

На правах рукописи

Ефимов Алексей Витальевич

ПЛАНИРОВАНИЕ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО  
АППАРАТА ПРИ МОНИТОРИНГЕ НАЗЕМНОЙ ОБСТАНОВКИ В  
ЗАДАННОМ РЕГИОНЕ С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ БОКОВОГО  
ВЕТРА

Специальность 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации  
(информатика, управление и вычислительная техника)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2012

Работа выполнена на кафедре «Системы автоматического и интеллектуального управления» Московского авиационного института (национального исследовательского университета, МАИ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ Лебедев  
Георгий Николаевич

Официальные оппоненты:

д.т.н., профессор, старший научный  
сотрудник РСК «МИГ», заслуженный деятель  
науки РФ Синевич Григорий Михайлович,  
д.т.н., профессор, зам. начальника отдела  
ОАО «МИЭА» Зайцева Наталия  
Александровна

Ведущая организация: ОАО «НИИ Кулон»

Защита состоится 19 ноября 2012 г. на заседании диссертационного  
совета Д212.125.11 при Московском авиационном институте  
(национальном исследовательском университете) «МАИ» по адресу  
125993, А-80, ГСП-3, Москва, Волоколамское ш., 4, зал заседаний  
Ученого Совета МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

к.т.н., доцент

Горбачев Ю.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность работы.* Существующие в настоящее время подходы к решению задачи планирования маршрута полета в первую очередь относятся к процессу поочередного облета и наблюдения неподвижных объектов. Известно множество методов маршрутизации, начиная от метода ветвей и границ, и заканчивая нейросетевыми алгоритмами планирования, когда в исходных данных указаны координаты местоположения наблюдаемых объектов.

Однако в этих методах недостаточное внимание уделено ограниченным динамическим возможностям летательного аппарата (ЛА), а их учет приводит к сильным изменениям плана облета объектов, когда на каждом шаге планирования в исходных данных, кроме объектов, нужно иметь в виду направление и значение скорости самого ЛА. Эта особенность также характерна и для беспилотной авиации с тем отличием, что, в случае внезапных изменений динамической обстановки, перепланирование полета должно осуществляться без участия человека.

Еще большие трудности возникают при планировании облета мобильных объектов. Во-первых, для попадания очередного подвижного объекта в окрестность или «окно» наблюдения бортовой аппаратуры беспилотного летательного аппарата (БЛА) необходимо прогнозировать его движение, а для этого в исходных данных объекта нужно учитывать не только исходные координаты местоположения объекта, но и вектор скорости его движения. Во-вторых, более существенное осложнение состоит в том, что в случае нарушения не самого первоначального маршрута облета, а графика полета, например, из-за действия ветра, время прогнозирования меняется, а

значит, и новое местоположение пунктов требует повторного перепланирования маршрута.

В итоге учет векторов скорости БЛА и наземных объектов требует новых подходов к решению задачи планирования полета, которые малоизученны и являются актуальными.

*Целью данной диссертационной работы* является повышение эффективности планирования полета БЛА с учетом динамических свойств как самого ЛА, так и наземных объектов, если они движутся в заданных направлениях.

Для достижения этой цели решены следующие задачи:

1. Сформулирована постановка задачи и найдено приближенное аналитическое решение при вычислении области притяжения (или приоритетного выбора очередного объекта наблюдения) при облете неподвижных объектов, учитывая при этом направление вектора скорости БЛА и ограничения бокового маневра;
2. Получено новое правило приоритетного альтернативного выбора одного из подвижных объектов с учетом не только его близости, но и направления движения;
3. Исследовано влияние ветра на процесс планирования, и показано, что, в первую очередь, его нужно учесть как при прогнозе полета БЛА, так и непосредственно при управлении полетом, чтобы минимизировать вызванный ветром промах при пролете над планируемым объектом наблюдения. Для этой цели сформирован идентификатор ветровых возмущений, введенный в контур управления боковым движением БЛА;
4. Составлена и отлажена программа на ЭВМ для оперативного планирования маршрута облета неподвижных и мобильных

наземных объектов, и с помощью моделирования показана высокая эффективность ее работы.

В работе *на защиту выдвинуты следующие научные положения:*

1. Алгоритм вычисления области притяжения для приоритетного выбора очередного неподвижного объекта при заданном текущем направлении полета БЛА;
2. Алгоритм вычисления области притяжения для приоритетного выбора очередного подвижного объекта наблюдения при заданных направлениях его движения и полета БЛА;
3. Идентификатор путевого угла БЛА и угла бокового ветра, формирующий необходимые управляющие сигналы в контуре управления БЛА при горизонтальном полете;
4. Программа оперативного планирования полета БЛА при наблюдении как мобильных, так и неподвижных объектов.

*Научная новизна* выдвинутых положений определяется следующим:

1. Алгоритму приоритетного выбора неподвижных объектов соответствует область притяжения в виде эллипса, а не круга, как это принято в известном «жадном» алгоритме. При этом главная ось эллипса направлена по вектору скорости БЛА, а его другие параметры вычисляются аналитическим путем в квадратурах и зависят от заданного радиуса кривизны бокового маневра БЛА;
2. Алгоритму приоритетного выбора подвижных объектов также соответствует эллипс, главная ось которого направлена в упреждающую точку встречи БЛА с объектом, найденную с помощью процедуры прогноза;

3. Параметры эллипсов притяжения найдены с помощью специального метода рабочей точки для динамического программирования, в окрестности которой для различных полетных ситуаций вычислены ординаты риска, позволившие найти новое решение в квадратурах;
4. Идентификатор параметров бокового движения ЛА и действующего на него ветра сформирован при модификации фильтра Калмана путем «замораживания» его переменных коэффициентов и отличается тем, что с его помощью определяется с высокой точностью сила ветра. Это позволяет скомпенсировать его влияние на полет БЛА по заданной траектории, что важно при наблюдении заданных трасс;
5. Программа планирования полета отличается тем, что при прогнозировании точки встречи вычисляются не только координаты упреждения, но и время достижения БЛА очередного объекта, а это время автоматически входит в расчеты прогнозируемого движения остальных объектов. Поэтому программа планирования формирует не только маршрут, но и график движения, что является новым элементом;

*Достоверность полученных результатов* определяется следующим. Алгоритмы маршрутизации сформированы с помощью научно-обоснованного метода динамического программирования, при этом найденное решение в виде эллипсов имеет ясный физический смысл – чем ближе объекты наблюдения к полосе, ориентированной по вектору скорости БЛА, тем выше их приоритет включения в план. Идентификатор найден с помощью метода оптимальной калмановской фильтрации, обеспечивающей наименьшие среднеквадратичные ошибки в оценке как измеряемых, так и неизменяемых параметров, что

соответствует найденным оценкам путевого угла и силы бокового ветра.

Все полученные параметры алгоритмов планирования и идентификации были проверены моделированием на ЭВМ, результаты которого подтверждают достоверность полученных оценок.

*Практическая ценность работы* состоит в том, что разработанная программа планирования полета БЛА создает принципиально новую возможность прогнозирования полета над контролируемыми мобильными объектами, а использование идентификатора в контуре управления боковым движением БЛА позволяет значительно снизить влияние бокового ветра на пролет БЛА по заданной траектории над контролируемым наземным объектом, который попадает в «окно» наблюдения с максимальной вероятностью.

Достигнутый технический эффект подтвержден актом о внедрении на предприятии ОАО «НИИ Кулон» результатов хозяйственной НИР, проводимой кафедрой 301 МАИ в 2011 году.

#### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе** проведен обзор существующих методов построения маршрута полета летательных аппаратов:

1. Метод полного перебора всех возможных вариантов маршрута;
2. Жадные алгоритмы;
3. Построение маршрута полета с помощью генетических алгоритмов;
4. Методы, использующие постоянное патрулирование местности;

Показаны достоинства и недостатки этих методов, приведены примеры их использования. Также в этой главе упомянут тот факт, что в настоящее время в открытом доступе отсутствуют методы построения маршрута полета в случае, когда пунктами маршрута являются движущиеся объекты, за исключением метода полного перебора и производных от него методов, непригодных для выполнения в реальном масштабе времени. Приведены примеры методов, которые предназначены для наблюдения за движущимися объектами в небольшой области, но не являющиеся полноценными методами построения маршрута. Показана актуальность задачи построения маршрута полета летательного аппарата, указаны цели работы. Отражены основные положения, выносимые на защиту и их научная новизна, достоверность и практическая ценность.

**Во второй главе** описан процесс разработки метода построения маршрута БЛА при наблюдении за стационарными наземными объектами.

В этой главе приняты некоторые допущения, при которых решалась поставленная задача, в частности:

1. Движение БЛА осуществляется на постоянной высоте с постоянной скоростью;
2. Ограничением, которое накладывается на динамику БЛА, является минимальный радиус разворота;

Выбран критерий оптимальности маршрута, выражающийся в условии минимума суммарного времени, затраченного на маршрут.

При разработке предложенного метода был использован метод рабочей точки, описанный в [1], суть которого заключается в вычислении функции минимального риска  $F_j$  для различных альтернатив в ситуациях, близких к границам переключения при

отклонениях «влево и вправо» от рабочей точки, в которой нельзя отдать предпочтение ни одной альтернативе.

Приведено выражение для вычисления функции риска (1)

$$\begin{aligned}
 F_j = & \frac{r_j}{V\Delta} + (\beta_1 + \gamma_1 x + \psi_{12} z + \psi_{13} \alpha + \lambda z \alpha) \frac{x_j - x}{r_j} V + (\beta_2 + \gamma_2 z + \psi_{12} x + \psi_{23} \alpha + \lambda x \alpha) \frac{z_j - z}{r_j} V + \\
 & + (\beta_3 + \gamma_3 \alpha + \psi_{13} x + \psi_{23} z + \lambda x z) \frac{\alpha_j - \alpha}{r_j} V = \frac{r_j}{V\Delta} + (\beta_1 + \gamma_1 x + \psi_{12} z + \psi_{13} \alpha + \lambda z \alpha) \frac{\Delta x}{r_j} V + \\
 & + (\beta_2 + \gamma_2 z + \psi_{12} x + \psi_{23} \alpha + \lambda x z) \frac{\Delta z}{r_j} V + (\beta_3 + \gamma_3 \alpha + \psi_{13} x + \psi_{23} z + \lambda x z) \frac{\Delta \alpha}{r_j} V
 \end{aligned} \quad (1)$$

Это выражение получено путем представления функции Беллмана (2) степенным рядом

$$\begin{aligned}
 -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \min_j \left\{ f_{oj} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \dot{x}_j + \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \dot{z}_j + \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha} \dot{\alpha}_j \right\} = \\
 = \min_j \left\{ f_{oj} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \frac{x_j - x}{r_j} V + \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \frac{z_j - z}{r_j} V + \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha} \frac{\alpha_j - \alpha}{r_j} V \right\} = F_j(x, z, \alpha)
 \end{aligned} \quad (2)$$

Затем, согласно методу рабочей точки, для различных полетных ситуаций вычислены так называемые ординаты риска, с помощью которых впоследствии найдены коэффициенты  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$ ,  $\psi_{ik}$  выражения для вычисления функции риска  $F_j$ .

С помощью моделирования получен геометрический облик контуров одинакового риска (рис 1.)

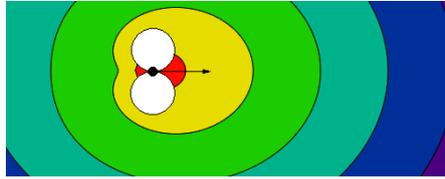


Рис. 1. Геометрическая интерпретация контуров одинакового риска

Далее проведена аппроксимация полученной функции риска эллипсом с целью упростить ее вычисление и снизить вычислительную нагрузку на бортовое оборудование. Полученное выражение для приближенного вычисления функции риска выглядит следующим образом (3):

$$F_j^* = r_j + \frac{\Delta x_j}{r_j} [-a + (K-1)b\varphi] + \frac{\Delta z_j}{r_j} [-Kb + (K-1)a\varphi] - \frac{ab\varphi(K-1)}{r_j} \quad (3)$$

где  $a$  и  $b$  – координаты центра,  $K$  – коэффициент «сжатия» его главных осей,  $\varphi$  – угол приращения,  $\Delta x_j$ ,  $\Delta z_j$  – приращения координат местоположения ЛА при перелете в пункт  $j$ . Приведены выражения для вычисления параметров эллипса.

После этого описан процесс построения маршрута полета БЛА с использованием полученной функции риска, который заключается в следующем. Попав в пункт  $(j-1)$ , строится прямоугольное окно заданного размера и внутри определяется состав попавших в него пунктов. Затем при заданных значениях  $x$ ,  $z$  и  $\alpha$  ЛА для каждого пункта  $j = 1 \dots M$  вычисляется поочередно функция риска  $F_j$  и определяется тот пункт, у которого значение  $F_j$  минимально. Затем вычисляется новый угол  $\alpha$  направления полета, при котором происходит пролет ЛА над новым пунктом. Далее, после перелета в этот пункт, указанная процедура в алгоритме повторяется.

В заключение главы проведено моделирование, показывающее эффективность предложенного метода и произведено сравнение с итерационным методом расчета времени, необходимого для перелета в указанный пункт. Сравнение показало, что предложенный метод имеет невысокую погрешность относительно итерационного метода (менее

5%), а время, затраченное на вычисления для одинакового набора объектов на несколько порядков меньше.

**В третьей главе** повторены вычисления, приведенные в главе 2 для подвижных объектов. В связи с этим, в дополнение к допущениям, приведенным во второй главе, введены новые допущения:

1. Наземные объекты движутся прямолинейно с постоянной скоростью.
2. Скорость объектов не превышает скорости БЛА

Для удобства вычислений был введен параметр  $K_j = \frac{V_{Lj}}{V}$  –

отношение скорости  $j$ -го объекта к скорости БЛА, причем  $K_j \ll 1$ .

Приведены вычисления ординат риска по методу рабочей точки. Число полетных ситуаций в данном случае оказалось больше по сравнению с неподвижными объектами, так как варьировалось еще и направление движения объектов.

Затем с помощью вычисленных ординат риска вычислены коэффициенты  $\beta_i, \gamma_i, \psi_{ik}$  выражения для вычисления функции риска  $F_j$  (1).

Путем моделирования была получена геометрическая интерпретация поверхности одинакового риска, показанная на рисунке 2. Было показано, что данная поверхность представляет собой «скрученный» эллиптический цилиндр, сечение которого есть эллипс, повернутый на угол, равный углу  $\alpha + \Delta\alpha_j K$ , где  $\alpha$  характеризует полет ЛА,  $\Delta\alpha_j$  – движение объекта.

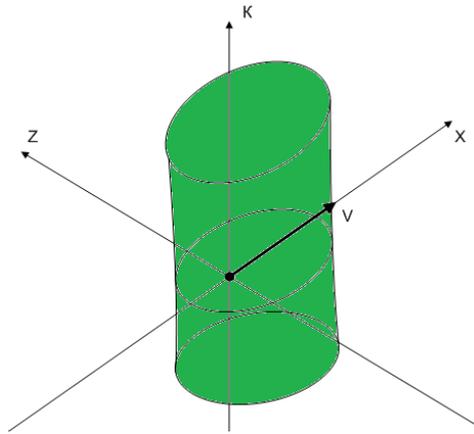


Рис. 2. Геометрическая интерпретация области притяжения в виде «скрученного» эллиптического цилиндра

При выборе очередного объекта явное предпочтение отдается тем объектам, которые находятся по пути направления полета, и во вторую очередь – объектам, движение которых соответствует сближению с ЛА. Объекты слева и справа менее предпочтительны, а последней по приоритету является часть региона в задней полусфере, что полностью соответствует физическому смыслу решаемой задачи.

Для уменьшения вычислительной сложности алгоритмов была также проведена аппроксимация по формуле:

$$F_j^* = r_j + \frac{\Delta x_j}{r_j} [-a + (M-1)b\varphi] + \frac{\Delta z_j}{r_j} [-Mb + (M-1)a\varphi] - \frac{ab\varphi(M-1)}{r_j} \quad (3)$$

где  $a$  и  $b$  – координаты центра,  $M$  – коэффициент «сжатия» его главных осей,  $\varphi$  – угол приращения,  $\Delta x_j$ ,  $\Delta z_j$  – приращения координат местоположения ЛА при перелете к объекту  $j$ .

Алгоритм, по которому предлагается производить построение маршрута, аналогичен алгоритму из главы 2.

Произведено моделирование, показывающее эффективность предложенного метода. Также произведено сравнение с итерационным методом вычисления времени, необходимого для перелета в указанный пункт. Как и в главе 2, сравнение показало высокую эффективность и быстрое действие предложенного алгоритма.

**В четвертой главе** показана необходимость оценки и учета бокового ветра при полете по маршруту, построенному с помощью методов, разработанных в предыдущих двух главах.

Приводится модель углового движения БЛА в боковом канале. Доказано, что хорошим вариантом для построения идентификатора будет фильтр Калмана, с помощью которого можно оценить недостающие параметры вектора состояния БЛА и использовать их в законе управления. Приведены уравнения идентификатора (4)

$$\begin{cases}
 \dot{\hat{\beta}} = Z^\beta \hat{\beta} + Z_{\omega_x}^{\omega_x} \hat{\omega}_x + Z_{\omega_y}^{\omega_y} \hat{\omega}_y + Z_{\gamma}^{\gamma} \hat{\gamma} + K_{\omega_x}^\beta (Z_{\omega_x} - \hat{\omega}_x) + K_{\omega_y}^\beta (Z_{\omega_y} - \hat{\omega}_y) + K_{\gamma}^\beta (Z_{\gamma} - \hat{\gamma}) + K_{\psi}^\beta (Z_{\psi} - \hat{\psi}) \\
 \dot{\hat{\omega}}_x = M_x^\beta \hat{\beta} + M_x^{\omega_x} \hat{\omega}_x + M_x^{\omega_y} \hat{\omega}_y + K_{\omega_x}^{\omega_x} (Z_{\omega_x} - \hat{\omega}_x) + K_{\omega_y}^{\omega_x} (Z_{\omega_y} - \hat{\omega}_y) + K_{\gamma}^{\omega_x} (Z_{\gamma} - \hat{\gamma}) + K_{\psi}^{\omega_x} (Z_{\psi} - \hat{\psi}) + M_x^{\delta_3} \delta_3 \\
 \dot{\hat{\omega}}_y = M_y^\beta \hat{\beta} + M_y^{\omega_x} \hat{\omega}_x + M_y^{\omega_y} \hat{\omega}_y + K_{\omega_x}^{\omega_y} (Z_{\omega_x} - \hat{\omega}_x) + K_{\omega_y}^{\omega_y} (Z_{\omega_y} - \hat{\omega}_y) + K_{\gamma}^{\omega_y} (Z_{\gamma} - \hat{\gamma}) + K_{\psi}^{\omega_y} (Z_{\psi} - \hat{\psi}) + M_y^{\delta_H} \delta_H \\
 \dot{\hat{\gamma}} = \hat{\omega}_x + K_{\omega_x}^{\gamma} (Z_{\omega_x} - \hat{\omega}_x) + K_{\omega_y}^{\gamma} (Z_{\omega_y} - \hat{\omega}_y) + K_{\gamma}^{\gamma} (Z_{\gamma} - \hat{\gamma}) + K_{\psi}^{\gamma} (Z_{\psi} - \hat{\psi}) \\
 \dot{\hat{\psi}} = \hat{\omega}_y + K_{\omega_x}^{\psi} (Z_{\omega_x} - \hat{\omega}_x) + K_{\omega_y}^{\psi} (Z_{\omega_y} - \hat{\omega}_y) + K_{\gamma}^{\psi} (Z_{\gamma} - \hat{\gamma}) + K_{\psi}^{\psi} (Z_{\psi} - \hat{\psi}) \\
 \dot{\hat{\Psi}} = Z_{\beta}^{\Psi} \hat{\beta} + Z_{\omega_x}^{\omega_x} \hat{\omega}_x + Z_{\gamma}^{\gamma} \hat{\gamma} + K_{\omega_x}^{\Psi} (Z_{\omega_x} - \hat{\omega}_x) + K_{\gamma}^{\Psi} (Z_{\gamma} - \hat{\gamma}) \\
 \hat{\beta}_w = \hat{\Psi} - \psi + \hat{\beta}
 \end{cases} \quad (4)$$

где  $Z_{\omega_x}$  – измеренная угловая скорость вращения БЛА вокруг оси  $Ox$ ;

$Z_{\omega_y}$  – измеренная угловая скорость вращения БЛА вокруг оси  $Oy$ ;  $Z_{\gamma}$

– измеренный угол крена БЛА;  $Z_{\psi}$  – измеренный угол курса БЛА;  $\delta_3$

– угол отклонения элеронов;  $\delta_H$  – угол отклонения рулей

направления;  $\hat{\beta}$ ,  $\hat{\omega}_x$ ,  $\hat{\omega}_y$ ,  $\hat{\gamma}$ ,  $\hat{\psi}$ ,  $\hat{\Psi}$ ,  $\hat{\beta}_W$  – оценки параметров вектора состояния;

$$Z^\beta, Z_{\beta}^{\omega_x}, Z_{\beta}^{\omega_y}, Z_{\beta}^{\gamma}, M_x^\beta, M_x^{\omega_x}, M_x^{\omega_y}, M_x^{\delta_{\Sigma}}, M_y^\beta, M_y^{\omega_x}, M_y^{\omega_y}, M_y^{\delta_H}$$

– коэффициенты математической модели движения БЛА;

$$K_{\omega_x}^\beta, K_{\omega_y}^\beta, K_{\gamma}^\beta, K_{\psi}^\beta, K_{\omega_x}^{\omega_x}, K_{\omega_y}^{\omega_x}, K_{\gamma}^{\omega_x}, K_{\psi}^{\omega_x}, K_{\omega_x}^{\omega_y}, K_{\omega_y}^{\omega_y}, K_{\gamma}^{\omega_y}, K_{\psi}^{\omega_y}, K_{\omega_x}^{\gamma}, K_{\omega_y}^{\gamma}, K_{\gamma}^{\gamma}, K_{\psi}^{\gamma}, K_{\omega_x}^{\psi}, K_{\omega_y}^{\psi}, K_{\gamma}^{\psi}, K_{\psi}^{\psi}$$

– составляющие матрицы коэффициентов  $K$  идентификатора.

Приведены результаты моделирования работы идентификатора при оценке силы бокового ветра (рисунок 3)

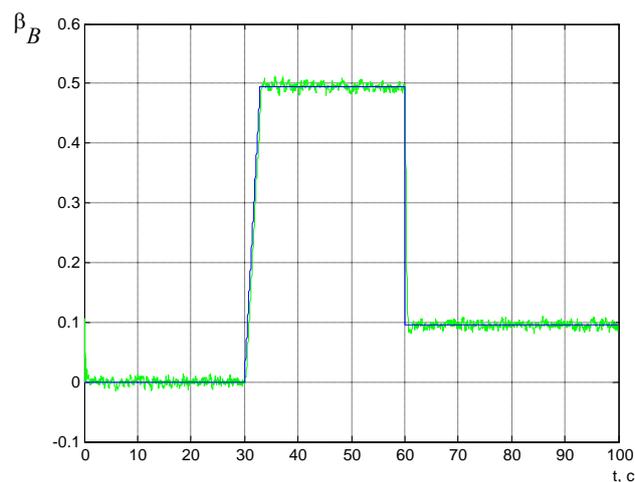


Рисунок 3. Результаты эксперимента с идеальной математической моделью БЛА (синяя линия – реальное значение силы ветра, зеленая – ее оценка)

Также приведены результаты работы бокового канала системы управления БЛА при воздействии порыва горизонтального ветра и сравнение с реакцией на тот же порыв системы без использования оценки силы бокового ветра в законе управления (рисунок 4).

Проведенное моделирование показало эффективность использования разработанного идентификатора в законе управления.

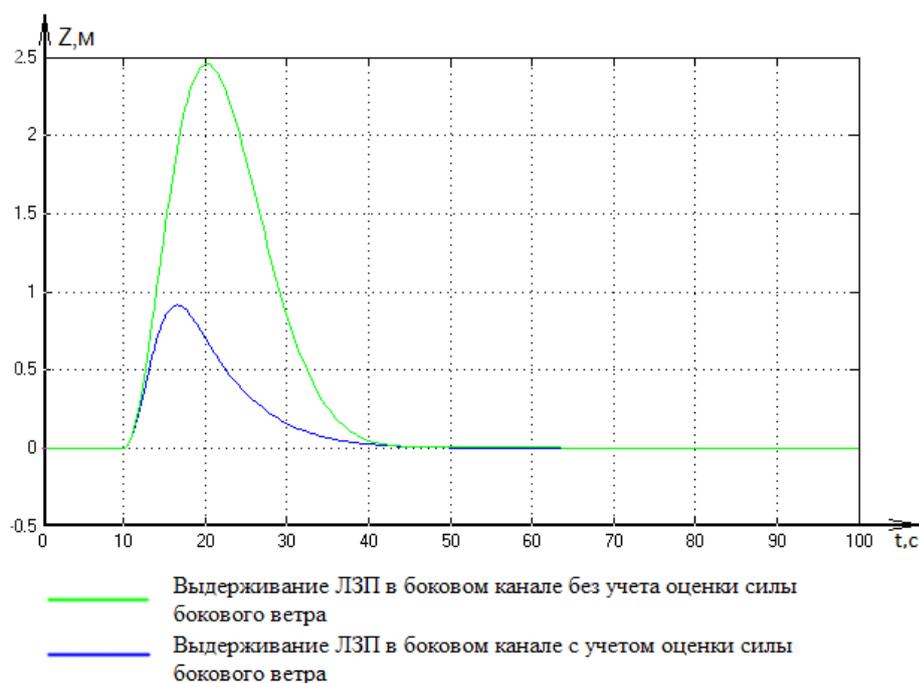


Рис.4. Результаты моделирования выдерживания линии заданного пути (ЛЗП) в боковом канале

**В пятой главе** описана разработанная программа для построения маршрута БЛА. Здесь описана архитектура программы, схема взаимодействия модулей. Программа состоит из следующих модулей:

1. Модуль ввода информации о ЛА и наблюдаемых объектах;
2. Модуль расчета маршрута облета наблюдаемых объектов;
3. Модуль пересчета координат;
4. Модуль эмуляции полета ЛА;
5. Модуль вывода информации на интерактивную карту местности.

Приведена структурная схема соединения модулей программы (рисунок 5)

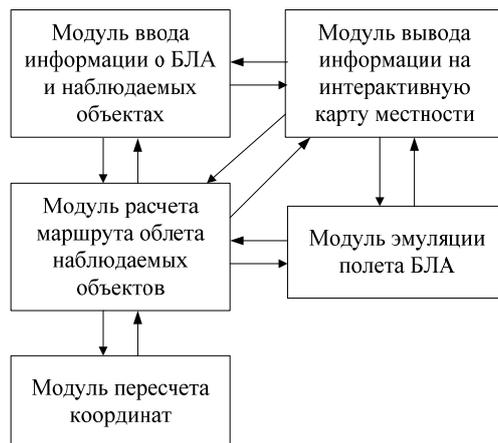


Рисунок 5 Схема взаимодействия модулей программы

Показан пользовательский интерфейс программы (рисунок 6)

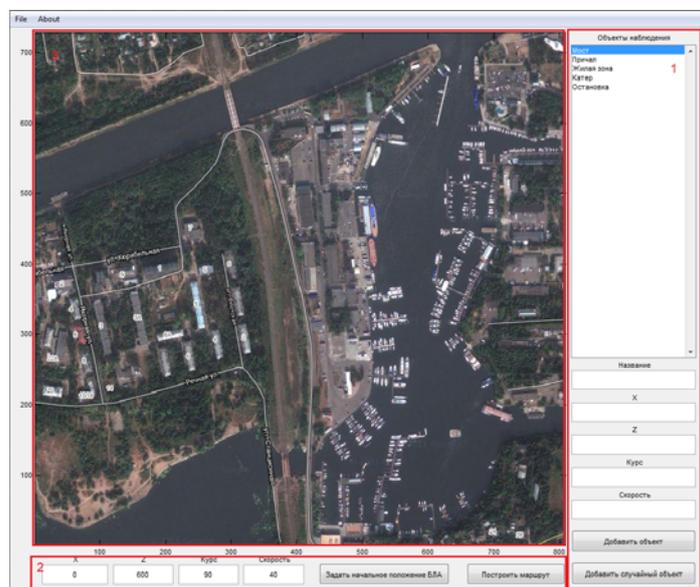


Рисунок 6. Пользовательский интерфейс программы

Для оценки эффективности работы программы было проведено сравнение результатов построения маршрута полета БЛА тремя методами: предложенным методом, методом полного перебора и «жадным» алгоритмом. Метод полного перебора был взят в качестве эталонного, как наиболее точный, а «жадный» алгоритм был выдвинут в качестве наиболее распространенного в настоящее время метода. Было промоделировано 3 различных сценария, в результате которых выявились недостатки каждого из методов. Результатом сравнения явилось то, что жадный алгоритм непригоден для использования, так как не учитывает динамику БЛА и дает слишком грубую оценку предполагаемого времени выполнения маршрута, а в некоторых сценариях предлагает неоптимальный маршрут. Метод полного перебора, напротив, дает наиболее точную картину происходящего, но время его выполнения непозволительно велико для работы на бортовом вычислителе в режиме реального времени. Предложенный алгоритм показал свою эффективность в данном моделировании, так как предложенный им маршрут и предполагаемое время его выполнения наиболее близки к результатам метода полного перебора, а время его выполнения невелико. Таким образом, он годен для работы в режиме реального времени.

**В заключении** изложены основные результаты работы.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В диссертационной работе была разработана система планирования маршрута БЛА при наблюдении за наземными объектами, использующая новые подходы к планированию маршрута. Основные результаты диссертационной работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Разработан и представлен новый подход к построению маршрута БЛА при наблюдении за стационарными и мобильными наземными объектами на основе метода динамического программирования;
2. Алгоритму приоритетного выбора подвижных объектов также соответствует эллипс, главная ось которого направлена в упреждающую точку встречи БЛА с объектом, найденную с помощью процедуры прогноза;
3. Показана необходимость прогнозирования движения мобильных объектов с помощью дифференциальных уравнений, описывающих это движение, что обеспечивает необходимый поворот области предпочтительного выбора объектов в виде эллипса на нужный угол;
4. Разработан метод оценки силы бокового ветра, позволяющий учесть его в законе управления БЛА и, тем самым, в значительной степени уменьшить влияние ветра на полет БЛА;
5. Предложена реализация программного комплекса, предназначенного для построения маршрута БЛА на основании данных о самом БЛА и об объектах наблюдения. С использованием данного программного комплекса доказана эффективность разработанных методов планирования маршрута и идентификации ветра.

Полученные результаты были использованы при проведении НИР МАИ для ОАО «НИИ Кулон», что подтверждено актом о внедрении.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Лебедев Г.Н., Ефимов А.В. Применение динамического программирования для маршрутизации облета неподвижных пунктов при мониторинге наземной обстановки в контролируемом регионе. Мехатроника, автоматизация, управление, М.: Новые технологии, 2012, №1, С 63 – 70.
2. Лебедев Г.Н., Ефимов А.В. Применение динамического программирования для маршрутизации облета мобильных объектов в контролируемом регионе. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2011, №6, - С. 234-241.
3. Лебедев Г. Н., Ефимов А. В., Михайлин Д. А. Оценка вектора состояния беспилотного летательного аппарата при наличии в объекте управления нелинейных элементов, Вестник Московского авиационного института, М.: МАИ, 2012, №1, С.12-16.
4. Лебедев Г. Н., Мирзоян Л. А., Ефимов А. В. Нейросетевое планирование групповых действий летательных аппаратов при наблюдении заданной группы подвижных наземных объектов, Мехатроника, Автоматизация, Управление, М: Новые технологии, №11, 2009, С. 60 – 65
5. Ефимов А.В., Гавриленко Ю.В., Собкина Е.М. Оценка точностных характеристик бесплатформенной инерциальной системы в составе навигационного контура. Навигация и управление движением. Материалы докладов XII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», СПб: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2010, С.147-152

