УДК 629.7

Л. Н. Лысенко, Нгуен Чонг Шам

АНАЛИЗ ПУТЕЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ДИСТАНЦИОННО ПИЛОТИРУЕМЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

На основе детального анализа текущего состояния разработок ДПЛА выявлены их основные недостатки, связанные с высокой чувствительностью к условиям функционирования в неспокойной атмосфере. На концептуальном уровне показаны пути обеспечения инвариантности реализации полетных характеристик к турбулентным возмущениям и ветровым нагружениям за счет решения задач интеллектуализации алгоритмического обеспечения нечеткого управления рассматриваемых типов ДПЛА. Предложенный метод эквивалентных возмущений может позволить упростить решение задачи синтеза нечетких регуляторов гибридных структур СУ ДПЛА и по-новому подойти к процессу обучения нейроподобных систем на основе установления соответствия для конкретных динамических характеристик аппарата априори моделируемых нестабильностей наблюдаемого изображения цели с характеристиками случайных процессов, эквивалентных реально действующим в полете случайным возмущениям.

E-mail: sm3@sm.bmstu.ru

Ключевые слова*: *дистанционно пилотируемый летательный аппарат, интерактивное управление, турбулентность атмосферы, модели возмущающих воздействий, теория нечеткого управления, неопределенность информации, интеллектуальные системы управления, агрегированный нечеткий регулятор с усиленным свойством грубости, аппроксиматор, метод эквивалентных возмущений.

Дистанционно пилотируемые летательные аппараты (ДПЛА) первоначально создавались как средства, способные заменить более дорогостоящие в производстве и сложные в эксплуатации беспилотные самолеты-разведчики типа “Стриж” и “Рейс” разработки КБ А.Н. Туполева. Основным назначением указанных беспилотников являлась тактическая и оперативно-тактическая разведка с использованием аэрофотосъемки при пролете над представляющей интерес территорией в автоматическом режиме в соответствии с заложенными в их системы управления (СУ) программами и алгоритмами.

В результате опытно-конструкторских разработок, начатых в СССР в 1982 г., были созданы первые разведывательные комплексы на базе ДПЛА, наиболее известным из которых считается комплекс “Строй-П” с ДПЛА “Пчела-1”.

Особую привлекательность и актуальность производство ДПЛА получило с момента принятия концепции использования сетевых информационных технологий при планировании боевых операций независимо от их интенсивности и территориального масштаба [1]. Сетецентрические принципы информационного обеспечения, при которых автономная тактическая боевая единица рассматривается как объект в сетевом обмене информации (узел сети), не могут быть реализованы на практике без получения соответствующей достоверной информации на основе применения средств воздушной и космической разведок, о чем, в частности, свидетельствовало широкое применение воинским контингентом ДПЛА "Пойнтер" фирмы Aero Vironment (США) при проведении операции "Буря в пустыне". Если учесть, что ДПЛА оказались незаменимым средством информационной поддержки действий различных подразделений в экстремальных условиях, характерных для разного рода чрезвычайных ситуаций, практически все страны мира сочли необходимым вложиться в создание разработок собственных ДПЛА.

Среди наиболее известных конструкций ДПЛА могут быть отмечены: российские (помимо уже названного аппарата "Пчела-1") ГрАНТ, "Отшельник", ДПЛА комплексов "Типчак", "Мушкатель", "Элерон" и др.; американские ДПЛА комплексов "Пойнтер", "Нетопырь 3", линейка комплексов тактических ДПЛА "Тень"-200, 400, 600 и др.; израильский ДПЛА "Орбитер"; линейка китайских ДПЛА корпорации "Кайтик" ASN-7, 15, 105B, 207 и др.

Об уровне достигнутого прогресса в области ДПЛА в наиболее технически развитых странах мира можно судить хотя бы на основании следующих характеристик российских ДПЛА различных поколений, объединенных общим назначением (наблюдение поля боя в тактической глубине, обзор состояния территорий):

— ДПЛА "Пчела-1" (1990 г.), масса 140 кг, старт за счет двух пороховых ускорителей, размещение на десантном бронетранспортере;

— ДПЛА ГрАНТ (2001 г.), масса 20 кг, старт за счет энергии опускающегося груза, размещение на двух автомобилях типа УАЗ;

— ДПЛА БРАТ (2003 г.) (ближний разведчик аэродинамический телевизионный), масса 2,8 кг, старт — запуск "с руки", транспортно-пусковая установка не требуется.

По утверждениям известных российских специалистов Э.П. Лукашевой и Н.В. Читякова, уже сегодня промышленность развитых стран мира готова полностью отказаться от традиционных ДПЛА тактического уровня за счет создания мини-ДПЛА, стартовая масса которых не будет превышать 4 кг.

Предпосылками появления мини-ДПЛА послужили: создание однокристальных микроЭВМ высокого быстродействия; микроминиатюризация приборного оснащения; разработка миниатюрных матриц для создания ТВ- и ИК-камер; создание надежных и малогабаритных аккумуляторов высокой удельной емкости и электродвигателей на редкоземельных материалах; широкое распространение новых вакуумных технологий изготовления деталей планера.

Предметная область и задачи обзорно-аналитического исследования. Для определения алгоритма функционирования ДПЛА и принципа его действия предварительно рассмотрим на эвристическом уровне типовую схему управления его движением в контексте достижения основной цели полета — получения представляющей интерес информации, в частности, разведывательных данных вдоль программно заданного маршрута.

При этом будем ориентироваться на использование типового бортового оснащения ДПЛА, соответствующего, например, ДПЛА "Пчела-1" комплекса "Строй-П".

В процессе программного полета по заданному маршруту включается режим широкого поля зрения обзорной кадровой ТВ-системы, а ее оптическая ось ориентируется в плоскости вертикальной симметрии ДПЛА с наклоном на тангажный угол, при котором на изображении местности на экране оператор может заметить подозрительные фрагменты подстилающей поверхности. Как только это происходит, оператор наводит оптическую ось кадровой обзорной системы на предполагаемую цель, совмещая ее изображение с центром кадра. После этого проводится сужение поля зрения кадровой обзорной системы и укрупнение подозрительного изображения. При достаточно узком поле зрения осуществляется обнаружение и последующее распознавание цели либо делается вывод об ошибочности отождествления идентифицируемого изображения с целью. Если изображение идентифицировано как цель, подается команда на определение ее координат бортовой ЭВМ или ЭЦВМ наземного пункта управления с использованием координат ДПЛА, параметров его ориентации, а также ориентации оптической оси кадровой обзорной системы относительно связанной системы координат (СК) аппарата. С появлением миниатюрных приемоиндикаторов глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС решение последней задачи значительно упростилось, при этом точность навигационных определений повысилась в несколько раз (практически на порядок).

Знание координат цели позволяет оператору по командному радиоканалу передать сигнал на повторный заход ДПЛА на цель. В процессе повторного захода возможно еще более сузить поле зрения ТВ-системы для детального анализа изображения цели.

Из изложенного следует, что основной особенностью ДПЛА, отличающей его от любого ЛА разведывательного назначения, служит наличие интерактивного управления его функционированием в процессе полета, осуществляемого оператором, дистанционно удаленным от управляемого объекта. При этом обеспечение и поддержание требуемой ориентации ДПЛА должно обеспечиваться автоматически.

Единственной возможностью дистанционного управления траекторным движением аппарата применительно к рассмотренному составу бортовой аппаратуры является формирование команд управления оператором по наблюденному ТВ-изображению. В комплексе “Строй-П” был реализован режим ручного управления ДПЛА “Пчела”, при котором команды оператора, наблюдающего ТВ-изображение местности, подаются непосредственно на рули ДПЛА. Известно, что на начальных этапах испытаний аппарата все попытки воспользоваться этим режимом оказались неудачными.

На ДПЛА “Пойнтер” (США) указанный режим, по сообщениям средств массовой информации, был реализован достаточно надежно. Однако многое зависит от состояния внешней среды.

Даже для такого вполне современного ДПЛА, как “Нетопырь 3” (США), вводятся ограничения по погодным условиям его применения (скорость ветра не более 25 узлов (13 м/с) и умеренные осадки). Отметим, что качество получения изображения зависит не только от постоянного ветрового нагружения, но в еще большей степени от турбулентности атмосферы, идентифицировать параметры состояния которой на расстоянии от пункта управления в несколько десятков километров, тем более в реальном масштабе времени (в темпе полета) практически невозможно. Тем не менее, задача обеспечения инвариантности получения устойчивого изображения цели к внешним возмущениям, испытываемым ДПЛА в полете, относится к числу приоритетных. Путей решения такой задачи в принципе существует несколько. Некоторые из них уже получили свое отражение в выполненных исследованиях, в том числе в работах [2–5]. При этом речь может идти о совершенствовании как собственно информационных систем (комплексирование, использование гиростабилизаторов, применение методов оптимальной фильтрации (оценивания) и т.д.), так и СУ ДПЛА (синтез систем активной адаптации, систем искусственного интеллекта, в том числе с использованием нейронных сетей, обладающих адаптивными свойствами либо удовлетворяющих условиям требуемой грубости и стабильной сходимости процессов (гибридные структуры с нечеткими и традиционными алгоритмами и т.д.)).

Анализ путей выбора наиболее рационального подхода к решению соответствующих задач даже на уровне концептуальных обсуждений проблемы может оказаться достаточно полезным с точки зрения перспектив создания ДПЛА нового поколения.

Оценка возмущений, испытываемых ДПЛА в полете. Основным видом возмущений, испытываемых ДПЛА в полете, оказывающим существенное влияние на динамику его движения и качество изображения, получаемого с помощью расположенных на борту систем, являются, как отмечено ранее, ветровые нагружения и турбулентность атмосферы.

Отличительным признаком турбулентных движений служит статистический характер пространственно-временных пульсаций параметров (скорости, плотности, температуры и др.).

Турбулентность атмосферы наиболее удобно характеризовать вектором скорости мелкомасштабных перемещений воздушных масс. Обычно принято представлять ее в виде трехмерного векторного случайного поля, аргументами которого служат пространственные координаты. В общем случае такое поле является пространственно-временным. Однако для большинства типов ДПЛА, скорость которых больше максимальной скорости порывов ветра, турбулентность можно рассматривать как пространственное случайное поле, инвариантное к временной компоненте.

Исходными данными для моделирования такого поля являются структура и параметры матричной спектральной плотности; вид структуры следует из теории однородной и изотропной турбулентности, а значения параметров определяются экспериментально.

Ветровые возмущения атмосферы, как правило, задаются в виде

$$\mathbf{w}(\mathbf{x}) = \mathbf{w}_0(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}), \tag{1}$$

где $\mathbf{w}(\mathbf{x})$ — скорость ветра в точке с координатами $\mathbf{x} = (x, y, z)$; $\mathbf{w_0}(\mathbf{x}) \in \mathbf{R^3}$ — детерминированная составляющая; $\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}) = (\xi_1(x), \xi_2(y), \xi_3(z))$ — случайная пульсационная составляющая (собственно турбулентность), в которой $\xi_1(x)$ — продольная, $\xi_2(y)$ вертикальная, $\xi_3(z)$ — поперечная компоненты поля турбулентности.

В большинстве случаев поле $\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x})$ допустимо считать гауссовым с нулевым математическим ожиданием. Размерности аргумента поля m и пространства n равны: $m = n = 3$. Вероятностные характеристики поля $\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x})$ зависят от высоты y над подстилающей поверхностью.

Принято различать моделирование турбулентности в свободной атмосфере (на высотах порядка сотен и более метров) и моделирование приповерхностного слоя турбулентной атмосферы (на высотах $y \leqslant 150\ldots300$ м).

Общий вид матричной ковариационной функции $R(\boldsymbol{\tau}) = (\rho_{kl}(\boldsymbol{\tau})) = M\{[\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x} + \boldsymbol{\tau})]\xi^{\text{т}}(\mathbf{x})\}$ поля $\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x})$ задается в виде выражения для ее компоненты:

$$\rho_{kl}(\boldsymbol{\tau}) = [\rho_t(\boldsymbol{\tau}) - \rho_n(\boldsymbol{\tau})]\frac{\tau_k\tau_l}{|\tau|^2} + \rho_n(\boldsymbol{\tau})\delta_{kl}, \tag{2}$$

где δ_{kl} — символ Кронекера; l, $k = 1, 2, 3$; τ_k — компоненты вектора $\boldsymbol{\tau} \in R^3$; $\rho_t(\boldsymbol{\tau}), \rho_n(\boldsymbol{\tau})$ — соответственно параллельная и поперечная ковариационные функции

$$\rho_t(\boldsymbol{\tau}) = M\{\boldsymbol{\xi}_t(\mathbf{x}+\boldsymbol{\tau})\boldsymbol{\xi}_t^{\text{т}}(\mathbf{x})\}, \tag{3}$$

$$\rho_n(\boldsymbol{\tau}) = M\{[\boldsymbol{\xi}_n(\mathbf{x}+\boldsymbol{\tau})]\boldsymbol{\xi}_n^{\text{т}}(\mathbf{x})\}, \quad \tau = |\boldsymbol{\tau}|; \tag{4}$$

здесь индексы t и n обозначают проекции вектора скорости на направления, соответственно параллельное и перпендикулярное вектору $\boldsymbol{\tau}$.

Интенсивность турбулентных пульсаций характеризуется средней кинетической энергией единицы массы

$$\frac{1}{2}M|\xi(\mathbf{x})|^2 = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{3} M\xi_i^2(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{3}\rho_{ii}(o) \tag{5}$$

и ее плотностью распределения $F(u)$ по спектру

$$\frac{1}{2}M|\xi(\mathbf{x})|^2 = \iiint\limits_{-\infty}^{+\infty} F(u)du, \tag{6}$$

$$F(u) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{3} s_{ii}(u); \tag{7}$$

здесь M — символ математического ожидания.

Распределение средней энергии по спектру $u > 0$ при этом может быть получено путем усреднения по поверхности сферы радиуса $R = |u|$ в виде $\iint\limits_{|u|=u} F(u)ds(u)$.

Получаемая в результате функция $E(u)$ будет иметь следующее свойство:

$$E(u) \geqslant 0; \quad \int\limits_{0}^{\infty} E(u)du = \frac{3}{2}\sigma_w^2, \tag{8}$$

где σ_w^2 — дисперсия компонент поля.

Отметим, что приведенные зависимости содержат как частный случай характеристики двух классов изотропных случайных полей — соленоидального и потенциального.

Матричная спектральная плотность произвольного поля будет представлять собой сумму соленоидальной и потенциальной составляющих

$$S(u) = S_{\text{с}} + S_{\text{пот}}(u). \tag{9}$$

Многочисленные исследования дают основание считать, что в первом приближении поле турбулентности атмосферы может быть принято соленоидальным, для которого справедливо соотношение

$$\rho_n(\tau) = \rho_t(\tau) + \frac{\tau}{2}\frac{d}{d\tau}\rho_t(\tau). \tag{10}$$

Для него функция $E(u)$ может быть аппроксимирована следующей зависимостью:

$$E(u) = \frac{4\Gamma(\nu + 2{,}5)u^4}{\sqrt{\pi}L^{2\nu}\Gamma(\nu)(u^2 + L^2)^{\nu+2{,}5}}, \tag{11}$$

где ν — параметр спектра; $\Gamma(\nu)$ — гамма-функция; L — масштаб турбулентности. Дисперсия компонент поля при этом принята единичной.

Частным случаем соотношения (11) при $\nu = 0{,}5$ является спектр Драйдена, а при $\nu = 1/3$ — спектр Кармана.

Применительно к ДПЛА наибольший интерес представляет анализ приповерхностного слоя турбулентности атмосферы. В этом слое наиболее существенным фактором являются зависимости от высоты масштаба турбулентности L и дисперсии $\sigma_i^2 = \sigma^2\left[\xi_i(x)\right]$ компонент поля. Это обусловлено тем, что на малых высотах полета возмущающие воздействия являются существенно нестационарными и использование гипотезы стационарности приводит к значительным ошибкам.

На практике часто применяется подход, при котором весь исследуемый диапазон высот приповерхностного слоя турбулентности атмосферы разбивают на малые участки, в пределах которых параметры L_i и σ_i^2 могут быть без потери точности приняты постоянными и равными своим средним (по высоте) значениям. Затем двойным численным интегрированием трехмерных спектров переходят к одномерным спектральным плотностям, по которым и находят параметры моделирующего алгоритма. Для получения реализаций случайных процессов обычно используется метод скользящего суммирования. Перекрестными связями между компонентами пульсаций скорости ветра, как правило, пренебрегают.

Более общим является метод моделирования, основанный на применении параметрических моделей случайных полей [1]. Сущность подхода сводится к следующему.

Применительно к рассматриваемому случаю для аппроксимации параметров спектра принимаются зависимости вида

$$L = L(y) = \frac{608y}{760 + y}, \tag{12}$$

$$\sigma_k = \sigma_k(y) = a_k + b_k y, \tag{13}$$

где a_k и b_k — постоянные величины.

Реальный случайный процесс $\xi(t)$ заменяется параметрической моделью $\boldsymbol{\zeta}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\Omega})$, имеющей те же, что и указанный процесс, математическое ожидание и моменты второго порядка. Здесь и далее $\mathbf{\Omega}$ — конечномерный случайный параметр.

Обобщенная параметрическая модель поля задается выражением

$$\zeta(\mathbf{x}, \mathbf{\Omega}) = \sqrt{2\frac{s(\mathbf{v})}{\Psi(\mathbf{v})}\mathbf{z}\sin(\mathbf{v}^{\scriptscriptstyle\mathrm{T}}\mathbf{x} + \varphi)}, \tag{14}$$

где компоненты $\mathbf{z} \in R^n$, $\mathbf{v} \in R^m$, $\varphi \in R^1$ случайного параметра $\mathbf{\Omega} = (\mathbf{z}, \mathbf{v}, \varphi)$ — независимые случайные величины; $\Psi(\mathbf{v}) > 0$ — плотность распределения вектора $\mathbf{v}$; $s(\mathbf{v})$ — нормированная спектральная плотность поля $\xi(\mathbf{x})$, для которой $\int\limits_{R^m} s(\mathbf{v})d\mathbf{v} = 1$.

Аппроксимируемое в рамках обсуждаемой задачи случайное поле с учетом соотношений (12) и (13) может рассматриваться как квазиодномерное с переменными параметрами спектра. Для такого поля

$$\frac{E(u)}{4\pi\left|u\right|^2}\left(\delta_{ke} - \frac{u_k u_e}{\left|u\right|^2}\right) = A(u, \alpha)A^*(u, \alpha), \tag{15}$$

где матричная функция $A(u, \alpha)$ находится из условия факторизации матричной спектральной плотности $S_c(u)$ при постоянном значении параметра L.

Параметрическая модель поля (14) приводится к виду

$$\zeta(\mathbf{x}, \mathbf{\Omega}) = \sqrt{2}L(x_o)\Psi^{-\frac{1}{2}}A(u, L(y))\mathbf{z}\sin(\mathbf{v}^{\scriptscriptstyle\mathrm{T}}\mathbf{x} + \varphi). \tag{16}$$

В параметрической модели (16) закон распределения параметра v принимаем равным $\Psi(v) = \Psi_L(u)$, где $\Psi_L(u) = \dfrac{E(u)}{4\pi u^2 c}$, причем $c = 3/2$ — нормирующая постоянная; значение параметра $L(x_o) = L(y_o)$ отвечает среднему значению масштаба на заданной номинальной высоте y_o. В дальнейшем для высот более 5 м допустимо положить $y_o = 20$ м; $L_o = 15{,}6$ м.

Преобразуем (16) к виду

$$\zeta_k(\mathbf{x}, \mathbf{\Omega}) = \sigma_k(y)\gamma_L(v)\beta_k(\mathbf{z}, \mathbf{v})\sin(\mathbf{v}^{\scriptscriptstyle\mathrm{T}}\mathbf{x} + \varphi), \tag{17}$$

где коэффициенты $\beta_k(\mathbf{z}, \mathbf{v})$ $(k = 1, 2, 3)$ определяются выражениями, приведенными в таблице.

Изменение масштаба турбулентности с высотой учитывает множитель $\gamma_L(u)$, который в безразмерных переменных ($\tilde{L} = L(y)/L_o$, $u = vL_o$) имеет вид

$$\gamma_L(u) = \frac{(u^2 + 1)^{0{,}5\nu + 1{,}25}}{\tilde{L}(u^2 + \tilde{L}^{-2})^{0{,}5\nu + 1{,}25}}. \tag{18}$$

Функция $\gamma_L(u)$ воспроизводит амплитудную модуляцию поля по высоте. Многочисленные исследования, связанные с моделированием

Спектр	Значения коэффициентов $\beta_k(\mathbf{z}, \mathbf{v})$	
	β_1	β_2
$S(\mathbf{u})$	$\dfrac{\sqrt{3} z_1 \sqrt{\upsilon_2^2 + \upsilon_3^2}}{\lvert\upsilon\rvert}$	$\dfrac{\sqrt{3}}{\sqrt{\upsilon_2^2 + \upsilon_3^2}} \left(-z_1 \dfrac{\upsilon_1 \upsilon_2}{\lvert\upsilon\rvert} + z_2 \lvert\upsilon_3\rvert\right)$
	β_3	
	$\dfrac{\sqrt{3}}{\sqrt{\upsilon_2^2 + \upsilon_3^2}} \left(-z_1 \dfrac{\upsilon_1 \upsilon_3}{\lvert\upsilon\rvert} - z_2 \mathrm{sign}(\upsilon_3) \upsilon_2\right)$	

приповерхностного слоя турбулентности в виде трехмерного векторного случайного поля ($n = m = 3$), показали, что приемлемые по достоверности результаты могут быть получены для спектра Драйдена ($\nu = 0{,}5$) при числе реализаций не менее $N = 100$, что практически исключает для данного подхода возможность получения результата в естественном (полетном) времени. Данный вывод, как исключительно важный, будет использован в дальнейшем.

Применение теории нечетких регуляторов для СУ ДПЛА с ограниченной неопределенностью. Анализ предшествующих материалов дает основание считать, что условия функционирования ДПЛА характеризуются наличием априори неопределенной информации об их параметрах. Это, в свою очередь, приводит к неопределенности информации о динамике ДПЛА как объекта управления (ОУ).

Как следствие, разработка алгоритмического обеспечения управления движением рассматриваемого типа объектов требует применения при описании процессов нечетких категорий, их представления и знания о них, а также оперирования ими для формулирования соответствующих заключений и выводов.

Одним из наиболее эффективных программно-аппаратных средств, гарантирующих в таких условиях высокое качество управления, является, как известно, теория нечетких множеств с основанным на ней аппаратом нечеткой логики. Нечеткие системы управления (НСУ) относятся к классу интеллектуальных систем.

Особенность нечеткого представления информации, а также наличие значительного числа входных и выходных переменных и формируемых правил поведения системы позволяет, с одной стороны, использовать существующие интеллектуальные технологии для решения широкого спектра задач управления техническими системами самого общего класса, с другой стороны — формировать практически любой закон управления нечеткого регулятора, который будет представлять собой в этом случае частотно-зависимый нелинейный преобразователь для конкретного ОУ. При этом могут быть использованы различные варианты (подходы) решения задачи.

В отличие от НСУ, обладающих свойством "интеллектуальности в большом" и имеющих многоуровневую структуру (уровни обучения, самоорганизации, прогноза событий, работы с базами знаний, формирования решений, адаптации, исполнительный уровень), нечеткие регуляторы относятся к системам, обладающим свойством "интеллектуальности в малом". Используемые при их функционировании знания как средство преодоления неопределенности входной информации, в частности модели ОУ или его поведения, содержат только уровень работы с базами знаний и исполнительный уровень (нечеткие регуляторы на основе алгоритмов Мамдани–Заде и Цукамото). Кроме того, нечеткие регуляторы могут иметь способность к обучению (алгоритмы Такаги–Сугено или (T–S)-структуры).

С учетом указанных способностей функционирования ДПЛА ориентация на создание для них обладающих "интеллектом в большом" НСУ вряд ли может считаться продуктивной. Применение же нечеткого регулятора как средства преодоления неопределенности, причем неопределенности ограниченного типа, в состоянии обеспечить требуемый уровень грубости и стабильную сходимость процессов, что дает основание считать такой подход более целесообразным. Реализация указанного подхода основывается на концепции универсального аппроксиматора. Имея в виду, что нечеткий регулятор $\mathbf{u}(t) = S_f(\bullet)$ может быть представлен объединением нечетких регуляторов в виде $\mathbf{u}(t) = \bigcup\limits_{i=1}^{m} u_i(t)$, искомое решение целесообразно искать на основе построения агрегированного нечеткого регулятора с усиленным свойством грубости, в котором, кроме аппроксиматоров четких регуляторов, например робастного типа, либо оптимальных, используются нечеткие аппроксиматоры действующих ограниченных возмущений, приведенных к входу ОУ, применяемых в качестве компенсаторов этих возмущений. Отметим при этом, что процесс приведения косвенно определяемых возмущений к входу ОУ является далеко не формализованным.

Построение каждого нечеткого регулятора в этом случае должно быть основано на фаззификации ошибки системы или выхода робастного регулятора (РР). Число входных множеств фаззификации нечеткого регулятора выбирается для каждой входной переменной соответствующего нечеткого регулятора. Такие множества описываются определенными значениями по уровню (обычно О, Н, П — соответственно отрицательное, нулевое, положительное значения по уровню). Их формирование в процессе реального полета ДПЛА в виде термов соответствующих лингвистических переменных, являющихся функциями переменных состояния, осуществляется оператором по результатам определения степени стабильности наблюдения изображения первоначально сопровождаемого объекта, идентифицируемого как цель, перед повторным заходом ДПЛА на него. Параметры заключений нечетких правил нечеткого регулятора могут быть установлены при моделировании с помощью редактора ANFIS раздела Fuzzy программного пакета Matlab (Toolbox Fuzzy, Simulink) с обеспечением грубости и устойчивости каждой нечеткой модели.

Наличие ветровых возмущений и турбулентного состояния атмосферы приводит к необходимости интеллектуализации управления как траекторным движением ДПЛА, так и его угловым движением относительно центра масс.

Для описания номинального движения используется "полная" пространственная модель полета ДПЛА в неспокойной атмосфере, приведенная, в частности, в [6].

Проекции воздушной V и земной скоростей V_k на ось нормальной СК находятся в результате применения матрицы перехода от скоростной СК (индекс "a") к нормальной (индекс "g") и от траекторной (индекс "k") к нормальной СК.

При наличии постоянного ветра, скорость которого $\mathbf{w}(\mathbf{x})$ описывается соотношением (1); воздушная $\mathbf{V}(t)$ и земная $\mathbf{V}_k(t)$ скорости ДПЛА связаны соотношением:

$$\mathbf{V}(t) = \mathbf{V}_k(t) + \mathbf{w}(\mathbf{x}) \tag{19}$$

при $\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x})$ в (1), равном нулю.

При этом соответствующие проекции задаются как

$$\begin{aligned} V\cos\vartheta_a\cos\psi_a &= V_k\cos\theta\cos\Psi - w_{xg}, \\ V\sin\vartheta_a &= V_k\sin\theta - w_{yg}, \\ -V\cos\vartheta_a\sin\psi_a &= -V_k\cos\theta\sin\Psi - w_{zg}, \end{aligned} \tag{20}$$

где ϑ, θ и Ψ — углы тангажа, возвышения и поворота траектории соответственно.

Для определения углов атаки α и скольжения β с учетом ветровых составляющих воздушной скорости удобно использовать следующие соотношения:

$$\alpha = -\operatorname{arctg}\frac{V_y}{V_x}; \quad \beta = \arcsin\frac{V_z}{V}, \tag{21}$$

Возмущенное движение рассматривается в окрестности опорного движения, малость отношения параметров которого допускает осуществление линеаризации исходной, существенно нелинейной модели.

В общем виде линейная детерминированная модель возмущенного движения записывается в форме

$$\frac{d}{dt}\mathbf{x}(t) = A_{\text{н}}(t)\mathbf{x}(t) + B_{\text{н}}(t)\mathbf{u}(t) + \boldsymbol{\phi}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \quad \mathbf{x}(t_o) = \mathbf{x}_o; \tag{22}$$

$$\mathbf{y}(t) = C\mathbf{x}(t), \tag{23}$$

где $A_{\text{н}}(t)$ и $B_{\text{н}}(t)$ — переменные по времени номинальные матрицы состояния и управления; C — постоянная матрица наблюдения; $\boldsymbol{\phi}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ — локально ограниченная по t функция в ограниченной области определения; $\mathbf{y}(t)$ — измеряемая переменная при формировании управляющего воздействия только четким регулятором.

Предполагается, что свойства управляемости и наблюдаемости ОУ в смысле Калмана выполнены.

При переходе к линеаризованной стохастической модели состояния возникает необходимость расширения ее вектора состояния в силу необходимости учета, что для реальной атмосферы вектор $\boldsymbol{\xi}(x) \neq 0$, а также исходя из необходимости подавления нечетким регулятором всех приведенных ко входу ОУ возмущений и обеспечения устойчивости и оптимальности замкнутой системы (22), (23) четким регулятором, что, возможно, потребует введения дополнительной интегрирующей обратной связи по отклонению траекторного движения (для достижения требуемого астатизма) и использования дополнительной модели динамики рулевого привода.

Принятое условие ограниченной неопределенности в части, касающейся вектора $\boldsymbol{\xi}(x)$, а следовательно, и стохастического значения функции $\boldsymbol{\phi}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$, допускает возможность при использовании результатов, изложенных в ранее, аппроксимировать ее эквивалентным случайным процессом, получаемым с использованием формирующих фильтров.

В свою очередь, различным значениям числовых характеристик эквивалентных случайных процессов действующих возмущений могут быть поставлены в соответствие (с использованием полунатурных моделирующих стендов [1]) априори моделируемые нестабильности наблюдаемого изображения, что, в принципе, открывает возможности обучения системы.

Тогда, объединяя всю совокупность локальных моделей расширенного вектора, представляем

$$\frac{d}{dt}\mathbf{x}_{\text{р}}(t) = F_{\text{р}}(t)\mathbf{x}_{\text{р}}(t) + G(t)\mathbf{w}_e(t), \tag{24}$$

$$\frac{d}{dt}\mathbf{w}_e = \Phi_e(t)\mathbf{w}_e + G_w(t)\mathbf{w}_e(t), \tag{25}$$

где $\mathbf{x}_{\text{р}}(t)$ — $(n+m)$-мерный вектор состояния расширенной системы; $F_{\text{р}}(t)$ — матрица состояния ОУ расширенной системы размера

$(m+n)\times(m+n)$; $\Phi_e(t)$ — обобщенная матрица эквивалентных действующим возмущениям случайных процессов; $G_w(t)$ — матрица возмущения расширенной системы размера $(n+m)_{\text{р}}$; $\mathbf{w}(t)$ — p-мерный порождающий вектор возмущений — гауссовый случайный процесс.

Матрицы $\Phi_e(t)$ и $G(t)$ могут быть представлены как блочные через исходные матрицы объекта и фильтра.

Естественно, возникает вопрос о критериях эквивалентности сопоставляемых случайных процессов.

При принятии гипотезы о гауссовом марковском случайном процессе, к которому сводится исследуемый, его плотность распределения полностью характеризуется двумя функциями: вектором средних значений $\tilde{\mathbf{x}}_{\text{р}}(t) = M[\mathbf{x}(t)]$ и матрицей ковариаций $R(t) = M\{[\mathbf{x}(t)-\tilde{\mathbf{x}}(t)]\times \times[\mathbf{x}(t)-\tilde{\mathbf{x}}(t)]^{\text{т}}\}$. Уравнения для определения этих величин имеют вид

$$\frac{d}{dt}\left[\tilde{\mathbf{x}}_{\text{р}}(t)\right] = F(t)\tilde{\mathbf{x}}(t) + G(t)\tilde{\mathbf{w}}_e(t), \tag{26}$$

$$\frac{d}{dt}\left[R(t)\right] = F(t)R(t) + R(t)F^{\text{т}}(t) + G(t)Q(t)G^{\text{т}}, \tag{27}$$

где $Q(t)$ — интенсивность белого шума.

Близость значений определяемых характеристик соответствующим значениям характеристик моделируемых реальных возмущений, очевидно, может быть принята в качестве обсуждаемого критерия эквивалентности процессов.

Выводы. Изложенное позволяет констатировать, что несмотря на определенные успехи, достигнутые в последние годы в области проектирования ДПЛА, комплексы, созданные в РФ, продолжают отставать по ряду показателей от лучших зарубежных аналогов.

Ликвидация этого отставания возможна при создании аппаратов следующего поколения, отличительной особенностью которых будет оснащение их интеллектуальными СУ, способными существенно повысить эксплуатационные характеристики, в том числе обеспечить инвариантность применения к условиям состояния атмосферы.

Перспективным направлением интеллектуализации СУ ДПЛА следует считать разработку нечеткого регулятора на основе алгоритмов Мамдани–Заде и Цукамото, используемых в сочетании с четкими регуляторами оптимального или робастного типа.

Предложенный метод эквивалентных возмущений, хотя и является приближенным, может позволить упростить решение рассматриваемой задачи и по-новому подойти к процессу обучения нейроподобных СУ ДПЛА.

Выполненный анализ путей интеллектуализации алгоритмического обеспечения нечеткого управления ДПЛА позволил на концептуальном уровне обосновать один из возможных вариантов решения проблемы, который может оказаться полезным с точки зрения перспектив создания аппаратов нового поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ш а л ы г и н А. С., Л ы с е н к о Л. Н., Т о л п е г и н О. А. Методы моделирования ситуационного управления движением беспилотных летательных аппаратов / Под ред. А.В. Ноздрачева и Л.Н. Лысенко. Т. 11. Справочная библиотека разработчика-исследователя вооружения и военной техники. – М.: Машиностроение.
2. К у з н е ц о в А. Г. Повышение точности оценки координат малогабаритного беспилотного летательного аппарата с использованием системы технического зрения / Дисс. . . . канд. техн. наук. – М.: МАИ, 2011.
3. Б и е н Л е К и. Обзорная информационная система беспилотного летательного аппарата экологического мониторинга прибрежных районов / Дисс. . . . канд. техн. наук. – СПб.: БГТУ “ВОЕНМЕХ” им. Д.Ф. Устинова, 2004.
4. Ф и р с о в С. П. Нейросетевая система управления посадкой дистанционно-пилотируемого летательного аппарата / Дисс. . . . канд. техн. наук. – М.: МАИ, 2005.
5. Х а м м у д А б д у л л а. Использование нейросетевых подходов в адаптивных системах управления летательными аппаратами / Дисс. . . . канд. техн. наук. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
6. Д о б р о л е н с к и й Ю. П. Динамика полета в неспокойной атмосфере. – М.: Машиностроение, 1969.

Статья поступила в редакцию 16.11.2011

Лев Николаевич Лысенко родился в 1939 г., окончил в 1963 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки, заслуженный изобретатель РФ, лауреат премии Президента РФ. Действительный член и член президиума Российской академии ракетных и артиллерийских наук (РАРАН). Профессор кафедры “Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 300 научных работ и изобретений в области баллистики и динамики движения беспилотных летательных аппаратов.

L.N. Lysenko (b. 1939) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1963. D.Sc.(Eng.), professor, Honored Scientist of the RF, Honored Inventor of the RF, Winner of RF President Prize. Acting member of the Russia Academy of Rocket and Artillery Sciences (RARAS) and member of RARAS Presidium. Professor of “Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecrafts” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 300 publications and inventions in the field of ballistics, dynamics of motion of unmanned flying vehicles.

Нгуен Чонг Шам родился в 1983 г., окончил в 2011 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области управления движением летательных аппаратов различного назначения и статистической динамики полета.

N.T. Sam (b. 1983) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2011. Post-graduate of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of motion control of different-purpose flying vehicles and statistical flight dynamics.