

В. Б. Мелехин, д-р техн. наук, проф., pashka1602@rambler.ru,
Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала,
М. В. Хачумов, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., khmike@inbox.ru,
Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН,
Институт программных систем им. А. К. Айламазяна РАН, с. Вельское, Ярославская обл.

Нечеткая модель ситуационного управления параметрами полета автономного беспилотного летательного аппарата в условиях неопределенности*

Обозначены основные проблемы автоматического планирования поведения автономного беспилотного летательного аппарата в нестабильных условиях воздушной среды. Показано, что актуальность решаемой в ней задачи обусловлена тем, что автономный беспилотный летательный аппарат самостоятельно формирует и реализует маршрут своего полета без поддержки с наземной станции управления. В связи с этим возникает необходимость в разработке метода автоматического управления программными движениями, связанными с реализацией построенного в решателе задач маршрута воздушного движения. Для решения данной задачи предложен подход к регулированию параметров состояния динамических объектов на основе принципа ситуационного управления целенаправленным поведением сложных систем в изменяющихся условиях функционирования. Целесообразность выбора данного принципа управления связана с тем, что состояние автономного беспилотного летательного аппарата во время полета характеризуется большим числом параметров и действующих на них возмущающих факторов окружающей среды. В целях эффективной реализации данного принципа управления введено понятие полной проблемной ситуации на объекте управления, включающее в себя вектор отклонений параметров состояния автономного беспилотного летательного аппарата от требуемых значений во время полета и возмущающие факторы воздушной среды. На этой основе разработана нечеткая модель ситуационного управления параметрами состояния автономного беспилотного летательного аппарата во время полета в нестабильной воздушной среде, в которой в целях обобщенного представления эталонных проблемных ситуаций, а также описания входящих в их структуру отклонений параметров состояния и возмущающих факторов воздушной среды использованы лингвистические переменные и функции. Определены условия, при выполнении которых эталонные, нечетко представленные проблемные ситуации являются обобщением и поглощают аналогичные друг другу фактические проблемные ситуации, возникающие на объекте управления. Это позволяет существенным образом сократить число логико-трансформационных решающих правил в модели ситуационного управления и оперативным образом автоматически определять в проблемных ситуациях результативные управляющие воздействия, обеспечивающие эффективную реализацию программных движений автономного беспилотного летательного аппарата во время полета в условиях неопределенности. В заключение показано, что для реализации управляющих воздействий, выбранных на ситуационной основе, при повышенных требованиях к точности регулирования изменяющихся во времени параметров состояния объекта управления и значительном уровне возможных рассогласований между фактическими и заданными их значениями в условиях неопределенности целесообразно использовать нечетко реализованные пропорциональный, интегральный и дифференциальный законы регулирования.

Ключевые слова: автономный беспилотный летательный аппарат, нестабильная воздушная среда, параметры полета, ситуационная модель управления, условия неопределенности

Введение

Одной из актуальных проблем современной беспилотной авиации является разработка эффективных систем автоматического планирования поведения автономных беспилотных лета-

тельных аппаратов (АБЛА) различного назначения в нестабильных условиях воздушной среды (ВС). В общем случае под АБЛА будем понимать беспилотные летательные аппараты, способные эффективным образом автоматически планировать свое целенаправленное поведение в изменяющихся условиях воздушного окружения без связи с наземным пунктом управления. Очевидно, что автоматическая система планирования поведения АБЛА должна включать ин-

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-10056, <https://rscf.ru/project/21-71-10056/>

теллектуальный решатель задач, позволяющий, опираясь на модель представления знаний об изменениях, происходящих в воздушной среде, и процедуру вывода решений, обеспечить ему эффективное решение различных задач, связанных с воздушным движением в нестабильных условиях функционирования.

В общем случае к основным задачам планирования поведения АБЛА в воздушной среде следует отнести [1]: управление взлетом и посадкой, автоматическую прокладку маршрута полета в ВС над заданным (контролируемым) квадратом местности и управление процессом реализации сформированного маршрута полета в нестабильных условиях функционирования.

Следует отметить, что эффективное решение задачи управления посадкой АБЛА различного базирования имеется [2] и в настоящей работе не рассматривается.

Необходимо также отметить, что проблема автоматического построения пути полета АБЛА как в априори неописанных условиях, так и при заданной формальной модели карты местности является достаточно исследованной задачей, для решения которой можно использовать, например, следующие методы планирования:

- методы планирования локально-оптимального маршрута полета и подлета к целям на низкой высоте в априори неописанных условиях функционирования при наличии на земле препятствий [3];
- методы планирования пути полета, основанные либо на решении задачи о коммивояжере [4], динамического [5] линейного программирования [6] при заданной карте местности, над которой осуществляется движение, либо базирующиеся на применении эвристических алгоритмов планирования пути полета [7].

Что же касается управления процессом реализации сформированного пути полета в нестабильной ВС, то решение данной задачи состоит в реализации следующих основных подзадач [8]:

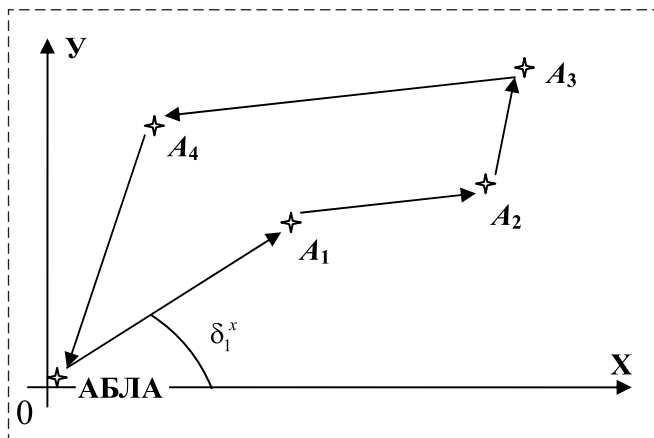
- картографического проецирования или привязки маршрута полета к карте контролируемого или заданного участка местности для ориентации в воздушном пространстве;
- управления параметрами полета в нестабильной ВС по автоматически формируемому маршруту, привязанному, например, к карте местности в заданной системе координат.

В настоящее время существует большое число методов и информационных технологий, связанных с управлением воздушным движением беспилотных летательных аппаратов (см., например, работы [9–11]). Однако данные методы не позволяют обеспечить полную автономность управления полетами АБЛА в нестабильной ВС либо по причинам высокой сложности их реализации на бортовой ЭВМ, требующей поддержки с наземной станции управления и необходимости априори сформулированного полетного задания, либо из-за отсутствия в них инструментальных средств представления и обработки знаний для принятия решений в нестабильных, спонтанно изменяющихся условиях воздушной среды. Это, в свою очередь, существенным образом ограничивает дальность полетов беспилотных летательных аппаратов, так как требует наличия на борту сложной аппаратуры связи с наземной станцией управления, а также априорных знаний рельефа местности, над которой предстоит полет, и характера изменений условий ВС для построения полетного задания.

Для решения отмеченных выше проблем, связанных с управлением отработкой воздушных движений, в работе предлагается один из подходов к организации автоматического управления полетами АБЛА в нестабильных условиях ВС, опирающийся на нечеткую модель ситуационного управления поведением сложных объектов различной природы [12, 13], позволяющую обеспечить практически полную автономность АБЛА различного назначения и на этой основе значительным образом увеличить дальность полетов, а также расширить класс решаемых ими задач. Целесообразность построения автоматической системы управления движением АБЛА на ситуационной основе обусловлено тем, что формальное описание различных ситуаций, возникающих на объекте управления, позволяет учесть достаточно большое число параметров его состояния и действующих на них возмущающих факторов ВС.

Синтез модели ситуационного управления параметрами состояния АБЛА в полете

Рассмотрим пример, поясняющий особенности решения ряда проблем, связанных с картографическим проецированием маршрута полета АБЛА в прямоугольную систему координат карты местности с началом отсче-



Маршрут облета АБЛА четырех целей
ABLA over flight route of four targets

та в точке вылета. Допустим, что в заданном квадрате местности расположены четыре цели $A_1, \dots, A_4$ (см. рисунок).

Пусть в процессе поисково-исследовательской деятельности в этом квадрате АБЛА автоматически сформировал показанный на рисунке маршрут облета расположенных на земле целей с учетом координат их положения на карте местности, а также посадки в точке вылета, который можно представить в следующем виде:

Взлет $(x_0, y_0 = 0) \rightarrow A_1(x_1, y_1) \rightarrow A_2(x_2, y_2) \rightarrow A_3(x_3, y_3) \rightarrow A_4(x_4, y_4) \rightarrow$ Посадка $(x_0, y_0 = 0)$,

где x_0, y_0 — координаты точки взлета и посадки АБЛА; $x_i, y_i, i = \overline{1, 4}$, — координаты местоположения на местности целей в прямоугольной системе координат, построенной относительно точки вылета АБЛА с координатами $(0, 0)$. Таким образом, сформированный маршрут облета целей состоит из пяти участков, на каждом из которых АБЛА следует изменить направление линии пути полета, отработав поворот на угол, заданный относительно основного направления движения, определяемого, например, осью абсцисс. Тогда, если учесть, что направление линии заданного пути полета на каждом i -м участке местности задается путевым углом δ_i , то для эффективной реализации АБЛА данного маршрута полета в нем следует перейти от прямоугольной к полярной системе координат расположения целей на местности относительно точки вылета. В результате получим следующее представление заданного маршрута облета целей:

Взлет $(\delta_1^y; +l_1) \rightarrow A_1(\delta_2^x; +l_2) \rightarrow A_2(\delta_3^x; +l_3) \rightarrow A_3(\delta_4^x; -l_4) \rightarrow A_4(\delta_5^x; l_5) \rightarrow$ Посадка $(\delta_6^y; +l_6)$, (1)

где δ_1^y, δ_6^y — соответственно углы взлета и посадки АБЛА относительно земли; δ_i^x — путевой угол маршрута полета вдоль i -го участка местности, у которого верхний индекс x означает, что основное направление движения АБЛА, относительно которого вычисляется угол поворота, определяется осью абсцисс X ; $\pm l_i$ — расстояние, которое АБЛА необходимо преодолеть над i -м участком местности для достижения инцидентной ему цели $A_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$, которое берется с плюсом, если для координаты x_i выполняется условие $x_{i+1} > x_i$ и с минусом — в противном случае; $(x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1})$ — соответственно координаты точек начала и конца линии пути полета, соответствующей i -му участку местности с расположенными на нем целями $A_i(x_i, y_i)$ и $A_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$.

Для реализации полученного таким образом маршрута полета системе управления АБЛА следует автоматически во времени сформировать следующую последовательность управляющих воздействий:

Взлететь $\rightarrow u_1(\delta_1^x; \text{полет}(l_1), t_1) \rightarrow$
 $\rightarrow u_2(\delta_2^x; \text{полет}(l_2), t_2) \rightarrow u_3(\delta_3^x; \text{полет}(l_3), t_3) \rightarrow$ (2)
 $\rightarrow u_4(\delta_4^x; \text{полет}(l_4), t_4) \rightarrow$
 $\rightarrow u_5(\delta_5^x; \text{полет}(l_5), t_5) \rightarrow$ Посадка,

где, например, $u_2(\delta_2^x; \text{полет}(l_2), t_2)$ — управляющее воздействие, отрабатываемое в момент времени t_2 , которое означает, что после преодоления расстояния t_1 на предыдущем участке АБЛА необходимо изменить направление линии пути полета, совершив поворот на путевой угол δ_2^x относительно оси координат X и продолжить движение над вторым участком местности по прямой на расстояние, равное l_2 .

Однако учитывая, что во время полета на состояние АБЛА воздействуют различные возмущающие факторы ВС (например, боковой ветер и т. д.), в произвольные моменты времени t следует различать его требуемое и фактическое текущее состояния. В общем случае данные состояния будут определяться упорядоченными векторами различных, поддающихся регулированию параметров, характеризующих:

- текущее местоположение АБЛА в заданной системе координат карты местности;
- состояние органов управления полетом;
- скорость и высоту полета (оценка скорости полета имеет принципиальное значение в случае заданных ограничений на время вы-

полнения полета, а высоты — при низком полете и наличии на земле препятствий).

Таким образом, требуемое и фактическое состояния АБЛА будут определяться, соответственно, векторами следующего вида:

$$S_{\text{зад}}(t) = \langle p_1^*(t), p_2^*(t), \dots, p_j^*(t), \dots, p_n^*(t) \rangle$$

и $S_{\text{фак}}(t) = \langle p_1(t), p_2(t), \dots, p_j(t), \dots, p_n(t) \rangle,$

где $p_j^*(t)$ — желаемое на момент времени t значение j -го показателя состояния летательного аппарата; $p_j(t)$ — фактическое значение этого показателя в текущий момент времени t .

Следовательно, в произвольные моменты времени t в текущем состоянии АБЛА могут возникать нештатные или проблемные ситуации, определяемые вектором недопустимых отклонений

$$\Delta S(t) = \langle \Delta p_1(t), \Delta p_2(t), \dots, \Delta p_j(t), \dots, \Delta p_n(t) \rangle,$$

где $\Delta p_j(t)$ — отклонение фактического $p_j(t)$ значения j -го показателя состояния летательного аппарата от требуемого его значения $p_j^*(t)$ в момент времени t .

Возникновение таких нештатных ситуаций препятствует результативной отработке АБЛА штатных управляющих воздействий (2). Таким образом, задача управления поведением АБЛА в нестабильной ВС сводится к построению и отработке не только штатных, но и нештатных управляющих воздействий $u_j(t)$, которые позволяют устранить текущие значения недопустимых отклонений параметров его состояния $\Delta p_j(t)$ на протяжении всего полета. В связи с этим для построения эффективного управления процессом движения АБЛА, например, по маршруту (1) с учетом возмущающих факторов ВС требуется определить полную проблемную ситуацию на объекте управления (ОУ), которую можно представить в следующем виде:

$$\Delta S(t, H) = \langle \Delta p_1(t, h_1^1(Z_1), h_2^1(Z_2)), \Delta p_2(t, h_1^2(Z_1), h_2^2(Z_3)), \dots, \Delta p_n(t, h_4^n(Z_4), h_5^n(Z_5), h_7^n(Z_7)) \rangle.$$

Каждая такая ситуация соответствует текущему проблемному состоянию АБЛА с учетом действующих в ВС возмущающих факторов

$$h_j(Z_j, t) \in H, H = \{h_j(Z_j(t))\}, j = 1, 2, \dots, m_1,$$

где, например, $h_2^1(Z_2(t))$ — второй возмущающий фактор ВС, влияющий на первый показате-

тель состояния АБЛА; $Z_2(t)$ — множество характеристик, определяющих второй возмущающий фактор воздушной среды в текущий момент времени t , например {скорость бокового ветра, угол под которым он воздействует на летательный аппарат, и т. д.}.

Если для каждой полной допустимой проблемной ситуации $\Delta S(t, H)$, которая может возникнуть на ОУ, опираясь на накопленный опыт операторов, способных эффективным образом управлять полетами беспилотных летательных аппаратов в различных ситуациях нестабильной ВС, а также экспертные данные, полученные от высококвалифицированных специалистов в области воздушной навигации, можно определить вектор управляющих воздействий

$$U(t, Z) = \langle u_1 = f_1(\Delta p_1, h_1^1(Z_1), h_2^1(Z_2), t), \\ u_2 = f_2(\Delta p_2, h_1^2(Z_1), h_3^2(Z_3), t), \dots, \\ u_m = f_m(\Delta p_3, h_4^n(Z_4), h_5^n(Z_5), h_7^n(Z_7), t) \rangle,$$

позволяющих устранить соответствующую проблемную ситуацию на ОУ, то это дает возможность сформировать модель ситуационного управления поведением АБЛА в нестабильной воздушной среде, где, например, $u_1(t) = f_1(\Delta p_1(t), h_1^1(Z_1(t)), h_2^1(Z_2(t)))$ — управляющее воздействие, отработка которого обеспечивает устранение отклонения Δp_1 параметра состояния p_1 , возникшее в результате проявления в окружающем пространстве возмущающих факторов $h_1^1(Z_1(t))$ и $h_2^1(Z_2(t))$.

Построенная таким способом модель ситуационного управления полетами АБЛА в нестабильной ВС будет состоять из множества логико-трансформационных решающих правил следующего вида:

$$Q_{i_1}(t) : \Delta S_{i_1}(t, H_{i_1}) \oplus U_{i_1}(t, H_{i_1}) \rightarrow \\ \rightarrow S_{\text{тр}}^{i_1}(t), i_1 = 1, 2, \dots, m_2. \quad (3)$$

Каждое такое правило означает, что если на ОУ в момент времени t возникает проблемная ситуация $\Delta S_{i_1}(t, H_{i_1})$ по причине наличия в ВС возмущающих факторов $H_{i_1}(t)$, то отработка (обозначена символом $\oplus$) вектора управляющих воздействий $U_{i_1}(t, H_{i_1})$ позволяет устранить данную проблемную ситуацию, обеспечив таким образом на объекте требуемую на данный момент времени t текущую ситуацию $S_{\text{тр}}^{i_1}(t)$. Необходимо отметить, что любое решающее правило вида (3) фактически пред-

ставляет собой элементарный акт управления воздушным движением АБЛА в нестабильной воздушной среде. Что же касается штатных (запланированных) управляющих воздействий, то они отрабатываются в заданные моменты времени t при достижении требуемых ситуаций $S_{\text{тр}}(t)$.

Параметры отрабатываемых управляющих воздействий $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$, автоматически определяемые на основе решающих правил (3) при наличии в ВС возмущающих факторов $h_k(t, Z_r) \in H_j(t)$, $H_j(t) \subset H_{i_1}(t)$, в произвольные моменты времени t можно рассчитать на основе аналитической зависимости следующего вида:

$$\begin{aligned} u_j(t, H_j) = \\ = F_j(\Delta p_j(t), h_k(t, Z_k)), h_k(t, Z_k) \in H_j, \\ k = 1, 2, \dots, m_3, \end{aligned}$$

где F_j — график лингвистической функции (ЛФ) [14], соответствующей j -му управляющему воздействию, построенной на основе экспертных данных, отражающих характер влияния возмущающих факторов ВС во времени на параметр состояния $p_j(t)$; m_3 — число возмущающих факторов воздушной среды $H_j(t)$, влияющих на j -й параметр состояния АБЛА.

Практика применения ситуационного управления поведением сложных объектов различной природы показывает [12, 13], что число проблемных ситуаций $\Delta S_{i_1}(t, H_{i_1})$, возникающих на ОУ, как правило, значительным образом превышает число результативных в них управлений $U_{i_1}(t, H_{i_1})$. Другими словами, для ряда аналогичных друг другу проблемных ситуаций $\Delta S_{i_1}(t, H_{i_1})$ можно определить результативное управление $U_{i_1}(t, H_{i_1})$, которое позволяет выполнить их устранение на ОУ и, таким образом, обеспечить необходимые для успешной отработки маршрута (2) состояния АБЛА во времени, определяемые ситуациями $S_{\text{тр}}(t)$.

В связи с этим в классической модели ситуационного управления множество проблемных ситуаций $\Delta S(t)$ разбивается на подмножества аналогичных друг другу ситуаций $\Delta S_\beta(t)$, $\Delta S_\beta(t) \subset \Delta S(t)$, $\beta = 1, 2, \dots, m_4$, каждому из которых в соответствие ставится результативное управление $U_\beta(t, \Delta, S_\beta)$, позволяющее устранить произвольную проблемную ситуацию $\Delta S_{i_1}(t, H_{i_1})$ на ОУ, относящуюся к подмножеству ситуаций $\Delta S_\beta(t)$.

Однако при такой организации модели ситуационного управления воздушным движением АБЛА в базе знаний интеллектуального решателя задач необходимо хранить достаточно большое число допустимых проблемных ситуаций. Во избежание этого для каждого подмножества аналогичных друг другу проблемных ситуаций $\Delta S_\beta(t) \subset \Delta S(t)$ целесообразно сформировать обобщенное его описание $\Delta S_\beta^*(t)$ в виде эталонной проблемной ситуации, позволяющей идентифицировать произвольную проблемную ситуацию на ОУ, относящуюся к этому подмножеству ситуаций. Одним из эффективных подходов к решению этой проблемы является использование математического аппарата нечетких множеств для обобщенного представления отклонений параметров состояния АБЛА, характеристик возмущающих факторов ВС и управляющих воздействий в ситуационной модели представления знаний автоматической системы управления воздушным движением АБЛА.

Построение нечеткой модели представления и обработки знаний АБЛА

В целях обобщенного представления аналогичных друг другу проблемных ситуаций и построения соответствующей им эталонной проблемной ситуации $\Delta S_\beta^*(t)$ для всех переменных, участвующих в построении нечеткой ситуационной модели управления, необходимо определить множество R одноименных с ними лингвистических переменных (ЛП) [15, 16]:

$$\begin{aligned} R = \{R_j \cup \Delta R_j \cup R_k \cup R_q\}; \\ j, q = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, m_1 \end{aligned}$$

где $R_j, \Delta R_j, R_k, R_q$ — подмножества ЛП, соответственно определяющие параметры состояния АБЛА $p_j(t)$, их отклонения $\Delta p_{i_1}(t, h_k(t, Z_k))$, возмущающие факторы ВС $h_k(t, Z_k) \in H_j(t)$ и управляющие воздействия $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$ автоматической системы управления движением АБЛА.

Каждая ЛП [15], например, для отклонений параметров состояния АБЛА, задается следующей четверкой:

$$\Delta R_j = (\Delta P_j, \Delta T_j^p, \Delta P_j^*, \Delta p_j),$$

где ΔP_j — название ЛП, которое идентично с названием отклонения соответствующего

ей параметра состояния АБЛА $p_j(t)$, например, "Отклонение от требуемой скорости полета"; $\Delta T_j^p = \{\Delta T_j^p(j_2)\}$, $j_2 = 1, 2, \dots, 5$, — множество словесных значений ЛП, состоящее из нечетких подмножеств, определяемых следующими термами: $\Delta T_j^p(1)$ — "очень малое отклонение" (отклонение, которым можно пренебречь); $\Delta T_j^p(2)$ — "малое отклонение"; $\Delta T_j^p(3)$ — "среднее отклонение"; $\Delta T_j^p(4)$ — "большое" и $\Delta T_j^p(5)$ — "очень большое отклонение текущей скорости полета от заданного его значения"; $\Delta P_j^* = [\Delta p_j^{\min}, \Delta p_j^{\max}]$ — базовое множество ЛП, которое образует шкалу ее численных значений, соответственно, с нижней $\Delta p_j^{\min}$ и верхней $\Delta p_j^{\max}$ границами допустимых отклонений скорости полета АБЛА.

Здесь шкала на основе экспертных данных в соответствии с числом термов ЛП разбивается на пять непересекающихся подынтервалов с четко заданными границами. Внутри каждого такого подынтервала определяется нечеткое подмножество значений отклонений $\Delta p_j(t)$ соответствующего регулируемого параметра состояния $p_j(t)$. Например, для терма $\Delta T_j^p(j_2) \in \Delta T_j^p$ граничные значения нечеткой шкалы относящихся к нему фактических значений отклонений $\Delta p_j(t)$ определяются подынтервалом $[\Delta p_j(j_2), \Delta p_j(j_2 + 1)]$ численных значений. Таким образом, ограничения, определяемые термами $\Delta T_j^p(j_2) \in T_j^p$ ЛП ΔR_j и накладываемые на значения базовой переменной $\Delta p_j(t)$ отклонений регулируемого параметра состояния $p_j(t)$, задаются четко и выбираются исходя из предельных эксплуатационных характеристик АБЛА или на основе экспертных данных [15]; $\Delta p_j(t)$ — базовая переменная ЛП, или оценка конкретного значения отклонения параметра состояния АБЛА $p_j(t)$ в текущий момент времени t .

Необходимо отметить, что аналогичным образом определяются ЛП и для других переменных, участвующих в построении нечеткой модели ситуационного управления воздушным движением АБЛА.

С учетом того, что с выхода бортовой подсистемы навигации автоматической системы управления полетами АБЛА текущие значения параметров его состояния и возмущающих факторов ВС поступают в количественном виде, для построения эталонных проблемных ситуаций $\Delta S_\beta^*(t)$ все переменные, входящие в их структуру, представляются в нечетком формате. Например, для параметров состоя-

ния $p_j(t)$ формат их описания имеет следующий вид:

$$\langle T_j^p(j_2), [\Delta p_j(j_2), \Delta p_j(j_2 + 1)] \rangle.$$

В свою очередь, параметры управляющих воздействий $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$ в логико-трансформационных решающих правилах (3) также переводятся в нечеткий формат представления в виде следующих троек:

$$\langle T_j^u(j_2), [u_j(j_2), u_j(j_2 + 1)] \rangle,$$

где $T_j^u(j_2) \in T_j^u$, T_j^u — множество термов лингвистической переменной, определяющей в нечеткой форме представления текущего значения управляющего воздействия $u_j(t, H_j)$; $u_j(j_2), u_j(j_2 + 1)$ — соответственно нижняя и верхняя границы подынтервала численных значений терма $T_j^u(j_2)$, определяющего характерный для него диапазон изменения параметров управляющего воздействия $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$.

Интервалы $[u_j(j_2), u_j(j_2 + 1)]$ численных значений термов $T_j^u(j_2) \in T_j^u$ определяются таким образом, чтобы параметры управляющих воздействий $u_j(t, H_j)$, выбираемых на основе решающих правил (3), после их корректировки с учетом требуемой точности регулирования обеспечивали бы устранение отклонений $\Delta p_j(t)$ параметров состояния ОУ на всем диапазоне $[\Delta p_j(j_2), \Delta p_j(j_2 + 1)]$ их допустимых значений, заданном в эталонной проблемной ситуации $\Delta S_\beta^*(t)$.

Что же касается текущих фактических $S_{\text{фак}}^{i_1}(t)$ и требуемых $S_{\text{тр}}^{i_1}(t)$ ситуаций, то для фазификации входящих в них переменных, выполняемой в целях их обобщения и сравнения между собой, используются, соответственно, следующие нечеткие форматы их представления: $\langle p_j(t), T_j^p(j_2) \rangle$ и $\langle p_j^*(t), T_j^p(j_2^*) \rangle$, где $p_j(t), p_j^*(t)$ — соответственно текущие значения базовой переменной ЛП в ситуациях $S_{\text{фак}}^{i_1}(t)$ и $S_{\text{тр}}^{i_1}(t)$, определяющей j -й параметр состояния АБЛА.

Определим понятия "нечетко равных" и "аналогичных друг другу произвольных ситуаций", возникающих в текущем состоянии АБЛА.

Определение 1. Две произвольные ситуации, например $S_{\text{фак}}^{i_1}(t)$ и $S_{\text{тр}}^{i_1}(t)$, нечетко равны между собой, если для всех пар " $\langle p_j(t), T_j^p(j_2) \rangle$, $\langle p_j^*(t), T_j^p(j_2^*) \rangle$ " входящих в них одноименных

j -х параметров состояния выполняется условие: $T_j^p(j_2) = T_j^p(j_2^*)$.

Определение 2. Две проблемные ситуации $\Delta S_1(t, H_1)$ и $\Delta S_2(t, H_2)$ являются аналогичными друг другу, если они нечетко равны между собой, т. е. когда все количественные значения одноименных в них переменных попадают в интервалы численных значений $[\Delta p_j(j_2), \Delta p_j(j_2 + 1)]$ одного и того же терма $T_j^p(j_2) \in T_j^p$ соответствующей им ЛП.

Введем понятие "степень $\rho(p_j(t), p_j^*(t))$ нечеткого равенства" двух значений j параметра состояния АБЛА, представленных парами $\langle p_j(t), T_j^p(j_2) \rangle$ и $\langle p_j^*(t), T_j^p(j_2^*) \rangle$, которая определяется на основе следующего решающего правила.

Правило оценки степени нечеткого равенства: "Степень нечеткого равенства

- $\rho(p_j(t), p_j^*(t)) = 1$, если для двух значений $p_j(t)$ и $p_j^*(t)$ одного и того же параметра состояния АБЛА выполняется условие $|p_j(t) - p_j^*(t)| \leq \varepsilon^*$, где $|p_j(t) - p_j^*(t)|$ — абсолютное значение разности; ε^* — допустимое рассогласование между текущим и требуемым значениями j параметра состояния. В этом случае принимается решение о том, что сравниваемые между собой значения j -го параметра состояния с допустимой погрешностью равны между собой и не требуется его регулирование;
- иначе $\rho(p_j(t), p_j^*(t)) = \mu(p_j(t)) \leftrightarrow \mu(p_j^*(t))$, если выполняется условие:

$$((|p_j(t) - p_j^*(t)| > \varepsilon^*) \& (T_j^p(j_2) = T_j^p(j_2^*))),$$

где $\&$ — знак, означающий необходимость выполнения левой и правой частей условия; $\mu(p_j(t)), \mu(p_j^*(t))$ — степени принадлежности сравниваемых между собой значений j -го параметра состояния нечетким множествам, определяемым, соответственно, термами $T_j^p(j_2)$ и $T_j^p(j_2^*)$ [16]; $\leftrightarrow$ — операция нечеткой эквивалентности [17]. При таком значении оценки нечеткого равенства принимается следующее решение: сравниваемые между собой значения j -го параметра состояния нечетко равны между собой, но может потребоваться устранение имеющегося между ними рассогласования, если оно больше допустимой ошибки регулирования ε^* ;

- иначе $\rho(p_j(t), p_j^*(t)) = 0$, если выполняется условие $T_j^p(j_2) \neq T_j^p(j_2^*)$. В этом случае принимается решение о том, что сравниваемые

между собой значения j -го параметра состояния не равны между собой, и требуется устранить имеющееся между ними отклонение".

Отсюда получаем, что степень $\rho(S_{\text{фак}}^i(t), S_{\text{тр}}^i(t))$ нечеткого равенства сравниваемых между собой ситуаций $S_{\text{фак}}^i(t)$ и $S_{\text{тр}}^i(t)$ можно вычислить следующим образом:

$$\rho(S_{\text{фак}}^i(t), S_{\text{тр}}^i(t)) = \min_{j=1}^n \rho(p_j(t), p_j^*(t)). \quad (4)$$

На основе полученной таким образом оценки степени нечеткого равенства сопоставляемых между собой ситуаций согласно соотношению (4) принимается одно из следующих решений:

— если $\rho(S_{\text{фак}}^i(t), S_{\text{тр}}^i(t)) = 1$, то сравниваемые между собой ситуации $S_{\text{фак}}^i(t)$ и $S_{\text{зад}}^i(t)$ практически равны между собой, и на ОУ отсутствует проблемная ситуация;

— в случае, когда $0 < \rho(S_{\text{фак}}^i(t), S_{\text{тр}}^i(t)) < 1$, сравниваемые между собой ситуации $S_{\text{фак}}^i(t)$ и $S_{\text{тр}}^i(t)$ нечетко равны между собой, и если $\rho(S_{\text{фак}}^i(t), S_{\text{тр}}^i(t)) > h_0$, то принимается решение, что между ситуациями $S_{\text{фак}}^i(t)$ и $S_{\text{тр}}^i(t)$ наблюдаются только допустимые рассогласования входящих в них одноименных параметров, не требующие дальнейшего устранения, где h_0 — порог сравнения, который определяется исходя из допустимой ошибки регулирования ε^* параметров состояния АБЛА;

— если $\rho(S_{\text{фак}}^i(t), S_{\text{тр}}^i(t)) = 0$, то это говорит о том, что сравниваемые между собой ситуации не равны, а текущее состояние АБЛА определяется проблемной ситуацией $\Delta S_i(t, H_i)$.

Введем и определим операцию "поглощения" текущей проблемной ситуации $\Delta S_i(t, H_i)$ эталонной ситуацией ΔS_β^* .

Определение 3. Эталонная проблемная ситуация ΔS_β^* поглощает проблемную ситуацию $\Delta S_i(t, H_i)$, возникшую в текущем состоянии АБЛА в момент времени t , тогда и только тогда, когда для каждой пары одноименных в них переменных, например, параметров состояния $p_j(t)$, выполняется условие:

$$\Delta p_j(j_2) \leq \Delta p_j \leq \Delta p_j(j_2^*), \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

где $\Delta p_j(j_2), \Delta p_j(j_2^*)$ — верхнее и нижнее граничные значения подынтервала численных значений терма $T_j^p(j_2)$, которым определяется отклонение Δp параметра состояния p_j в эталонной

проблемной ситуации; $\Delta p_j(t)$ — количественная оценка отклонения параметра состояния $p_j(t)$ в текущей проблемной ситуации $\Delta S_i(t, H_i)$.

Утверждение. Если эталонная проблемная ситуация ΔS_β^* поглощает текущую проблемную ситуацию $\Delta S_{i_1}(t, H_{i_1})$, то отработка управляющих воздействий $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$, выбранных на основе решающего правила (3), соответствующего ситуации ΔS_β^* , позволяет преобразовать текущую ситуацию $S_{\text{фак}}^i(t)$ на ОУ в ситуацию $S_{\text{фак}}^*(t)$, нечетко равную ситуации $S_{\text{тр}}^i(t)$.

Доказательство. 1. Пусть эталонная проблемная ситуация ΔS_β^* поглощает текущую проблемную на ОУ ситуацию $\Delta S_{i_1}(t, H_{i_1})$, тогда согласно определениям 1 и 3 данные ситуации нечетко равны между собой.

2. Согласно принципу организации ситуационного управления [12, 13] управляющие воздействия $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$, выбранные на основе решающих правил (3) по эталонной проблемной ситуации ΔS_β^* , позволяют выполнить преобразование текущей ситуации $S_{\text{фак}}^i(t)$ в ситуацию, нечетко равную требуемой ситуации $S_{\text{тр}}^i(t)$ в том случае, когда фактическая проблемная ситуация на ОУ $\Delta S_{i_1}(t, H_{i_1})$ нечетко равна ситуации ΔS_β^* .

3. Вместе с тем, очевидно, что каждое выбранное на основе решающих правил (3) отдельное управляющее воздействие $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$ в результате отработки обеспечивает такое текущее значение $p_j(t)$ соответствующего j -го параметра состояния, которое попадает в интервал численных значений одного и того же термина $T_j^p(j_2)$, что и его требуемое значение $p_j^*(t)$. Сказанное вытекает из того, что в нечетко равных ситуациях ΔS_β^* и $\Delta S_{i_1}(t, H_{i_1})$ значения одноименных отклонений определяются одними и теми же терминами $\Delta T_j^p(j_2)$ соответствующих им лингвистических переменных.

Следовательно, из пп. 1–3 с очевидностью вытекает справедливость искомого утверждения.

Необходимо отметить, что при повышенных требованиях к точности регулирования j -х параметров состояния АБЛА, значительных уровнях возможных рассогласований между их фактическими и требуемыми значениями возникает необходимость реализации в управляющих воздействиях $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$ пропорционального и интегрального законов регулирования. Кроме того, если наблюдается

высокая скорость изменения параметров состояния $v_j(t) = (p_j^H(t_2) - p_j^H(t_1))/(t_2 - t_1)$ под воздействием возмущающих факторов ВС, то в управляющих воздействиях $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$ требуется реализовать и дифференциальный закон регулирования.

Следует также отметить, что для автоматического построения ПИД закона регулирования в процессе отработки управляющих воздействий $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$ все множество параметров состояния P АБЛА целесообразно разбить на подмножество автономных или независимо регулируемых параметров $p_j^H \in P_H, P_H \subset P$ и подмножество параметров $p_j^B \in P_B, P_B \subset P$ с перекрестным влиянием друг на друга. При этом, учитывая высокий уровень динамики ВС и ее не стохастическую неопределенность, в рассматриваемом случае необходимо использовать нечеткий ПИД регулятор [18].

Заключение

Предложенная в работе нечеткая модель ситуационного управления не требует проведения сложных вычислений и может быть реализована на бортовой ЭВМ АБЛА, что позволяет организовать эффективное управление целенаправленными полетами АБЛА в нестабильной воздушной среде.

Представление в нечетком формате входящих в структуру эталонных проблемных ситуаций отклонений параметров состояния АБЛА от требуемых значений и возмущающих факторов воздушной среды позволяет обобщить ситуационную модель представления знаний и на этой основе сократить число логико-трансформационных правил вывода без потери управляемости воздушного движения автономных беспилотных летательных аппаратов в нестабильных условиях функционирования.

Разработанные инструментальные средства, служащие для определения аналогичных друг другу фактических проблемных ситуаций на объекте управления и их сравнения с эталонными проблемными ситуациями, обеспечивают оперативный выбор результативных управляющих воздействий, которые позволяют устранить наблюдаемые отклонения текущих значений параметров состояния АБЛА от требуемых их значений.

Список литературы

1. Merino L., Martinez-de-dios JR., Ollero A. Cooperative Unmanned Aerial Systems for Fire Detection, Monitoring, and Extinguishing. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Springer, 2014. P. 2693–2722.
2. Сергеев А. А., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Управление автономной посадкой БПЛА самолетного типа на статическую и динамическую посадочные площадки по "гибким" кинематическим траекториям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, № 3. С. 156–167.
3. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Планирование маршрута целенаправленного полета автономного летательного аппарата на низкой высоте в условиях неопределенности // Авиакосмическое приборостроение. 2018. № 1. С. 18–27.
4. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Об одном подходе решения задачи коммивояжера для планирования автономным беспилотным летательным аппаратом маршрутов облета целей // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021. № 1(48). С. 106–115.
5. 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.
6. Лиго Тань, Фомичев А. В. Планирование пространственного маршрута беспилотных летательных аппаратов с использованием методов частичного целочисленного линейного программирования // Вестник МГТУ им Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 2. С. 53–66.
7. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Планирование автономным беспилотным летательным аппаратом эффективных маршрутов облета целей // Авиакосмическое приборостроение. 2020. № 4. С. 3–14.
8. Черный М. А., Кораблин В. И. Воздушная навигация. М.: Транспорт, 1991. 432 с.
9. Моисеев В. С. Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов. Казань: Школа, 2015. 444 с.
10. Rysdyk R. Unmanned Aerial Vehicle path following for target observation in wind // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2006. Vol. 29, N. 5. P. 1092–1100.
11. Веремеенко К. К., Желтов С. Ю., Ким Н. В. и др. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. М.: Физматлит, 2009. 554 с.
12. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.
13. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Ситуационный подход в задачах автоматизации управления техническими объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т.19, № 9. С. 562–578.
14. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Управление эффективной реализацией технологических процессов механической обработки деталей в машиностроении // Проблемы управления. 2020. № 1. С. 71–82.
15. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение для принятия приближенных решений. М.: Мир, 1976. 168 с.
16. Passino K. M., Yurkovich S. Fuzzy Control. Boston (USA): Addison Wesley Longman, 1998. 522 p.
17. Мелихов А. Н., Берштейн Л. С., Коровин С. Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.
18. Абдурагимов Т. Т., Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Информационно-аналитическая модель нечеткого ПИД регулятора // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017. № 1 (44). С. 48–60.

Fuzzy Model of Situational Control of the Flight Parameters of an Autonomous Unmanned Aircraft under Uncertainty Conditions

V. B. Melekhin, pashka1602@rambler.ru,

Dagestan State Technical University, Makhachkala, 367015, Russian Federation,

M. V. Khachumov, khmike@inbox.ru,

Federal research center "Computer Science and Control" Russian Academy of Sciences,

Moscow, 117312, Russian Federation,

Program Systems Institute of the Russian Academy of Sciences, Veskovo, 152021, Russian Federation

Corresponding author: Melekhin Vladimir B., D. Sc., Professor, Makhachkala, 367015, Russian Federation, e-mail: pashka1602@rambler.ru

Accepted on August 15, 2021

Abstract

The article outlines the main problems of automatic planning of the behavior of an autonomous unmanned aerial vehicle in unstable air conditions. It is shown that the urgency of the problem is due to the fact that an autonomous unmanned aerial vehicle independently forms and implements its flight route without support from a ground control station. There is therefore a need to develop a method for automatic control of programmed movements associated with the implementation of the route constructed by the problem solver. To solve this problem we propose an approach to regulating the parameters of the state of dynamic objects based on the principle of situational control of the goal-directed behavior of complex systems in changing environmental conditions. The expediency of choosing this control principle is due to the fact that the state of an autonomous unmanned aerial vehicle during its flight is characterized by a large number of parameters and disturbing environmental factors. In order to effectively implement this control principle, we introduce the concept of a complete problematic situation, which consists of deviations of the state parameters of an autonomous unmanned aerial vehicle from the required values during flight and disturbing environmental factors. On this basis, a fuzzy model of situational control of the state parameters of an autonomous unmanned aerial vehicle functioning in an unstable environment is developed, in which

linguistic variables and functions are used to provide a generalized presentation of reference problem situations, as well as to describe the deviations of the state parameters and disturbing environmental factors. The conditions are determined under which the reference indistinctly presented problem situations generalize the actual problem situations that arise at the control object. This makes it possible to significantly reduce the number of logical-transformational decision rules in the situational control model and to promptly automatically determine effective control actions in problematic situations that ensure the effective implementation of programmed movements of an autonomous unmanned aerial vehicle under conditions of uncertainty. In conclusion, it is shown that for the implementation of control actions which are selected on a situational basis with increased requirements for the accuracy of regulation of the time-varying parameters of the control object and a significant level of possible discrepancies between their actual and specified values in conditions of uncertainty, it is advisable to use indistinctly implemented proportional, integral and differential regulation laws.

Keywords: autonomous unmanned aerial vehicle, unstable air environment, flight parameters, situational control model, uncertainty conditions

Acknowledgements: This work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 21-71-10056, <https://rscf.ru/project/21-71-10056/>

For citation:

Melekhin V. B., Khachumov M. V. Fuzzy Model of Situational Control of the Flight Parameters of an Autonomous Unmanned Aircraft under Uncertainty Conditions, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 12, pp. 650–659.

DOI: 10.17587/mau.22.650-659

References

1. Merino L., Martinez-de-dios JR., Ollero A. Cooperative Unmanned Aerial Systems for Fire Detection, Monitoring, and Extinguishing. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Springer, 2014, pp. 2693–2722.
2. Sergeev A. A., Filimonov A. B., Filimonov N. B. Control of autonomous landing of aircraft-type UAVs on static and dynamic landing sites along "flexible" kinematic trajectories. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 156–167 (in Russian).
3. Melekhin V. B., Hachumov M. V. Planning the route of a purposeful flight of an autonomous aircraft at low altitude under conditions of uncertainty, *Aviakosmicheskoe Priborostroenie*, 2018, no. 1, pp. 18–27 (in Russian).
4. Melekhin V. B., Hachumov M. V. On one approach to solving the traveling salesman problem for planning an autonomous unmanned aerial vehicle of target fly-over routes, *Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science*, 2021, vol. 48, no. 1, pp. 106–115 (in Russian).
5. Lebedev G. N., Efimov A. V. The use of dynamic programming for routing overflights of mobile objects in the controlled region, *Bulletin of the Samara State Aerospace University*, 2011, no. 6, pp. 234–241 (in Russian).
6. Ligo Tan', Fomichyov A. V. Planning the spatial route of unmanned aerial vehicles using partial integer linear programming methods, *Bulletin of the Moscow State Technical University named after N. E. Bauman. Ser. Instrumentation*, 2016, no. 2, pp. 53–66 (in Russian).
7. Melekhin V. B., Hachumov M. V. Planning by an autonomous unmanned aerial vehicle of effective routes of overflights of targets, *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2020, no. 4, pp. 3–14 (in Russian).
8. CHernyj M. A., Korablin V. I. Air navigation, Moscow, Transport, 1991, 432 p. (in Russian).
9. Moiseev V. S. Fundamentals of the theory of effective use of unmanned aerial vehicles, Kazan', SHkola, 2015, 444 p. (in Russian).
10. Rysdyk R. Unmanned Aerial Vehicle path following for target observation in wind, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, vol. 29, no. 5, pp. 1092–1100.
11. Veremeenko K. K., ZHeltov S. Yu., Kim N. G., Serebryakov G. G., Krasil'nikov M. N. Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned maneuverable aircraft, Moscow, Fizmatlit, 2009, 554 p. (in Russian).
12. Pospelov D. A. Situational management: theory and practice, Moscow, Nauka, 1986, 288 p. (in Russian).
13. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Situational approach in the tasks of automation of management of technical objects, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 9, pp. 562–578 (in Russian).
14. Melekhin V. B., Hachumov V. M. Management of effective implementation of technological processes of mechanical processing of parts in mechanical engineering, *Problems of Management*, 2020, no. 1, pp. 71–82 (in Russian).
15. Zade L. The concept of a linguistic variable and its application for making approximate decisions. Moscow, Mir, 1976, 168 p. (in Russian).
16. Passino K. M., Yurkovich S. Fuzzy Control, Boston (USA), Addison Wesley Longman, 1998, 522 p.
17. Melihov A. N., Bershtejn L. S., Korovin S. Ya. Situational advising systems with fuzzy logic, Moscow, Nauka, 1990, 272 p. (in Russian).
18. Abduragimov T. T., Melekhin V. B., Hachumov V. M. Information-analytical model of a fuzzy PID controller, *Bulletin of the Dagestan State Technical University, Technical science*, 2017, vol. 44, no. 1, pp. 48–60 (in Russian).