



*[Handwritten signature]*

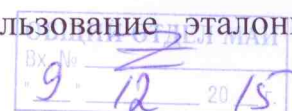
Желтов С.Ю.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного унитарного предприятия «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»  
на диссертацию Бодункова Николая Евгеньевича  
на тему «Расширение условий функционирования систем визуальной навигации автономных беспилотных летательных аппаратов»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01- «Системный анализ, управление и обработка информации (Авиационная и ракетно-космическая техника)».

Задача разработки систем визуальной навигации беспилотных летательных аппаратов (БЛА), способных функционировать при отказах или нестабильной работе спутниковых навигационных систем (СНС), является на сегодняшний день одной из наиболее актуальных задач информационно-алгоритмического обеспечения БЛА. Для обеспечения визуальной навигации на борту БЛА необходимо осуществить в реальном времени обнаружение ориентиров с известными координатами на получаемых оптических сенсорах БЛА текущих изображениях, их привязку по сформированным до полета эталонным описаниям, и, наконец, оценку текущих координат БЛА в земной системе координат.

В диссертационной работе Бодункова Н.Е. рассматриваются две основные проблемы, существенно ограничивающие возможности существующих систем визуальной навигации. Первой проблемой является влияние изменения условий наблюдения на эффективность обнаружения ориентиров. В различное время года, время суток, в различных условиях освещенности и т.п. видимые признаки искомых ориентиров могут изменяться. При этом подготовка эталонов для всех этих условий наблюдения не представляется возможной, а использование эталонных



описаний, полученных при условиях, отличных от текущих, приводит к росту вероятности ошибок обнаружения.

Вторая проблема связана с возможным отсутствием в поле зрения БЛА достаточно информативных ориентиров. Данная ситуация может возникнуть, например, при длительном полете над малоинформативной местностью: лесом, полем, над прямолинейным участком дороги и т.п. Использование одних только алгоритмов визуальной навигации на основе привязки фрагментов изображений в такой ситуации приводит к невозможности точного определения текущего положения БЛА.

Следует отметить, что первая проблема – необходимость привязки изображений в условиях изменчивости условий регистрации – к настоящему времени достаточно хорошо изучена. В литературе предложено большое количество методов привязки изображений (image matching), которые условно можно подразделить на три основные группы: методы на основе выделения характерных черт (feature-based), методы, на основе сегментации и выделения объектов (object-based), и методы на основе адаптации эталона (template matching). Методы первой группы предполагают выделение на изображениях информативных особенностей определенного типа (точечных, линейных, площадных), их описание локальными дескрипторами формы и последующее сопоставление с использованием тех или иных метрик сравнения. При этом используются такие методы как SIFT, SURF, ORB и т.п. К этой же группе относится и популярный метод контурной корреляции. Методы второй группы предполагают предварительную сегментацию и классификацию областей и объектов (леса, поля, дома, дороги, реки, озера...), представленных на изображении, и их последующее сравнение на основе признаков описаний как самих объектов, так и отношений между ними. Третья группа методов предполагает формирование и сравнение некоторых параметрических яркостно-геометрических моделей изображения (шаблонов или форм), параметры которых адаптивно оцениваются в процессе привязки изображений. В частности, к этой группе относятся методы морфологического анализа изображений, методы геометрической корреляции, методы, основанные на взаимной информации, а также методы transfer learning (переноса обучения), адаптирующие ранее обученные спектральные модели к наблюдаемым данным.



В диссертации для формирования адаптивных эталонов предлагается использовать нечеткие системы. Ядром предлагаемой нечеткой системы является база знаний нечетких правил и функций принадлежности. С точки зрения приведенной выше классификации такой метод относится к третьей группе методов. Достоинством данного подхода является возможность использования ограниченного числа эталонов в широком диапазоне условий наблюдения. Недостатком является необходимость формирования большого количества правил, описывающих все возможные условия наблюдения, в отличие от методов, осуществляющих адаптацию модели непосредственно по наблюдаемым изображениям.

Для решения второй проблемы – работы в условиях малоинформативного текущего зрительного поля – автором предлагается формировать более общие описания на основе языков ситуационного управления (в частности, предикативные описания), объединяющие малоинформативные объекты, их атрибуты и отношения между ними. Таким образом, здесь уже используются методы второй группы (object-based). Сравнение описаний наблюдаемой сцены с описаниями различных фрагментов эталонной карты местности позволяет определить гипотезы об области возможного нахождения БЛА. Для повышения точности оценки координат, предлагается алгоритм выбора направления дальнейшего полета к определяемому по карте более информативному участку местности. Таким образом, в ряде ситуаций, в которых существующие подходы к визуальной навигации неработоспособны или недостаточно эффективны, предлагаемые алгоритмы позволяют дать некоторые более точные оценки положения БЛА.

Диссертационная работа имеет следующую структуру. Введение диссертации содержит обзор литературы, цель работы, решаемые задачи и положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается влияние изменения условий наблюдения и отсутствия информативных ориентиров в наблюдаемой области на работу алгоритмов визуальной навигации. На основе проведенного анализа формулируются основные решаемые задачи и предлагается разработать алгоритмы формирования адаптивных эталонов и навигации по малоинформативным ориентирам.

Вторая глава посвящена разработке методики и алгоритма формирования адаптивных эталонов на основе использования нечетких

систем. Описана структура нечеткой системы, приведена методика ее формирования. Также приведены методики формирования функций принадлежности и обучения нечеткой системы.

В третьей главе рассматривается алгоритм навигации по малоинформативным ориентирам на основе описания наблюдаемой сцены. Предложены формат иерархического описания сцены и процедура сравнения описаний текущих и эталонных сцен. Для оценки информативности ориентиров предложено использовать меру информативности по Шеннону. Описан разработанный алгоритм выбора направления полета БЛА к более информативному участку местности.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям предложенных алгоритмов. Описаны методики и результаты экспериментов, показывающих работоспособность и эффективность предлагаемых подходов.

Заключение содержит основные выводы по работе.

Научная новизна и теоретическая значимость работы в основном определяются тем, что в ней предложены решения актуальных проблем визуальной навигации автономных БЛА, позволяющие расширить условия их применения. Предложен алгоритм формирования адаптивных описаний, на основе использования нечетких систем, обеспечивающий возможность сопоставление текущих и эталонных изображений при изменяемых условиях наблюдения. Также предложен новый подход к визуальной навигации по малоинформативным ориентирам, использующий предикативные описания наблюдаемой сцены.

Практическая ценность результатов выполненных исследований заключается в том, что полученные автором результаты в части алгоритмов формирования адаптивных описаний и навигации по малоинформативным ориентирам могут быть использованы при разработке новых систем визуальной навигации.

В методическом плане существенным достоинством данной работы является то, что в ней последовательно проводится идея работы с изображениями и их элементами на основе аппарата теории информации. Это позволяет формализовать понятие «полезной информации», которую необходимо найти и выделить именно в данный момент с точки зрения решаемой текущей задачи управления, и соответственно опираться именно на такую информацию при решении задачи визуальной навигации.



По оформлению и содержанию работы имеются следующие замечания:

1. В работе отсутствует содержательный обзор современных методов привязки изображений, а также навигации по оптическим полям. В списке литературы имеются источники, описывающие корреляционно-экстремальные методы, однако никак не представлены работы других направлений, в частности, современные работы по привязке изображений и навигации на основе информативных особенностей различных типов, методы *template matching* и *transfer learning*, методы морфологического анализа изображений. Желательно было бы дополнить обзор литературы такими современными публикациями, прежде всего, зарубежными.

2. При выполнении экспериментальных исследований не проведено сравнение предлагаемого подхода к обнаружению ориентиров на основе использования адаптивных эталонов с другими существующими подходами, инвариантными к изменению условий наблюдения, в частности, с методами сопоставления точечных особенностей, контуров и других информативных черт, а также площадными морфологическими методами. Желательно было бы такое сравнение провести.

3. В правилах формирования адаптивных описаний ориентиров не представлены все исходные данные, необходимые для полного восстановления условий наблюдения. В связи с этим неясно, насколько велика должна быть формируемая база правил для того, чтобы охватить все возможные ситуации наблюдения.

4. Не проведена оценка влияния параметров разбиения эталонной карты местности на точность работы алгоритма формирования гипотез о положении БЛА.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация имеет четкую структуру, хорошо оформлена, содержит значительное количество графиков, рисунков и схем. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Достоверность результатов определяется корректностью математических построений и подтверждается результатами проведенных экспериментов. По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, среди них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 3 – в зарубежных изданиях и ряд докладов на российских и международных научно-технических конференциях.

Работа является завершённым научным исследованием, выполненным лично автором, содержит результаты, обладающие научной новизной и имеющие теоретическую и практическую значимость. В целом диссертационная работа удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Бодунков Н.Е., заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (Авиационная и ракетно-космическая техника)».

Диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на заседании научно-технического совета подразделения 3000 ФГУП «ГосНИИАС», протокол №14 от 09 декабря 2015 г.

Начальник подразделения 3000,  
д.ф.-м.н., с.н.с.



Визильтер Ю.В.

Секретарь секции НТС  
подразделения 3000



Иловайская Е.Б.