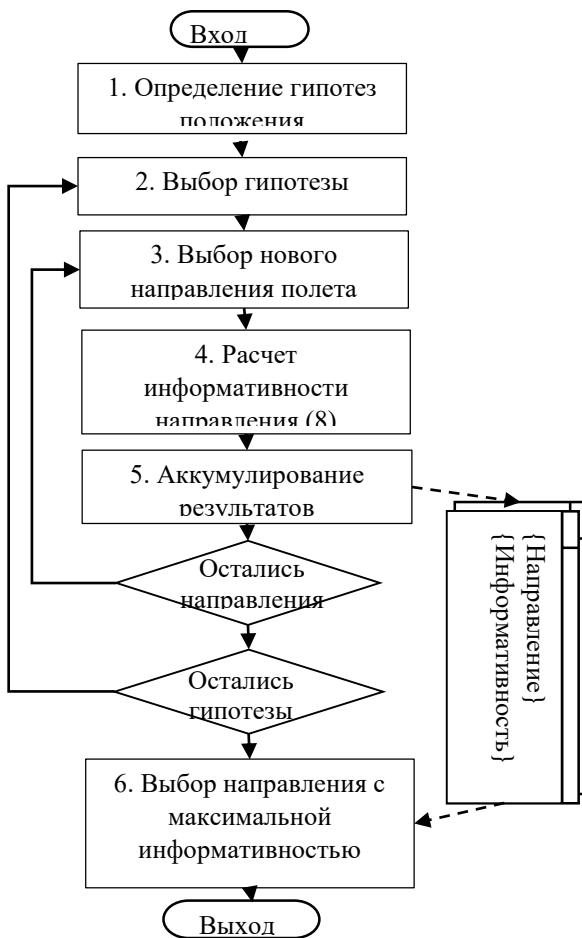


Рисунок 6. Алгоритм выбора информативного направления

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований предлагаемых алгоритмов. Показана работоспособность и эффективность использования подходов и алгоритмов:

- формирования адаптивных описаний объектов;
- анализа наблюдаемой сцены (с целью навигации по малоинформативным ориентирам);
- выбора информативного направления полета.

Для этого оценивались:

1. Точности адаптивных описаний объектов интереса на основе нейронечетких систем.
2. Влияние изменений условий наблюдения на экстремум корреляционной функции.
3. Влияние изменений условий наблюдения на вероятности ошибок обнаружения.
4. Влияние ошибок обнаружения малоинформативных ориентиров на качество описания сцены.
5. Работоспособность алгоритма навигации по малоинформативным ориентирам.

В рамках первого эксперимента производилось сопоставление описаний,

полученных на основе использования нейронечетких систем, и модельных описаний, полученных на основе общих физических законов.

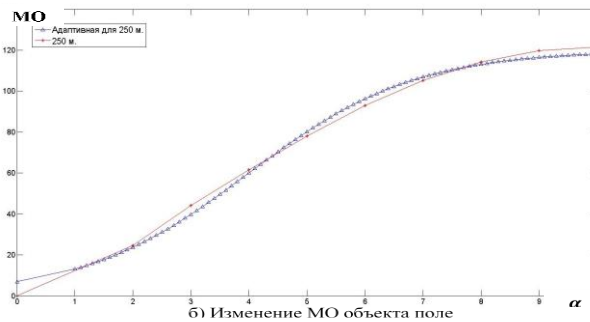
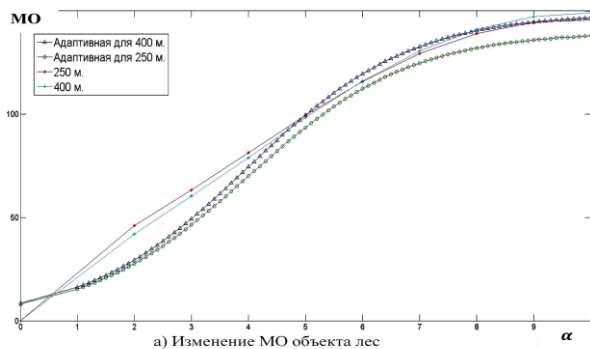


Рисунок 7. Сравнение результатов моделирования и работы нейронечеткой системы

В рассматриваемом случае под описаниями понимаются зависимости статистических характеристик наблюдаемых объектов, т.е. МО яркости, от условий наблюдения – времени суток и высоты. В качестве объектов интереса выбраны площадные ориентиры: лес и поле.

Изменение времени суток на изображениях наблюдаемых сцен моделировалось за счет изменения положений источника света (угол α), высота положения наблюдателя моделировалась положением виртуальной камеры (H).

На рисунках 7, а, б показаны зависимости изменения МО яркости объектов от положения источника света и наблюдателя, полученные:

- при моделировании в среде Unity (среда разработки трехмерных графических приложений),
- при использовании адаптивных описаний.

Из рисунков видно, что зависимости характеристик исследуемых поверхностей (лес,

поле) от изменяемых условий наблюдения, полученные на основе нейронечетких систем, и результаты моделирования (в среде Unity) отличаются не более чем на 12%.

Во **втором эксперименте** сравнивались существующие корреляционные алгоритмы обнаружения ориентиров с использованием ЭИ и предлагаемого алгоритма на основе адаптивных описаний.

Результаты эксперимента показали большую устойчивость к изменению яркости и вычислительную экономичность алгоритма на основе адаптивных описаний, по сравнению с корреляционными алгоритмами. Так количество вычислений сократится более чем на 41,6% при использовании ЭИ размером не менее 10x10 пикселей

В **третьем эксперименте** рассматривалось обнаружение объектов: лес, поле (лесная поляна), дорога на текущем изображении с использованием плотностей распределения, полученных для других эталонных условий наблюдения («День» и «Вечер»), и адаптивной плотности, полученной на основе нечеткой системы.

При использовании адаптивного эталона потери от ошибок обнаружения объекта «лес» уменьшаются:

- по сравнению с эталоном «День» - на 50 %;
- по сравнению с эталоном «Вечер» - на 24%.

При использовании адаптивного эталона (плотности) для обнаружения объектов «поле» и «дорога» потери обнаружения приближаются к нулю.

Таким образом, анализ результатов показывает, что использование предлагаемой методики формирования адаптивных плотностей существенно снижает общие потери от ошибок обнаружения объектов подстилающей поверхности.

Для проведения **четвертого эксперимента** было выбрано три тестовые карты местности. На каждой карте последовательно произвольно выбирались начальные положения БЛА. Далее

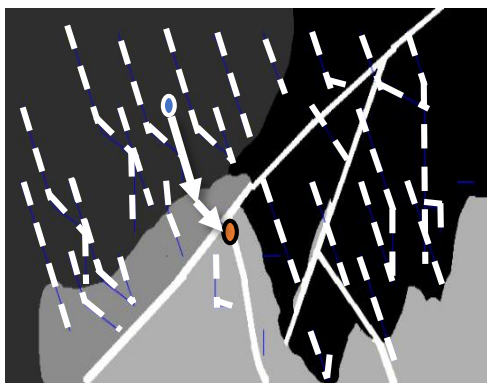


Рисунок 8. Траектории, полученные в результате экспериментов

запускались алгоритм навигации по малоинформативным ориентирам и алгоритм выбора информативного направления полета. В результате работы алгоритмов текущее положение менялось и строились траектории перемещения. Успешными реализациями принимались эксперименты, в результате которых апостериорная энтропия положения $H_{ап} = 0$.

На рисунке 8 штриховой линией обозначены траектории, соответствующие успешным реализациям эксперимента на одной из тестовых карт (карта 1).

В таблице 1 показано количество успешных реализаций экспериментов для каждой карты.

Таблица 1. Результаты экспериментов

	Всего экспериментов	Успешных реализаций	%
Карта 1	50	30	60
Карта 2	28	14	50
Карта 3	54	39	72

Таким образом, проведенные исследования подтверждают работоспособность предлагаемого алгоритма навигации по малоинформативным ориентирам.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Показано, что для расширения условий функционирования систем визуальной навигации автономных БЛА необходимо разработать алгоритм формирования адаптивных описаний ориентиров и алгоритм навигации по малоинформативным ориентирам.
2. Разработаны методика и алгоритм формирования адаптивных (к условиям наблюдения) описаний ориентиров, основанные на использовании нейронечетких систем.
3. Предложены методики построения функций принадлежности и обучения нечеткой системы формирования адаптивных описаний ориентиров.
4. Предложены и разработаны методика и алгоритм определения гипотез возможного положения БЛА при навигации по малоинформативным ориентирам на основе сопоставления текущих и эталонных описаний, содержащих отношения между ориентирами.
5. Предложен и разработан алгоритм выбора информативного направления полета для уточнения координат БЛА при неоднозначности гипотез его местоположения.
6. Сопоставление сформированных адаптивных характеристик (математического ожидания яркости) и полученных в среде Unity подтвердило достаточно высокую точность полученных адаптивных описаний: средняя ошибка для объекта «лес» в диапазоне положения источника света от 15^0 до 50^0 составляет 9%, а в диапазоне от 50^0 до 90^0 – 3%; для объекта «поле» средняя ошибка в диапазоне от 10^0 до 45^0 не превышает 2%, а в диапазоне от 45^0 до 90^0 – 3%.
7. Сравнение корреляционных алгоритмов обнаружения ориентиров с использованием ЭИ и алгоритма, основанного на адаптивных описаниях, показало:

- 7.1. Устойчивость алгоритма, основанного на адаптивных к изменению освещенности описаниях, существенно выше чем у алгоритмов, использующих ЭИ. Так при изменении освещенности на 50% изменение значений экстремума ВКФ при использовании адаптивных описаний на 75% меньше чем у алгоритмов, использующих эталонные изображения.
- 7.2. Различия значений экстремумов НКК, определяющих обнаружительную способность алгоритма, при использовании ЭИ и адаптивных описаний в условиях изменения освещенности и зашумленности - незначительны и находятся в пределах погрешности эксперимента (менее 1%).
- 7.3. Использование адаптивных описаний при обнаружении малоинформативных ориентиров позволяет сократить объем вычислений более чем на 41,6% при размере ЭИ >10x10 пикс.
8. На основе модельных экспериментов показано, что использование алгоритма формирования адаптивных описаний позволит уменьшить вероятность ошибок обнаружения ориентиров при изменении условий наблюдения: средние потери от ошибок обнаружения объекта «лес» для тестового случая (для времени 16:00 час.) уменьшились на 50% по сравнению с использованием эталона «День» (для 12:00 час.) и на 24% по сравнению с использованием эталона «Вечер» (для 19:00 час.).
9. Показано, что ошибки распознавания малоинформативных ориентиров увеличивают вероятность неправильного описания сцены, что приводит к ошибкам формирования гипотез положения.
10. Представленные результаты модельных экспериментов для различных ЦКМ подтвердили работоспособность алгоритмов навигации по малоинформативным ориентирам и выбора информативного направления.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Публикации в изданиях из рекомендованного ВАК Минобрнауки России перечня:

1. Облик выносной системы технического зрения на базе БЛА для робототехнических мобильных наземных комплексов / *В.А. Аникин, Н.Е. Бодунков, Н.В. Ким, В.П. Носков, И.В. Рубцов* // Известия ЮФУ. Технические науки. –Таганрог: 2014. -№3 (152). –С. 70-77.
2. *Ким, Н.В.* Разработка системы формирования адаптивных описаний объектов интереса для СТЗ РТК. / *Н.В. Ким, Н.Е. Бодунков, Д.В. Клестов* // Известия ЮФУ. Технические науки. –Таганрог: 2015. -№1 (162). –С. 109-120.
3. *Ким, Н.В.* Обработка и анализ изображений высокодинамичных объектов в масштабе реального времени / / *Н.В. Ким, Н.Е. Бодунков, Прохоров П.Д.* // Вестник Московского Авиационного Института. –М: МАИ, 2015. -Т 22. –С. 38-45.

Публикации в зарубежных изданиях:

4. *Kim, N.V.* Adaptive surveillance algorithms based on the situation analysis / *N.V. Kim, N.E. Bodunkov* / Ed.: *N.M. Favorskaya, C.L. Jain* // Computer Vision in Advanced Control Systems: Innovations in Practice. Volume 2. –N.Y.: Springer, 2015. –Ch 7. –pp. 169 - 200.
5. *Kim, N.V.* Ensuring the accuracy of traffic monitoring using unmanned aerial vehicles vision systems / *N.V. Kim, N.E. Bodunkov, R.I. Cherkezov* // Modern Applied Science. Vol 9. -2015. -No 5 (2015). –pp. 323 – 336.

Прочие публикации, включая тезисы докладов российских и международных конференций:

6. *Ким, Н.В.* Решение целевых задач беспилотных летательных аппаратов на основе использования методов анализа ситуации / *Н.В. Ким, Н.Е. Бодунков, И.Г. Крылов* // Сб. мат. всероссийской науч.-тех. конф. «Экстремальная робототехника». -Санкт-Петербург: 2012. – С. 436-439.

7. *Ким, Н.В.* Оценка поведенческих признаков автотранспортных средств на основе анализа видеoinформации / *Н.В. Ким, Н.Е. Бодунков, А.В. Лебедев* // Сб. тезисов докладов науч.-тех. Конференции «Техническое зрение в системах управления - 2013» -М.: 2013. –С. 19-21.

8. *Kim, N.V.* The intelligent surface object tracking algorithm placed on board of the UAV / *N.V. Kim, N.E. Bodunkov* // Сб. мат. 5-ой международной конференции «Scientific aspects of unmanned mobile objects (SAUMO-2013)», -Демблин: 2013.

9. *Ким, Н.В.* Планирование действий робота в экстремальных ситуациях на основе оценки поведенческих признаков / *Н.В. Ким, Н.Е. Бодунков, А.В. Лебедев* //Сб. мат. 7-го международного симпозиума «Экстремальная робототехника - робототехника для работы в условиях опасной окружающей среды (7th IARP RISE-ER'2013)», -Санкт-Петербург: 2013.

10. *Ким, Н.В.* Прогнозирование и диагностика отказов оборудования БЛА / *Н.В. Ким, Р.Ч. Таргамадзе, Н.Е. Бодунков* // Сб. мат. IX Всероссийской науч.-тех. конф. «Перспективные системы и задачи управления». –Таганрог: 2014.

11. *Ким, Н.В.* Визуальная навигация беспилотных летательных аппаратов в неопределенных и изменяемых условиях наблюдения / *Н.В. Ким, Н.Е. Бодунков* // Сб. трудов 14-й национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием, -Казань: 2014. –С 275 - 282.

12. *Бодунков, Н.Е.* Визуальная навигация беспилотных летательных аппаратов в неопределенных и изменяемых условиях наблюдения / *Н.Е. Бодунков* // Сб. тезисов 13-й международной конференции "Авиация и космонавтика -2014". –М.: МАИ, 2014.

13. *Ким, Н.В.* Визуальная навигация автономного беспилотного летательного аппарата / *Н.В. Ким, Н.Е. Бодунков* // Сб. мат. 10-й Всероссийской науч.-тех. конф. «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов». –М.: МАИ, 2015. –С.21 – 25.