

УДК 517.934

© С. А. Ганебный

УПРАВЛЕНИЕ САМОЛЕТОМ НА ПОСАДКЕ  
В УСЛОВИЯХ ВЕТРОВОГО ВОЗМУЩЕНИЯ<sup>1</sup>

К настоящему моменту опубликовано много работ, посвященных применению современных методов теории управления и теории дифференциальных игр к задачам взлета и посадки самолета в условиях ветрового возмущения (см, например, статьи [1, 2, 3, 4] и ссылки в них). Данная работа связана с применением к задаче посадки методов теории дифференциальных игр, разрабатываемых в Екатеринбургской школе.

Рассматривается задача о посадке среднего транспортного самолета в условиях ветрового возмущения. Процесс посадки исследуется на стадии снижения по глиссаде до момента пролета торца взлетно-посадочной полосы (ВПП). Желательно, чтобы в момент пролета торца ВПП боковое отклонение самолета от номинала и его скорость, а также отклонение по вертикали и его скорость лежали в заданном допуске. На рассматриваемом участке номинальным является равномерное снижение с высоты 400 м до высоты 15 м, примерное время — 120 сек, примерное преодолеваемое расстояние — 8000 м.

Динамика самолета описывается достаточно полной 12-ти мерной дифференциальной системой. В фазовый вектор входят: три геометрические координаты центра масс самолета, три угловые координаты, соответствующие линейные и угловые скорости. К основной системе дополнительно подсоединяются уравнения, описывающие в простейшей форме инерционность исполнительных органов, отрабатывающих управляющие воздействия (сила тяги, руль высоты, отклонения элеронов, руль направления).

Исходная нелинейная система линеаризуется относительно номинального движения. Получаемая линейная система распадается на подсистемы бокового и вертикального каналов.

Для каждого из каналов рассматривается вспомогательная дифференциальная игра следующего вида:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Cv, \\ x &\in R^m, \quad t \in T = [\vartheta_0, \vartheta], \\ u &\in P = \{(u_1, u_2) : |u_i| \leq \mu_i, i = 1, 2\}, \quad v \in R^q \end{aligned} \quad (1)$$

Цель первого игрока, в ведении которого находится управление  $u$ , — приведение двух выделенных координат фазового вектора  $x$  на терминальное множество  $M$  в момент окончания  $\vartheta$ . Особенностью постановки является то, что заранее не фиксируется какое-либо компактное множество, ограничивающее управление  $v$  второго игрока (ветровое возмущение). Опираясь на методы линейных дифференциальных игр [5, 6, 7], для каждого из каналов вводится управление обратной связи, предназначенное для работы в широком диапазоне ветровых помех (робастное управление).

*Робастным* называем управление обратной связи, удовлетворяющее следующим условиям.

1. Если возмущение не превосходит некоторого “критического уровня”, то
  - требуется гарантия удачного завершения игры (приведение системы на соответствующий допуск в момент окончания),
  - при этом, чем “слабее” помеха, тем “слабее” должна быть реализация управления.
2. Если же возмущение превосходит этот критический уровень, то допускается терминальный промах, гарантированный размер которого необходимо оценить.

<sup>1</sup>Работа поддержана грантами РФФИ №04-01-96099, №06-01-00414.

Для построения робастного управления применяем теорию антагонистических дифференциальных игр при геометрических ограничениях на управления обоих игроков. Основная идея состоит в следующем. Рассмотрим семейство дифференциальных игр, в которых ограничение на управление второго игрока зависит от числового параметра. С каждым значением параметра свяжем также некоторое ограничение на управление первого игрока и стабильную трубку (стабильный мост по терминологии [5]) в пространстве *время*  $\times$  *фазовый вектор*. Получаемое семейство трубок упорядочено по включению с возрастанием параметра. Первый игрок гарантирует удержание системы внутри каждой из трубок при соответствующем ей уровне помехи, используя свое управление, также лежащее в соответствующем ограничении. Это семейство может рассматриваться как задание в пространстве игры некоторой функции Ляпунова, которая, в свою очередь, позволяет построить управление обратной связи для первого игрока и вычислить гарантию, обеспечиваемую этим управлением.

Указанная идея допускает простую реализацию в случае, если динамика является линейной, а полезное векторное управляющее воздействие стеснено независимыми покомпонентными ограничениями. Именно такой вид имеет система (1). В этом случае надо хранить всего один стабильный мост и поверхности переключения (определяющие знак соответствующего управления) для каждой из компонент. Детали алгоритма и теоретическое обоснование для случая скалярного управления приведены в [7].

Моделируется движение исходной нелинейной системы с применением полученного робастного управления. Используются различные варианты задания ветровой помехи, в том числе модели микровзрыва ветра [8].

Полученные результаты сравниваются с результатами работы [4], в которой для аналогичной задачи применялся метод управления, рассчитанный на ветровую помеху с заранее заданным ограничением.

### Список литературы

1. Miele A., Wang T., Melvin W. W. Optimal take-off trajectories in the presence of windshear // Journal of Optimization Theory and Applications. 1986, Vol. 49, No. 1, pp. 1–45.
2. Miele A., Wang T., Wang H., Melvin W. W. Optimal penetration landing trajectories in the presence of windshear // Journal of Optimization Theory and Applications. 1988, Vol. 57, No. 1, pp. 1–40.
3. Seube N., Moitie R., Leitmann G. Viability analysis of an aircraft flight domain for take-off in a windshear. Lyapunov's methods in stability and control // Math. Comput. Modelling, 2002, Vol. 36, No. 6, pp. 633–641.
4. 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, 1994, Vol. 83, No. 2, pp. 237–267.
5. Красовский Н. Н., Субботин А. И. Позиционные дифференциальные игры. М: Наука, 1974.
6. Исакова Е. А., Логунова Г. В., Пацко В. С. Построение стабильных мостов в линейной дифференциальной игре с фиксированным моментом окончания // Алгоритмы и программы решения линейных дифференциальных игр, под ред. Субботина А. И., Пацко В. С., Институт математики и механики, Свердловск, 1984, С. 127–158.
7. 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.
8. Ivan M. A ring-vortex downburst model for real-time flight simulation of severe windshear // AIAA Flight Simulation Technologies Conf., July 22–24, 1985, St.Louis, Miss., pp. 57–61.

Ганебный Сергей Александрович  
Институт математики и механики УрО РАН,  
Россия, Екатеринбург  
e-mail: ganebny@imm.uran.ru