

УДК 519.71: 629.05
На правах рукописи

Гэн Кэ Кэ

**АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОТОМ
КВАДРОКОПТЕРА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ОБЛЕТА ПРЕПЯТСТВИЙ И
КОМПЛЕКСНОЙ НАВИГАЦИЕЙ**

**Специальность 05.13.01 –
Системный анализ, управление и обработка информации
(в технических системах)**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



Москва – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» – МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: **Чулин Николай Александрович**,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Системы автоматического управления»
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Дивеев Асхат Ибрагимович**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий сектором проблем кибернетики ФИЦ
«Информатика и управление» РАН, заведующий
кафедрой кибернетики и мехатроники РУДН

Косинский Михаил Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент,
начальник отдела
ФГУП «Московское опытно-конструкторское бюро
«МАРС»

Ведущая организация: Филиал ФГУП «ЦЭНКИ» - «НИИ ПМ им. академика
В. И. Кузнецова»

Защита состоится «12» сентября 2017г. в 16:30 на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.bmstu.ru> МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.02.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Муратов И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Квадрокоптер представляет собой беспилотный летательный аппарат (БПЛА), имеющий четыре двигателя с воздушными винтами (пропеллерами), создающими тягу. В настоящее время подобные аппараты используются достаточно широко и разнообразно, но это использование ограничено в основном режимами «ручного» дистанционного управления с пульта оператора. Причина ограничений - низкая автономность квадрокоптера из-за сложности автоматического облета различных препятствий, особенно подвижных в сложной среде и автономной навигации в случае отсутствия сигнала спутниковой навигационной системы (СНС). Актуальной является задача разработки автономной системы управления полетом, позволяющей осуществлять полёт квадрокоптера по спланированному маршруту с возможностью облета препятствий и автономной навигацией.

Вклад в развитие данной области знаний внесли ряд китайских, русских ученых и ученых из других стран, результаты которых использовались при выполнении работы: N.Buniyamin, M.A.Garcia, O.Montiel, O.Castillo, P.Bhattacharya, Е.А.Гастилович, О.Б.Лебедев, В.С.Щербаков, А.В.Назарова, И.О.Шаповалов, В.В.Шадрина, П.Е.Подлипьян, Н.А.Максимов, А.Н.Козуб, Д.П.Кучеров (планирование глобального маршрута); A.D.Pearse, S.A.Gaskell, R.Marks, J.M.Yang, S.B.Tkachev, R.C.Coulter, E.Johnson, П.М.Соколова (отслеживание траектории); Н.Chen, К.С.Chang, Л.Тань, Q.B.Zhu, Y.Q.Qin, S.X.Yang, J.Barraquand, J.J.Kuffner, J.V.Mbede, J.L.Ganley, В.J.Krose, M.Eecen, J.P.Schoon, Д.Н.Сузанский, Г.Н.Лебедев, В.А.Попов, В.М.Поединок, А.И.Дивеев, А.В.Румакина, А.Г.Булгаков, А.А.Евгенов, А.Э.Бунаков, Н.М.Гревцов (облет препятствий); В.Yue, Т.Dierks, Н.А.Чулин, Манфред Шляйхер, А.С.Ющенко, С.Л.Зенкевич, О.С.Салычев, А.А.Ардентов, И.Ю.Маштаков, А.Ю. Попов, Ю.Л.Сачков, Е.Ф.Сачкова, А.С.Сыров, А.М.Пучков, В.В.Солодовников (системы стабилизации, траекторного и углового управления полетом); L.Tong, Y.M.Zhang, Z.Yi, А.Е.Голубев, А.Е.Гурьянов, С.Л.Зенкевич, И.И.Огольцов, Н.Б.Рожнин, В.В.Шеваль (математическая модель квадрокоптера); P.Newman, S.Clark, O.Naroditsky, J.Bergen, С.F.Weiman, S.J.King, J.Biswas, П.М.Кузнецов, В.А.Бобков, В. Г. Логачев, И. В. Минин, Р. В. Кучерский, Б. Б. Михайлов, В.Г.Волков, О.В.Востриков, И.М.Кузнецов, А.Н.Пронькин, К.К.Веремеенко, А.И.Гаврилов (визуальная навигационная система на основе алгоритма SLAM); L.Ran, S.Helal, S.Moore, С.W.Johnson, K.W.McElreath, Т.N.Upadhyay, А.W.Deaton, К.А.Неусыпин, О.С.Салычев, А.В.Фомичев, В.В.Лукьянов, Б.С.Алешин, А.Н.Пронькин, И.М.Кузнецов, В.М.Синеглазов, Ш.И.Аскеров, Е.С.Лобусов (комплексная навигационная система).

Рабочая среда полета квадрокоптера становится все более сложной в связи с расширением области применения этих летательных аппаратов. Она может быть наполнена различными препятствиями (подвижными и неподвижными). В ней может отсутствовать сигнал СНС. Большинство алгоритмов планирования маршрута и систем управления, описанных в литературе, достаточно хорошо проработаны для применения в детерминированной статической известной среде,

но в сложной неизвестной среде с различными препятствиями и влияниями атмосферы не обеспечивают достаточную работоспособность. Существующие для квадрокоптеров комплексные навигационные системы (КНС) не могут обеспечить достоверность навигационной информации (НИ) в случае отсутствия сигнала СНС. Во всем мире ведутся интенсивные исследования по технологиям навигации квадрокоптера с использованием визуальной навигационной системы (ВНС) на основе одновременной локализации и картографирования (SLAM), с помощью компьютерного зрения, ориентиров, карты местности и др. Использование ВНС позволяет достичь высокой точности навигации для квадрокоптера, особенно в неизвестной динамической среде без сигнала СНС, но данное использование ограничено для квадрокоптера из-за низкой скорости вычисления алгоритмов обработки изображений и SLAM.

Таким образом, решение и исследование указанных проблем весьма актуально и имеет важное практическое значение.

Цель диссертационной работы заключается в разработке автоматической системы управления полетом квадрокоптера, позволяющей обеспечить автономный полёт по спланированному маршруту с возможностью облета препятствий в сложной среде и автономной навигацией.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие основные задачи:

1. Разработка алгоритма планирования пространственного глобального маршрута в известной среде с неподвижными препятствиями;
2. Разработка алгоритма отслеживания спланированного маршрута в режиме реального времени;
3. Разработка алгоритма облета препятствий в сложной среде для квадрокоптера;
4. Разработка системы траекторного и углового управления полетом квадрокоптера по заданному маршруту;
5. Построение уточненной математической модели квадрокоптера с учётом гироскопических эффектов винтов и моторов, влияния ветра и экранного эффекта поверхности Земли;
6. Разработка алгоритмического и программного обеспечения визуальной навигационной системы (ВНС) для квадрокоптера на основе алгоритма одновременной локализации и картографирования (SLAM) ;
7. Разработка КНС, учитывающей достоверность и статистические характеристики входящих в неё источников информации;

Методы исследования. При решении задач, рассматриваемых в диссертации, были использованы методы математического анализа и моделирования, синтеза линейных (ПИД) и нелинейных (бэкстеппинг) регуляторов, управления поворотом вектора скорости, тесты хи-квадрат по остаточной ошибке и по состоянию, одновременной локализации и картографирования, назначения весов для слияния данных, линейной и нелинейной калмановской фильтрации. В процессе математического моделирования применялись вычислительные системы: программный комплекс "Универсальный механизм" (УМ), инструмент

3D-моделирования Solidworks, C++ (язык программирования), среда моделирования MATLAB.

Научная новизна. К числу новых научных результатов, полученных в диссертации, относятся:

1. Предложен алгоритм планирования пространственного глобального маршрута на основе представления информации о среде в виде облачно-точечной карты и улучшенного муравьиного алгоритма с возможностью эффективного использования имеющейся известной информации о среде и быстрого получения глобального маршрута с меньшим количеством путевых точек;

2. Разработан алгоритм отслеживания спланированного маршрута на основе модификации метода «L1» путем адаптивного выбора опорных точек отслеживания на маршруте;

3. Предложен алгоритм облета неподвижных и подвижных препятствий, позволяющий управлять поворотом вектора скорости квадрокоптера в реальном времени;

4. Предложен улучшенный алгоритм SLAM с расширенным фильтром Калмана (EKF-SLAM) с адаптивным диапазоном наблюдения и локальной ассоциации данных, на основе которого разработано алгоритмическое и программное обеспечение визуальной навигационной системы;

5. Разработана структура и математическая модель КНС, использующая модификации многоуровневого фильтра Калмана для компенсации погрешностей НИ от нескольких источников с возможностью обнаружения и изоляции неисправностей.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Предлагаемая КНС с разными навигационными режимами, используя показания дополнительных датчиков, позволяет повысить точность навигации и расширить область применения БПЛА в отсутствие сигнала СНС;

2. Разработанный интерфейс пользователя комплексной навигационной системы может быть использован на наземной станции для наблюдения за полетом БПЛА и работой датчиков в режиме реального времени;

3. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение (ПАО) многорежимной подсистемы углового управления на основе бэкстеппинг-регуляторов, автоматически выбираемых в соответствии с условиями полёта (высота, угловое положение, ветровые воздействия, режимы взлёта-посадки), позволяющее повысить стабильность полета БПЛА в среде с ветром и вблизи поверхности Земли с возможностью аварийного возврата к исходной точке в сложных погодных условиях;

4. Предложены более простые для бортовой реализации алгоритмы облета препятствий и отслеживания заданного маршрута в режиме реального времени на основе управления поворотом вектора скорости, которые могут быть использованы для БПЛА и наземных подвижных объектов.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационных исследований и разработанное программно-алгоритмическое обеспечение были применены в учебном процессе на кафедре «Системы автоматического

управления» МГТУ им.Н.Э.Баумана и при реализации конкретного технического проекта в научно-технической компании «Нанкинское научно-техническое общество с ограниченной ответственностью «Цзи Хуи Тин» (Нанкин, КНР).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде конференций: международная конференция «Молодежный научно-технический вестник» (Москва, 2014г.); X Международный симпозиум «Интеллектуальные системы» (Москва, 2014г.); Information Processing and Control Engineering (ICIPCE-2015) (Москва, 2015г.); VIII Международная научно-практическая конференция «Инженерные системы» (Москва, 2015г.); II Всероссийская научно-техническая конференция "Навигация, наведение и управление летательными аппаратами" (Москва, 2015г.); Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах (Санкт-Петербург, 2015г.); VI Молодежная конференция молодых ученых и специалистов (Москва, 2015 г.); XII International Symposium «Intelligent Systems» (Москва, 2016 г.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 16 научных работ, из них 6 статей – в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе, списка используемой литературы. Общий объем 162 страниц, в том числе 99 рисунков и 8 таблиц.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм планирования пространственного глобального маршрута в известной среде на основе упрощенной облачно-точечной карты и улучшенного МА.

2. Алгоритмы облета препятствий и отслеживания маршрута, позволяющие осуществлять облет неподвижных и подвижных препятствий в процессе полета по спланированному маршруту в сложной среде в режиме реального времени.

3. Система управления угловым движением квадрокоптера на основе многорежимного алгоритма стабилизации, состоящего из набора бэкстеппинг–регуляторов, позволяющих повысить стабильность полета в среде с ветром и вблизи поверхности Земли.

4. АПО ВНС для квадрокоптера на основе улучшенного алгоритма EKF-SLAM с адаптивным диапазоном наблюдения и локальной ассоциацией данных, позволяющее повысить скорость вычисления и точность навигации.

5. Структура и алгоритмы КНС, позволяющие корректировать показания БИНС по информации СНС, ВНС, барометрического и радиовысотометров, с возможностью обнаружения и изоляции неисправности и обеспечения высокой точностью навигации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и важность темы диссертации, для чего проведен анализ современных тенденций в области разработки систем управления полетом и навигации квадрокоптера, указаны перспективы их применения.

Определена цель и сформулированы основные задачи диссертации. Указаны методы проведения исследований, представлены полученные в ходе выполнения работы основные научные результаты. Показана практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Представлены вид и количество публикаций, описана структура и объем диссертации.

В первой главе проведен обзор существующих методов для решения ключевых задач автономного полета квадрокоптера, определены наиболее подходящие из них и выявлены проблемы, препятствующие непосредственному применению известных методов и алгоритмов.

Для планирования маршрута в статической среде в последние годы широко используется МА, сочетающий параллельность поиска и сходимости к оптимальному решению. Однако, время сходимости не определено, так как зависит от сложности карты поиска маршрута. Поэтому традиционный МА не может быть применен в режиме реального времени для планирования глобального маршрута в трехмерной среде с различными препятствиями и сложной моделью.

Для решения задачи отслеживания заданного маршрута квадрокоптера можно применить метод «L1», обладающий простой реализацией и высокой скоростью вычисления. Однако, эффективность подобного метода сильно зависит от величины критического параметра L1 (расстояния между центром масс аппарата и опорной точки отслеживания). Выбор фиксированного расстояния для траектории с разной кривизной может привести к большому отклонению между реальной траекторией полета и заданным маршрутом.

Существующие многочисленные алгоритмы облета препятствий не обладают достаточной работоспособностью для квадрокоптера в сложной динамической среде из-за медленной скорости вычисления. Необходим новый простой алгоритм облета препятствий, который может быть применен в режиме реального времени. Целесообразно создание такого алгоритма также на основе управления поворотом вектора скорости.

Для траекторного и углового управления необходимо создание многорежимной системы, способной реализовать алгоритмы отслеживания маршрута и облета препятствий в различных режимах полета при различных ветровых воздействиях. Такие многорежимные системы могут быть построены на основе простых структур – ПИД-регуляторов и бэкстеппинг-регуляторов, параметры которых для разных режимов предварительно уточняются по результатам моделирования.

Для решения предыдущей задачи и проведения комплексного моделирования построена более подробная математическая модель квадрокоптера с учетом влияния экранного эффекта поверхности Земли, ветра, гироскопических моментов двигателей и винтов и т. д.

Среди возможных подходов к решению задачи разработки ВНС в последнее десятилетие популярен алгоритм EKF-SLAM, дающий возможность прогнозирования координат и скорости квадрокоптера в неизвестной среде с одновременной оценкой положения ориентиров и созданием полной карты. Координаты характерных точек среды, выбираемых в качестве ориентиров, можно

получить в НСК по изображениям с фотокамеры с помощью алгоритма SUSAN, функции нормированной взаимной корреляции, алгоритма RANSAC, 8-точечного нормированного алгоритма и преобразования координат. Недостаток – большое время вычислений.

Рассматривается квадрокоптер, выполняющий полёт в автономном режиме или при дистанционном пилотировании в условиях недостаточности предоставляемой оператору информации о среде. В этих случаях информация с одного источника не может обеспечить необходимой точности навигации БПЛА. КНС обычно сочетает два или более двух типов навигационных систем (НС) и может использовать преимущества взаимодополняемости различных НС и генерировать достоверную навигационную информацию (НИ). Такие системы обычно включают инерциальный измерительный блок (IMU), СНС, ВНС и т.д. Тем не менее, в рассматриваемой задаче с учётом необходимости локализации и облёта препятствий в трехмерной среде присутствуют дополнительные факторы, влияющие на точность и достоверность измеренной информации, что не позволяет использовать готовые КНС.

Во второй главе разработаны новые или улучшенные алгоритмы, позволяющие решить проблемы, описанные в первой главе, и реализовать автоматическое управление полетом квадрокоптера по спланированному маршруту с возможностью облёта препятствий в сложной среде, в которой существуют различные препятствия и атмосферное влияние.

Разработка алгоритма планирования глобального маршрута на основе усовершенствованного МА. В традиционном МА вероятность p_{ij}^m перехода муравья m из позиции i в позицию j определяется формулой:

$$p_{ij}^m = \tau_{ij}^\alpha \eta_{ig}^\beta \left(\sum_{s=1}^{D_m} \tau_{is}^\alpha \eta_{ig}^\beta \right)^{-1}, j \in S_m, s \in S_m | 0, D_m = 0$$

где τ_{ij} – количество феромона на дуге ij ; α – параметр влияния на τ_{ij} ; η_{jg} – величина, обратная длине дуги jg ; β – параметр, влияющий на η_{ij} ; S_m – множество позиций, проходимых муравьём m ; D_m – размер множества S_m .

Улучшения традиционного МА включают:

– Построение новой функции вероятности перехода, позволяющей уменьшить рассматриваемое число путей:

$$p_{ij}^m = \tau_{ij}^\alpha \eta_{ig}^\beta \theta_{ij}^\gamma d_{ij}^\varepsilon \left(\sum_{s=1}^{D_m} \tau_{is}^\alpha \eta_{ig}^\beta \theta_{is}^\gamma d_{is}^\varepsilon \right)^{-1}, j \in S_m, s \in S_m | 0, S_m = [], D_m = 0$$

где θ_{ij} – величина, обратная углу $\angle jig$; d_{ij} – величина, обратная длине дуги ij ; γ, ε – параметры влияния.

– Устранение ограничения длины поиска на каждом шаге: от текущей точки можно перейти к любой точке, которая не находится в запрещенной области.

– Уменьшение размера матрицы смежности:

$$Q_T = M \times M; \quad Q_Y = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^A n_{ij} \times (M - N)$$

где Q_T – размер смежности традиционного алгоритма; Q_Y – улучшенного алгоритма; n_{ij} – количество проходимых точек j -ого муравья в i -ой итерации; K – количество итераций; A – количество муравьёв; M – число точек поиска; N – число точек, находящихся в запрещенной области. Таким образом, $Q_Y \ll Q_T$, что позволяет эффективно повысить скорость вычисления алгоритма.

Разработка алгоритма отслеживания спланированного маршрута на основе улучшенного метода «L₁» с адаптивным выбором опорной точки отслеживания.

Принцип метода «L₁» для решения задачи отслеживания заданного маршрута квадрокоптера показан на Рис. 1, где V – вектор скорости; L_1 – вектор от квадрокоптера до опорной точки; Ω – угол упреждения; d – кратчайшее расстояние от центра массы квадрокоптера до траектории (точек маршрута); a_c – вектор нормального ускорения, необходимого для отслеживания маршрута; D – опорная точка; O – центр вспомогательной окружности; R – радиус вспомогательной окружности; C – точка центра массы квадрокоптера.

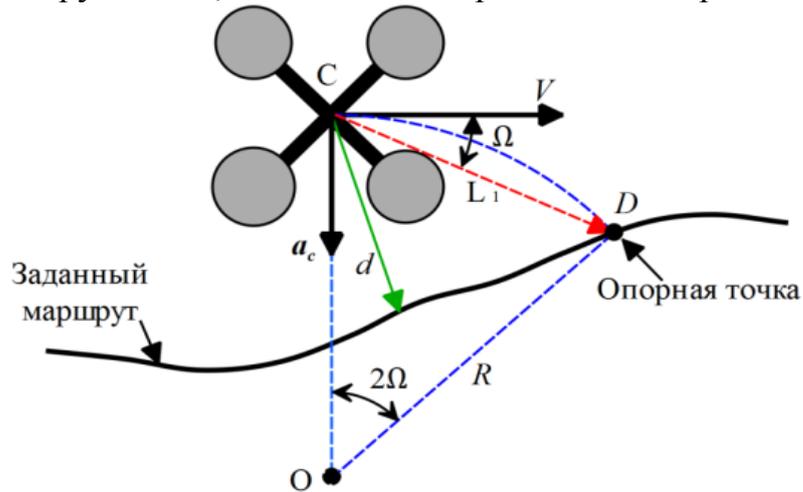


Рис. 1. Принцип алгоритма отслеживания

Нормальное ускорение, необходимое для отслеживания заданного маршрута, определяется следующим образом:

$$a_c = V^2/R = V^2/[L_1/(2 \sin \Omega)] = 2V^2 \sin \Omega/L_1$$

Процесс выбора опорной точки можно разделить на два этапа:

- 1) выбор ближайшей точки маршрута D_1 при условии: $L_1 \geq d$; $\Omega_1 \leq \pi/2$;
- 2) определение порядкового номера опорной точки N в множестве точек маршрута:

$$N = n + \phi; \quad \phi = \begin{cases} 0, & m = 1; \\ \text{floor} \left(m \cdot \left[(1 + \sin \Omega_1)^p (1 + d)^q \left(1 + \sum_{i=1}^{m-1} (\pi - \chi_i) \right)^r \right]^{-1} \right), & m \geq 2 \end{cases}$$

где n – порядковый номер точки D_1 ; ϕ – функция опорной точки; p, q, r – показатели влияния угла упреждения, расстояния, углов поворота маршрута (определяются путем предварительного моделирования); m – количество точек в этой области; χ – угол между точками маршрута.

Разработка нового алгоритма облета различных препятствий. Для определения координат, скоростей и размеров препятствий, предлагается использовать прогноз движения на основе известного сигма-точечного ФК (Uncented Kalman Filter – UKF).

Уравнения состояний и наблюдения системы в момент k :

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = f(\mathbf{X}_{k-1}, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k) \\ \mathbf{Z}_k = h(\mathbf{X}_k, \mathbf{v}_k) \end{cases}$$

где $\mathbf{X}_k = [\mathbf{X}_{b_k}, \mathbf{V}_{b_k}, \mathbf{R}_k]^T$ – вектор состояния движения препятствий; \mathbf{X}_{b_k} – координаты препятствий; \mathbf{V}_{b_k} – скорости препятствий; \mathbf{R}_k – радиусы препятствий; $\mathbf{Z}_k = [\mathbf{D}_k, \boldsymbol{\alpha}_k, \boldsymbol{\eta}_k]^T$ – вектор наблюдения; \mathbf{D}_k – расстояния; $\boldsymbol{\alpha}_k$ – углы между касательными; $\boldsymbol{\eta}_k$ – углы между вектором скорости и направлением на препятствие (линией визирования препятствия); \mathbf{u}_k – управляющее воздействие; \mathbf{w}_k и \mathbf{v}_k – шумы процесса и измерений.

На Рис. 2 показан принцип предлагаемого алгоритма облета неподвижных препятствий в двумерной среде.

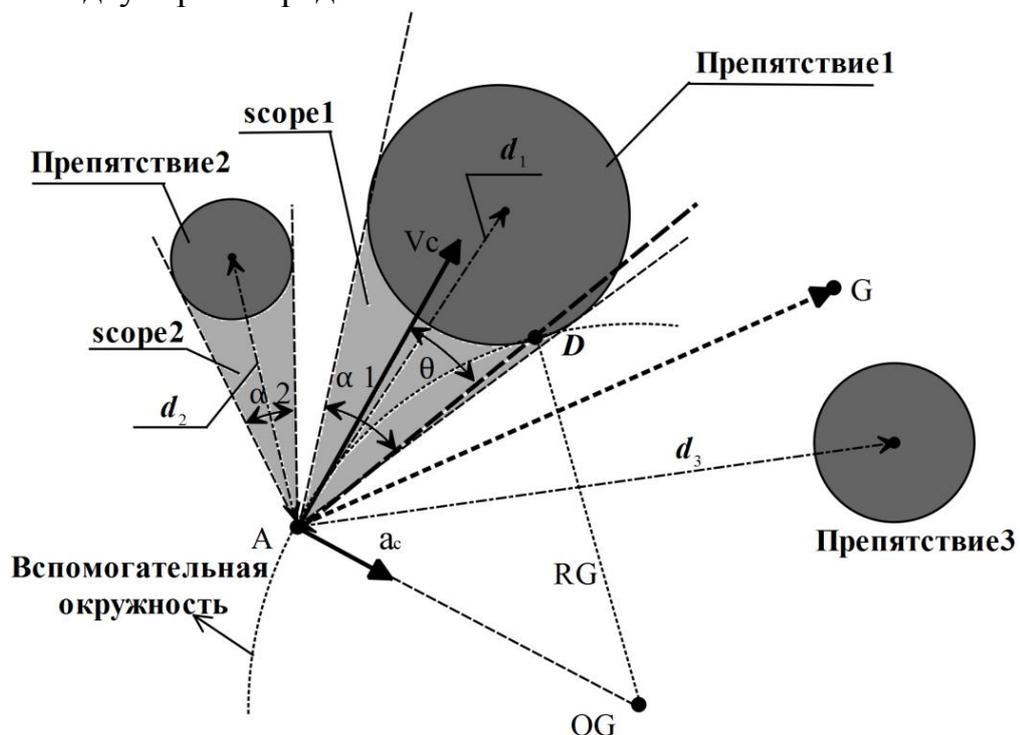


Рис. 2. Стратегия облета неподвижного препятствия

Для включения процесса облета неподвижных препятствий, необходимы определенные условия:

- $d_i \leq d_r$, d_r – порог расстояния облета;
- вектор скорости робота \mathbf{V}_c находится в области наблюдения $scope_i$ и

внутри угла α_i .

Для облета неподвижных препятствий нужно вычислить минимальные ускорения, необходимые для исключения столкновений, и умножить на коэффициенты безопасности облета. Эти коэффициенты выбираются, исходя из степени безопасности, требуемой в конкретной задаче. Выражения минимального и безопасного нормальных ускорений, необходимых для исключения столкновения с препятствием i , можно записать следующим образом:

$$a_i = \frac{V_c^2}{R_G} = \frac{V_c^2}{d_{AD}/(2 \cdot \sin \theta)} = \frac{2 \cdot V_c^2 \cdot \sin \theta}{d_{AD}}; \quad a_{ci} = k_i \cdot a_i$$

где k_i – коэффициент безопасности для препятствия i .

В качестве нормального ускорения для облета всех препятствий выбирается самое большое из множества безопасных нормальных ускорений, т.е. $a_c = \max[a_{c1}, a_{c2}, \dots, a_{ci}, \dots, a_{cn}]$.

Подвижные препятствия определяются из условия $v_{bi_k} > v_t$, где v_t выбирается, исходя из погрешности визуальной системы. Облет подвижных препятствий производится путем предсказания местоположений столкновения, после чего на этих местах размещаются виртуальные неподвижные препятствия в качестве объекта облета.

Преимущества подобной стратегии:

- 1) Уменьшение ненужных действий при облете препятствий, что делает полет более стабильным, а скорость вычисления алгоритма более высокой;
- 2) Снижение влияния визуального слепого поля на эффективность алгоритма облета подвижных препятствий.

Разработка многорежимной системы стабилизации для квадрокоптера в среде с атмосферным влиянием. Основными возмущающими факторами являются ветровые воздействия и экранные эффекты поверхности Земли. Предлагается многорежимная система стабилизации, содержащая набор бэкстеппинг-регуляторов, автоматически выбираемых в соответствии с условиями полёта, а также – подсистему аварийного возврата к исходной точке. В режиме взлета или посадки лучше выбирать регулятор с меньшим перерегулированием. В среде без ветра или со слабым ветром можно выбирать регуляторы с малыми изменениями крена и тангажа. В среде с умеренным ветром можно выбирать регуляторы с меньшим временем регулирования. Когда ветер превышает допустимый предел, следует выбирать регуляторы с наименьшим временем регулирования, а подсистему траекторного управления переводить в режим возврата к исходной точке.

В третьей главе представлена КНС на основе ФК с возможностью обнаружения неисправности и слияния нескольких источников НИ с возможностью изоляции неисправности. На Рис. 3 показана схема КНС, где \hat{Z}_A – выходы ВНС с ошибками; \hat{Z}_G – выходы СНС с ошибками; \hat{h}_B, \hat{h}_R – выходы высотомеров с ошибками; \hat{Z}_S – выходы БИНС с ошибками; Z_O – наблюдаемые НС после слияния данных датчиков; X_r – НС состояния системы после слияния

данных датчиков; M – матрица обнаружения неисправности.

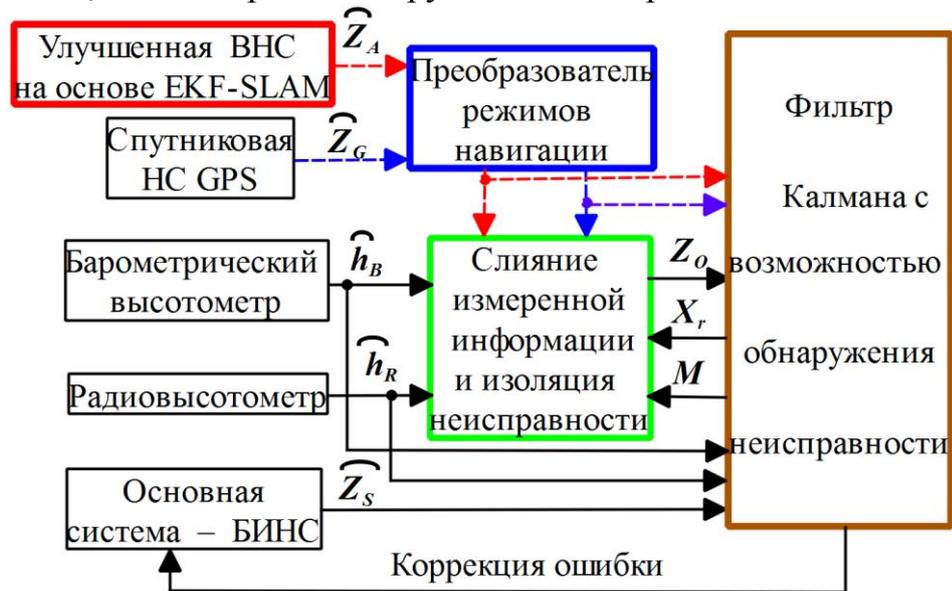


Рис. 3. Схема КНС

Преобразователь режимов навигации. ВНС используется в случае отсутствия сигнала СНС или при необходимости более точной информации о среде (например, для облета препятствий или посадки на указанном месте), т. е. выбирается режим навигации БИНС/ВНС/ВА/РА или БИНС/СНС/ВНС/ВА/РА. В остальных случаях выбирается режим навигации БИНС/СНС/ВА/РА.

ВНС с локальным диапазоном наблюдения и локальной ассоциацией данных. В открытой среде, одновременно с приращением числа наблюдаемых ориентиров, будут также постоянно увеличиваться размер вектора состояния системы и сложность вычисления алгоритма. Чтобы избежать этого, предлагается ввести известный EKF-SLAM алгоритм адаптации зоны наблюдения. Суть алгоритма состоит в использовании локальной круговой карты для текущей оценки координат аппарата и локализации зоны используемых ориентиров в глобальной системе координат. Локализация зоны наблюдения показана на Рис. 4.

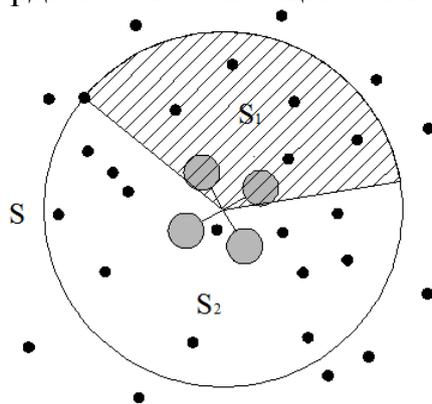


Рис. 4. Круговая локальная карта и диапазон наблюдения

На Рис. 4: S – круговая локальная карта; S_1 – диапазон наблюдения; S_2 – дополнительный диапазон; чёрные точки – ориентиры.

Если число ориентиров Num в наблюдаемой области S_1 меньше, чем минимально необходимое для надежной коррекции прогнозируемого вектора состояния Num_{min} ($Num < Num_{min}$), и радиус наблюдения R меньше, чем

максимальный радиус R_{\max} надежного наблюдения ($R < R_{\max}$), то предлагается увеличить радиус локальной карты. Если число ориентиров больше, чем максимальное число ориентиров Num_{\max} , позволяющее избегать чрезмерной избыточности коррекции ($Num > Num_{\max}$), или радиус наблюдения больше, чем максимальный радиус надежного наблюдения ($R > R_{\max}$), то предлагается уменьшать радиус локальной карты. Когда число ориентиров $Num_{\min} < Num < Num_{\max}$ и $R < R_{\max}$, то радиус локальной карты остаётся неизменным.

Для дальнейшего повышения скорости вычисления алгоритма SLAM предлагается алгоритм локальной ассоциации данных SLAM на основе улучшенного МА, реализуемый в два этапа, как показано на Рис. 5.

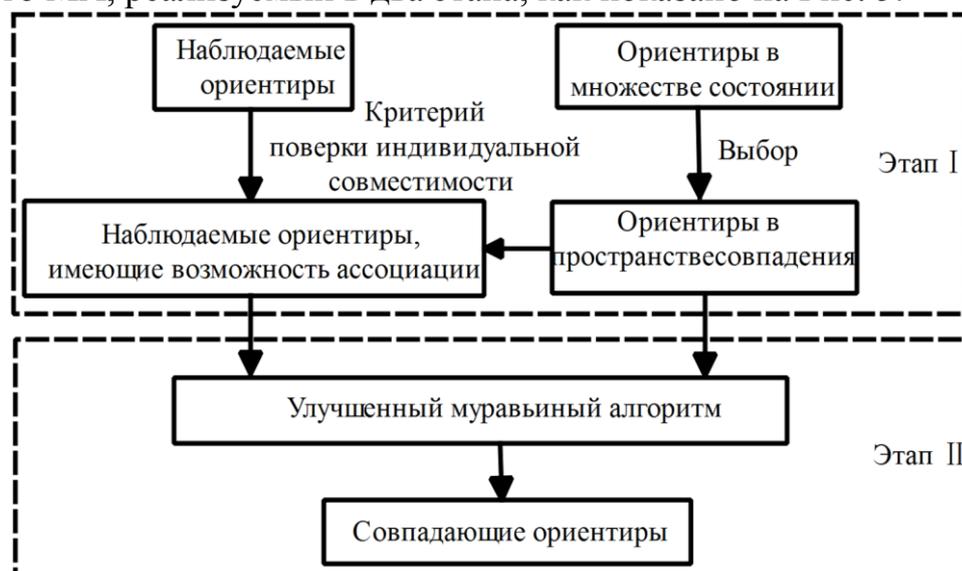


Рис. 5. Схема алгоритма ассоциации

Чтобы уменьшить объём вычислений алгоритма, вместо глобальной ассоциации используем локальную. Поскольку в процессе наблюдения и предсказания состояния существуют ошибки, необходимо добавить в пространство совпадения область за пределами области наблюдения.

Улучшения МА для избегания локального минимума, увеличения пространства поиска и повышения скорости вычисления МА включают:

- добавление хаотической последовательности в процесс обновления глобального феромона в виде возмущения:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \rho\Delta\tau_{ij}(t) + z_{ij} ;$$
- установление границы феромона $\tau_{ij} \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}]$.

На первом этапе работы алгоритма определяются ориентиры в пространстве совпадений и наблюдаемые ориентиры, имеющие возможности ассоциации по критерию индивидуальной совместимости (Individual Compatibility – IC). На втором этапе определяются совпадающие ориентиры и координаты совпадающих наблюдаемых ориентиров на множестве состояний при помощи улучшенного МА.

Разработка ФК с возможностью обнаружения неисправности. В данной работе была осуществлена разработка ФК с возможностью обнаружения

неисправности. В качестве примера на Рис. 6 показана схема обработки информации о высоте.

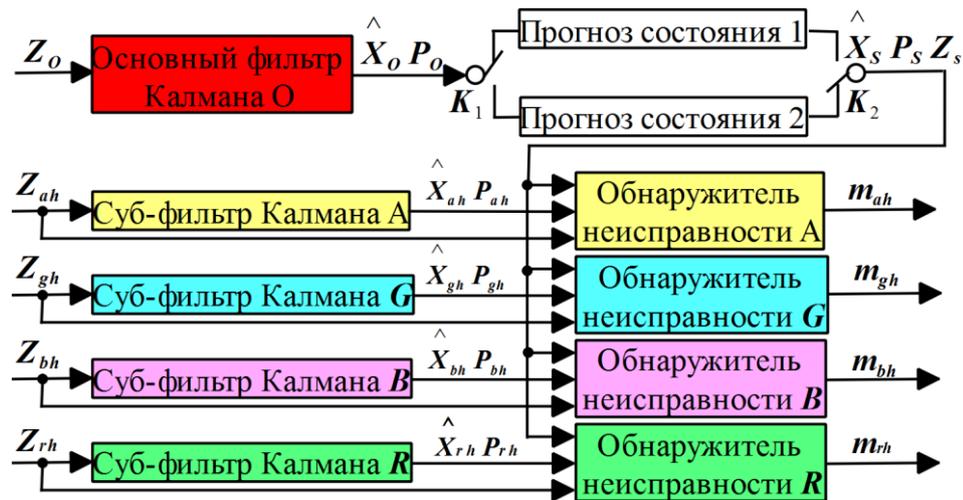


Рис. 6. Схема ФК с возможностью обнаружения неисправности

Уравнение состояний интегрированной навигационной системы имеет вид:

$$\dot{\mathbf{X}}_O(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}_O(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{W}(t)$$

где $\mathbf{X}_O = [\phi_E, \phi_N, \phi_U, \delta v_E, \delta v_N, \delta v_U, \delta L, \delta \lambda, \delta h, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z]^T$ – вектор состояния; буквами E , N и U обозначены направления на восток, север и вверх; ϕ_E , ϕ_N и ϕ_U – ошибки определения углов ориентации в инерциальной системе координат (ИСК); δv_E , δv_N и δv_U – ошибки определения скорости БПЛА в ИСК; δL , $\delta \lambda$ и δh – ошибки определения широты, долготы и высоты; ε_x , ε_y и ε_z – случайные погрешности датчиков угловой скорости (ДУС) в ССК; ∇_x , ∇_y и ∇_z – случайные погрешности акселерометров; \mathbf{F} – матрица перехода; \mathbf{G} – матрица влияния шумов системы; \mathbf{W} – вектор шумов системы (предполагается – «белый» шум).

Уравнение измерений основного ФК «O» можно записать в виде:

$$\mathbf{Z}_O(t) = \widehat{\mathbf{Z}}_S(t) - \widehat{\mathbf{Z}}_O(t) = \mathbf{H}_O(t)\mathbf{X}_O(t) + \mathbf{V}_O(t)$$

где $\widehat{\mathbf{Z}}_O$ – информация об измерениях после слияния; $\widehat{\mathbf{Z}}_S$ – состояния БПЛА по показаниям БИНС с ошибками; \mathbf{V}_O – вектор шумов наблюдения; \mathbf{H}_O – матрица измерений

Уравнения измерений для суб-фильтра Калмана «A», «G», «B» и «R» можно записать в виде:

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_{ah}(t) = h_S - h_A = \mathbf{H}_{ah}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{V}_{ah}(t) \\ \mathbf{Z}_{gh}(t) = h_S - h_G = \mathbf{H}_{gh}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{V}_{gh}(t) \\ \mathbf{Z}_{bh}(t) = h_S - h_B = \mathbf{H}_{bh}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{V}_{bh}(t) \\ \mathbf{Z}_{rh}(t) = h_S - h_R = \mathbf{H}_{rh}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{V}_{rh}(t) \end{cases}$$

где h_S , h_G , h_A , h_B и h_R – информация о высоте по показаниям БИНС, СНС, SLAM, барометрического высотомера и радиовысотомера; \mathbf{V}_{ah} , \mathbf{V}_{gh} , \mathbf{V}_{bh} и \mathbf{V}_{rh} –

вектор шумов наблюдения высоты СНС, SLAM, барометрического высотомера и радиовысотомера с дисперсиями \mathbf{R}_{ah} , \mathbf{R}_{gh} , \mathbf{R}_{bh} и \mathbf{R}_{rh} ; \mathbf{H}_{ah} , \mathbf{H}_{gh} , \mathbf{H}_{bh} и \mathbf{H}_{rh} – матрицы измерений

Чтобы повысить вероятность обнаружения неисправности, в данной работе был предложен обнаружитель неисправности с параллельной структурой, включающей тест χ^2 по остаточной ошибке и тест χ^2 по состоянию с двойным прогнозом состояния.

В качестве примера приведем схему обнаружителя неисправности G на Рис. 7.

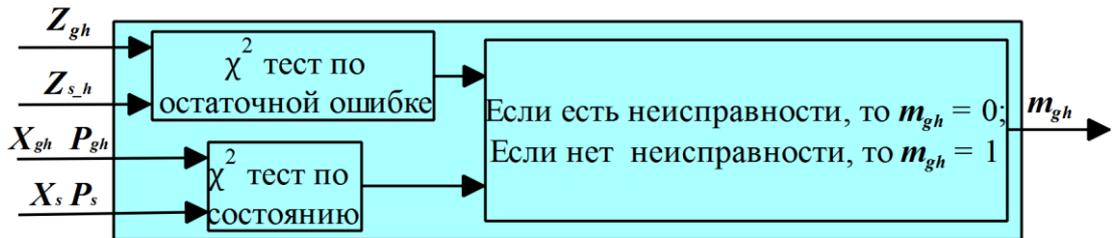


Рис. 7. Обнаружитель недостоверности информации о высоте

Аналогичные фильтры были применены и для других видов НИ.

Использование нескольких источников НИ с возможностью изоляции неисправности. Если используем несколько датчиков для измерения одного параметра, то можно слить выходы всех датчиков, назначая веса для выхода каждого датчика.

Результат слияния измеренной информации можно записать следующим образом:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}\mathbf{M}\mathbf{X} = [w_1, w_2, \dots, w_n] \text{diag}[m_1, m_2, \dots, m_n] [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$$

где \mathbf{Y} – результат слияния; $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ – матрица весов; $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ – выходы датчика; n – количество датчиков; \mathbf{M} – матрица обнаружения неисправности.

Принцип назначения весов для выхода каждого датчика можно записать следующим образом:

$$w_j = \left(\sigma_j^2 \sum_i^n 1/\sigma_i^2 \right)^{-1} ; \sum_j w_j = 1$$

где σ_i и σ_j – дисперсия ошибки выхода i -ого и j -ого датчика.

Если в момент k датчик j получает измеренное значение $T_j(k)$, то:

$$\Delta T_j(k) = T_j(k) - \hat{T}_j(k); \quad \Delta \bar{T}_j = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta T_j(k); \quad \sigma_j(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\Delta T_j(k) - \Delta \bar{T}_j)^2, k = 1, 2, 3, \dots, N$$

где $\Delta T_j(k)$ – ошибка измерения j -ого датчика в момент k ; $\Delta \bar{T}_j$ – среднее значение j -ого датчика в момент k ; $\sigma_j(k)$ – дисперсия ошибки выход j -ого датчика в моменте k ; $\hat{T}_j(k)$ – прогностическая величина, полученная с помощью ФК; N – число измерений с каждого датчика.

В четвертой главе проводится макетирование навигационной системы в наружной среде и комплексное моделирование разработанной автономной системы управления полетом квадрокоптера в программной среде Matlab.

Схема структуры комплексной математической модели автономной системы управления полетом квадрокоптера показана на Рис. 8.

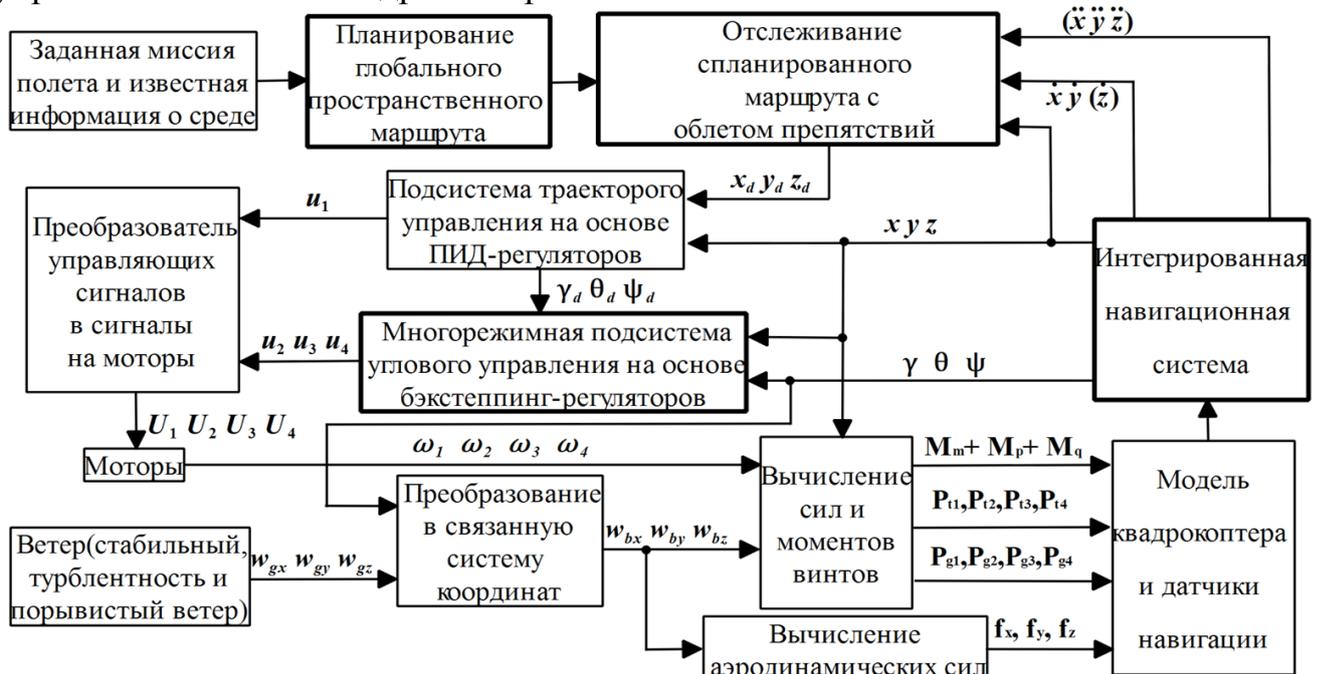


Рис. 8. Схема математической модели автономной системы управления

Для проверки работоспособности предлагаемой системы в данной работе было проведено моделирование полета в среде без ветра и с ветром, результаты моделирования показаны на Рис. 9.

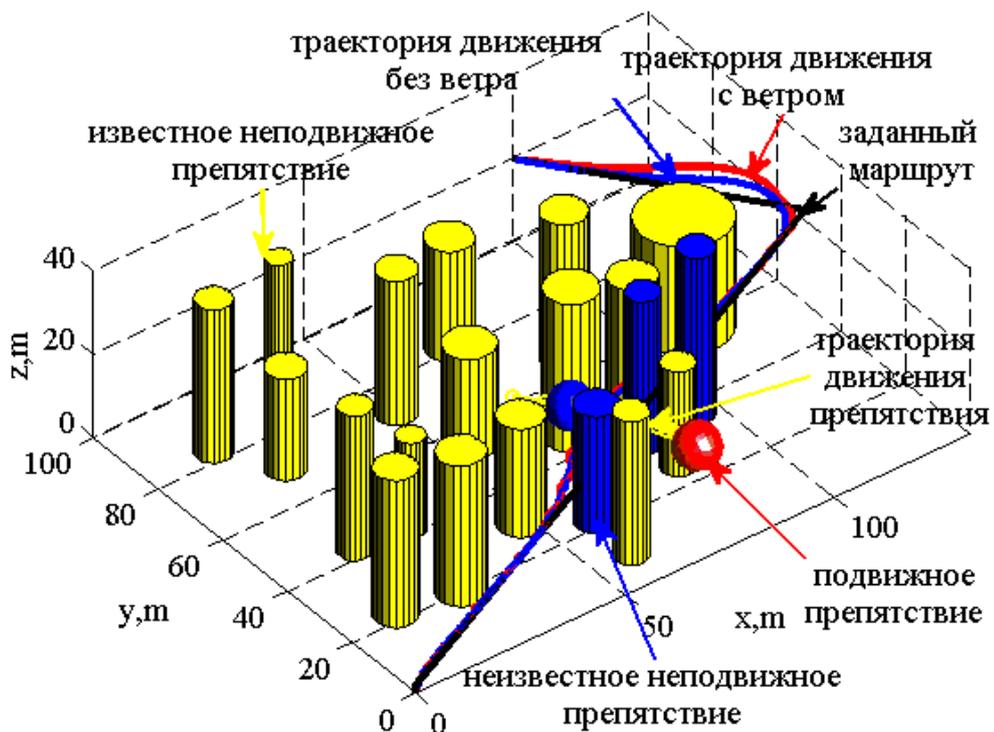


Рис. 9. Траектория полета квадрокоптера в трехмерной среде

Из результатов, показанных на Рис. 9 можно заметить, что траектория полета квадрокоптера избегает столкновения со всеми неподвижными препятствиями и подвижным препятствием в сложной динамической среде.

В заключении подводятся итоги диссертационного исследования, излагаются его основные выводы и обобщающие результаты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан алгоритм планирования пространственного глобального маршрута в известной среде с неподвижными препятствиями на основе облачно-точечной карты и улучшенного МА.

2. Разработаны алгоритм облета препятствий и алгоритм отслеживания маршрута на основе управления поворотом вектора скорости. Результаты моделирования показывают, что предложенные алгоритмы позволяют летать по спланированному маршруту в сложной среде с облетом неподвижных и подвижных препятствий.

3. Разработано ПАО многорежимной системы управления угловым движением квадрокоптера на основе бэкстеппинг-регуляторов, позволяющее повысить стабильность полета в среде с ветром и вблизи поверхности Земли. Результаты подтверждены моделированием.

4. Разработано ПАО визуальной навигационной системы для квадрокоптера на основе улучшенного алгоритма EKF-SLAM с адаптивным диапазоном наблюдения и локальной ассоциацией данных, позволяющее повысить скорость вычислений и точность навигации.

5. Структура и алгоритмы КНС, позволяющие определять координаты препятствий и корректировать показание БИНС по информации СНС, ВНС, барометрического и радиовысотометров. Результаты моделирования и макетирования показывают, что предложенная система сочетает высокую точность навигации с возможностью обнаружения и изоляции неисправностей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гэн Кэ Кэ , Чулин Н. А. Алгоритмы стабилизации для автоматического управления траекторным движением квадрокоптера // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. №5. С. 218-235. (1,13п.л. / 0,56п.л.)

2. Гэн Кэ Кэ, Тань Лиго, Чулин Н.А., Хэ Юн. Планирование маршрута для квадрокоптера в неизвестной среде на основе монокулярного компьютерного зрения // Автоматизация. Современные технологии. 2015. №12. С. 14-19. (0,37п.л. / 0,23п.л.)

3. Гэн Кэ Кэ, Чулин Н.А. Алгоритм локальной ассоциации данных SLAM на основе улучшенного муравьиного алгоритма // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. №10. С. 340-355. (1,00п.л. / 0,50п.л.)

4. Тань Л., Фомичев А. В., Гэн Кэ Кэ. Решение задачи планирования полета в реальном режиме времени малогабаритного беспилотного летательного аппарата по пространственной траектории в условиях сложного рельефа местности // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. №11. С. 485-504. (1,13п.л. / 0,26п.л.)

5. Чулин Н. А., Гэн Кэ Кэ. Планирование маршрута на основе облачно-точечной карты и улучшенного муравьиного алгоритма // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 6. С. 80-88. (0,56п.л. / 0,28п.л.)

6. Гэн Кэ Кэ, Чулин Н.А. Интегрированная навигационная система для беспилотных летательных аппаратов с возможностью обнаружения и изоляции неисправностей // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. №12. С. 182-206. (1,19п.л. / 0,63п.л.)

7. Гэн Кэ Кэ. Алгоритмы стабилизации и управления полетом квадрокоптера // Молодежный научно-технический вестник. 2014. №11. С:35-48. (0,88п.л. / 0,88п.л.)

8. Гэн Кэ Кэ, Чулин Н. А. Многорежимный контроллер стабилизации для автоматического управления траекторным движением квадрокоптера // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 12-3. С. 428-435; (0,50п.л. / 0,25п.л.)

9. Гэн Кэ Кэ, Чулин Н.А. Метод реконструкции облачно-точечной карты окружающей среды на основе монокулярного компьютерного зрения в режиме реального времени // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 12-3. С. 437-442. (0,375п.л. / 0,19п.л.)

10. Geng Ke ke, Liu Wei, Tan Liguo. A fuzzy controller: Using monocular computer vision to see and avoid obstacle for quadcopter. Proceedings of ICIPE 2015, Moscow. 2015. P. 26-32. (0,45 п.л. / 0,27 п.л.)

11. KeKe Geng. An improved EKF-SLAM algorithm for mobile robot // International scientific journal. 2016. №2. С. 74-77. (0,31п.л. / 0,17п.л.)

12. Geng K. K., Chulin N. A. Applications of Multi-height Sensors Data Fusion and Fault-tolerant Kalman Filter in Integrated Navigation System of UAV // Procedia Computer Science. 2017. № 103. P. 231-238.

13. Гэн Кэ Кэ, Чулин Н.А. Многорежимный алгоритм управления квадрокоптером // Одиннадцатый Международный симпозиум «Интеллектуальные системы»: Труды одиннадцатого международного симпозиума. Москва. 2014. С. 250-255. (0,39 п.л. / 0,19 п.л.)

14. Гэн Кэ Кэ, Чулин Н.А. Алгоритм обнаружения движущихся объектов для системы управления полетом квадрокоптера //Труды VIII международной научно-практической конференции «Инженерные системы - 2015». Москва. 2015. С. 185-190. (0,38 п.л. / 0,19п.л.)

15. Гэн Кэ Кэ. Алгоритм навигации для квадрокоптера на основе алгоритма 3D-EKF-SLAM // Тезисы докладов второй всероссийской научно-технической конференции "Навигация, наведение и управление летательными аппаратами". Москва. 2015. С. 133-136. (0,38 п.л. / 0,19п.л.)

16. Гэн Кэ Кэ, Чулин Н.А. Локальное планирование маршрута в неизвестной среде на основе муравьиного алгоритма и облачно-точечной карты // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. Санкт-Петербург. 2015. С. 286-289 (0,38 п.л. / 0,19п.л.)