На правах рукописи

ГАНЕБНЫЙ Сергей Александрович

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ЗАДАЧАХ С НЕИЗВЕСТНЫМ УРОВНЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОМЕХИ

05.13.18 — математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург — 2008

Работа выполнена в отделе динамических систем Института математики и механики Уральского отделения РАН.

Научный руководитель:	кандидат физико-математических наук Пацко Валерий Семенович
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор Барабанов Андрей Евгеньевич, кандидат физико-математических наук Кукушкин Александр Петрович
Ведущая организация:	Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва

Защита состоится 10 декабря 2008 года в $15^{\underline{00}}$ на заседании диссертационного совета Д 212.286.10 по защите докторских и кандидатских диссертаций при ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А.М. Горького» по адресу:
620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51, комн. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А.М. Горького».

Автореферат разослан 10 ноября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук, профессор В.Г. Пименов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Диссертация посвящена разработке способа адаптивного управления для систем с неизвестным уровнем динамической помехи. В основе исследования лежат методы теории антагонистических дифференциальных игр.

Теория антагонистических дифференциальных игр интенсивно развивается с начала 60-х годов прошлого века. Решающий вклад в ее становление внесли Н.Н. Красовский, Л.С. Понтрягин, А.И. Субботин, R. Isaacs, M.G. Crandall, P.L. Lions, А.Б. Куржанский, Ю.С. Осипов, Б.Н. Пшеничный, А.Г. Ченцов, Ф.Л. Черноусько, L. Berkovitz, P. Bernhard, A. Blaquire, J.V. Breakwell, W.H. Fleming, G. Leitmann.

Существенные результаты получены в работах Э.Г. Альбрехта, В.Д. Батухтина, С.А. Брыкалова, Н.Л. Григоренко, П.Б. Гусятникова, М.И. Зеликина, А.Ф. Клейменова, А.В. Кряжимского, Н.Ю. Лукоянова, А.А. Меликяна, Е.Ф. Мищенко, М.С. Никольского, В.В. Остапенко, А.Г. Пашкова, Н.Н. Петрова, Е.С. Половинкина, Н.Н. Субботиной, В.Е. Третьякова, В.И. Ухоботова, В.Н. Ушакова, А.А. Чикрия, M. Bardi, T. Basar, I. Capuzzo-Dolcetta, R.J. Elliot, J. Lewin, A.W. Merz, G.J. Olsder, E. Roxin, J. Shinar, P. Soravia.

В настоящее время получено значительное продвижение в исследовании численных методов для антагонистических дифференциальных игр с геометрическими ограничениями на управления игроков. Такие методы развиваются для нелинейных дифференциальных игр в работах А.М. Тарасьева, А.А. Успенского, В.Н. Ушакова, P.M. Cardaliaguet, M. Falcone, M. Quincampoix, P. Saint-Pierre, для игр с линейной динамикой — в работах Н.Л. Григоренко, В.С. Пацко, Е.С. Половинкина.

Одной из основных в теории дифференциальных игр[1] является задача с фиксированным моментом окончания, в которой цель первого игрока — приведение фазового вектора системы в момент окончания на некоторое терминальное множество, цель второго игрока противоположна.

[1] Красовский Н.Н., Субботин А.И. Позиционные дифференциальные игры. — М.: Наука, 1974, 455 с.

Стандартные постановки предполагают задание геометрических ограничений на управляющие воздействия как первого, так и второго игроков. Отметим также, что позиционное управление первого игрока, осуществляющего наведение, использует максимум своих возможностей — управляющие воздействия берутся с границы множества, задающего геометрическое ограничение.

Естественной сферой применения математических методов теории управления и методов антагонистических дифференциальных игр являются задачи об управлении самолетом в условиях ветровых возмущений. В этих задачах (как и во многих других практических постановках) первый игрок трактуется как полезное управление, а второй игрок — как природная или информационная помеха. При использовании стандартного подхода возникает ряд вопросов. Во-первых, если ограничение на полезное управление, как правило, определяется вполне естественно (техническое ограничение на действие органов управления), то ограничение на природную помеху бывает сложно строго обосновать. Разработанные в рамках теории дифференциальных игр методы построения управления требуют задания обоих ограничений, и получаемое решение зависит от выбранных ограничений. Во-вторых, встает вопрос о целесообразности управления, всегда использующего максимум своих возможностей, так как природная или информационная помехи, вообще говоря, не являются антагонистами первому игроку. Они могут действовать оптимальным образом — в этом случае использование максимального управления оправдано, но в большинстве случаев их действие оптимальным не является, оно может быть достаточно слабым — в этом случае использование максимального допустимого управления является излишним.

В диссертации предложен метод управления, который, сохраняя идеологию гарантированных результатов, справляется с перечисленными проблемами. Как и ранее, по постановке задачи задано терминальное множество и оговорено ограничение на полезное управление. Какое-либо ограничение на действие помехи по постановке задачи не предполагается. Вместо этого, в рамках предложенного метода, выбирается множество, имеющее смысл ожидаемого «разумного» ограничения на помеху. С содержательной точки зрения метод обладает следующими свойствами: 1) если уровень помехи не превосходит заданный ожидаемый уровень, то обеспечивается гарантия выполнения цели игры — приведения движения на терминальное множество; 2) при этом, если действует помеха малого уровня, то достижение цели игры происходит с использованием малого уровня полезного управления; 3) если помеха оказывается больше ожидаемого уровня, то гарантии выполнения цели игры нет, но существуют оценки терминального промаха.

Поскольку при формировании управляющего воздействия происходит его автоматическая подстройка под динамическую помеху неизвестного уровня, то (следуя терминологии теории управления) называем разработанный метод *адаптивным*.

Предложенный метод управления используется в работе для моделирования двух задач, связанных с управлением самолетом в условиях ветрового возмущения. В нашей стране методы теории дифференциальных игр к задачам об управлении самолетом впервые были применены В.М. Кейном и его учениками[2]. Исследования зарубежных ученых были стимулированы статьей A. Miele и его сотрудников[3].

Цель работы. Разработка метода управления первого игрока для линейных дифференциальных игр с фиксированным моментом окончания, где полезное управление ограничено, а ограничение на управление второго игрока (природной или информационной помехи) заранее неизвестно. Метод должен обеспечивать выполнение цели игры (приведение на целевое множество в момент окончания), если помеха не превосходит некоторого критического уровня. Причем, чем меньше уровень помехи, тем меньше должен быть уровень управления.

Разработка алгоритмов и программ, позволяющих численно реализо-

[2] Кейн В.М., Париков А.Н., Смуров М.Ю. Об одном способе оптимального управления по методу экстремального прицеливания // Прикладная математика и механика, Т. 44, Вып. 3, 1980, С. 434–440.

[3] Miele A., Wang T., Melvin W.W. Optimal take-off trajectories in the presence of windshear // Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 49, № 1, 1986, pp. 1–45.

вывать предложенный метод управления. Применение метода к задачам о посадке самолета и о преодолении препятствия по высоте.

Методы исследования. Методы теории дифференциальных игр (стабильные мосты), численные методы. Существенным образом в диссертации используются результаты книги Н.Н. Красовского и А.И. Субботина[1], некоторые алгоритмы из сборника[4].

Научная новизна. Предложен новый метод управления, предназначенный для работы в широком диапазоне динамических помех. Основной идеей метода является построение семейства вложенных стабильных мостов, соответствующих упорядоченному набору ограничений на управления первого и второго игроков. Доказанные в диссертации свойства сохранения стабильности при алгебраических операциях над мостами позволяют построить искомое семейство, вычислив лишь некоторые два максимальных стабильных моста. Предложены три варианта конструирования управления обратной связи на базе данного семейства. Сформулированы и доказаны теоремы о гарантии.

Результаты диссертационной работы являются новыми.

Теоретическая и практическая ценность работы. Разработанный метод управления может быть применен для большого класса практических задач управления при наличии динамического возмущения. Предложенная идеология метода может быть распространена и на нелинейные системы.

Разработан комплекс программ численного построения адаптивного управления и моделирования действий этого управления.

Применение комплекса продемонстрировано на двух задачах, связанных с управлением средне-магистральным самолетом в условиях ветрового возмущения. Первая задача описывает процесс посадки, а именно этап снижения по прямолинейной глиссаде до пролета торца взлетно-посадочной полосы. Вторая посвящена обходу препятствия по высоте.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, списка основных обозначений, трех глав, приложения и списка литературы. Диссертация подготовлена в системе LaTeX. Общий объем диссертации составляет 124 страницы. Библиографический список включает 100 наименований, в том числе 16 публикаций автора по теме диссертации.

[4]Алгоритмы и программы решения линейных дифференциальных игр / Ред. А.И. Субботин, В.С. Пацко. — Свердловск, 1984, 295 с.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались автором на семинарах: отдела динамических систем и отдела управляемых систем Института математики и механики УрО РАН, кафедры оптимального управления факультета ВМиК МГУ, лаборатории адаптивных и робастных систем управления Института проблем управления РАН; на конференциях молодых ученых Института математики и механики УрО РАН (Екатеринбург, 2005–2008 гг.), 36–39 региональных молодежных конференциях «Проблемы теоретической и прикладной математики» (Екатеринбург, 2005–2008 гг.), Демидовских чтениях на Урале (Екатеринбург, 2006); на международных конференциях: Проблемы управления и приложения (техника, производство, экономика) (Минск, Беларусь, 2005), 13th IFAC Workshop on Control Applications of Optimisation (Paris, France, 2006), IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006), Теория управления и математическое моделирование (Ижевск, 2006), Нелинейный динамический анализ (Санкт-Петербург, 2007), Дифференциальные уравнения и топология (посвящена 100-летию со дня рождения Л.С. Понтрягина, Москва, 2008), Теория игр и менеджмент (Санкт-Петербург, 2008), 13th International Symposium on Dynamic Games and Applications (Wroclaw, Poland, 2008), Динамические системы: устойчивость, управление, оптимизация (посвящена 90-летию со дня рождения Е.А. Барбашина, Минск, Беларусь, 2008).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1–16].

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дается краткий обзор литературы по дифференциальным играм, определяется цель работы, излагаются основные результаты.

В **первой главе** описан метод построения адаптивного управления.

Глава включает в себя разделы, посвященные постановке задачи, свойствам сохранения стабильности мостов в линейных дифференциальных играх, основной идее построения семейства мостов. Предложены три способа выбора управления по этому семейству (в зависимости от вида ограничений), сформулированы две теоремы о гарантии. Глава заканчивается описанием разработанного комплекса программ и модельным примером с конфликтно-управляемым маятником.

1. Постановка задачи. Рассмотрим линейную дифференциальную игру

$$\begin{gathered} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x} + \mathbf{B}(t)u + \mathbf{C}(t)v, \\ \mathbf{x} \in R^m, \quad t \in T = [\vartheta_0, \vartheta], \quad M, \\ u \in P \subset R^p, \quad v \in R^q. \end{gathered} \tag{1}$$

Предполагаем, что ограничение P на управление u первого игрока содержит нуль. Терминальное множество M задано в подпространстве n выделенных координат и содержит окрестность нуля. Цель первого игрока (полезного управления) — привести n соответствующих компонент фазового вектора на терминальное множество M в момент окончания ϑ. Особенность постановки состоит в том, что помеха v предполагается ограниченной, но это ограничение неизвестно заранее. Возможности полезного управления оговорены изначально. Предполагается, что помеха не является «разумной» и в большинстве случаев не действует оптимальным образом. *Адаптивным* назовем управление обратной связи, которое

1) гарантирует приведение системы на терминальное множество, как бы ни действовала помеха, если только она не превосходит некоторого критического уровня (в случае, если реализация помехи превосходит критический уровень, допускается терминальных промах, который требуется гарантированно оценить);

2) если реализация помехи «слабая», то она должна парироваться «слабым» управлением.

Первое условие есть требование обеспечения гарантированного результата. Выполнение второго условия делает адаптивное управление более технологически приемлемым по сравнению с оптимальным управлением, использующим максимальные допустимые значения.

С помощью стандартного преобразования[1] перейдем от игры (1) к игре без фазовой переменной в правой части:

$$\begin{gathered} \dot{x} = B(t)u + C(t)v, \\ x \in R^n, \quad t \in T = [\vartheta_0, \vartheta], \quad M, \\ u \in P \subset R^p, \quad v \in R^q. \end{gathered} \tag{2}$$

Это преобразование позволяет также понизить размерность игры до размерности пространства терминального множества.

2. Семейство стабильных мостов. Рассмотрим совокупность дифференциальных игр, имеющих ту же динамику, что и игра (2). Ограничение $\mathcal{P}$ на полезное управление, ограничение $\mathcal{Q}$ на помеху и терминальное множество $\mathcal{M}$ будем считать параметрами игры:

$$\begin{gathered} \dot{x} = B(t)u + C(t)v, \\ x \in R^n, \quad t \in T, \quad \mathcal{M}, \quad u \in \mathcal{P}, \quad v \in \mathcal{Q}. \end{gathered} \tag{3}$$

Известно, что множеством разрешимости такой стандартной игры при зафиксированных параметрах является максимальный стабильный мост.

Рассмотрим наборы множеств $\mathcal{P}_k \subset R^p$, $\mathcal{Q}_k \subset R^q$, $\mathcal{M}_k \subset R^n$, $W_k \subset T \times R^n$, $k \geqslant 0$, удовлетворяющие следующим свойствам.

1) Множество W_k является стабильным мостом игры (3) при параметрах $\mathcal{P}_k$, $\mathcal{Q}_k$ и $\mathcal{M}_k$.

2) Каждый следующий мост охватывает предыдущий: $W_{k_1} \subset W_{k_2}$ для любых $k_1 < k_2$. Объединение множеств W_k занимает все пространство игры $T \times R^n$.

3) Для некоторого индекса k_{main} имеем $\mathcal{P}_{\mathrm{main}} = P$, $\mathcal{Q}_{\mathrm{main}} = Q_{\max}$, $\mathcal{M}_{\mathrm{main}} = M$, где P и M заданы по постановке задачи (2), а $Q_{\max}$ — выбираемое нами ограничение на помеху, которое выполняет роль критического уровня. Считаем, что множество $Q_{\max}$ содержит нуль пространства R^q. Мост $W_{\mathrm{main}} = W_{k_{\mathrm{main}}}$ назовем главным.

4) Мосты, лежащие внутри главного, назовем внутренними. При любых $k_1 < k_2 < k_{\mathrm{main}}$ для них выполнены вложения $\mathcal{P}_{k_1} \subset \mathcal{P}_{k_2} \subset P$,

$\mathcal{Q}_{k_1} \subset \mathcal{Q}_{k_2} \subset Q_{\max}$, $\mathcal{M}_{k_1} \subset \mathcal{M}_{k_2} \subset M$.
5) Мосты, охватывающие главный, назовем внешними. Для них при $k_{\text{main}} < k_1 < k_2$ выполнены соотношения $\mathcal{P}_{k_1} = \mathcal{P}_{k_2} = P$, $Q_{\max} \subset \mathcal{Q}_{k_1} \subset \mathcal{Q}_{k_2}$, $M \subset \mathcal{M}_{k_1} \subset \mathcal{M}_{k_2}$.

Таким образом, рассматриваем семейство вложенных друг в друга стабильных мостов, соответствующих набору возрастающих параметров. Идея построения управления следующая. Пусть текущая позиция (t, x) находится вблизи границы моста W_k. Тогда мы можем использовать этот мост для построения управляющего воздействия на малом промежутке времени. Соответственно, управляющее воздействие выбираем из множества $\mathcal{P}_k$. Если реализация помехи будет меньше уровня $\mathcal{Q}_k$, то движение пойдет внутрь к мосту с меньшим индексом. Тогда на следующем шаге будем использовать полезное управление меньшего уровня. Если же реализация помехи больше уровня $\mathcal{Q}_k$, то она может вывести движение к мосту с большим индексом. Соответственно, на следующем шаге управление будет большего уровня. Таким образом происходит подстройка уровня вырабатываемого полезного управления в зависимости от сложившегося уровня помехи. Смысл ограничения $Q_{\max}$: если реализация помехи не превосходит $Q_{\max}$, а начальная позиция принадлежит главному мосту, то система гарантированно придет на терминальное множество M.

Подчеркнем, что общая идея метода реализуема в любых задачах, для которых известны способы построения стабильных мостов.

Для линейных дифференциальных игр с фиксированным моментом окончания в первой главе доказано, что свойство стабильности сохраняется при алгебраическом суммировании стабильных мостов и при умножении на скалярный коэффициент. Это позволяет задать все семейство мостов на основе некоторых двух максимальных стабильных мостов. А именно, в качестве одного из них берем главный мост W_{main}, соответствующий ограничениям $\mathcal{P} = P$, $\mathcal{Q} = Q_{\max}$ и терминальному множеству $\mathcal{M} = M$. Дополнительный мост W_{add} соответствует $\mathcal{P} = \{0\}$ (т.е. управление первого игрока нулевое), $\mathcal{Q} = Q_{\max}$, $\mathcal{M} = M_G$, где содержащее нуль множество M_G подбирается так, чтобы сечения $W_{\text{add}}(t)$ имели

непустую внутренность при всех $t \in [\vartheta_0, \vartheta]$. Сечения $W_k(t)$ мостов W_k определяются соотношением

$$W_k(t) = \begin{cases} kW_{\text{main}}(t), & 0 \leqslant k \leqslant 1, \\ W_{\text{main}}(t) + (k-1)W_{\text{add}}(t), & k > 1. \end{cases}$$

При этом параметры мостов задаются формулами

$$\mathcal{P}_k = \min\{k, 1\} \cdot P, \quad \mathcal{Q}_k = kQ_{\max}, \quad \mathcal{M}_k = \begin{cases} kM, & k \leqslant 1, \\ M + (k-1)M_G, & k > 1. \end{cases}$$

Введем функцию $V : T \times R^n \to R$ — уровневую функцию семейства W_k:

$$V(t, x) = \min\bigl\{k \geqslant 0 : (t, x) \in W_k\bigr\}.$$

Эта функция используется для описания гарантированного результата в приводимых ниже теоремах.

3. Построение управления на основе семейства W_k. В зависимости от вида ограничения на полезное управление P в диссертации рассмотрены три варианта построения управления обратной связи.

1) Если полезное управление скалярное и ограничено по модулю:

$$P = \bigl\{u \in R^1 : |u| \leqslant \mu\bigr\},$$

то для выбора управления можно использовать поверхность переключения. Поверхность переключения — изменяющаяся во времени поверхность в фазовом пространстве, с одной стороны от которой выбирается управление со знаком плюс, с другой — со знаком минус.

Для данного способа сформулирована следующая теорема о гарантии.

Обозначим символом $\mathbf{U}^r(t, x)$ многозначную стратегию первого игрока на основе поверхности переключения. Параметр r характеризует неточность при построении поверхности переключения. Пусть λ — константа Липшица функции $x \mapsto V(t, x)$, β — константа Липшица вектор-функции $B(t)$, $\sigma = \max_{t \in T} |B(t)|$.

Теорема 1. *Пусть $r \geqslant 0$ и U — стратегия первого игрока такая, что $U(t,x) \in \mathbf{U}^r(t,x)$ для всех $(t,x) \in T \times R^n$. Выберем произвольно $t_0 \in T$, $x_0 \in R^n$ и $\Delta > 0$. Предположим, что управление второго игрока на промежутке $[t_0, \vartheta]$ будет ограничено множеством $k^* Q_{\max}$, $k^* \geqslant 0$. Обозначим*

$$s^* = \max\{k^*, V(t_0, x_0)\}.$$

Пусть $x^*(\cdot)$ — движение системы (2), выходящее из точки x_0 в момент t_0 под воздействием стратегии U в дискретной схеме управления с шагом Δ и некоторого управления $v(\cdot)$. Тогда реализация $u(t) = U\big(t, x^*(t)\big)$ управления первого игрока подчиняется включению

$$u(t) \in \min\{s^* + \Lambda(t, t_0, \Delta, r), 1\} \cdot P, \qquad t \in [t_0, \vartheta].$$

При этом значение $V\big(t, x^*(t)\big)$ функции V удовлетворяет неравенству

$$V\big(t, x^*(t)\big) \leqslant s^* + \Lambda(t, t_0, \Delta, r), \qquad t \in [t_0, \vartheta].$$

Здесь

$$\Lambda(t, t_0, \Delta, r) = 2\lambda\sqrt{(2\sigma\mu\Delta + r)\beta\mu}(t - t_0) + 4\lambda\sigma\mu\Delta + \lambda r.$$

2) Если полезное управление векторное с независимыми покомпонентными ограничениями по модулю:

$$P = \left\{u \in R^p : |u_i| \leqslant \mu_i,\ i = \overline{1,p}\right\},$$

то можно использовать управление при помощи p поверхностей переключения для каждой из компонент управления.

Для данного способа не приведено теоремы о гарантии, так как он является эмпирическим расширением предыдущего и может давать ошибки в случае, когда поверхности переключения «слипаются» друг с другом (это может случаться в точках негладкости границ мостов). Однако в практических задачах такой способ можно использовать, и при численном моделировании он дает результаты, сравнимые с результатами следующего метода.

3) Пусть полезное управление ограничено произвольным выпуклым компактным ограничением. Для построения управления будем использовать идеологию экстремального прицеливания. Пусть система находится в текущей точке (t,x). Из семейства W_k выбирается мост, отстоящий от текущей точки на фиксированное расстояние ρ. Управление берем из условия максимального сближения с выбранным мостом.

Введем обозначения: λ — как и раньше, константа Липшица функции $x \mapsto V(t,x)$, β — максимум из констант Липшица для функций $t \to B_j(t)$, $j = \overline{1,p}$, $\varkappa$ — оценка покоординатного отклонения множества P от нуля, p — размерность управления, $d = \max_{t \in [\vartheta_0, \vartheta]} \max_{u \in P} ||B(t)u||$ — оценка скорости роста множества достижимости за первого игрока.

Теорема 2. *Пусть $\rho > 0$ и U — стратегия первого игрока, экстремально прицеливающаяся при заданном расстоянии ρ. Выберем произвольно $t_0 \in T$, $x_0 \in R^n$ и $\Delta > 0$. Предположим, что управление $v(\cdot)$ второго игрока на промежутке $[t_0, \vartheta]$ будет ограничено множеством $k^* Q_{\max}$, $k^* \geqslant 0$. Обозначим*

$$s^* = \max\{k^*, V(t_0, x_0)\}.$$

Пусть $x(\cdot)$ — движение системы (2), выходящее из точки x_0 в момент t_0, порожденное стратегией U в дискретной схеме управления с шагом Δ и управлением $v(\cdot)$. Тогда реализация $u(t) = U\big(t, x(t)\big)$ управления первого игрока подчиняется включению

$$u(t) \in \min\{s^* + E(t, t_0, \Delta, \rho), 1\} \cdot P, \qquad t \in [t_0, \vartheta].$$

При этом значение $V\big(t, x(t)\big)$ функции V удовлетворяет неравенству

$$V\big(t, x(t)\big) \leqslant s^* + E(t, t_0, \Delta, \rho) + \lambda\rho, \qquad t \in [t_0, \vartheta].$$

Здесь

$$E(t, t_0, \Delta, \rho) = \lambda\Delta\left((t - t_0)\left(p\beta\varkappa + \frac{2d^2}{\rho} + \frac{(p\beta\varkappa\Delta)^2}{2\rho}\right) + 2d\right).$$

Во **второй главе** приведены доказательства сформулированных выше теорем.

Третья глава посвящена применению метода адаптивного управления к задаче о посадке самолета в условиях ветрового возмущения и к задаче о преодолении самолетом препятствия по высоте. Исследование задачи о посадке примыкает к работам[5,6], выполненным в 80-е годы в Институте математики и механики УрО РАН и Ленинградской академии гражданской авиации. Постановка задачи о преодолении препятствия предложена А.И. Красовым (фирма «Новые информационные технологии в авиации», Санкт-Петербург).

Движение самолета описывается 16-мерной нелинейной системой[7], которая включает уравнения для трех пространственных координат и их скоростей, трех угловых координат и их скоростей, а также четыре уравнения, описывающие инерционность органов управления. Полезными управлениями являются командные значения силы тяги, рулей высоты и направления, отклонения элеронов. Возмущение — три компоненты скорости ветра.

В качестве ветровой помехи в обеих задачах используется либо постоянный ветер, либо возмущение, порожденное моделью микровзрыва ветра[8]. Микровзрыв — природное явление, которое возникает, когда нисходящий поток воздуха ударяется о землю, а затем расходится горизонтально. При прохождении самолетом зоны микровзрыва воздушный поток резко меняется на встречный, затем на попутный. Это приводит к неожиданному увеличению подъемной силы, а затем к ее резкому падению.

Задача о посадке самолета. Рассматривается предпоследний этап

[5]Боткин Н.Д., Кейн В.М., Красов А.И., Пацко В.С. Управление боковым движением самолета на посадке в условиях ветрового возмущения. — Отчет о НИР, № гос. регистрации 81104592, инв. № 02830078880, Ленинград–Свердловск, 1983, 78 с.

[6]Боткин Н.Д., Пацко В.С., Турова В.Л. Разработка алгоритмов построения экстремальных ветровых возмущений. — Отчет о НИР, № гос. регистрации 188003467, инв. № 02880054701, Свердловск, 1987, 58 с.

[7]Patsko V.S., Botkin N.D., Kein V.M., Turova V.L., Zarkh M.A. Control of an aircraft landing in windshear // Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 83, № 2, 1994, pp. 237–267.

[8]Ivan M. A ring-vortex downburst model for real-time flight simulation of severe windshear // AIAA Flight Simulation Technologies Conf., St.Louis, Miss., 1985, pp. 57–61.

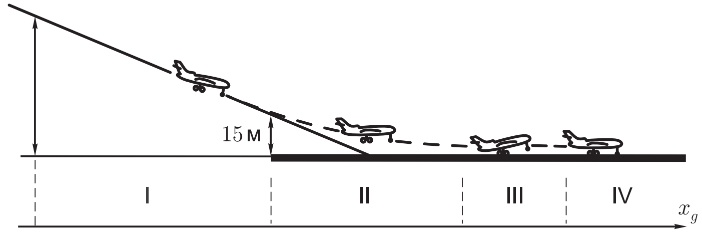

Рис. 1: Процесс посадки самолета. В работе рассматривается I этап — снижение по глиссаде до пролета торца ВПП. Далее следуют: II этап — выравнивание, III этап — пробег на колесах главной стойки шасси, IV этап — пробег на всех колесах.

захода на посадку — снижение по прямолинейной глиссаде до пролета торца взлетно-посадочной полосы (ВПП), рис. 1. Так как продольная скорость относительно большая, можно примерно оценить момент пролета торца ВПП. При моделировании этот момент уточняется, исходя из оставшегося расстояния и текущей скорости.

Для построения управления исходная нелинейная система линеаризуется относительно номинального движения по глиссаде. Линеаризованная система распадается на две подсистемы: продольно-вертикального и бокового движений. Для каждой из подсистем задаются двумерные терминальные множества: вертикальный канал — в координатах отклонений по высоте и по вертикальной скорости, боковой — в координатах бокового отклонения и отклонения боковой скорости. Управление строится на основе предложенного метода адаптивного управления при помощи экстремального прицеливания.

Исследовалось движение самолета при постоянном ветре и при микровзрыве ветра.

Пример моделирования нелинейной системы для двух вариантов микровзрыва приведен на рис. 2. Показаны результаты, относящиеся к вертикальному каналу. Начальная точка была взята на расстоянии 8000 м от торца ВПП, на 40 м вверх от глиссады и 80 м вбок. Траектории и графики, получившиеся при слабом микровзрыве, обозначены

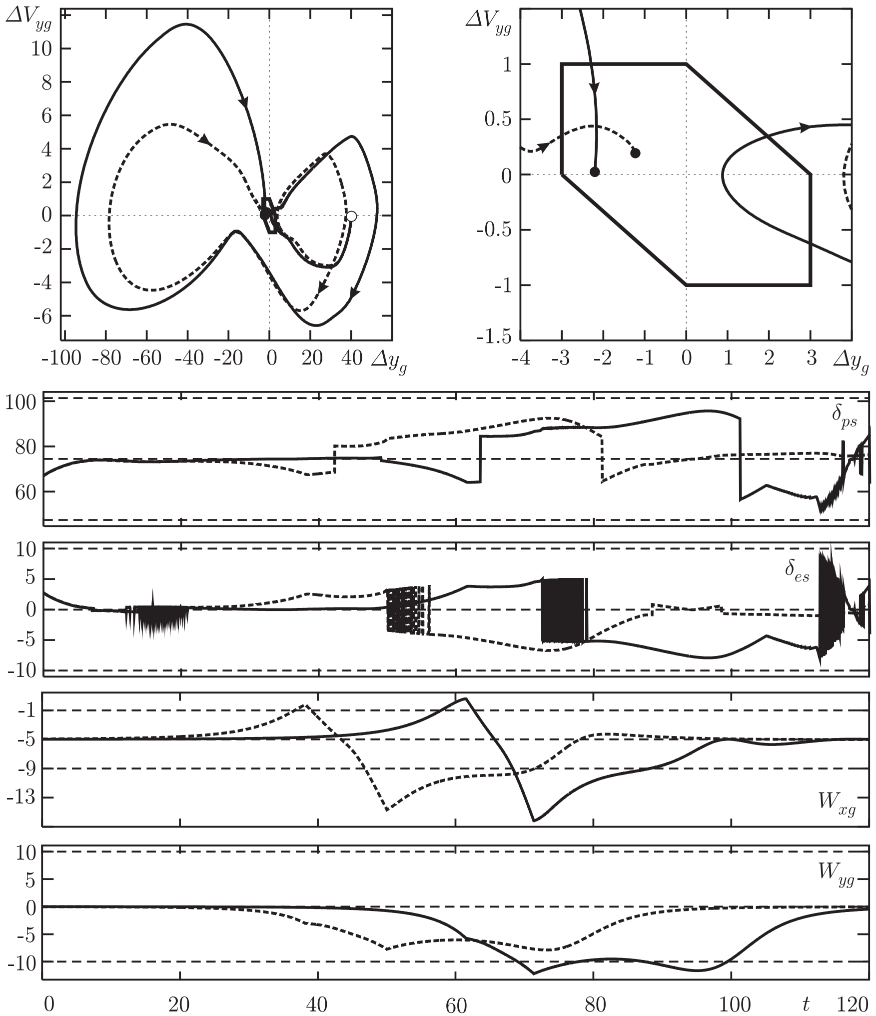

Рис. 2: Моделирование задачи о посадке. Сверху: траектории движения в фазовой плоскости *вертикальное отклонение* Δy_g (м) $\times$ *отклонение вертикальной скорости* ΔV_{yg} (м/с). Далее: графики командных управлений по силе тяги δ_{ps} (град) и рулю высоты δ_{es} (град); графики продольной W_{xg} (м/с) и вертикальной W_{yg} (м/с) компонент скорости ветра. Пунктир соответствует слабому микровзрыву, сплошная линия — более сильному.

пунктиром, при более сильном — сплошной линией. Сверху слева представлены фазовые траектории в координатах *вертикальное отклонение* $\times$ *отклонение вертикальной скорости*. Увеличенный в районе терминального множества фрагмент показан справа. В обоих случаях цель игры достигается — движения приходят на терминальное множество. Ниже показаны графики управлений по силе тяги и рулю высоты, а также графики компонент ветрового возмущения. Тонкими пунктирными линиями на графиках управлений обозначены номинальные и крайние значения управлений, на графиках возмущений — нулевой уровень и критические ограничения на помеху. Как видно из графиков, адаптивное управление увеличивается и уменьшается, подстраиваясь под уровень текущей помехи, и в данном моделировании успешно справляется со своей задачей, не доходя до максимально допустимых значений. Имеются интервалы, когда управление работало в скользящем режиме, переключаясь с одного значения на другое. Эти переключения сглаживаются инерционностью исполнительных механизмов.

Задача о преодолении препятствия. Рассматривается задача о предотвращении столкновения самолета с наземным препятствием, рис. 3. Уклонение производится по высоте, соответственно движение самолета рассматривается в вертикальной плоскости.

Одно из управлений, а именно, управление по рулю высоты делается зависящим от нового фиктивного управления — целевого угла тангажа, диапазон изменения которого полагается ограниченным. Тем самым в процессе преодоления препятствия обеспечивается косвенное поддержание фазовых ограничений по углу тангажа.

Опорной прямой, относительно которой производится линеаризация, является прямая, соединяющая начальное положение самолета с точкой, расположенной на некоторой высоте над препятствием. Цель управления — оказаться выше этой точки в момент пролета препятствия. Таким образом, вспомогательная линейная дифференциальная игра ставится с одномерным терминальным множеством. Аналогично предыдущей задаче, в качестве момента окончания дифференциальной игры берется номинальный момент пролета препятствия, а при моделировании нели-

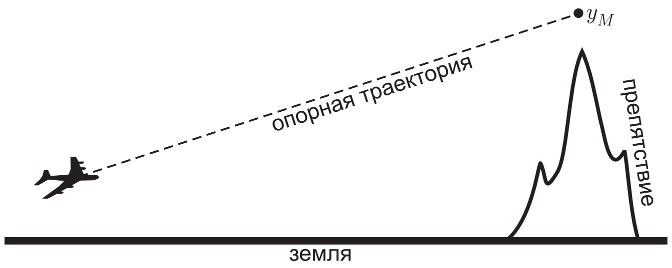

Рис. 3: Задача о преодолении препятствия.

нейной системы оставшееся время оценивается, исходя из текущего положения.

Исследовалось движение при постоянном ветре и при микровзрыве ветра. Пример результатов приведен на рис. 4. Как и в задаче о посадке, моделирование проделано при двух вариантах микровзрыва. Кривые, соответствующие слабому микровзрыву, обозначены пунктиром, более сильному — сплошной линией. Сверху показан основной для этой задачи график — график высоты. Тонким пунктиром показана опорная траектория. Как видно, в момент окончания оба движения прошли выше опорной прямой, а значит и выше препятствия. Далее представлены графики силы тяги, целевого угла тангажа, а также реализации компонент ветрового возмущения.

В **приложении** собраны графики моделирования задач о посадке и о преодолении препятствия по высоте, также иллюстрирующие действия адаптивного управления, но представляющие более узкий интерес.

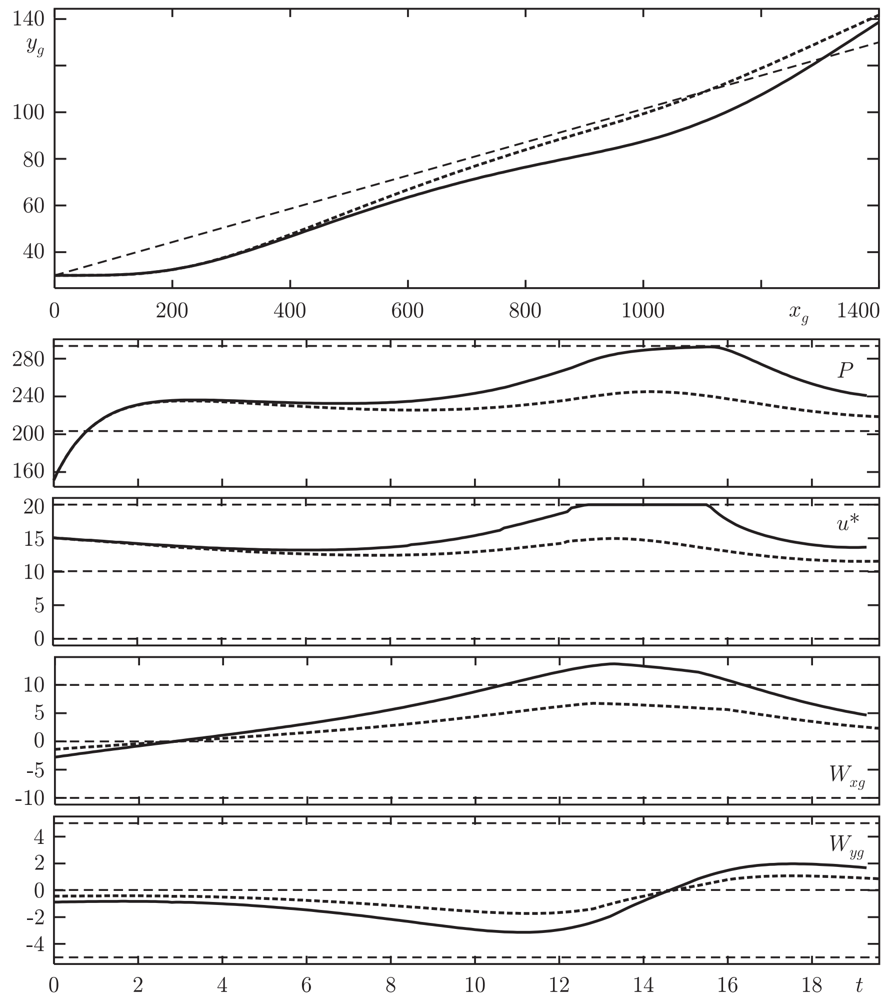

Рис. 4: Моделирование задачи о преодолении препятствия по высоте. Сверху: график высоты (м). Далее: графики силы тяги P (Н), целевого угла тангажа u^* (град), продольной W_{xg} (м/с) и вертикальной W_{yg} (м/с) компонент скорости ветра.

Основные результаты, выносимые на защиту

1) Разработка метода адаптивного управления, применимого для задач, в которых задано геометрическое ограничение на полезное управление, а какое-либо ограничение на динамическую неантагонистическую помеху неизвестно. Формулировка и доказательство теорем о гарантии для данного метода.

2) Создание комплекса программ численного построения трех вариантов адаптивного управления для случая двумерного терминального множества. Дополнительно комплекс позволяет вычислять максимальные стабильные мосты, множества достижимости и проводить моделирование движений под действием различных управлений и помех.

3) Применение разработанного комплекса к исследованию задачи о посадке самолета и задачи о преодолении препятствия по высоте при наличии ветрового возмущения.

Автор глубоко благодарен научному руководителю к.ф.-м.н. Пацко Валерию Семеновичу за постоянное внимание к работе.

Публикации по теме диссертации

Статья, опубликованная в ведущем рецензируемом научном журнале, определенном ВАК:

[1] Ганебный С.А., Кумков С.С., Пацко В.С. Построение управления в задачах с неизвестным уровнем динамической помехи // Прикладная математика и механика, Т. 70, Вып. 5, 2006. — С. 753–770, 2 п.л.

Другие публикации:

[2] Ганебный С.А. Построение робастного управления в линейных дифференциальных играх // Проблемы теоретической и прикладной математики: Труды 36-й Региональной молодежной конференции, Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — С. 253–257.

[3] Ганебный С.А., Кумков С.С., Пацко В.С., Пятко С.Г. Построение робастного управления в дифференциальных играх. Применение к задаче управления самолетом на посадке // Труды Международной конференции «Проблемы управления и приложения (техника, производство, экономика)», Минск, Беларусь, Институт математики НАН Беларуси, Т. 2, 2005. — С. 29–34.

[4] Ганебный С.А., Кумков С.С., Пацко В.С., Пятко С.Г. Робастное управление в игровых задачах с линейной динамикой. Препринт. — Институт математики и механики, Екатеринбург, 2005. — 53 с.

[5] Ganebny S.A., Krasov A.I., Kumkov S.S., Patsko V.S. Robust Control in a Problem of Aircraft Landing under Wind Disturbances // Proceedings of the 13th IFAC Workshop on Control Applications of Optimisation (CAO'06), Paris-Cachan, France, 2006. — pp. 431–436.

[6] Ганебный С.А. Управление самолетом на посадке в условиях ветрового возмущения // Проблемы теоретической и прикладной математики: Труды 37-й Региональной молодежной конференции, Екатеринбург: УрО РАН, 2006. — С. 311–315.

[7] Ганебный С.А. Управление самолетом на посадке в условиях ветрового возмущения // Известия Института математики и информатики, Т. 37, № 3, Ижевск, 2006. — С. 23–24.

[8] Ganebny S.A., Krasov A.I., Kumkov S.S., Patsko V.S. Robust Control in a Problem of Aircraft Landing under Wind Disturbances // International Journal of Tomography and Statistics, Special Issue on Control Applications of Optimisation, Vol. 7, No. F07, 2007. — pp. 37–46.

[9] Ganebny S.A., Kumkov S.S., Patsko V.S., Pyatko S.G. Constructing Robust Control in Differential Games. Application to Aircraft Control during Landing // Annals of the International Society of Dynamic Games, Vol. 9: Advances in Dynamic Games and Applications, S. Jorgensen, M. Quincampoix, and T.L. Vincent (Eds.), Birkhäuser, Boston, 2007. — pp. 69–92.

[10] Ганебный С.А. Построение робастного управления на основе методов теории дифференциальных игр // Проблемы теоретической и прикладной математики: Труды 38-й Региональной молодежной конференции, Екатеринбург: УрО РАН, 2007. — С. 281–285.

[11] Ганебный С.А., Красов А.И., Пацко В.С., Смольникова М.А. Задача преодоления самолетом препятствия по высоте — Отчет о НИР, Разработка алгоритмов и программ обработки и анализа информации в системе УВД, Том 3, ИММ УрО РАН, Екатеринбург, 2008. — 35 с.

[12] Ганебный С.А., Смольникова М.А. Применение методов теории дифференциальных игр к задаче о преодолении самолетом препятствия по высоте // Проблемы теоретической и прикладной математики: Труды 39-й Региональной молодежной конференции, Екатеринбург: УрО РАН, 2008. — С. 240–244.

[13] Ganebny S.A., Kumkov S.S., Patsko V.S. Feedback control in problems with unknown level of dynamic disturbance // Advances in Mechanics: Dynamics and Control: Proceedings of the 14th International Workshop on Dynamics and Control, Institute for Problems in Mechanics RAS, M.: Nauka, 2008. — pp. 125–132.

[14] Ganebny S.A., Kumkov S.S., Patsko V.S. Extremal aiming in problems with unknown level of dynamic disturbance // Proceedings of the 13th International Symposium on Dynamic Games and Applications, Wroclaw, Poland, 2008. — 25 с. (на диске)

[15] *http://home.imm.uran.ru/kumkov/isdg2006/*

[16] *http://home.imm.uran.ru/kumkov/Israel2007/*

Ганебный Сергей Александрович

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
В ЗАДАЧАХ С НЕИЗВЕСТНЫМ УРОВНЕМ
ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОМЕХИ

Автореферат

Подписано в печать 30.10.2008
Формат 60x84 1/16. Объем 2 п.л.
Тираж 150 экз.