

УДК 519.71: 629.05

На правах рукописи

Тань Лиго

**ПЛАНИРОВАНИЕ МАРШРУТА ПОЛЁТА
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЧАСТИЧНО-ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО
ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

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

Научный руководитель: **Фомичев Алексей Викторович**
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»

Официальные оппоненты: **Хранилов Валерий Павлович**
доктор технических наук, профессор,
профессор ФГБОУ ВПО «Нижегородский
государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева»

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

Ведущая организация: АО «Раменское приборостроительное
конструкторское бюро»

Защита состоится «14» июня 2016 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана» по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613м.

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

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д. 10, ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.02.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.02
кандидат технических наук, доцент

И.В. Муратов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в России, Китае, США, Евросоюзе и других странах затрачивается много усилий для развития перспективного направления летательных аппаратов – беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Разработка и применение БПЛА требует решения ряда важных проблем, одной из которых является обеспечение его автономного полёта. Для обеспечения автономного полёта БПЛА необходимо решить следующие ключевые задачи: планирование маршрута полёта (ПМП) предварительно перед запуском БПЛА и в процессе его полёта; управление траекторным движением и стабилизация БПЛА в процессе полёта; определение координат местоположения БПЛА в пространстве, т.е. навигация.

Результаты исследований, посвященные способам ПМП БПЛА различных типов, изложены в работах ученых: Li Chunhua, Gao Hui, Hu Yu, Gao Jinyuan, Wang Lei, Wang Yingxun, Han Zhigang, Qu Yaohong, Zheng Changwen, Канатникова А.Н., Крищенко А.П., Ткачева С.Б., Хачумова В.М., Лебедева А.А., Степаняна К.В., Миллера А.Б., Миллера Б.М., Яковлева К.С., Макарова Д.А., Баскина Е.С., Кабанова С.А., Asseo S.J., Vasudevan C., Ganesan K., Vachtsevanos G., Bortoff S.A., Szczerba R.J., Pellazar M.B. и др. Однако большинство алгоритмов, описанных в данной литературе, могут обеспечить ПМП не в реальном режиме времени. Кроме того, данные алгоритмы ПМП не могут обеспечить соответствующее управляющее воздействие для бортовой системы управления полётом БПЛА, что является важным требованием для аппаратов автономного типа.

Анализ литературы показал, что решить указанные выше проблемы возможно с помощью алгоритмов прогнозирования маршрута полёта, построенных на основе метода частично-целочисленного линейного программирования (ЧЦЛП). Впервые способ комбинирования метода ЧЦЛП и управления с прогнозирующими моделями (УПМ) для случая планирования двумерного маршрута полёта ЛА был изложен в статье T. Schouwenaars и B.D. Moor. Данная диссертационная работа посвящена решению задачи планирования пространственного маршрута полёта БПЛА в реальном времени в условиях ограничений и неопределённости, связанных с движением в разнообразных сложных условиях рельефа местности: в условиях горного рельефа, над пустынной, лесопарковой, водной средой, а также в городской среде, среди зданий с плотной застройкой.

Для полёта по запланируемому маршруту при известной структуре системы управления БПЛА требуется решение задач, обеспечивающих точную навигацию и управление траекторией полёта. Повышение точности решения задачи навигации БПЛА с использованием существующих технических средств является одним из важных направлений исследований при разработке БПЛА. Поскольку в целях сокращения финансовых затрат БПЛА гражданского назначения должны многократно использоваться, то для гарантированного выполнения целевых задач на борту аппарата необходимо установить комплекс технических средств, включающий точную инерциальную навигационную систему (ИНС) и приемник СНС.

Результаты исследований, посвященные способам построения комплексных инерциально-спутниковых систем навигации (КИССН), изложены в работах следующих авторов: Zhou Zhigang, Yi Jiong, Zhang Zonglin, Yu Jie, Zhou Weidong, Zeng Jing, Wang junshan, Qing Yongyuan, Микрина Е.А., Харина Е.Г., Рогалева А.П., Ларионова П.В., Тазьбы А.М., Бабича О.А., Неусыпина К.А., Салычева О.С., Дмитриева С.П., Степанова О.А., Кошаева Д.А., Черногорова А.В., Красовского А.А., Поспелова Г.С., Михалева И.А., Романенко Л.Г., Ярлыкова М.С., Schanzer G., Rodgers R.M., Weber D.J., Carlson N.A., Paiell R.A., Phillips R.E., Dahlen B.R. и др. На основе анализа литературы в диссертации предложено для БПЛА многократного применения использовать КИССН. БПЛА, движущиеся в сложной окружающей среде, часто не могут успешно принять навигационную информацию от СНС в короткий отрезок времени. Точность КИССН резко уменьшается. Для повышения надёжности и жизнеспособности БПЛА предлагается на основе существующих измерительных датчиков улучшить алгоритм КИССН со слабосвязанной схемой комплексирования.

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

Целью диссертационной работы является разработка алгоритма планирования маршрута полёта БПЛА и алгоритма обработки информации КИССН для обеспечения гарантированного облёта препятствий, находящихся на маршруте полёта, в реальном режиме времени и с высокой точностью навигации. Для достижения поставленной цели требуется решить следующие основные задачи:

- разработать алгоритм планирования пространственного маршрута полёта БПЛА в реальном режиме времени в условиях городской среды и горной местности;

- построить математическую модель препятствий в городской среде и горной местности;

- разработать ограничения на динамические свойства БПЛА и облёт препятствий для задачи ПМП;

- разработать математическую модель движения и модели измерительных средств БПЛА (БИНС и СНС);

- разработать алгоритм быстрой компенсации навигационной информации КИССН для решения проблемы отказа БИНС при отсутствии сигналов системы СНС;

- исследовать с помощью моделирования функционирование разработанных алгоритмов ПМП и навигации БПЛА в условиях ограничений.

Методы исследований. При решении задач, рассматриваемых в диссертации, были использованы методы частично-целочисленного линейного программирования, управления с прогнозирующими моделями, математического анализа и моделирования, теории математической статистики, оптимального управления и линейной фильтрации. В процессе математического моделирования применялись следующие вычислительные системы: AMPL (A Mathematical Programming Language), решатель CPLEX, среда моделирования MATLAB.

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

1. Разработан алгоритм планирования пространственного маршрута полёта БПЛА в реальном режиме времени в условиях сложного РМ. Учёт в целевой функции дополнительного ограничения на изменение ускорения позволил сделать более стабильное изменение динамики БПЛА, что повышает точность отслеживания запланированного маршрута полёта.

2. Для решения задачи планирования полёта БПЛА разработана математическая модель, использующая теорию ЧЦЛП, учитывающая ограничения на его динамические свойства и облет препятствий в условиях городской среды. При проведении линеаризации для невыпуклых ограничений применяется симплексный M -метод.

3. Разработана математическая модель, использующая сочетание метода триангулированной нерегулярной сети (ТНС) и теории ЧЦЛП для решения задачи планирования полёта БПЛА, учитывающая ограничения на его динамические свойства и огибание рельефа горной местности. Данный подход в процессе линеаризации невыпуклых ограничений не требует использования традиционного симплексного M -метода, что в значительной степени сокращает время решения задачи, поэтому предложенный метод в большой степени пригоден для ПМП БПЛА в реальном режиме времени.

4. Разработана структура и математическая модель КИССН для БПЛА. Предложен эффективный алгоритм, использующий модификации фильтра Калмана, для быстрой компенсации погрешностей навигационной информации КИССН, вызванных кратковременной потерей сигналов от системы СНС.

Практическая ценность работы заключается в том, что предложенные способы, математические модели, учитывающие ограничения на облет препятствий носят универсальный характер и могут применяться (и применяются) в задачах планирования и исследования маршрутов движения для различных наземных подвижных объектов и БПЛА других типов. Предложен метод обработки информации для КИССН, учитывающий кратковременное пропадание сигналов от СНС, обеспечивающий надежность полёта БПЛА и способный повысить его живучесть и точность навигации.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационного исследования, а также разработанное программно-алгоритмическое обеспечение были применены как в учебном процессе на кафедре «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана, так и при реализации конкретного технического проекта в научно-технической компании с ограниченной ответственностью «Чжэнтан» (Пекин, КНР).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде конференций: International Conference on Information Processing and Control Engineering (ICIPCE-2015) (Москва, 2015 г.); XXXVIII, XXXIX Академические чтения по космонавтике (Москва, 2014, 2015 г.г.); XIX, XX и XXI Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» (Нижний Новгород, 2013-2015 г.г.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 10 научных работ, из них 4 статьи – 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 201 страница, в том числе 84 рисунка и 31 таблица.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Алгоритм планирования пространственного маршрута полёта БПЛА в реальном режиме времени в условиях сложного РМ с учетом обхода препятствий разного типа.

2. Математическая модель для решения задачи планирования полёта БПЛА, использующая теорию ЧЦЛП, учитывающая ограничения на его динамические свойства и облет препятствий в условиях городской среды.

3. Математическая модель, использующая сочетание метода ТНС и теории ЧЦЛП, для решения задачи планирования полёта БПЛА, учитывающая ограничения на его динамические свойства и огибание горного РМ.

4. Структура и математическая модель КИССН для БПЛА, а также эффективный алгоритм, использующий модификации фильтра Калмана для быстрой компенсации погрешностей навигационной информации КИССН, вызванных кратковременной потерей сигналов от системы СНС.

5. Результаты исследований алгоритмов ПМП и КИССН БПЛА.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и важность темы диссертации, для чего проведен анализ современных тенденций в области разработки ПМП и навигации БПЛА, 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. Представлен вид и количество публикаций, описана структура и объем диссертации.

В первой главе проведен обзор существующих методов ПМП БПЛА. На основе анализа литературы показано, что с помощью комбинирования методов УПМ и ЧЦЛП можно повысить эффективность решения задачи ПМП в реальном режиме времени.

Метод ЧЦЛП особенно подходит для решения задачи ПМП БПЛА при наличии препятствий, поскольку ограничения на динамические свойства ЛА могут выражаться в виде условий, ограничивающих непрерывные переменные, а ограничения при обходе препятствий могут выражаться в виде условий, ограничивающих целочисленные переменные.

Если полный маршрут полета из начальной точки до целевой точки вычисляется однократно, то объем вычислений может быть достаточно большим. Кроме того, данный процесс вычислений ограничивается возможностями бор-

тогового компьютера для обработки информации – допустимым временем вычислений и объёмом оперативной памяти. С другой стороны, если окружающая среда, где проходит маршрут полёта, является частично известной, необходимо проводить дальнейшее исследование с целью её уточнения, поэтому вычислить полный маршрут полета однократно практически невозможно.

На основе метода УПМ задача ПМП БПЛА рассчитывается с течением времени постепенно, причём каждый участок маршрута полёта БПЛА определяется в результате решения задачи оптимизации на ограниченном интервале времени. Таким образом, метод УПМ позволяет сократить время вычислений.

На рисунке 1 приведена схема процесса решения задачи ПМП БПЛА при наличии препятствий.

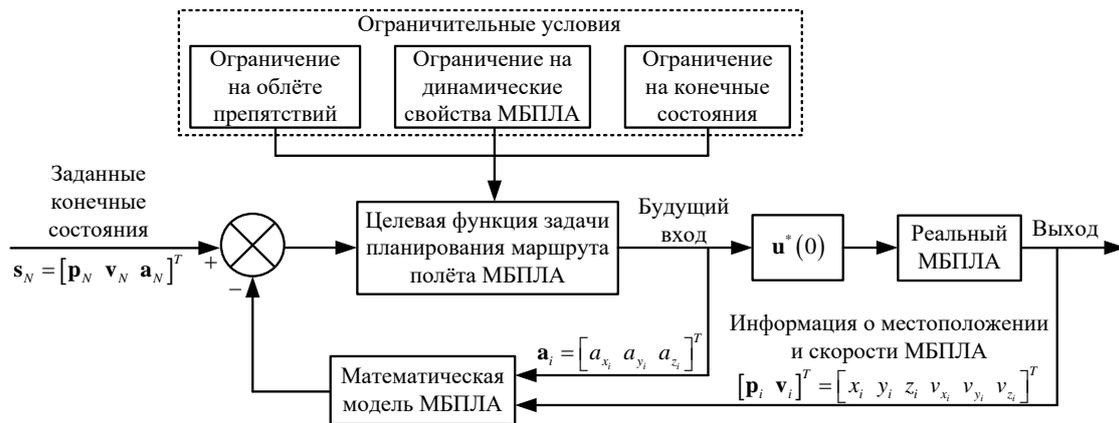


Рис. 1. Схема процесса решения задачи ПМП БПЛА

Динамические уравнения движения БПЛА имеют вид:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} 2 \cdot \mathbf{I}_3 & \Delta t \cdot \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{O}_3 & 2 \cdot \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix}_i - \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \Delta t \cdot \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{O}_3 & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix}_{i-1} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} (\Delta t)^2 \cdot \mathbf{I}_3 \\ \Delta t \cdot \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \Delta \mathbf{a}_i \quad (1)$$

где \mathbf{I}_3 и \mathbf{O}_3 – 3×3 единичная и нулевая матрица; Δt – период выборки; i – некоторый текущий момент времени; $\mathbf{p}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ – вектор координат БПЛА; $\mathbf{v}_i = [v_x \ v_y \ v_z]^T$ – вектор скорости; $\mathbf{a}_i = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ – вектор ускорения; $\Delta \mathbf{a}_i = \mathbf{a}_i - \mathbf{a}_{i-1}$ – вектор изменения ускорения; $\mathbf{s}_i = (\mathbf{p}_i, \mathbf{v}_i)^T \in R^6$ – вектор состояния; $\mathbf{u}_i := \mathbf{a}_i \in R^3$ – вектор управления (входа).

Ограничения на динамические свойства БПЛА в плоскости $x - y$ и в проекциях на направление оси z имеют следующий вид:

$$\begin{cases} v_{\min} \leq \|\mathbf{v}_{xy}\|_2 \leq v_{\max}, & \|\mathbf{a}_{xy}\|_2 \leq a_{\max}, & \|\Delta \mathbf{a}_{xy}\|_2 \leq \Delta a_{\max}; \\ v_{z\min} \leq v_z \leq v_{z\max}, & a_{z\min} \leq a_z \leq a_{z\max}, & \Delta a_{z\min} \leq \Delta a_z \leq \Delta a_{z\max}. \end{cases} \quad (2)$$

Из первых трех уравнений (2) следует, что ограничения на динамику БПЛА являются нелинейными. Для того, чтобы приближённо описать ограничения в виде линейных неравенств используем вписанные многоугольники с Q сторонами (Рис. 2).

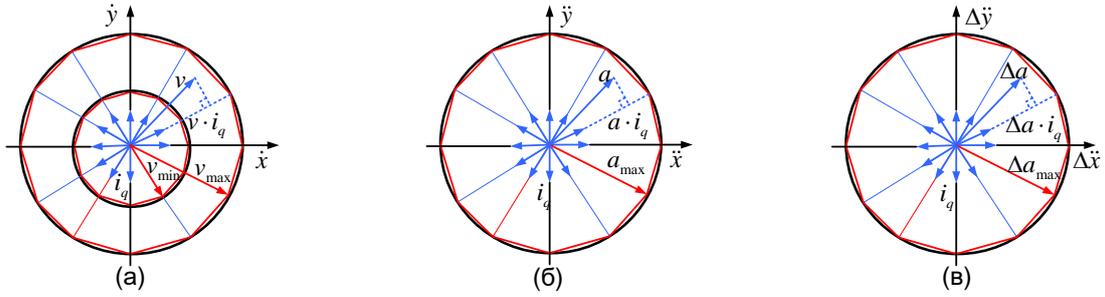


Рис. 2. Ограничения на динамические свойства:

а) на скорость б) на ускорение в) на изменение ускорения

Единичный орт радиуса-вектора правильного многоугольника:

$$i_q = [\cos(2\pi q/Q) \quad \sin(2\pi q/Q)]^T, \quad q = \overline{1, Q}$$

Первые три уравнения (2) преобразуются к виду:

$$\begin{cases} v_{\min} \leq v_x \sin(2\pi q/Q) + v_y \cos(2\pi q/Q) \leq v_{\max}, & q = \overline{1, Q} \\ a_x \sin(2\pi q/Q) + a_y \cos(2\pi q/Q) \leq a_{\max}, & q = \overline{1, Q} \\ \Delta a_x \sin(2\pi q/Q) + \Delta a_y \cos(2\pi q/Q) \leq \Delta a_{\max}, & q = \overline{1, Q} \end{cases} \quad (3)$$

Ограничение на минимальную скорость преобразуется к линейному виду:

$$\begin{cases} v_{\min} - (\dot{x} \sin(2\pi q/Q) + \dot{y} \cos(2\pi q/Q)) \leq M c_q, & q = \overline{1, Q} \\ \sum_{q=1}^Q c_q \leq Q - 1 \end{cases} \quad (4)$$

Условия (2) – (4) описывают ограничения на динамические свойства БПЛА.

Конечное состояние обеспечивает устойчивость полёта БПЛА и имеет вид:

$$S_{k+N|k} = \{ \mathbf{s}_{k+N|k} : \mathbf{u}_{k+N|k} = \mathbf{0}_{3 \times 1}, \Delta \mathbf{u}_{k+N|k} = \mathbf{0}_{3 \times 1} \} \quad (5)$$

где N – длина временной области прогноза и управления; $\mathbf{0}_{3 \times 1}$ – нулевая матрица.

Городское препятствие представляет блочное здание в форме параллелепипеда.

Математическое описание **ограничения на обход городских препятствий** имеет вид:

$$\{ (x, y, z) \in R^3 : x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, y_{\min} \leq y \leq y_{\max}, z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \}$$

Для i -го шага ПМП ($i = \overline{1, N}$) ограничения при обходе препятствий имеют вид:

$$\begin{cases} x_i - x_{\min} \leq M b_{i1}; & y_i - y_{\min} \leq M b_{i2}; & z_i - z_{\min} \leq M b_{i3}; \\ -x_i + x_{\max} \leq M b_{i4}; & -y_i + y_{\max} \leq M b_{i5}; & -z_i + z_{\max} \leq M b_{i6}; \\ \sum_{j=1}^6 b_{ij} \leq 5; & b_{ij} \in (0, 1), & j = \overline{1, 6}. \end{cases} \quad (6)$$

где M – достаточно большая по величине константа, причём её значение больше, чем доступное максимальное значение левой части первых шести неравенств (6); b_{ij} – логическая переменная ("0" или "1").

Математическая модель ограничения на огибание горного РМ. Поверхность горного РМ моделируется на основе метода ТНС. На рисунке 3 показано, что

в пространстве непрерывная поверхность РМ $h(x, y)$ состоит из T неперекрестных и неперекрывающихся треугольников с m вершинами $p_i(x_i, y_i, z_i), i = \overline{1, m}$. Здесь $z = h(x, y)$ – кусочно аффинная функция.

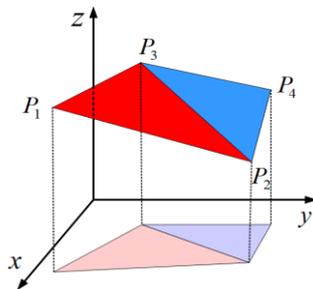


Рис. 3. Схема моделирования горного РМ

Пусть $p_k(x_k, y_k, z_k)^T$ – положение БПЛА в k -й момент времени. $(x_k, y_k, h_k)^T$ – координата точки на поверхности РМ, находящейся под БПЛА в этот момент времени.

Ограничение на огибание РМ имеет вид:

$$z_k \geq h_k + d, \quad \forall k \quad (7)$$

где d – размер самого БПЛА.

Координаты x_k, y_k и h_k описываются в виде комбинации трехмерных фигур:

$$\begin{cases} x_k = \sum_{i=1}^m \lambda_{ik} x_i; & y_k = \sum_{i=1}^m \lambda_{ik} y_i; & h_k = \sum_{i=1}^m \lambda_{ik} h_i; \\ \lambda_{ik} \geq 0, \quad \forall i; & \sum_{i=1}^m \lambda_{ik} = 1, \end{cases} \quad (8)$$

В качестве переменных решения для описания ограничения на огибание РМ используется комбинация неопределенных коэффициентов $\lambda_{ik}, i = \overline{1, m}$.

Для k -го момента времени введём следующее ограничение:

$$\begin{cases} \lambda_{ik} \leq \sum_{t \in D_i} b_{tk}, & i = \overline{1, m} \\ \sum_{t=1}^T b_{tk} = 1 \end{cases} \quad (9)$$

где D_i – множество порядковых номеров треугольников с точками в вершинах P_i ; $b_{tk}, t = \overline{1, T}$ – логическая переменная ("0" или "1"), причём каждая b_{tk} соответствует одной треугольной подобласти, которая находится на поверхности горного РМ.

Формулы (7)–(9) являются ограничениями на огибание горного РМ.

Наконец рассматривается математическая модель и алгоритмы решения задачи инерциальной навигации для случая применения БИНС на борту БПЛА, математические модели ошибок измерительных датчиков и модель ошибок БИНС, а также математическая модель измерений и модель ошибок для СНС, которые служат теоретической основой при разработке алгоритмических решений для КИССН.

Во второй главе проведён выбор и линеаризация целевой функции для задачи ПМП БПЛА в условиях неопределённости:

– целевая функция для задачи планирования оптимального маршрута полёта БПЛА **в условиях городской среды** имеет вид:

$$J_N = \sum_{i=0}^{N-1} a \|\mathbf{s}_{k+i|k} - \mathbf{s}_F\|_1 + \sum_{i=0}^{N-1} b \|\mathbf{u}_{k+i|k}\|_1 + \sum_{i=1}^{N-1} c \|\Delta \mathbf{u}_{k+i|k}\|_1 + d \|\mathbf{s}_{k+N|k} - \mathbf{s}_F\|_1 \quad (10)$$

– целевая функция для задачи планирования оптимального маршрута полёта БПЛА **в условиях сложного горного РМ** имеет вид:

$$J_N = a \sum_{i=0}^{N-1} \|\mathbf{s}_{k+i|k} - \mathbf{s}_F\|_1 + b \sum_{i=0}^{N-1} \|\mathbf{u}_{k+i|k}\|_1 + c \sum_{i=1}^{N-1} \|\Delta \mathbf{u}_{k+i|k}\|_1 + d \|\mathbf{s}_{k+N|k} - \mathbf{s}_F\|_1 + e \sum_{i=1}^N z_{k+i|k} \quad (11)$$

где N – количество шагов прогноза и управления; k – текущий момент времени; i – промежуток времени от текущего момента; $\mathbf{s}_{k+i|k}$, $\mathbf{u}_{k+i|k}$ и $\Delta \mathbf{u}_{k+i|k}$ – прогнозируемый вектор состояния, вектор входа и вектор изменения ускорения в момент времени $k+i$; \mathbf{s}_F – конечное состояние; $\mathbf{s}_{k+N|k}$ – последнее состояние во временной области планирования.

Коэффициенты a , b , c , d и e являются неотрицательными весовыми коэффициентами, величину которых в процессе полёта возможно регулировать для того, чтобы удовлетворить соответствующие различные требования к характеристикам оптимального маршрута полёта.

В уравнениях (10) и (11) первое и второе слагаемые учитывают влияние фактора неприбытия БПЛА в заданную точку и затраты топлива, соответственно; третье слагаемое учитывает влияние изменения ускорения, с которым движется объект, обеспечивающего его устойчивый полёт, причём предполагается, что в процессе движения динамические свойства БПЛА не подвержены радикальным изменениям. Четвёртое слагаемое учитывает влияние конечного состояния, т.е. координат и скорости в конечной точке маршрута. В уравнении (11) пятое слагаемое учитывает влияние высоты полёта, которое удерживает траекторию, близкую к местности.

С помощью вспомогательных переменных $\omega_{k+i|k}$, $i = \overline{1, N}$, $\bar{u}_{k+i|k}$, $i = \overline{0, N-1}$ и $\Delta \bar{u}_{k+i|k}$, $i = \overline{1, N-1}$, целевые функции (10) и (11) могут быть преобразованы к следующему линейному виду, соответственно:

$$J_N = a \sum_{i=1}^{N-1} \omega_{k+i|k} + b \sum_{i=0}^{N-1} \bar{u}_{k+i|k} + c \sum_{i=1}^{N-1} \Delta \bar{u}_{k+i|k} + d \omega_{k+N|k},$$

$$J_N = a \sum_{i=1}^{N-1} \omega_{k+i|k} + b \sum_{i=0}^{N-1} \bar{u}_{k+i|k} + c \sum_{i=1}^{N-1} \Delta \bar{u}_{k+i|k} + d \omega_{k+N|k} + e \sum_{i=1}^N z_{k+i|k}.$$

Чтобы избежать столкновения в ситуации с препятствием, на пути перехода необходимо добавить соответствующее количество линейно-интерполяционных узлов. В этом случае переменная \mathbf{p}_k в уравнениях, описывающих ограничения при обходе городских препятствий (6), заменяется выражением:

$$\mathbf{p}_{k-1} + \frac{l}{L} (\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_{k-1}), \quad l = \overline{1, L},$$

где L – количество точек интерполяции между двумя соседними точками пути.

Если между соседними участками траектории существует определённый угол θ (Рис. 4), то БПЛА, движущийся по траектории, обязательно разворачивается. В этом случае невозможно поддерживать режим его прямолинейного полёта. Метод последовательного соединения радиусных сегментов траектории для всех участков полёта связан с обработкой сглаживанием. Кроме того, должна быть гарантия касания между текущим радиусным сегментом и двумя соседними сегментами траектории так, чтобы обеспечить гладкость всей траектории полёта. Точка касания (a или c) должна находиться на соседнем сегменте траектории так, как показано на рисунке 4.

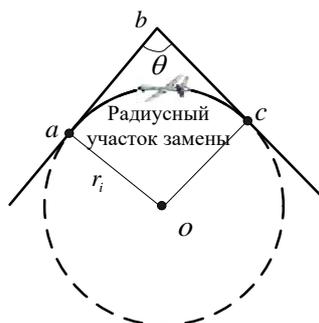


Рис. 4. Схема замены ломаной линии радиусным сегментом

Для задачи обеспечения гладкости траектории полёта в сложных условиях горного РМ не существует ситуация с углом среза или препятствием на пути перехода, поэтому в этом случае используется только метод последовательного соединения радиусных сегментов траектории.

В третьей главе разработан алгоритм обработки информации в КИССН для обеспечения полёта БПЛА в условиях ограничений. На рисунке 5 представлена структура модели КИССН со слабосвязанной схемой комплексирования.

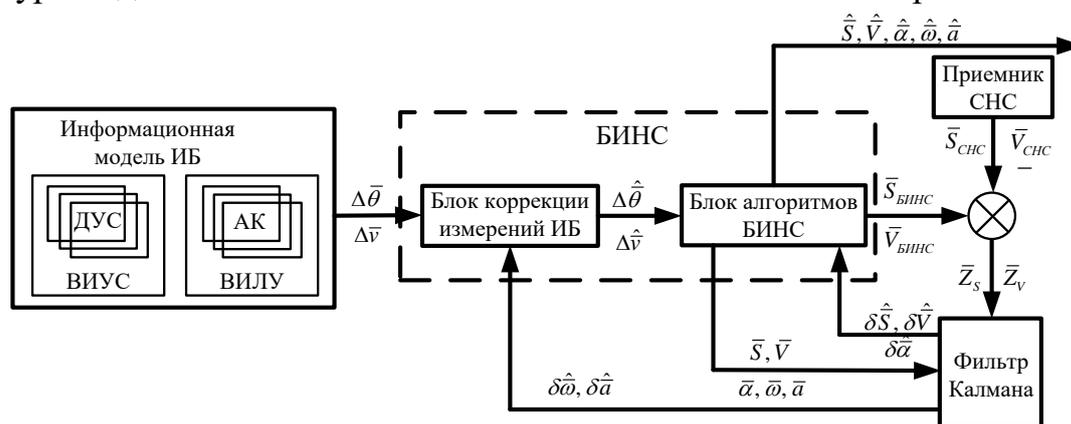


Рис. 5. Структура модели КИССН со слабосвязанной схемой комплексирования

Здесь обозначено: ВИУС – векторный измеритель угловой скорости; ВИЛУ – векторный измеритель линейного ускорения; ДУС – датчик угловой скорости; АК – акселерометр; ИБ – инерциальный блок; $\Delta\bar{\theta}$ – приращение вектора угла кажущегося поворота; $\Delta\bar{v}$ – приращение вектора кажущейся скорости; \bar{s} , \bar{v} , $\bar{\alpha}$ – навигационные параметры БПЛА (вектор координат, вектор скорости и вектор параметров ориентации); $\bar{\omega}$ – вектор абсолютной угловой скорости

БПЛА; \bar{a} – вектор кажущегося ускорения БПЛА; $\delta\hat{\omega}$ – вектор оценок инструментальных погрешностей ДУС; $\delta\hat{a}$ – вектор оценок инструментальных погрешностей акселерометров.

Поскольку БПЛА может осуществлять полёты, например, в горной среде, то из-за наличия сложного РМ, плохих природно-климатических условий и т.п. аппарат часто не может успешно принять сигналы СНС, что влияет на режим работы КИССН в целом и качество решения задачи навигации. Для решения указанной проблемы, разработан алгоритм быстрой компенсации погрешностей навигационной информации КИССН.

В случае, когда информация о результатах измерений является полной, уравнения фильтра Калмана имеют вид:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}; \\ \hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}); \\ \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}; \\ \mathbf{P}_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \Gamma_{k-1}^T; \\ \mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k)^T + \mathbf{K}_k \mathbf{R}_k \mathbf{K}_k^T. \end{cases} \quad (12)$$

где $\hat{\mathbf{X}}_k$ – оценка вектора состояний системы; $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$ – предварительная оценка вектора состояния системы на текущий шаг по итоговой оценке состояния с учётом предыдущего шага; $\Phi_{k|k-1}$ – матрица перехода состояний; \mathbf{K}_k – матрица коэффициентов усиления; $\mathbf{P}_{k|k-1}$ – ковариационная матрица для экстраполированного вектора состояния; \mathbf{Z}_k – вектор измерений; Γ_{k-1} – матрица перехода шума системы; \mathbf{H}_k – матрица измерений; \mathbf{Q}_{k-1} – ковариационная матрица случайных воздействий; \mathbf{P}_k – ковариационная матрица оценки вектора состояния; \mathbf{R}_k – ковариационная матрица шума измерений; \mathbf{I} – единичная матрица.

В том случае, когда пропадает сигнал от СНС, с помощью фильтра Калмана не удаётся получить полную информацию об измерениях. Если же на борту БПЛА установить достаточно прецизионную БИНС, то можно считать, что величина среднеквадратической ошибки оценки вектора состояния \mathbf{P}_k и шум на входе измерительной системы является малыми величинами. Поэтому в процессе вычислений, значение среднеквадратической ошибки одношагового прогноза состояния $\mathbf{P}_{k|k-1}$ также являются малой величиной, а значение коэффициента усиления фильтра \mathbf{K}_k являются существенно малой величиной, поэтому коэффициентом усиления фильтра можно в общем случае пренебречь. Тогда, значение оценки вектора состояний системы $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ и среднеквадратической ошибки состояния системы \mathbf{P}_{k-1} можно оценить с помощью алгоритма фильтра в момент времени $k-1$.

В случае пропадания сигнала СНС можно непосредственно использовать выходные параметры БИНС, чтобы в реальном режиме времени рекуррентно вычислить значение оценки вектора состояния системы $\hat{\mathbf{X}}_k$ в момент времени k . Тогда уравнение фильтра имеет вид:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \mathbf{\Phi}_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}; \\ \hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}; \\ \mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{\Phi}_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{\Phi}_{k,k-1}^T + \mathbf{\Gamma}_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{\Gamma}_{k-1}^T; \\ \mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k|k-1}. \end{cases} \quad (13)$$

Матрицы $\mathbf{\Phi}_{k,k-1}$ и $\mathbf{\Gamma}_{k-1}$ можно непосредственно вычислить, применяя уравнения состояния системы. В тоже время, используя выходные величины БИНС $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ и значения оценки ошибки БИНС \mathbf{P}_{k-1} в предыдущий момент времени $k-1$ для рекуррентного вычисления, возможно найти значение оценки вектора состояний системы $\hat{\mathbf{X}}_k$.

В соответствии с условием получения целостной информации об измерениях, при решении уравнений ошибок КИССН необходимо проводить переключение между формулами (12) и (13).

В четвертой главе сначала проводится моделирование разработанного алгоритма в условиях городской среды. В качестве конкретного примера БПЛА был рассмотрен летательный аппарат экспериментального типа, который создан в Харбинском политехническом университете (КНР). При моделировании применяются следующие весовые коэффициенты: $a = b = c = d = 0,25$. Маршрут полёта БПЛА из начальной точки с координатами (700 -900 50) в целевую точку с координатами (1650 750 350), проходит через несколько важных промежуточных точек.

Например, маршрут полёта БПЛА должен проходить через две промежуточные точки маршрута с координатами (820 750 350) и (1200 -750 150). Результаты моделирования показаны на рисунке 6. На рисунке 7 в увеличенном масштабе показан локальный участок полученного оптимального пространственного маршрута полёта БПЛА.

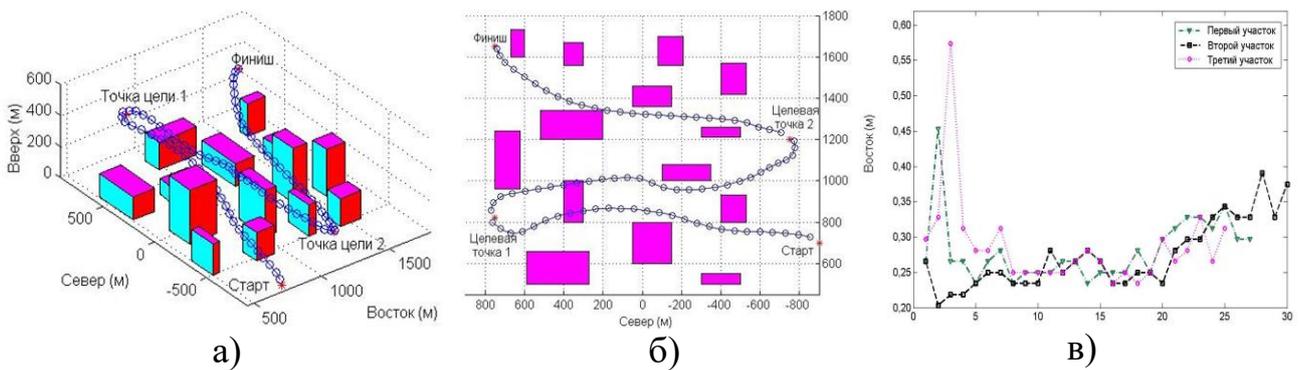


Рис. 6. Схема маршрута полёта БПЛА:

- а) трёхмерный маршрут полёта б) проекция маршрута полёта
в) время решения для каждой точки маршрута

Из рисунка 6, следует, что время решения для каждого участка пути меньше заданного значения периода выборки 1с. Полученный маршрут полёта является оптимальным и удовлетворяет требованию решения задачи в реальном режиме времени. Рисунки 6, а и б подтверждают, что данный маршрут позволяет успешно избежать все препятствия на пути движения к целевой точке.

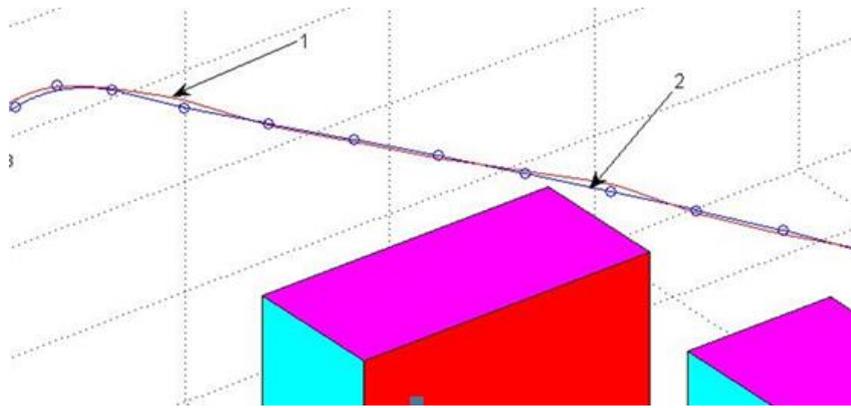


Рис. 7. Локальный участок маршрута полёта БПЛА в увеличенном масштабе
 1 – фактический маршрут полёта БПЛА (красная кривая),
 2 – вычисленный маршрут полёта БПЛА (синяя кривая)

На рисунке 7 фактический маршрут полёта БПЛА не совпадает с вычисленным маршрутом полёта. Основными причинами расхождения являются ошибка навигационной системы в определении местоположения БПЛА, а также эффект сглаживания оптимальной траектории.

Чтобы сравнить влияние весовых коэффициентов целевой функции на результаты планирования оптимального маршрута полёта БПЛА, было задано несколько вариантов весовых коэффициентов, которые приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Весовые коэффициенты целевой функции задачи ПМП БПЛА

Весовые коэффициенты	Вариант			
	1	2	3	4
a	0,7	0,1	0,1	0,1
b	0.1	0.7	0.1	0.1
c	0.1	0.1	0.7	0.1
d	0.1	0.1	0.1	0.7

Результаты моделирования приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

Суммарное время полёта, пройденная дистанция и конечный промах в целевой точке

Характеристика полёта	Вариант			
	1	2	3	4
Время полёта (c)	8.2531	6.5344	7.4844	6.9531
Расстояние полёта (m)	1940.7142	2071.5317	2119.2769	2125.3314
Промач (m)	46.2591	47.7834	44.4090	35.4288

Из анализа результатов моделирования можно сделать вывод о том, что с помощью предложенного алгоритма ПМП возможно в реальном режиме времени высокоэффективно вычислять оптимальный маршрут полёта с учетом манёвренных свойств БПЛА, а также проводить его обработку путём сглаживания. При этом, регулируя величины соответствующих весовых коэффициентов (a , b , c и d), можно удовлетворить разным требованиям, предъявляемым к характеристикам полёта.

В диссертации были проведены дополнительные эксперименты, чтобы определить приемлемый диапазон изменения каждого весового коэффициента целевой функции для задачи планирования оптимального маршрута полёта БПЛА.

Далее проводится моделирование разработанного алгоритма в условиях сложного горного РМ. При моделировании применяются следующие весовые коэффициенты: $a = b = c = d = e = 0,2$. Точки с координатами (150 150 1800) и (1050 900 1800) – это начальная и целевая точка задачи полёта.

Чтобы сравнить время решения задачи, с помощью разработанного алгоритма рассмотрено два варианта модели рельефа местности.

Вариант 1. В случае использования данных о полном РМ, данные о высоте РМ заранее являются известными, а ГНС фиксируется. Кроме того, при расчёте необходимо учитывать каждый треугольник, который находится на ГНС.

Вариант 2. В случае использования данных об ограниченном РМ, данные о высоте рельефа являются неизвестными. Тогда с помощью технических средств, установленных на борту БПЛА (например, радиолокационная станция или видеочамера), в реальном режиме времени получают данные о рельефе местности, которая находится в пределах радиуса обнаружения (действия) технических средств, при этом ГНС динамично обновляется.

Для вариантов 1 и 2 оптимальный маршрут полёта БПЛА показан на рисунках 8 и 9, соответственно.

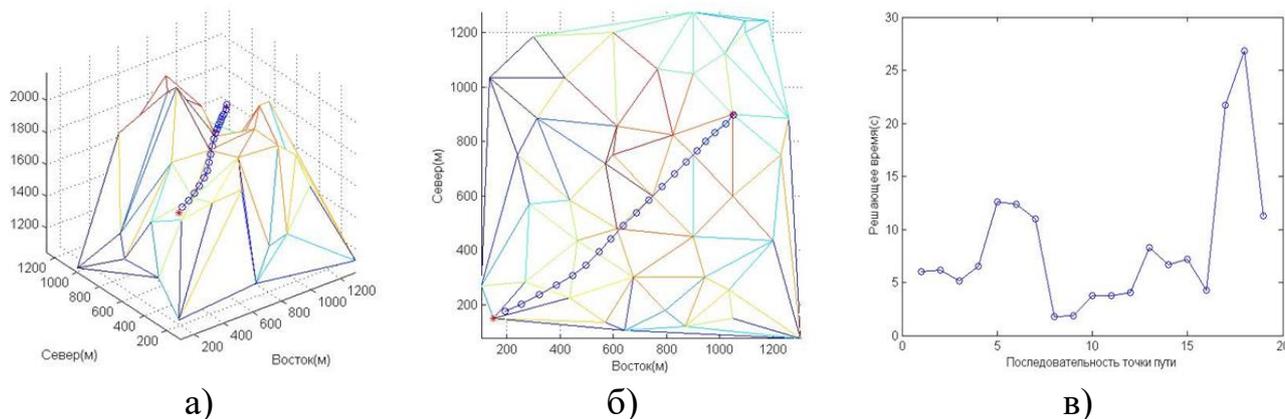


Рис. 8. Схема маршрута полёта БПЛА: а) пространственный маршрут полёта, б) проекция маршрута, в) время решения для каждой точки маршрута

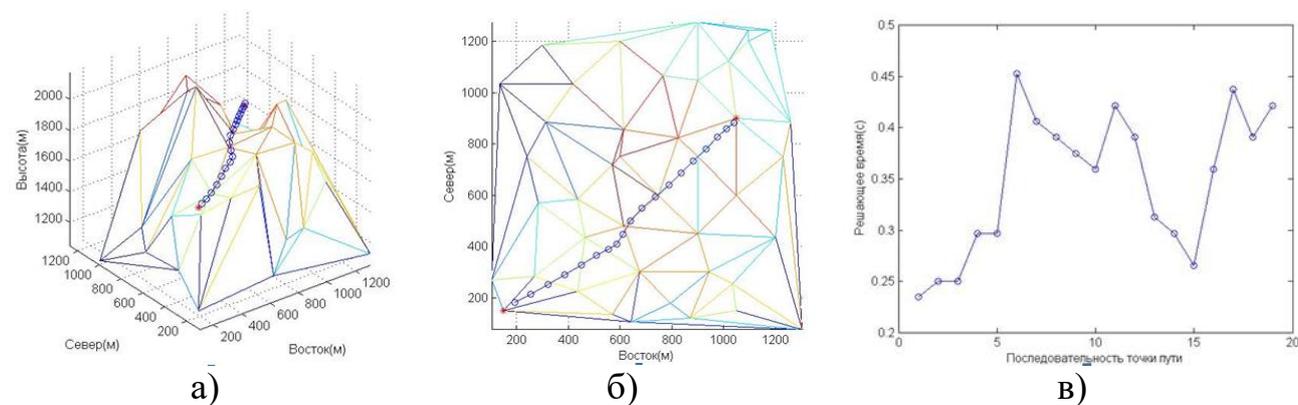


Рис. 9. Схема маршрута полёта БПЛА: а) пространственный маршрут полёта, б) проекция маршрута, в) время решения для каждой точки маршрута

Из результатов, показанных на рисунке 8, можно заметить, что время решения для каждой точки маршрута полёта превышает заданное время выборки 1 с. Тогда запланированный маршрут полёта является субоптимальным. Таким образом, полный РМ не подходит для ПМП в реальном режиме времени.

Из результатов, представленных на рисунке 9, можно заметить, что время решения для каждой точки пути существенно не превышает заданное время выборки 1 с, поэтому запланированный маршрут полёта является оптимальным. Таким образом, частный РМ пригоден для ПМП в реальном режиме времени.

Поскольку на случайном РМ существуют различные вершины и впадины, то он с достаточной степенью точности близко описывает реальные горные условия. Использование метода случайного смещения средней точки, позволяет создать область горного РМ размером 4 км × 4 км с разрешением в 45 м.

На рисунках 10 и 11 показаны результаты моделирования маршрута полёта БПЛА из начальной точки в целевую точку, который должен пройти через несколько промежуточных точек, например, через три точки.

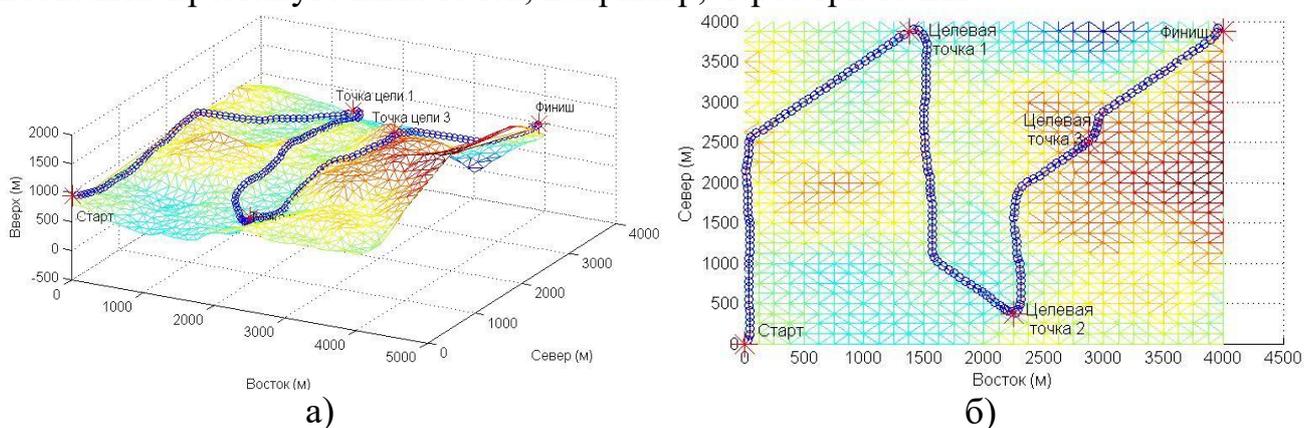


Рис. 10. Схема маршрута полёта БПЛА в условиях горной среды:
а) пространственный маршрут полёта, б) проекция маршрута полёта

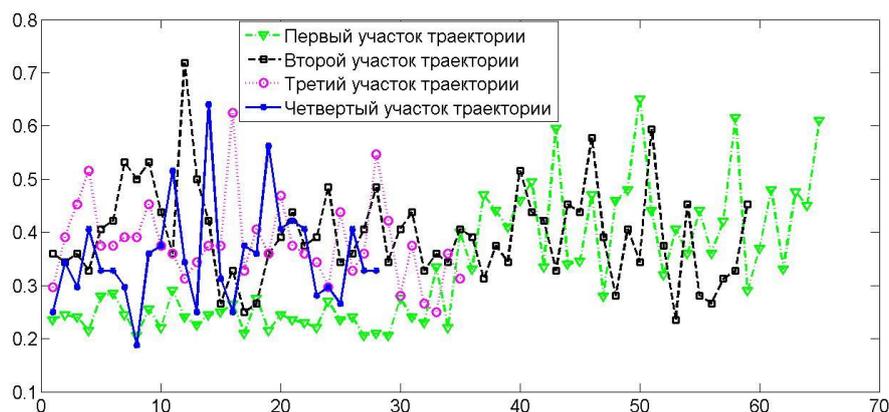


Рис. 11. Время решения для каждой точки пути всех участков полёта БПЛА

Из результатов, показанных на рисунке 11, следует, что время решения для каждого участка пути меньше заданного времени решения 1 с. На рисунках 10, а и б показано, что БПЛА успешно избежал все препятствия. Из результатов моделирования также следует, что при использовании частного РМ сложность самого алгоритма не зависит от размера РМ.

Наконец, проводилось моделирование алгоритма для повышения точности КИССН БПЛА. Влияние препятствий горного РМ на траекторное движение БПЛА, связанное с пропаданием сигналов СНС, учитывалось на следующих интервалах времени: 1800–2100 с, 2200–2400 с и 2500–2700 с. Ошибки измерения положения и скорости БПЛА по показаниям СНС с пропаданием сигналов показаны на рисунке 12. Результаты моделирования с учётом разработанного алгоритма показаны на рисунке 13.

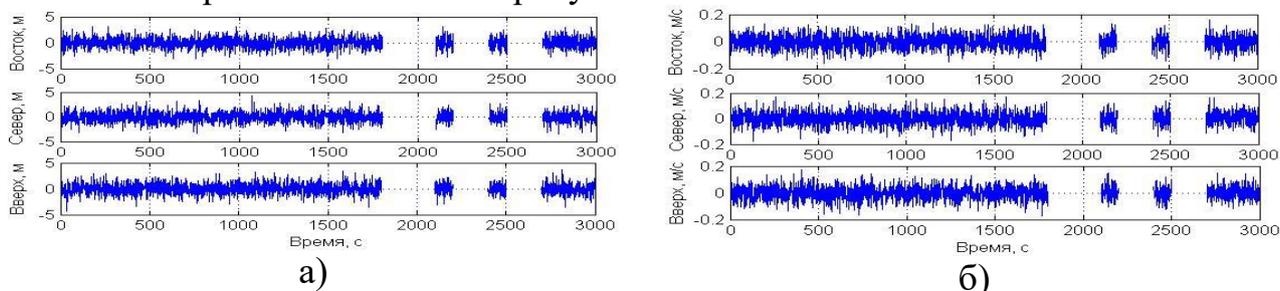


Рис. 12. Ошибки измерений по показаниям СНС:

а) ошибки измерения положения БПЛА б) ошибки измерения скорости БПЛА

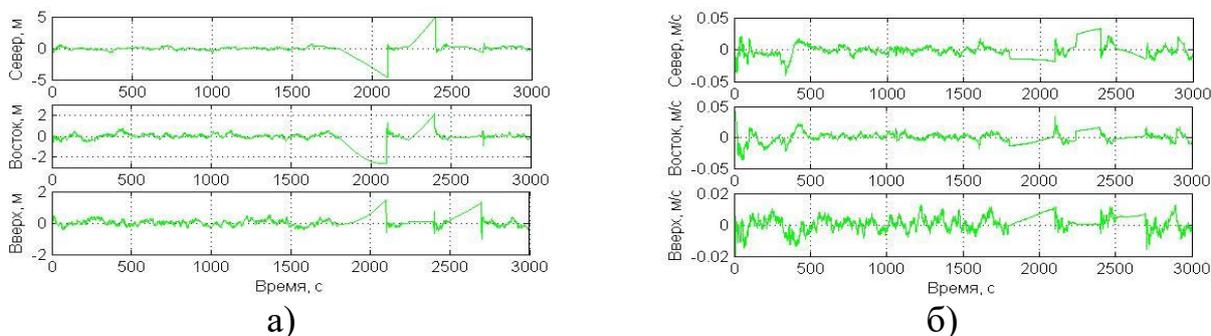


Рис. 13. Погрешности по алгоритму быстрой компенсации КИССН:

а) Погрешности положения БПЛА б) погрешности скорости БПЛА

Результаты моделирования (Рис 13) доказывают, что в заданных трёх промежутках времени, в связи с потерей сигнала СНС, КИССН не может принять измерительную информацию от этой системы. Поэтому в эти промежутки времени точность определения местоположения и скорости БПЛА по показаниям КИССН претерпевают определенное изменение и влияние. Например, в первых двух промежутках времени, ошибки положения и скорости в северном направлении становятся более существенными, причём максимальная величина ошибки положения в северном направлении достигает значений около ± 5 м. В момент, когда условия работы СНС вернулись к нормальным, КИССН смогла снова получить точные значения оценки, что позволило определить навигационные параметры (скорость и местоположение) с высокой точностью. Исходя из характера полученных результатов, видно, что за короткий промежуток времени ошибки положения и скорости КИССН могли контролироваться в допустимых пределах точности.

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель движения БПЛА в условиях ограничений (сложной окружающей среды), которая включает:

- динамические уравнения движения БПЛА;
- математическую модель препятствий при движении в городской среде и в условиях горной местности;
- ограничения на динамические свойства БПЛА;
- ограничения при обходе препятствий в условиях сложной городской среды и горной местности.

2. Разработан алгоритм планирования пространственного маршрута полёта БПЛА в реальном режиме времени в условиях городской среды, учитывающий ограничения на манёвренные свойства БПЛА, на конечное состояние полёта, а также на облёт городских препятствий.

3. Разработан алгоритм планирования пространственного маршрута полёта БПЛА в реальном режиме времени в условиях горной местности, учитывающий ограничения на манёвренные свойства БПЛА, на конечное состояние полёта, а также на огибание сложного рельефа местности.

4. Разработан алгоритм быстрой компенсации погрешностей навигационной информации КИССН для решения проблемы отказа БИНС при отсутствии сигнала системы СНС.

5. Результаты исследований с использованием имитационного моделирования в моделирующих системах AMPL, CPLEX и MATLAB показывают, что с помощью предложенного алгоритма планирования маршрута полёта в условиях ограничений возможно в реальном режиме времени и высокоэффективно вычислять оптимальный маршрут полёта с учётом маневренных свойств БПЛА, а также обрабатывать его сглаживанием.

6. Результаты исследований с использованием имитационного моделирования в моделирующей системе MATLAB показали, что в условиях неполной информации об измерениях данный алгоритм решил проблему отказа КИССН при кратковременном отсутствии сигнала системы СНС, поэтому точность навигации КИССН может поддерживаться в допустимых пределах.

Перспективы дальнейшей разработки темы.

1. Разработка математической модели и алгоритмов планирования пространственного маршрута движения БПЛА в составе группы в реальном режиме времени и в условиях разнообразных ограничений.

2. Разработка динамической модели БПЛА с учётом влияния вектора скорости ветра на его движение для повышения качества стабилизации полёта аппарата в турбулентной атмосфере.

3. Разработка модели движения и алгоритмов оптимального управления БПЛА на этапах взлёта и посадки с учётом влияния вектора скорости ветра, а также в условиях возникновения аварийных ситуаций.

4. Разработка алгоритмов функционирования КИССН на длительных временных интервалах.

РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Тань Лиго, Фомичев А.В, Лю Ян. Решение задачи планирования полета малогабаритного беспилотного летательного аппарата в условиях городской среды // Автоматизация и современные технологии. 2015. № 7. С. 19-24. (0,37п.л. / 0,21п.л.).
2. Тань Лиго, Фомичев А.В., Гэн Кэкэ. Решение задачи планирования полета в реальном режиме времени малогабаритного беспилотного летательного аппарата по пространственной траектории в условиях сложного рельефа местности // Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. Журнал. 2015. № 11. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/822109.html>. (1,25п.л. / 0,63п.л.).
3. Фомичев А.В, Тань Лиго Разработка алгоритма быстрой компенсации погрешностей комплексированной инерциально-спутниковой системы навигации малогабаритных БПЛА в условиях сложной среды // Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. Журнал. 2015. № 10. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/821641.html>. (1,15п.л. / 0,53п.л.).
4. Гэн Кэкэ, Тань Лиго, Чулин Н.А. Планирование маршрута для квадрокоптера в неизвестной среде на основе монокулярного компьютерного зрения // Автоматизация и современные технологии. 2015. № 12. С. 14-19. (0,37п.л. / 0,13п.л.).
5. Geng Keke, Liu Wei, Tan Ligu. A fuzzy controller: Using monocular computer vision to see and avoid obstacle for quadcopter. Proceedings of ICIPCE 2015, Moscow. 2015. P. 26-32. (0,45 п.л. / 0,17 п.л.).
6. Тань Лиго, Фомичев А.В. Планирование траектории БПЛА при помощи метода управления с прогнозирующими моделями // Актуальные проблемы Российской космонавтики: Труды XXXVIII академических чтений по космонавтике. Москва. 2014. С. 489-491. (0,19 п.л. / 0,12 п.л.).
7. Тань Лиго, Фомичев А.В. Разработка комплексированной навигационной системы для обеспечения полёта малогабаритных БПЛА в условиях сложного рельефа // Актуальные проблемы Российской космонавтики: Труды XXXIX академических чтений по космонавтике. Москва. 2015. С. 424-425. (0,13 п.л. / 0,07 п.л.).
8. Тань Лиго, Фомичев А.В. Анализ проблем в задачах навигации и управления перспективными беспилотными летательными аппаратами // Научные материалы XIX Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ-2013. Нижний Новгород. 2013. С. 302-303. (0,13 п.л. / 0,07 п.л.).
9. Тань Лиго, Фомичев А.В. Комплексная система навигации для перспективных беспилотных летательных аппаратов // Научные материалы XX Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ-2014. Нижний Новгород. 2014. С. 422-423. (0,13 п.л. / 0,07 п.л.).
10. Тань Лиго, Фомичев А.В. Планирование маршрута полёта малогабаритных БПЛА в условиях неопределённости с облётом препятствий // Научные материалы XXI Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ-2015. Нижний Новгород. 2015. С. 261-263. (0,19 п.л. / 0,12 п.л.).