

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **ФИЗИЧЕСКИЙ**
Кафедра Физико-техническая информатика

Направление подготовки **03.03.02 ФИЗИКА**
Образовательная программа: **БАКАЛАВРИАТ**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА
Пришляк Елизаветы Егоровны

Тема работы: Адаптивное управление движением беспилотных аппаратов по программной траектории

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

Научный руководитель

ученая степень, звание

ученая степень, звание

должность, место работы

должность, место работы

...../.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

...../.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....2024 г.

«.....».....2024 г.

Дата защиты: «.....».....2024 г.

Оглавление

Введение	3
1. Характеристика систем управления беспилотными аппаратами	4
1.1. Область применения и задачи беспилотных аппаратов.....	4
1.2. Управление движением.....	4
1.3. Выводы по разделу.....	7
2. Адаптивное управление движением по программной траектории ...9	
2.1. Постановка задачи.....	9
2.2. Управление движением летательного аппарата на плоскости.....	9
2.3. Управление движением в трехмерном пространстве.....	11
2.4. Управление с адаптацией.....	11
2.5. Выводы по главе.....	12
3. Численные эксперименты	13
3.1. Разработка структуры программного обеспечения системы моделирования.....	13
3.2. Эксперименты на плоскости.....	17
3.3. Эксперименты в трехмерном пространстве.....	19
3.4. Эксперименты с адаптацией.....	21
3.5. Режим «тренажер».....	22
3.6. Выводы по главе.....	23
4. Реальные эксперименты	24
4.1. Описание оборудования.....	24
4.2. Структура программного обеспечения бортового контроллера	26
4.3. Эксперименты с летательным аппаратом самолетного типа.....	27
4.4. Эксперименты с катером.....	28
4.5. Эксперименты с квадрокоптером.....	32
4.6. Выводы по главе.....	35
Заключение	36
Список литературы	37

Введение

В настоящее время беспилотные аппараты (БА) призваны решать широкий спектр задач гражданского направления. Использование беспилотных летательных аппаратов позволяет исключить из их конструкций оборудование, необходимое для экипажа на борту, а при автоматическом управлении также человеческий фактор. К существующим методам пилотирования беспилотными аппаратами относятся: дистанционное управление с помощью пультов, работающих на радиоканалах и взаимодействие с которыми происходит вручную; автоматическое управление, в процессе которого команды управления формируются программой. Несмотря на то, что проблема автоматического управления движением БА уже имеет множество решений, разработка новых алгоритмов, позволяющих уменьшить отклонения от траектории в условиях возмущений внешней среды, является актуальной задачей на сегодняшний день.

В данной работе представлено алгоритмическое и программное обеспечение, разработанное для управления движением беспилотного аппарата по программной траектории с автоматической настройкой параметров и возможностью адаптации к конкретному беспилотному аппарату; приведены результаты численных и реальных экспериментов. Под программной траекторией понимается траектория, являющаяся функцией времени. В работе предложен закон управления движением, обеспечивающий непрерывное формирование команд управления линейной и угловой скоростями и команды управления высотой; реализовано программное обеспечение для бортового контроллера аппарата. Разработана система моделирования, включающая численное решение дифференциальных уравнений движения аппарата, средства двухмерной и трехмерной визуализации положения в пространстве. Выполнена серия численных и реальных экспериментов с аппаратами самолетного и квадроспирального типа, а также с беспилотным катером.

1.ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ АППАРАТАМИ

1. 1 Область применения и задачи беспилотных аппаратов

Относительно невысокая цена беспилотных летательных аппаратов, компактность и мобильность обеспечивают широкие возможности по их применению в гражданской сфере. Беспилотные аппараты используются для наблюдения за ситуациями на автомобильных дорогах, мониторинга, геологических измерений на большой площади, обследования полей и лесных хозяйств, доставки грузов и во многих других областях [1, 2]. Для подобных задач зачастую требуется обеспечить автоматическое следование аппарата по обследуемой территории, чтобы не ограничивать зону работы возможностью средств связи с пультом оператора, а также исключить ошибки ручного управления.

Использование нескольких беспилотных аппаратов в составе группы позволяет решать более сложные задачи, например, мониторинг большой территории или выполнение геологической разведки посредством аэрофотосъемки. Координирование полета нескольких совместных летательных аппаратов требует разработки соответствующего закона управления, который может видоизменяться в зависимости от поставленных задач. Например, во время группового полета БПЛА в случае скоординированного планирования во избежание столкновений между аппаратами и оптимизации мобильности полета [3] или при необходимости поддерживать заданную конфигурацию в групповом полете [4]. Однако, существующие методы управления не обеспечивают требуемой точности в условиях возмущений внешней среды, а также требуют индивидуальной настройки параметров для беспилотных аппаратов разного типа.

1.2 Управление движением

В задаче скоординированного мониторинга большой территории и быстрого реагирования на чрезвычайные ситуации может быть использована

группа из нескольких беспилотных летательных аппаратов с датчиками на борту [5]. В такой системе каждый БПЛА постоянно поддерживает связь с наземной станцией, которая выполняет дифференциальные поправки GPS и обновляет план полета, представляющий собой последовательность из трех путевых точек. Состояния высоты, скорости и продольной динамики системы моделируются дифференциальными уравнениями первого порядка. Система упрощенных уравнений, моделирующих описанную авторами динамику представлены следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_a &= u \cos \theta \\
 \dot{y}_a &= u \sin \theta \\
 \dot{u} &= \frac{1}{\tau_u} (-u + u_{cmd}), \underline{u} \leq \dot{u} \leq \bar{u} \\
 \dot{\theta} &= \omega \\
 \dot{\omega} &= \frac{1}{\tau_\omega} (-\omega + \omega_{cmd}) \\
 \dot{z}_a &= \frac{1}{\tau_z} (-z + z_{cmd}), \underline{z} \leq \dot{z} \leq \bar{z}
 \end{aligned} \tag{1}$$

где (x, y, z) – координаты БПЛА в пространстве относительно некоторой системы отсчета; u – скорость БПЛА; ω – скорость поворота; θ – угол, изменяющийся в пределах $-\pi < \theta < \pi$; u_{cmd} , ω_{cmd} , и z_{cmd} – команды управления; τ_u , τ_ω , и τ_z – постоянные времени.

Другой не менее важной задачей при полете нескольких совместных БПЛА в составе группы является реконфигурация аппаратов друг относительно друга. В процессе выполнения миссии возможен выход из строя одного и более БПЛА, обход сложного препятствия или слияние нескольких подгрупп БПЛА в одну, которое приведет к нарушению текущего строя [6]. Для решения этой задачи авторы используют распределенную модель прогнозирующего управления и конечные автоматы, полагая целью оптимизации стоимость реконфигурации, и перепроверяют решение с помощью метода роя частиц. В данном случае полагается, что координата

высоты БПЛА постоянна, тогда модель движения центра тяжести описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}x_i(k+1) &= x_i(k) + v_i \cos \chi_i(k) \tau, \\y_i(k+1) &= y_i(k) + v_i \sin \chi_i(k) \tau, \\v_i(k+1) &= v_i(k) + \frac{v_i^c(k) - v_i(k)}{\alpha_v}, \\ \chi_i(k+1) &= \chi_i(k) + \frac{\chi_i^c(k) - \chi_i(k)}{\alpha_\chi}.\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь x_i, y_i , - координаты БПЛА в пространстве; v_i – скорость БПЛА; χ – азимут БПЛА в системе отсчета земли; v_i^c, χ_i^c - команды управления для скорости и азимута; τ – период; α_v, α_χ - временные константы для скорости и крена соответственно.

При этом координаты каждого БПЛА в строю в системе отсчета опорной точки, на которую ориентируются все аппараты, задаются следующими уравнениями:

$$\begin{bmatrix} x_i^d(k) \\ y_i^d(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r(k) \\ y_r(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \chi_r(k) & \sin \chi_r(k) \\ -\sin \chi_r(k) & \cos \chi_r(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i^{dr}(k) \\ y_i^{dr}(k) \end{bmatrix}.\quad (3)$$

где $x_i^{dr}(k), y_i^{dr}(k)$ - относительные расстояния между искомым положением и точкой отсчета траектории за время k .

Еще одной похожей задачей является обход препятствий беспилотными аппаратами. В работе [7] рассматривается управление движением с обходом препятствий с использованием следующей модели динамики беспилотных летательных аппаратов самолетного типа:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= V \cos \alpha_n \cos \beta_n, \\ \dot{y} &= V \cos \alpha_n \sin \beta_n, \\ \dot{z} &= V \sin \alpha_n, \\ m \dot{V} &= T - D - mg \sin \alpha_n, \\ \dot{\alpha}_n &= \frac{L \cos \delta_n - mg \cos \alpha_n}{m}, \\ \dot{\beta}_n &= \frac{L \sin \delta_n}{mV \cos \alpha_n}.\end{aligned}\quad (4)$$

где α_n — угол наклона траектории; β_n — курсовой угол; δ_n — угол крена; T — тяга двигателя; D — сила сопротивления; L — подъемная сила; V — скорость; m — масса БПЛА.

В большом количестве работ по управлению движением БПЛА по траектории используют упрощенную модель вида [8]:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= V \cos \phi + W_x = V \cos \chi, \\ \dot{y} &= V \sin \phi + W_y = V \sin \chi, \\ \dot{\chi} &= \omega\end{aligned}\tag{5}$$

где V — скорость БПЛА; W_x, W_y — компоненты скорости ветра, ϕ — курсовой угол; χ — курс относительно земли.

Для проверки работоспособности законов управления используют средства моделирования движения летательных аппаратов с применением как универсальных инструментов вроде Matlab/Simulink [9, 10], так и специализированных или собственное программное обеспечение, выполняющее численное решение систем дифференциальных уравнений [11].

Для построения систем управления современными малыми автономными аппаратами (летательными, наземными, морскими) используются микроконтроллеры с подключенным к ним набором датчиков: инерциальные, датчики давления, магнитометры, спутниковой навигации. Программное обеспечение этих аппаратов часто основано на продуктах с открытым исходным кодом таких как INAV, Betaflight, Ardupilot, PX4 [12].

1.3 Выводы по разделу

В решениях проблемы автоматического управления движением беспилотных аппаратов применяются различные методы. Модели движения при этом описываются системой дифференциальных уравнений, видоизменяющихся в зависимости от поставленной задачи. Однако, рассмотренные законы управления слабо применимы в более общей задаче следования по трехмерной программной траектории в условиях возмущений внешней среды и требуют настройки параметров законов управления под

каждый аппарат.

Для реализации программного обеспечения, включающего законы управления, используемые в данной работе, можно применить набор стандартных средств программирования с открытым исходным кодом.

2. АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ПО ПРОГРАММНОЙ ТРАЕКТОРИИ

2.1 Постановка задачи

В области автоматического управления разнородными аппаратами актуальными проблемами являются необходимость индивидуальной настройки алгоритма и выбор коэффициентов для каждого беспилотного аппарата, а также большие ошибки системы управления с фиксированными коэффициентами в условиях возмущений внешней среды. В связи с этим возникает задача разработки системы управления с автоматической подстройкой коэффициентов в процессе работы к конкретному аппарату и внешним возмущениям.

Целью данной работы является разработка системы управления движением беспилотных аппаратов разных типов по программной траектории с автоматической подстройкой коэффициентов в процессе работы к конкретному аппарату и внешним возмущениям. Для реализации поставленной цели требуется решить следующие **задачи**:

1. Изучить математические модели движения и способы управления беспилотными аппаратами.
2. Разработать метод управления движением по траектории с адаптацией к конкретному беспилотному аппарату.
3. Разработать программное обеспечение для моделирования движения, включающее математические модели разнородных аппаратов.
4. Разработать программный модуль с законом управления для управляющего контроллера.
5. Провести и проанализировать эксперименты с использованием аппаратов самолетного, квадроспирального типов и катера.

2.2 Управление движением летательного аппарата на плоскости

Для реализации системы управления предложен следующий алгоритм взаимодействия: в процессе автоматического движения задается целевая

точка, которая движется по заданной трехмерной траектории с требуемой скоростью. Задача управления сводится к задаче следования беспилотного аппарата за целевой точкой, координаты которой вычисляются динамически во время автоматического движения.

Запишем модель движения (5) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x)u, \\ u &= [v, \omega]^T, \end{aligned} \quad (6)$$

где $x = [x, y, \chi]^T$ - вектор состояния, содержащий координаты и курсовой угол; u - вектор управления, который задает команды управления по линейной и угловой скоростям,

$$f(x) = \begin{bmatrix} \cos(\chi) & 0 \\ \sin(\chi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Зададим уравнения желаемой динамики в виде:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= F(x), \\ F(x) &= K(x_r - x), \end{aligned} \quad (7)$$

где матрица $K = \text{diag}(k_x, k_y, k_\chi)$ соответствует набору желаемых постоянных времени по каналам управления;

Потребуем равенство желаемых и текущих значений старших производных переменных состояния в (6), (7) [13]. Умножая обе части уравнения на $(f^T(x)f(x))^{-1}f^T(x)$, и учитывая, что в нашем случае $f^T(x)f(x) = I$, получим закон управления в плоскости XY в виде команд линейной и угловой скоростям:

$$u = f^T(x)F(x). \quad (8)$$

2.3 Управление движением в трехмерном пространстве

Для получения закона управления по высоте используем уравнение для \dot{z} из (4). Полагая, что в крейсерском полете угол тангажа (Θ) беспилотного аппарата самолетного типа мал и незначительно отличается от угла наклона траектории, перепишем уравнение для высоты

$$\dot{z} = V \Theta, \quad (9)$$

Желаемое уравнение изменения высоты зададим в виде:

$$\dot{z} = a_{\Theta}(z_r - z). \quad (10)$$

Здесь z_r - желаемая высота полета; a_{Θ} - положительный коэффициент, задающий требуемое время переходного процесса.

Приравнявая производную высоты (9) к ее желаемому значению (10) и, полагая процессы изменения углов ориентации малого аппарата быстрыми, получим уравнение для командного значения угла тангажа:

$$u_{\Theta} = \frac{a_{\Theta}}{V}(z_r - z). \quad (11)$$

2.4 Управление с адаптацией

Предложенный закон управления (8) не учитывает такие возмущения окружающей среды, как например ветер или течение воды. В связи с этим возможно существенное отклонение аппарата, движущегося за целевой точкой, от расчетной траектории. Для коррекции ошибки движения по траектории в закон управления добавлена автоматическая настройка коэффициентов матрицы **K**:

$$\dot{k}_x = \dot{k}_y = -\mu_{xy}(d_r - d - \lambda_z \dot{z}_r), \quad (12)$$

где μ_{xy} - малый положительный коэффициент; λ_z - положительный размерный коэффициент порядка единицы; d_r и d - желаемая и фактическая дистанция до целевой точки.

В процессе экспериментов (глава 3) при изменении высоты БПЛА установлено существенное отклонение от желаемой траектории при

использовании закона (11). Поэтому предлагается ввести поправку $k_z \dot{z}_r$, которая позволяет компенсировать скоростную ошибку при движении по вертикали:

$$\begin{aligned} u_{cmd} &= \frac{a_\theta}{V} (z_r - z) + k_z \dot{z}_r, \\ \dot{k}_z &= \mu_z \operatorname{sign}(\dot{z}_r)(z_r - z), \end{aligned} \quad (13)$$

где μ_z - малый положительный коэффициент.

2.5 Выводы по главе

Предложенный в главе закон управления основывается на реализации желаемых уравнений для старших производных по каналам управления за счет отрицательной обратной связи путем решения обратной задачи динамики. Закон управления отличается простотой реализации. Для исключения необходимости индивидуальной настройки параметров под каждый аппарат и внешние возмущения закон управления расширен двумя уравнениями адаптации, которые обеспечивают автоматическую настройку коэффициентов усиления в каналах тяги и управления высотой.

В результате получен закон управления движением, с помощью которого вычисляются команды линейной и угловой скоростям аппарата для управления движением аппарата в плоскости ХУ и закон управления движением в вертикальной плоскости. Предложена модификация в виде автоматически настраиваемых коэффициентов, позволяющих минимизировать ошибку следования по трехмерной траектории.

3. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Исследование разработанного закона управления выполнено двумя способами: 1) с помощью системы моделирования проведены численные эксперименты, позволяющие оценить ошибки управления в различных ситуациях и выбрать коэффициенты регулятора для реальных экспериментов; 2) проведены реальные эксперименты на беспилотных аппаратах с целью оценить устойчивость и качество управления предложенных алгоритмов в реальных условиях. В главе приводится описание тестирования предложенного закона управления методами численного моделирования с использованием модели движения летательного аппарата.

3.1 Разработка структуры программного обеспечения системы моделирования

Для предварительной отладки разработанного закона управления и настройки программного обеспечения полетного контроллера разработана система моделирования средствами python, pygame, matplotlib с возможностью 3D визуализации в flightgear.

Общая схема структуры программного обеспечения приведена на Рис. 1. Основным компонентом, в котором реализован закон управления, является модуль Controller, принимающий на вход данные о текущем и желаемом положении аппарата и возвращающий команды управления линейной и угловой скоростями и команды управления по высоте. В этом модуле программно реализованы законы управления (8, 12, 13).

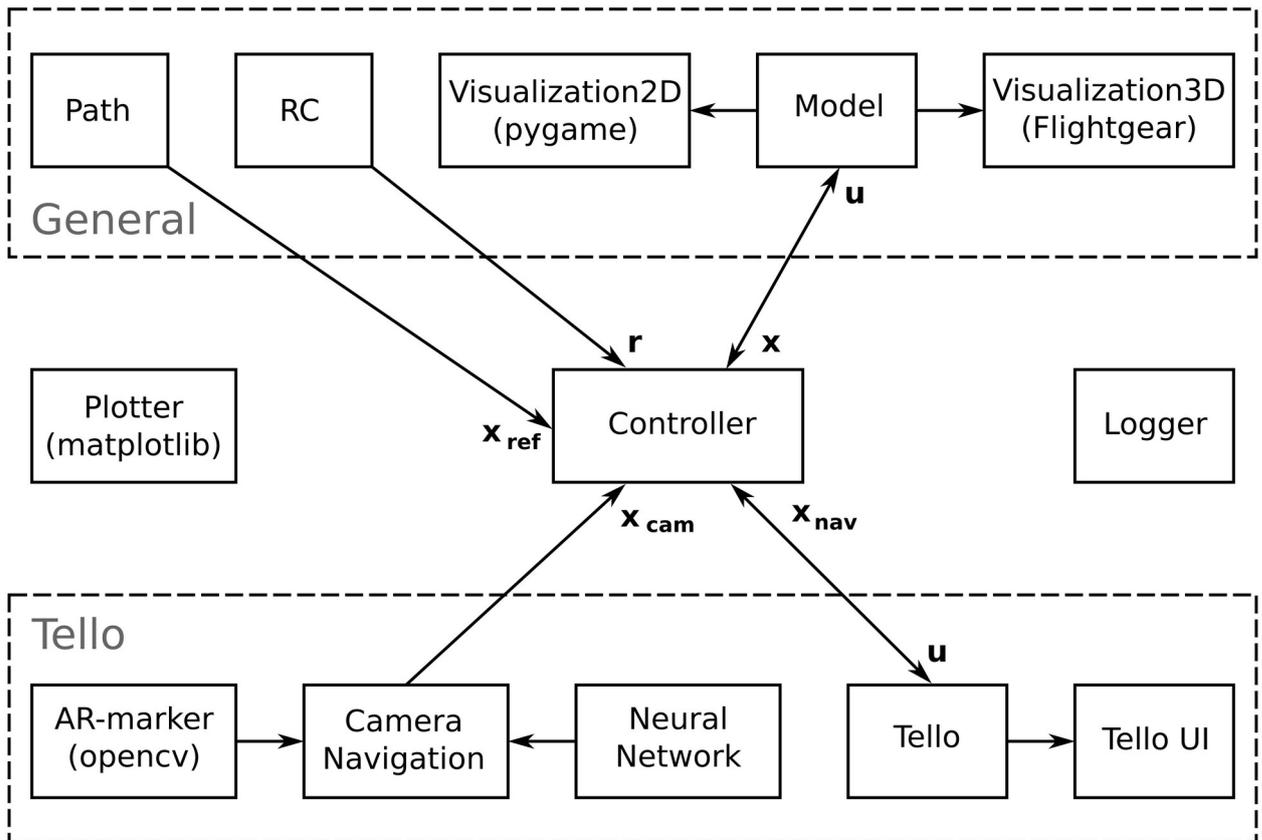


Рис. 1. Структура программного обеспечения

Модуль Path отвечает за формирование координат, которые соответствуют положению целевой точки, движущейся по траектории, заданной как функция времени. Эти координаты принимаются как желаемые для модуля Controller. В рамках данной работы принято решение задавать круговую траекторию, так как она наиболее удобна в отладке алгоритмов: обеспечивается полное наблюдение за характером движения аппарата. Траектория в вертикальной плоскости задается в форме пилы с изменяющейся вертикальной скоростью. В качестве параметров траектории для модуля Path задаются радиус круга, скорость движения целевой точки и диапазон высот.

Модуль RC отвечает за обработку команд с джойстика, используемого для управления беспилотным аппаратом в ручном режиме во время взлета и

посадки. Переключение между ручным режимом и автоматическим, осуществлялось по нажатию кнопки.

Модуль Model выполняет численное решение систем уравнений (4), (5) и рассчитывает движение беспилотного аппарата по трехмерной и двухмерной траектории соответственно. В разработанной системе моделирования средствами ruckate осуществляется 2D отрисовка заданной целевой точки, движущейся по трехмерной траектории, и БПЛА, следующего за целью, что позволяет в реальном времени отследить возникающие отклонения от желаемой траектории и скорректировать задаваемые параметры системы управления для дальнейших экспериментов (Рис. 2).

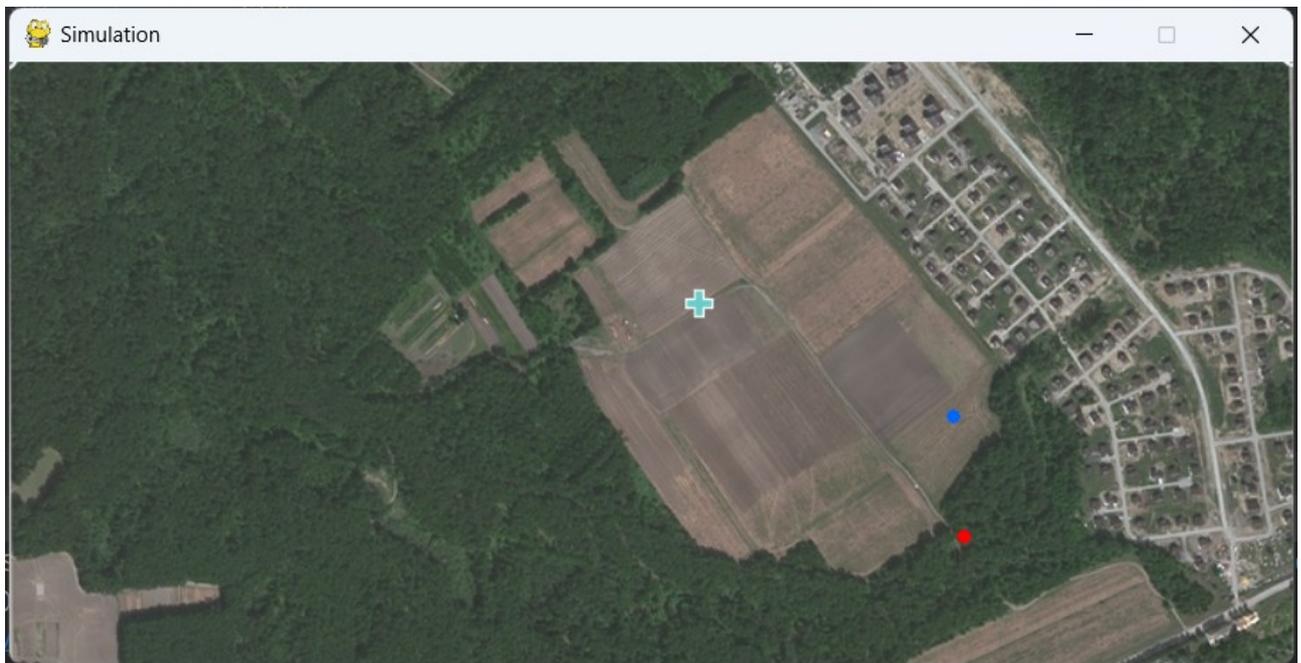


Рис. 2. Визуализация движения беспилотного аппарата (отмечен синим цветом) за целевой точкой красного цвета

Для проведения экспериментов с квадрокоптером Tello разработан специальный стенд с внешней камерой, позволяющий извне отслеживать положение аппарата в пространстве. Для этого добавлены модули, позволяющие определять и рассчитывать координаты квадрокоптера в поле зрения камеры. Детектирование осуществлялось с помощью AR-маркера,

закрепленном на квадрокоптере, однако наличие дополнительных элементов в конструкции аппарата иногда приводило к дестабилизации (Рис. 3).



Рис. 3. Квадрокоптер Tello с закрепленным сверху AR-маркером

Для упрощения способа детектирования обучена нейронная сеть YOLOv8 на наборе данных из более 1000 изображений с разметкой квадрокоптеров. На данный момент обнаружение квадрокоптера в поле зрения камеры позволяет установить слежение за аппаратом и оценку его местоположения без использования дополнительных опознавательных признаков (Рис. 4).

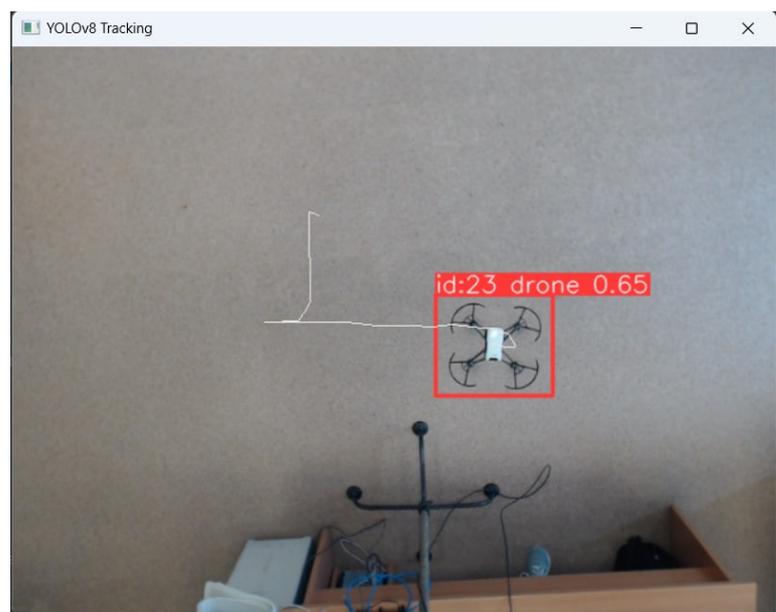


Рис. 4. Отслеживание квадрокоптера Tello с помощью обученной

нейронной сети YOLOv8

Также разработан интерфейс оператора данного экспериментального стенда. В интерфейсе выводится изображение с курсовой камеры с наложением на него индикации телеметрии, курса, высоты, заряда аккумулятора, углов ориентации (линия искусственного горизонта), скорости полета по осям координат и расчетные значения самих координат (Рис. 5.). Интерфейс используется для контроля за параметрами аппарата и ходом эксперимента.



Рис. 5. Интерфейс оператора квадрокоптера Tello

3.2 Эксперименты на плоскости

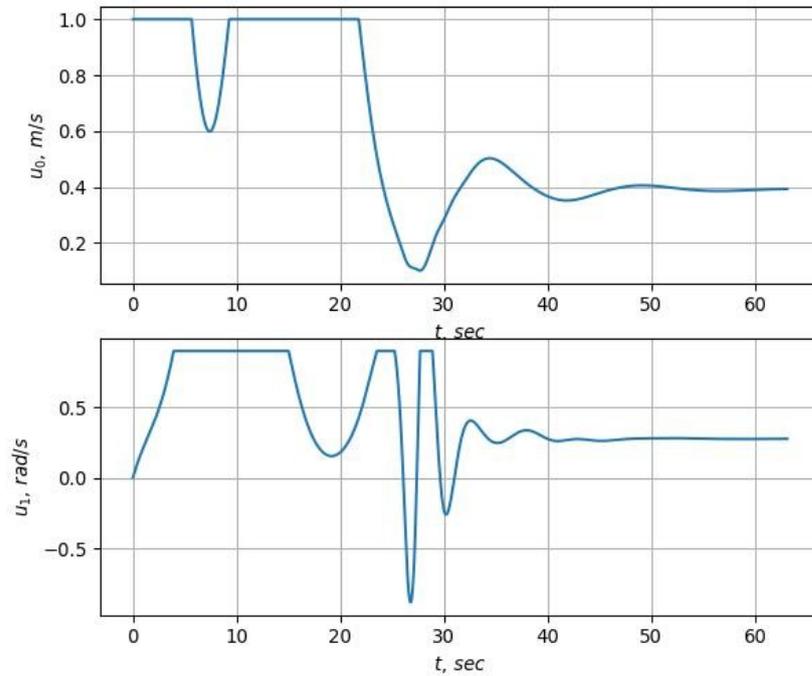
Первые эксперименты проведены для случая полета по двумерной траектории без законов адаптации. Эксперименты проводились без возмущений (Рис. 6) внешней среды и с возмущением в виде ветра с постоянной скоростью и направлением (Рис. 7). Добавление компоненты ветра при моделировании вызвало смещение действительной траектории

БПЛА от желаемой в сторону направления ветра (Рис. 7.б). Радиус желаемой траектории задавался 150 м, желаемая скорость 20 м/с.

В эксперименте использовались следующие коэффициенты законов управления:

$$k_x = k_y = 1, k_{\dot{x}} = 0.25.$$

а)



б)

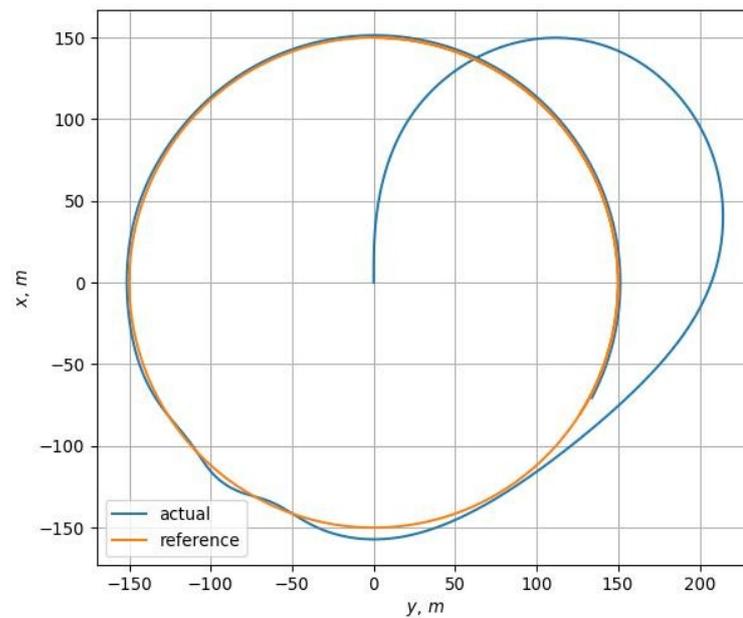
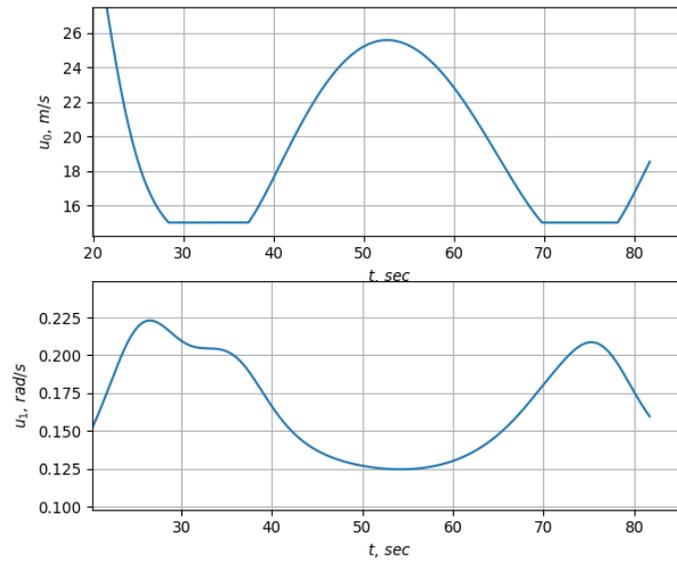


Рис. 6. Двухмерная траектория без ветра: а - Графики команд управления

линейной и угловой скоростями; б - Траектория полета

а)



б)

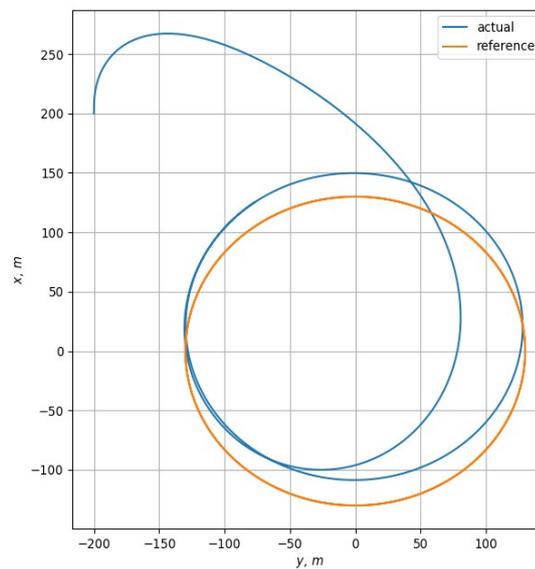
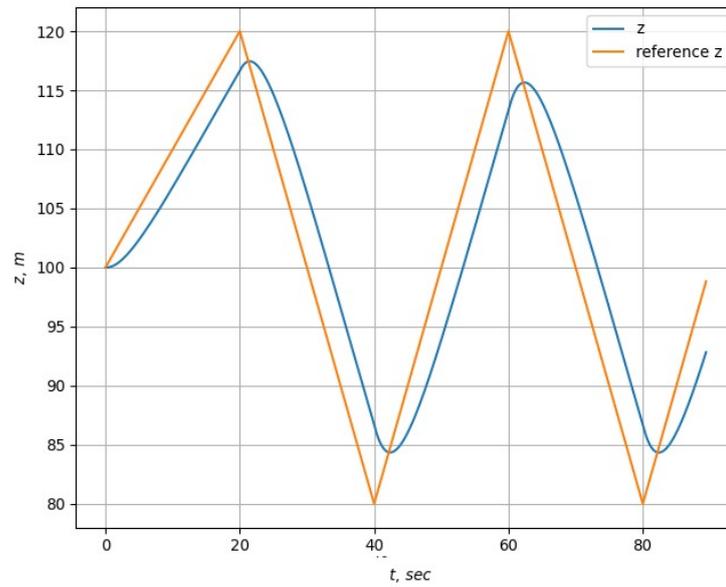


Рис. 7. Двухмерная траектория с ветром: а - Графики команд управления линейной и угловой скоростями; б - Траектория полета

3.3 Эксперименты в трехмерном пространстве

Последующие эксперименты проводились для случая полета по трехмерной траектории с добавлением закона управления (11) с коэффициентом $a_\theta=0.3$. Желаемая траектория в вертикальной плоскости задавалась пилообразной кривой, замкнутой в круг радиуса 125 метров, а заданная высота менялась в пределах от 80 до 120 м. С помощью системы моделирования выявлено отклонение от желаемой траектории по вертикали (Рис. 8.а). По результатам данного эксперимента установлена необходимость введения поправки $k_z \dot{z}_r$, компенсирующей ошибку следования.

а)



б)

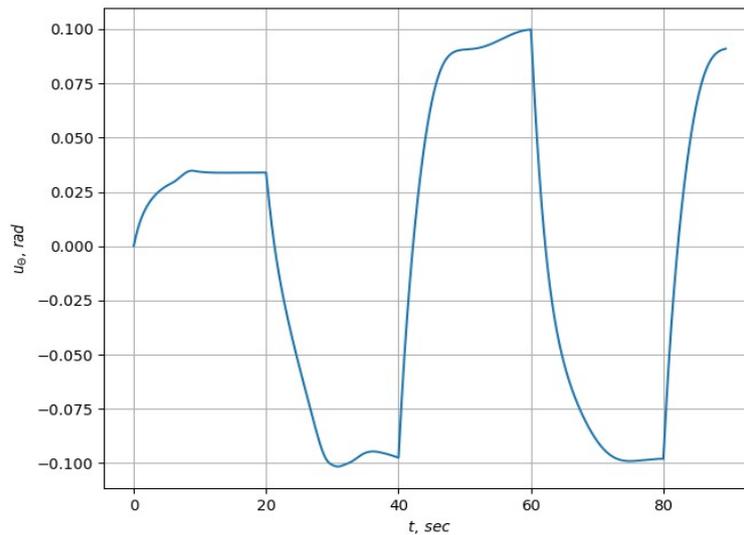


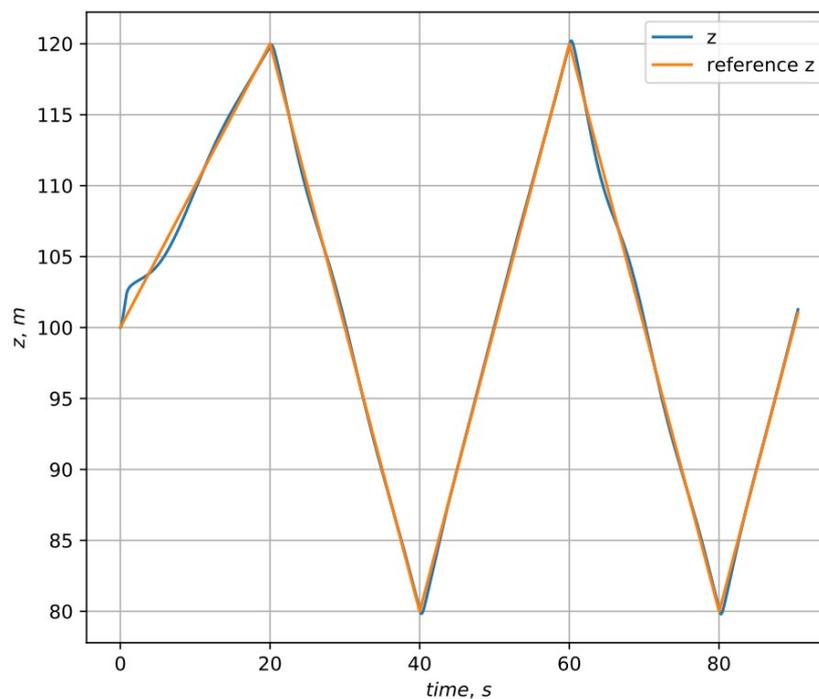
Рис. 8. Движение по трехмерной траектории: а — Движение в вертикальной плоскости; б — Команды управления углом тангажа

3.4 Эксперименты с адаптацией

После проведения экспериментов в трехмерном пространстве в программное обеспечение добавлены уравнения адаптации (12) и (13). Коэффициенты в уравнениях задавались следующими: $\mu_{xy}=0.005$, $\mu_z=0.001$, $\lambda_z=2$. Желаемая траектория задана пилообразной круговой кривой радиуса 150 м с изменением желаемой высоты от 80 до 120 м. На рисунке 4

приведены результаты моделирования полета БПЛА с использованием законов адаптации. Применение поправки $k_z \dot{z}_r$ и автоматической настройки коэффициентов позволило значительно уменьшить скоростную ошибку при движении в вертикальной (Рис. 9.а) и горизонтальной плоскостях (Рис. 9.б).

а)



б)

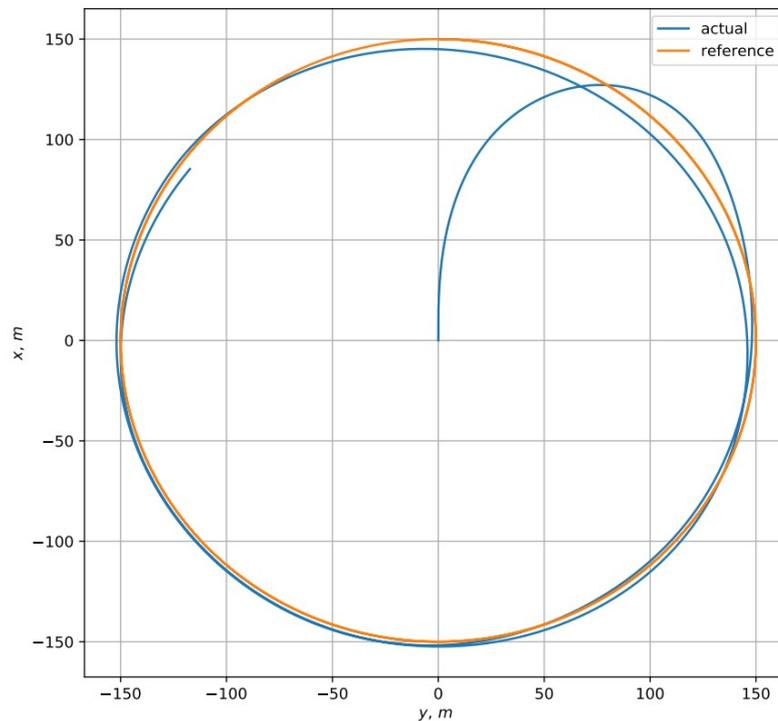


Рис. 9. Движение по трехмерной траектории с адаптацией: а — Траектория в вертикальной плоскости; б - Траектория полета в плоскости ХУ

3.5 Режим «тренажер»

Система моделирования может использоваться как тренажер оператора и как инструмент подготовки к реальным полетам. В этом режиме система моделирования поддерживает 3D визуализацию с применением средств Flightgear. В данном случае есть возможность подключения джойстика для ручного управления беспилотным аппаратом (Рис. 10) и переключение по кнопке в автоматический полет. При этом обеспечиваются следующие возможности:

- управление летательным аппаратом с пульта с визуализацией от первого и третьего лица;
- возможность переключения в режим автоматического полета;
- подготовка к реальным экспериментам.

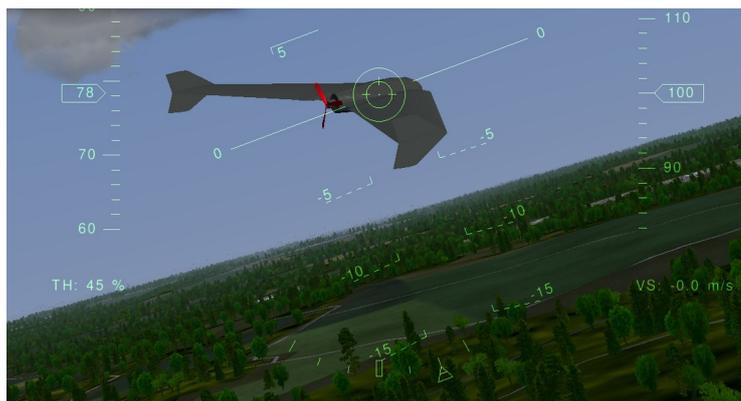


Рис. 10. 3D-визуализация средствами Flightgear в режиме «Тренажер»

3.6 Выводы по главе

Отладка предложенных алгоритмов с помощью разработанной системы моделирования позволила оценить устойчивость законов управления, выбрать базовые значения коэффициентов усиления по каналам управления для последующих реальных экспериментов, оценить ошибки следования по траектории при наличии и отсутствии возмущений, выявить необходимость введения поправки $k_z \dot{z}_r$ в закон управления движением по высоте и задать подходящие значения входных коэффициентов для системы управления движением по трехмерной программной траектории для реальных экспериментов.

4. РЕАЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В главе приводится описание тестирования предложенного закона управления в реальных экспериментах с использованием беспилотного летательного аппарата самолетного типа, катера и квадрокоптера.

4.1 Описание оборудования

Реальные летные эксперименты проводились с разнородными типами аппаратов: 1) летательный аппарат Dart250; 2) безэкипажный катер WLtoys WL916; 3) квадрокоптер Tello.

Dart250 представляет собой радиоуправляемый самолет производства компании Zohd, выполненный по аэродинамической схеме бесхвостка (Рис. 11). Длина аппарата составляет 0.4 м, размах крыла 0.55 м, собственная масса 0.14 кг. Аппарат оснащен электрическим бесколлекторным мотором. Управление по каналам крена и тангажа осуществляется за счет согласованного отклонения двух элевонов, приводимых в движения сервомоторами.



Рис. 11. Беспилотный летательный аппарат Dart 250

WLToys WL916 является радиоуправляемым катером длиной 0.46 м (Рис. 12). Он оснащен бесколлекторным мотором и сервомотором для управления рулем направления. Максимальная скорость составляет 55 км/ч.



Рис. 12. Безэкипажный аппарат катерного типа WLtoys WL916

Для проведения экспериментов оба аппарата дополнительно оснащены полетными контроллерами MatekF722miniSE, системой связи Express LRS, системами GPS, магнитометрами и пишущими HD камерами. Программное обеспечение контроллеров обоих аппаратов полностью идентично, отличия только в параметрах заданных траекторий: радиуса траектории и скорости движения. Параметры движения аппаратов и команды управления сохранялись на SD-карту.

Tello - небольшой квадрокоптер производства компании DJI, предназначенный для учебных и экспериментальных целей (Рис. 13). Аппарата оснащен собственной навигационной системой, основанной на измерении оптического потока с камер, направленных вниз. Взаимодействие с аппаратом осуществляется через три UDP-соккета по линии связи WIFI. По одному соккету транслируются видеок cadры с курсовой камеры, по другому передаются данные телеметрии в строковом формате (углы ориентации, заряд аккумулятора, высота, скорости по осям координат, курсовой угол), по третьему принимаются команды управления в соответствии с SDK [14].

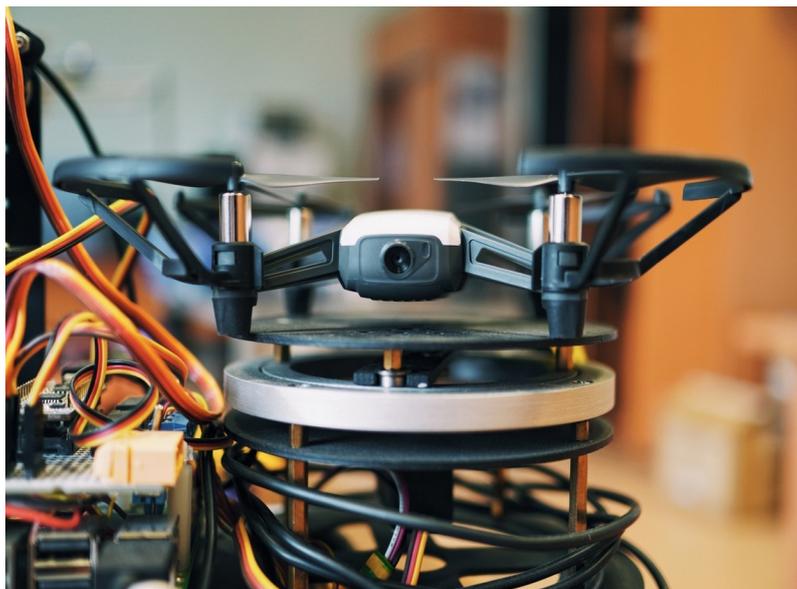


Рис. 13. Квадрокоптер Tello

Используемые платформы имеют ряд преимуществ: простота и дешевизна конструкции, а также широкие возможности по размещению целевого оборудования [2]. Управление беспилотными аппаратами во время взлета и посадки, а также переключение между ручным и автоматическим режимами осуществлялось оператором с помощью пульта управления.

4.2 Структура программного обеспечения бортового контроллера

Разработанный закон управления реализован на языке Си в виде программного модуля управления движением controller и встроен в исходный код открытой прошивки INAV6.0 [15]. Программное обеспечение контроллера принимает на вход данные системы навигации и позиционирования в воздухе, формирует на их основе команды тяги и углов ориентации, которые передаются на вход электронному регулятору оборотов (ESC) мотора и системе стабилизации соответственно (Рис. 14).

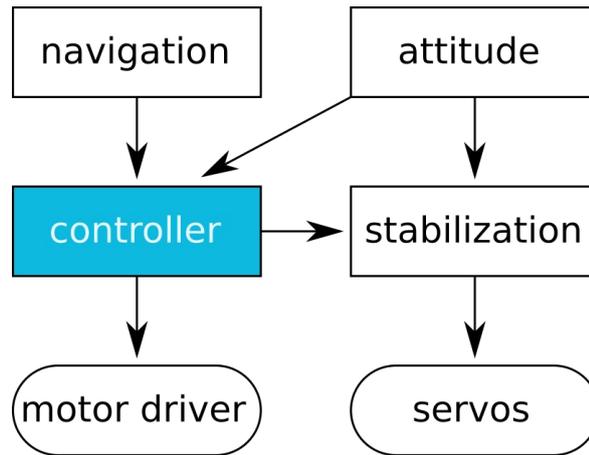


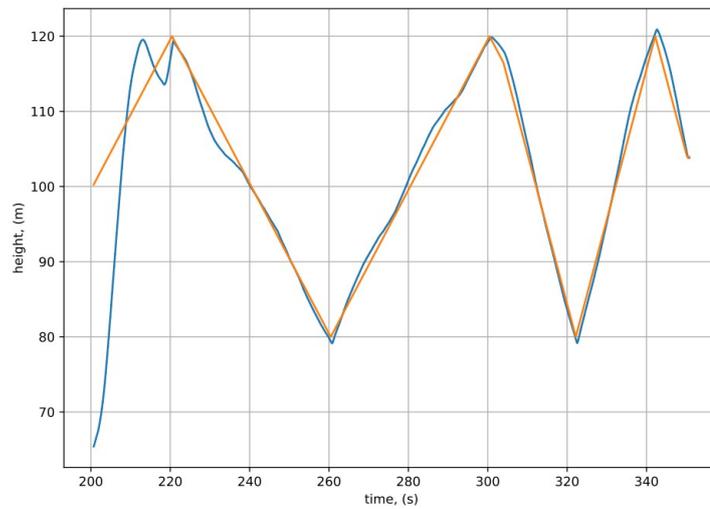
Рис. 14. Схема работы модуля controller, реализующего закон управления

4.3 Эксперименты с летательным аппаратом самолетного типа

Испытания предложенных законов управления с использованием беспилотного летательного аппарата Dart250 проводились поэтапно.

После отладки закона управления по высоте с помощью системы моделирования и добавления поправки (13), компенсирующей отклонение от желаемой траектории по вертикали, проведена серия летных экспериментов. Для случая тестирования управления по высоте траектория полета представляла собой трехмерную пилообразную кривую, замкнутую в круг радиусом 150 м в плоскости XY. В этой серии экспериментов желаемая высота целевой точки менялась в пределах от 80 до 120 м с вертикальной скоростью от 1 до 3 м/с, скоростью целевой точки в плоскости XY – 20м/с (Рис. 15). Для компенсации внешних возмущений использовался алгоритм (12) автоматической настройки коэффициентов матрицы **К**. Коэффициенты системы управления задавались аналогичными численным экспериментам с адаптацией.

а)



б)

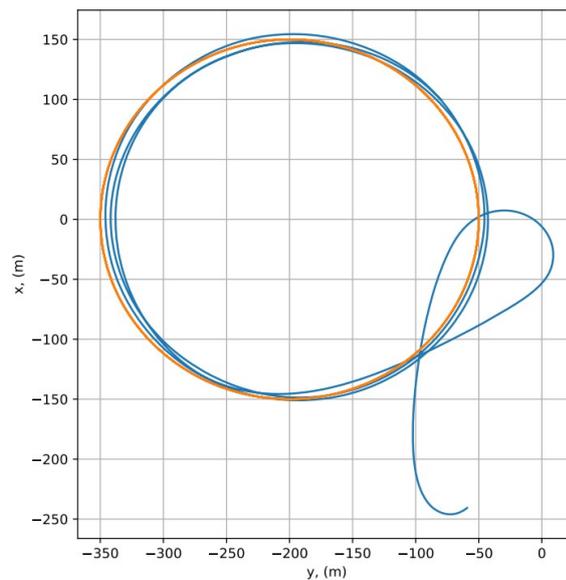


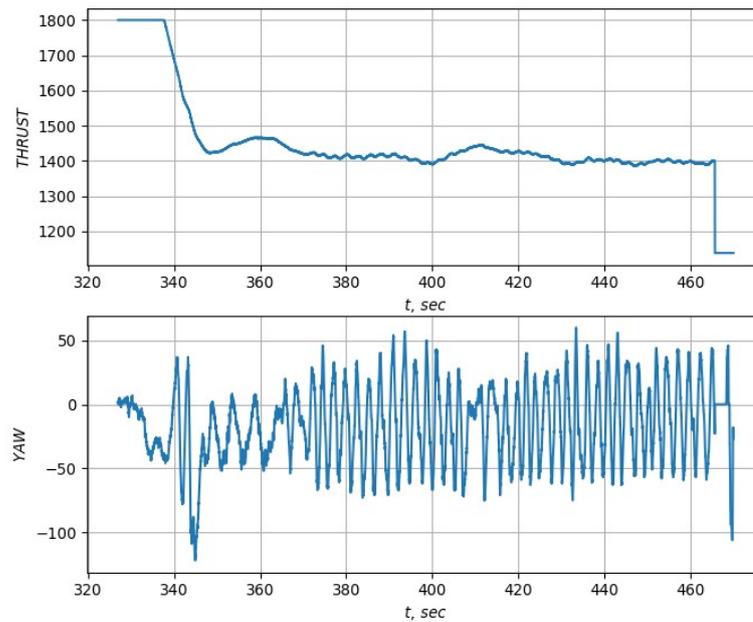
Рис. 15. Полеты по трехмерной траектории с аппаратом Dart250: а — Траектория в вертикальной плоскости; б - Траектория полета в плоскости XY

4.4 Эксперименты с катером

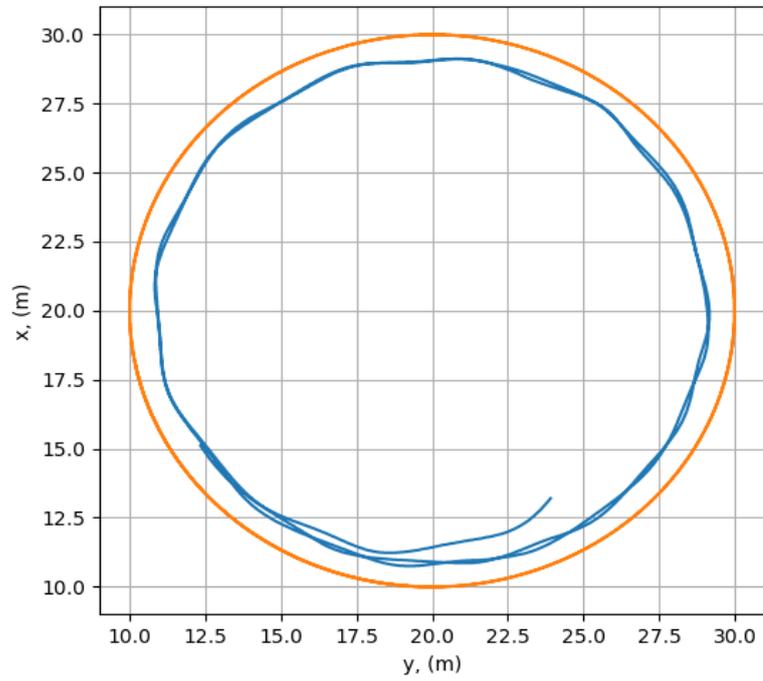
Другая серия экспериментов проводилась с катером WLtoys WL916 на озере. В условиях движения по поверхности воды вертикальная составляющая управления не использовалась. Коэффициенты закона управления аналогичны летному эксперименту. Центр круговой траектории

находился в точке (20, 20) м относительно начального положения, радиус траектории составлял 10 м, желаемая скорость движения по траектории составляла 2 м/с. (Рис. 16). В данном эксперименте траектория движения аппарата оказалась кусочно-линейной кривой радиусом меньшим, чем желаемая траектория. При анализе полученных результатов выявлено, что такой характер движения связан с использованием для расчетов навигационного курса системы GPS. Обновление курсового угла рысканья происходило с запаздыванием относительно результатов вычислений навигационного фильтра (Рис. 16. в).

а)



б)



в)

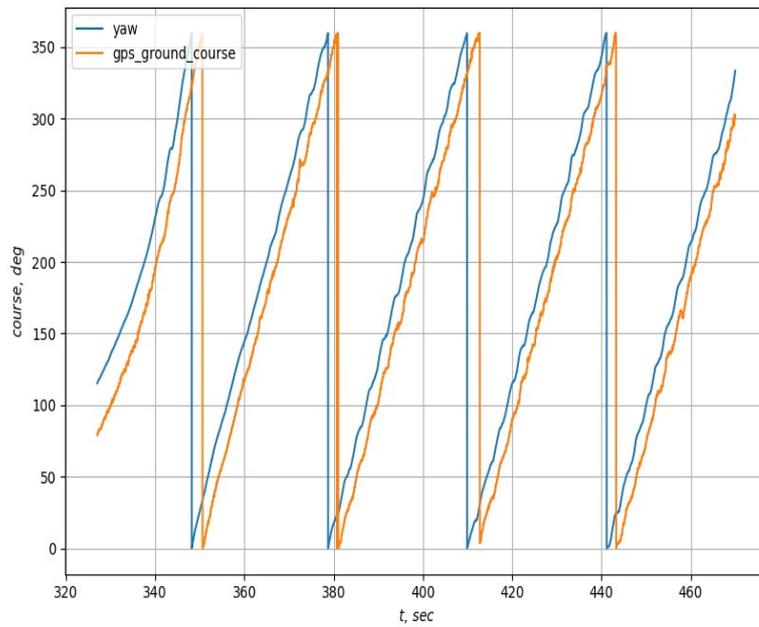
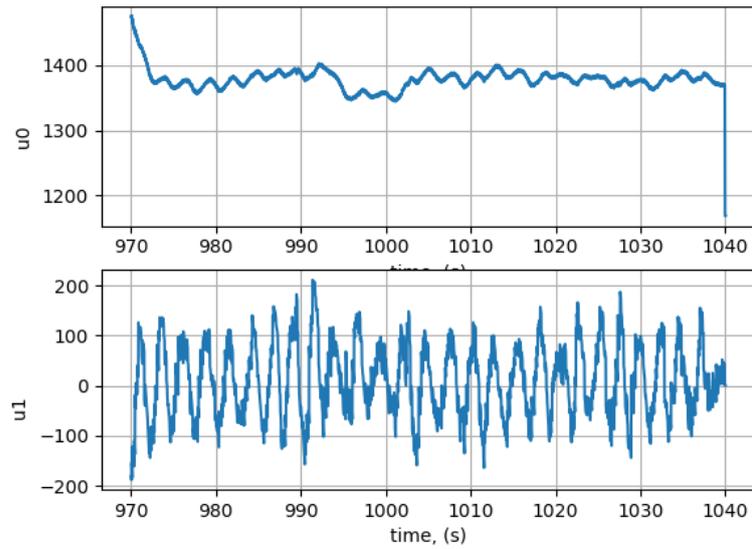


Рис. 16. Эксперименты с плавательным аппаратом WLToys WL916: а — команды управления; б - Траектория движения в плоскости XY; в) курсовой угол навигационной системы и системы GPS

В следующей серии экспериментов с катером использовались данные курсового угла от навигационного фильтра из прошивки INAV, что позволило добиться приемлемой точности следования по траектории (Рис. 17).

а)



б)

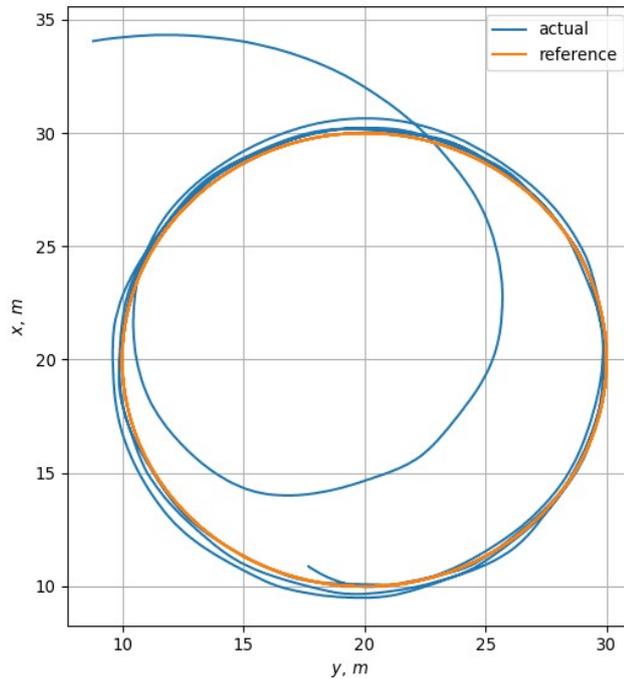
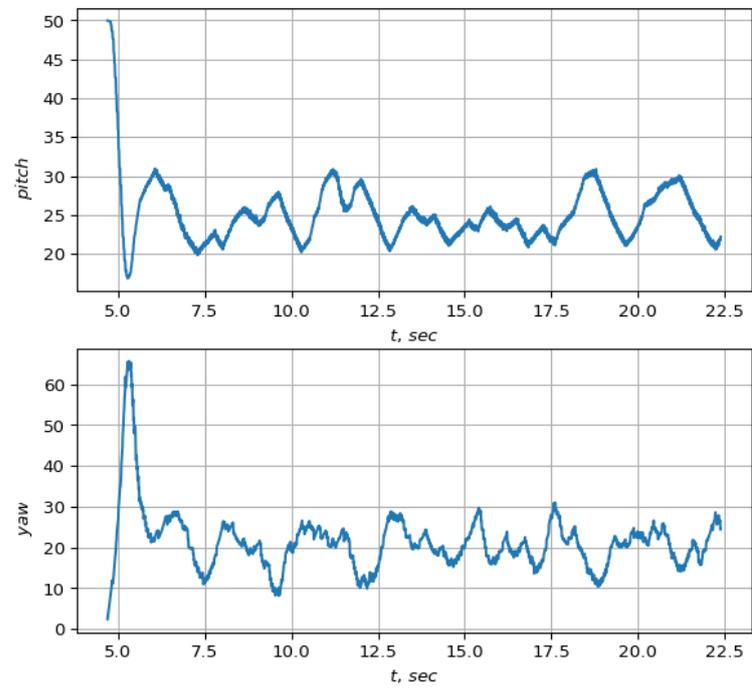


Рис. 17. Эксперименты с катером WLToys WL916: а — команды управления; б - Траектория движения в плоскости XY

4.5 Эксперименты с квадрокоптером

Эксперименты с использованием квадрокоптера Tello проводились для оценки возможности использования закона управления (8, 12, 13) для нового типа аппарата. В процессе автоматического полета система управления принимала данные о скорости квадрокоптера и исходя из них оценивала положение аппарата в пространстве. Эксперименты включали две серии с движением по желаемой круговой траектории с центром в точке старта (0, 0) м. В первой движение осуществлялось в плоскости XY с кругом радиуса 1.5 м на постоянной высоте (Рис. 18).

a)



б)

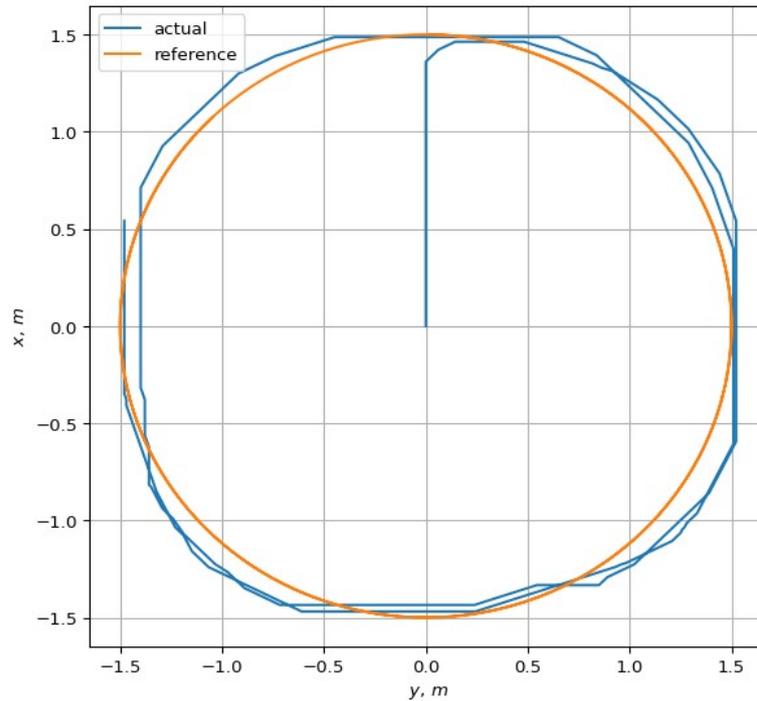
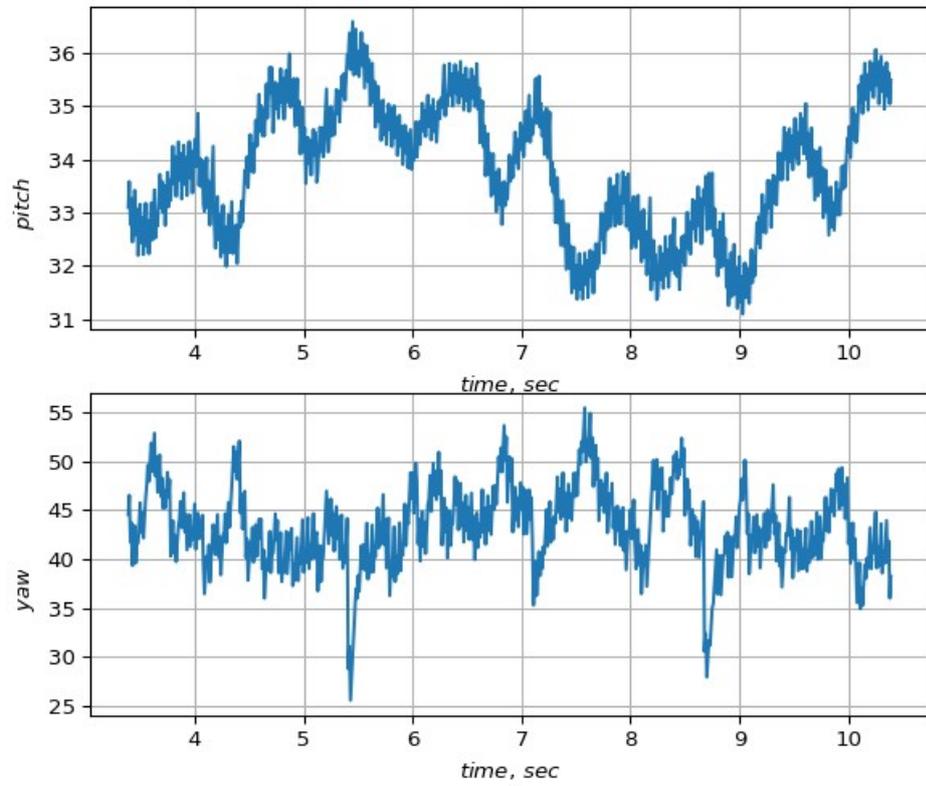


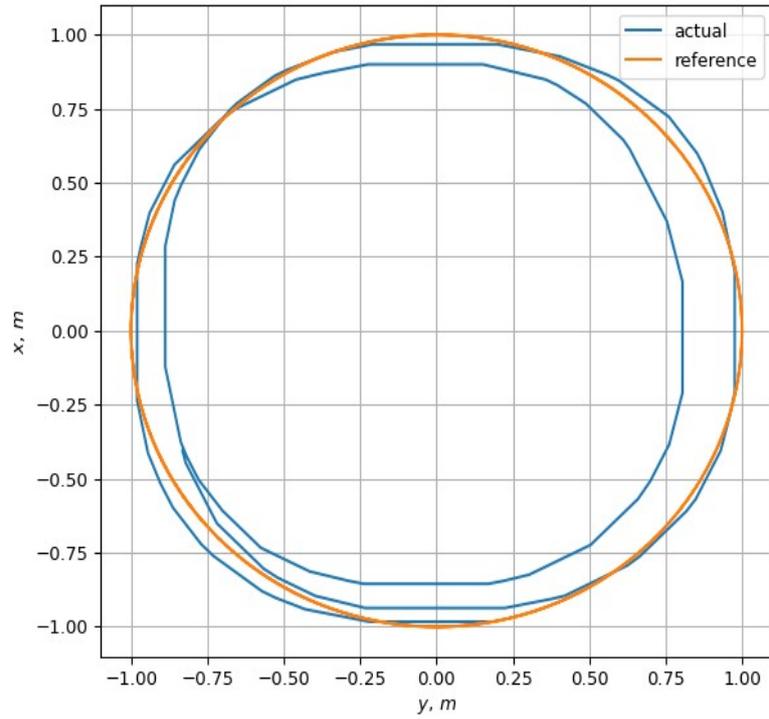
Рис. 18. Эксперименты с квадрокоптером Tello на плоскости: а — команды управления; б - Траектория движения в плоскости XY

Во второй серии экспериментов добавлена вертикальная составляющая управления (Рис. 19). Радиус желаемой траектории составлял 1 м, желаемая высота менялась в пределах от 1 до 2 м. Так как точность оценки скорости квадрокоптера ограничивается производителем в 0.1 м/с, действительная траектория отражена кусочно-линейной кривой, а высота имеет вид ступенчатой функции от времени из-за малой частоты обновления данных аппарата.

a)



b)



в)

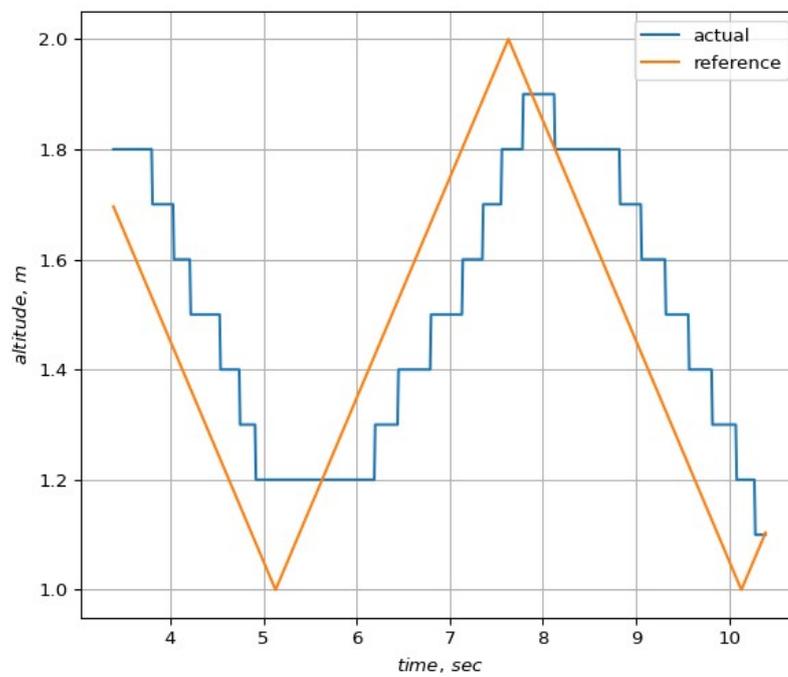


Рис. 19. Эксперименты с квадрокоптером Tello в случае трехмерной траектории: а — команды управления; б - Траектория движения в плоскости

XУ; в — Траектория в вертикальной плоскости.

4.6 Выводы по главе

В результате первых экспериментов в случае с движением БПЛА по трехмерной траектории для аппарата Dart250 удалось добиться хорошего совпадения реальной и желаемой траектории как в вертикальной плоскости, так и в плоскости XУ только при использовании закона управления с адаптацией. Максимальное отклонение от траектории в данном случае составило около 3 м. что показывает робастность предложенного закона. В экспериментах с законом управления без адаптации с фиксированными коэффициентами ошибки следования по траектории достигали десятков метров при наличии ветра. Результаты реальных и численных летных экспериментов согласуются.

В серии экспериментов с использованием безэкипажного катера в условиях движения по поверхности воды при использовании закона управления (12) максимальное отклонение от траектории составило около 0.5 м при радиусе круга 10 м. При этом в вычислениях использовались данные курсового угла от навигационного фильтра, что позволило добиться лучших результатов, чем с применением данных системы GPS непосредственно.

В серии экспериментов с применением квадрокоптера Tello удалось добиться приемлемого качества следования по траектории. Максимальное отклонение от траектории в плоскости XУ составило около 0.2 м. При движении по высоте наблюдалась небольшая задержка по времени реальных координат от желаемых, что, вероятно, связано с особенностями обновления данных скорости и оценки положения аппарата в пространстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработана и исследована адаптивная система управления движением малого беспилотного аппарата по программной траектории. Система управления реализована и опробована на разнородных аппаратах:

БПЛА самолетного типа, квадрокоптере и катере. Предложенный вариант автоматической настройки коэффициентов закона управления позволяет сделать его независимым от конкретного аппарата. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Выбрана и реализована математическая модель движения беспилотного аппарата.
2. Разработан закон управления, обеспечивающий движение БА по заданной в виде функций от времени трехмерной траектории с автоматической настройкой коэффициентов.
3. Создана система моделирования движения БА, включающая математическую модель движения, средства 2D и 3D визуализации и построения графиков.
4. Разработан программный модуль с законом управления для полетного контроллера на базе прошивки INAV.
5. Проведены реальные эксперименты с тремя БА, которые показали приемлемое качество следования по заданной траектории в условиях атмосферных возмущений.

Список литературы

1. Эпов М.И. Применение беспилотных летательных аппаратов в аэрогеофизической разведке // Материалы международного научной конгресса "Интерэкспо Гео-Сибирь". Новосибирск. СГУГиТ. 2012. Т. 3. С. 22-27.
2. Suresh Kannan, Girish Chowdhary, Eric N. Johnson. Adaptive Control of Unmanned Aerial Vehicles: Theory and Flight Tests // Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. 2015. P. 613-673.
3. Christopher Heintz, Sean C. C. Bailey, Jesse B. Hoagg, Formation Control of Fixed-Wing Unmanned Aircraft: Theory and Experiments // AIAA Scitech 2019 Forum. 2019. P. 115-127.

4. Hector Garcia de Marina, Zhiyong Sun, Murat Bronz, Gautier Hattenberge, Circular formation control of fixed-wing UAVs with constant speeds // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2017. P. 290-294.
5. Selcuk Bayraktar, Georgios E. Fainekos, George J. Pappas, Hybrid Modeling and Experimental Cooperative Control of Multiple Unmanned Aerial Vehicles. 2004.
6. Shao-lei Zhou, Yu-hang Kang, Hong-de Dai, Zhou Chao, Multi-UAVs Formation Autonomous Control Method Based on RQPSO-FSM-DMPC. 2016.
7. Jialong Zhang, Jianguo Yan, Pu Zhang, Fixed-Wing UAV Formation Control Design With Collision Avoidance Based on an Improved Artificial Potential Field // IEEE Access PP(99). 2018. P. 99-120.
8. Yang Chen, Nan Li, Wei Zeng, Wu Yongliang. Curved Path Following Control for a Small Fixed-Wing UAV with Parameters Adaptation // Applied Sciences 12(9). 2022. P. 34-54.
9. Калягин М. Ю., Волошин Д. А., Мазаев А. С. Моделирование системы управления полетом квадрокоптера в среде simulink и simscape multibody // Труды МАИ. Т. 112. 2020. С. 49-78.
10. Лобатый А.А., Гу П. Математическое моделирование движения летательных аппаратов мультироторного типа // Системный анализ и прикладная информатика. 2023. №1. С10-15.
11. Котов К.Ю., Мальцев А.С., Нестеров А.А., Ян А.П. Алгоритмы и архитектура системы управления траекторным движением мультироторного летательного аппарата // Автометрия. 2020. Т.56, №3. С.20-28
12. Lorenz Meier, Dominik Honegger, Marc Pollefeys. PX4: A node-based multithreaded open source robotics framework for deeply embedded platforms // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2015. PP. 6235-6240.
13. Крутько П.Д. Обратные задачи динами в теории автоматического

управления. М.: Машиностроение. 2004. 576 с.

14. Ryze Tech, Tello SDK 2.0 User Guide – [электронный ресурс]

15. <https://github.com/iNavFlight/inav> - [электронный ресурс]