

Construction of an Adaptive Motion Control System Optimal Information Exchange Scheme for a Group of Unmanned Aerial Vehicles

L. N. Kazakov¹, E. P. Kubyshkin¹, D. E. Paley¹

DOI: [10.18255/1818-1015-2023-1-16-26](https://doi.org/10.18255/1818-1015-2023-1-16-26)

¹P. G. Demidov Yaroslavl State University, 14 Sovetskaya str., Yaroslavl 150003, Russia.

MSC2020: 49J15

Research article

Full text in Russian

Received December 3, 2022

After revision February 6, 2023

Accepted February 8, 2023

The paper considers the problem of modeling an adaptive control system information exchange for a group of unmanned aerial vehicles (UAVs). The movement of the UAV group is carried out in accordance with the adaptive algorithm for optimal control. Optimal controls are constructed to provide a minimum of the total energy expended. The parameters of the mathematical model of the movement of the UAV group are refined during the flight in accordance with changing external conditions. In accordance with this, the control actions are specified. This task requires significant computing resources and imposes special requirements on the information exchange system between the UAV and the control point. A scheme of information exchange between the UAV and the control point is proposed, which makes it possible to calculate the optimal parameters of the transmitting devices.

Keywords: information exchange; optimal control; optimal trajectory; group of unmanned aerial vehicles

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leonid Nikolaevich Kazakov
correspondence author

orcid.org/0000-0002-9348-4440. E-mail: kazakov@uniyar.ac.ru

Head of the Department of Radio Engineering Systems, Doctor of Science, Professor.

Evgeniy Pavlovich Kubyshkin

orcid.org/0000-0003-1796-0190. E-mail: kubysh.e@yandex.ru

Professor of the Department of Mathematical Modeling, Doctor of Science, Professor.

Dmitry Ezrovich Paley

orcid.org/0000-0002-9184-3286. E-mail: dpaley@list.ru

Associate Professor, PhD.

Funding: This work was carried out within the framework of a development programme for the Regional Scientific and Educational Mathematical Center of the Yaroslavl State University with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement on provision of subsidy from the federal budget No. 075-02-2022-886) and funded by YSU Programme according to the research project №P2-K-1-G-4/2021 P2-GM-2021.

For citation: L. N. Kazakov, E. P. Kubyshkin, and D. E. Paley, "Construction of an Adaptive Motion Control System Optimal Information Exchange Scheme for a Group of Unmanned Aerial Vehicles", *Modeling and analysis of information systems*, vol. 30, no. 1, pp. 16-26, 2023.

Построение оптимальной схемы информационного обмена системы адаптивного управления движением группы беспилотных летательных аппаратов

Л. Н. Казаков¹, Е. П. Кубышкин¹, Д. Э. Палей¹

DOI: [10.18255/1818-1015-2023-1-16-26](https://doi.org/10.18255/1818-1015-2023-1-16-26)

¹Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, ул. Советская, д. 14, г. Ярославль, 150003 Россия.

УДК 517.977.51

Научная статья

Полный текст на русском языке

Получена 3 декабря 2022 г.

После доработки 6 февраля 2023 г.

Принята к публикации 8 февраля 2023 г.

В работе рассмотрена задача моделирования информационного обмена адаптивной системы управления движением группы беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Движение группы БЛА осуществляется в соответствии с адаптивным алгоритмом оптимального управления пространственной перестройкой. Оптимальные управления строятся обеспечивающими минимум общей затрачиваемой энергии. Параметры математической модели движения группы БЛА уточняются в процессе полета в соответствии с изменяющимися внешними условиями. В соответствии с этим уточняются управляющие воздействия. Это требует значительных вычислительных ресурсов и накладывает особые требования на систему информационного обмена между БЛА и пунктом управления. Предложена схема информационного обмена между БЛА и пунктом управления, позволяющая рассчитать оптимальные параметры передающих устройств.

Ключевые слова: информационный обмен; оптимальное управление; оптимальная траектория; группа беспилотных летательных аппаратов

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Леонид Николаевич Казаков
автор для корреспонденции

orcid.org/0000-0002-9348-4440. E-mail: kazakov@uniyar.ac.ru
Заведующий кафедрой радиотехнических систем, д-р тех. наук, профессор.

Евгений Павлович Кубышкин

orcid.org/0000-0003-1796-0190. E-mail: kubysh.e@yandex.ru
Профессор кафедры математического моделирования, д-р физ.-мат. наук, профессор.

Дмитрий Эзрович Палей

orcid.org/0000-0002-9184-3286. E-mail: dpaley@list.ru
Доцент кафедры радиотехнических систем, канд. тех. наук.

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации программы развития регионального научно-образовательного математического центра (ЯрГУ) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение о предоставлении из федерального бюджета субсидии № 075-02-2022-886) и Программы развития ЯрГУ, проект №П2-К-1-Г-4/2021 П2-ГМ4-2021.

Для цитирования: L. N. Kazakov, E. P. Kubyshkin, and D. E. Paley, "Construction of an Adaptive Motion Control System Optimal Information Exchange Scheme for a Group of Unmanned Aerial Vehicles", *Modeling and analysis of information systems*, vol. 30, no. 1, pp. 16-26, 2023.

Введение

Управление движением группы беспилотных летательных аппаратов (БЛА) представляет собой весьма непростую задачу. Она содержит как минимум две основные составляющие – построение алгоритма управления и построение системы информационного обмена между БЛА и пунктом управления, включающей в себя как алгоритмы информационного обмена, так и аппаратные средства. Решению первой части посвящено большое количество работ. Отметим основные подходы, используемые при решении первой части задачи управления. В работах [1–4] рассматриваются методы на основе построения графов. Подобные методы обычно используют в тех случаях, когда информация об окружающей среде является статической и известна полностью. Другим эффективным подходом планирования траекторий являются методы на основе «клеточной декомпозиции» [5–8]. Основная идея таких методов – планирование пути в среде с препятствиями на основе дискретизации окружающей среды. Сетка проста в использовании, и её легко создать и поддерживать. Однако метод сеток имеет серьезный недостаток: увеличение трудоемкости при уменьшении шагов сетки.

В [9–11] управления строятся на основе метода потенциальных функций. Алгоритм оптимального управления основывается на движении вдоль линий векторного поля, потенциальная функция которого отражает конфигурацию препятствий и их форму, а также цель движения. Отметим, что среди методов потенциальных полей самым известным является метод искусственных потенциалов (artificial potential field, APF) [11]. Его алгоритм прост, имеет низкую вычислительную сложность и высокую эффективность реализации. Векторное поле разделяется на две составляющие: цель движения представляется притягивающим векторным полем, в то время как препятствия – отталкивающим векторным полем. В [12] рассматривается задача стабилизации БЛА.

Решение задачи оптимального выбора траектории существенно зависит от рассматриваемой модели и ее параметров. При этом следует учитывать, что параметры модели в общем случае являются функциями времени. Т.е. всю систему необходимо рассматривать как адаптивную. В частности, перед синтезом оптимального управления необходимо решить задачу идентификации параметров системы. В настоящее время существует большое количество различных подходов к формированию адаптивного управления. Широко применяются классические методы с «эталонной моделью» [13, 14]. Можно также отметить L1 адаптивное управление [15, 16], которое позволяет отделить оценку модели от управления. Задача планирования пути в сложной окружающей среде может так же решаться, как оптимизационная задача. Для этого движение объекта надо представить как движение динамической системы в рамках некоторой модели. Препятствия будут описываться некоторыми ограничениями, а качество допустимой траектории соответственно должно оцениваться некоторым функционалом. В результате возникает задача оптимального управления. Решение такой задачи обеспечивает траекторию объекта в обход препятствий и позволяет выбрать лучший вариант с точки зрения функционала качества. Существует несколько подходов к решению таких задач. Наиболее популярными из них являются методы на основе нелинейного программирования [17, 18].

В настоящей работе рассмотрена задача моделирования информационного обмена адаптивной системы управления движением группы беспилотных летательных аппаратов (БЛА), предложенной в [19, 20]. Движение БЛА осуществляется в соответствии с адаптивным алгоритмом оптимального управления пространственной перестройкой. Параметры математической модели движения группы БЛА уточняются в процессе полета в соответствии с изменяющимися внешними условиями и соответственно происходит уточнение управляющих воздействий. Использование адаптивного алгоритма требует значительных вычислительных ресурсов. Это накладывает особые требования на систему информационного обмена между БЛА и пунктом управления. Оптимальные управления строятся доставляя минимум общей затрачиваемой энергии. Предложена схема

информационного обмена между БЛА и пунктом управления, позволяющая рассчитать оптимальные параметры передающих устройств.

1. Алгоритм адаптивного управления движением БЛА

Рассмотрим сначала кратко алгоритм адаптивного управления движением группы беспилотных летательных аппаратов (БЛА), на основе которого строится система информационного обмена (трафика) между БЛА и пунктами управления.

Рассматривается группа из n БЛА, положение которых относительно некоторой инерциальной системы координат $OXYZ$ определяется системой векторов

$$q_j(t) = (x_j(t), y_j(t), z_j(t)), \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Предполагается, что группа БЛА, находясь в момент времени t_0 в точке пространства с координатами q_{j0} и имея скорости $\dot{q}_{j0}$, должна за время $T > 0$ перестроиться в точки с координатами q_{jT} и иметь соответственно скорости $\dot{q}_{jT}$. При этом расстояние между отдельными БЛА в группе не должно быть менее $d_{jk} > 0$ и более D_{jk} , $j, k = 1, \dots, n$. Уравнения движения БЛА в группе и динамическая модель полетной перестройки БЛА будут иметь следующий вид [21]

$$m_j \ddot{q}_j + f_j(q_j, \dot{q}_j) = U_j(t), \quad t_0 < t < t_1 = t_0 + T, \quad (1)$$

$$q_j(t_0) = q_{j0}, \quad \dot{q}_j(t_0) = \dot{q}_{j0}, \quad q_j(t_1) = q_{j1}, \quad \dot{q}_j(t_1) = \dot{q}_{j1}, \quad (2)$$

$$d_{jk} \leq |q_j(t) - q_k(t)| \leq D_{jk}, \quad j, k = 1, \dots, n. \quad (3)$$

В (1) m_j – масса j -го БЛА, функция $f_j(q_j, \dot{q}_j)$ характеризует совокупность внешних сил, действующих на j -й БЛА, включающих в себя вес БЛА, внешнее трение, ветровую нагрузку и другие внешние силы, $U_j(t) = (U_{j1}(t), U_{j2}(t), U_{j3}(t))$ – вектор силового управления БЛА вдоль осей соответствующих координат, $|\cdot|$ – евклидово расстояние между точками. На практике выражения и значения функций $f_j(q_j, \dot{q}_j)$ априори не всегда точно известны. Будем предполагать, что они являются дифференцируемыми функциями и что их постоянные составляющие отнесены к функциям $U_j(t)$, поэтому можно считать $f_j(0, 0) = 0$. Предполагается, что между собой БЛА в группе не взаимодействуют.

Энергия силового управления j -го БЛА определяется интегралом

$$J(U_j(t)) = \int_0^T (U_j(t), U_j(t)) dt, \quad (4)$$

где $(\cdot, \cdot)$ – скалярное произведение в R^3 , соответственно

$$J(U(t)) = \sum_{j=1}^n J(U_j(t)) \quad (5)$$

общая энергия силового управления группой БЛА. Предполагается, что $U_{jp}(t) \in L_2(0, T)$ – пространство интегрируемых с квадратом функций. Отметим, что выражение (5) может быть более сложной положительно определенной квадратичной формой. Принципиального значения это не имеет.

Рассматриваются следующие задачи оптимального управления при построении траекторий движения группы БЛА.

Задача 1. Найти управления $U_j(t)$, $j = 1, \dots, n$, обеспечивающие перевод траекторий системы уравнений (1) за время $T > 0$ из начального положения (2) в конечное с учетом условий (3) и доставляющие минимум функционалу (5).

Задача 2. Найти управления $U_j(t)$, $j = 1, \dots, n$, при условии $J(U_j) \leq L_j$, $L_j > 0$, обеспечивающее перевод траекторий системы уравнений (1) из начального положения (2) в конечное с учетом условий (3) за минимальное время $T > 0$.

В рамках определенных функций $f_j(q_j, \dot{q}_j)$ в работах [19, 20] предложен алгоритм решения указанных задач. Алгоритм итерационный и требует значительных вычислительных ресурсов.

Для вычисления оптимального управления $U_j(t)$ необходимо выбрать конкретный вид функций $f_j(q_j, \dot{q}_j)$. Это делается как на этапе моделирования, так и на этапе оценки внешних воздействий перед синтезом $U_j(t)$. Очевидно, что точно задать $f_j(q_j, \dot{q}_j)$ не всегда представляется возможным и модель (1) может стать ошибочна прямо во время полета.

Например, сила ветра в начале маршрута может существенно отличаться от силы ветра на различных его этапах, или за счет дождя и неравномерного расхода топлива может измениться масса БЛА и т. д. В силу этого $U_j(t)$, вычисленное по неверной модели, перестает удовлетворять решению задачи. Рассмотрим задачу уточнения функций $f_j(q_j, \dot{q}_j)$ прямо во время полета БЛА. Такой алгоритм построения $U_j(t)$ назовем адаптивным. В соответствии с этим будет строиться система информационного обмена.

Управления $U_j(t)$ формируются динамически исходя из заданных критериев и параметров модели (1). Предположим, что $U_j(t)$ синтезировано в некоторый момент времени $t = t_0$. Далее управление поступает на вход реальной системы. Если модель (1) верна, то реальная траектория $p_j(t)$, при $t > t_0$, будет совпадать с расчетной $q_j(t)$ при условии $p_j(t_0) = q_j(t_0)$. Если модель (1) неверна и функции $f_j(q_j, \dot{q}_j)$ не соответствуют действительности, то между реальной и расчетной траекториями возникнет ошибка

$$p_j(t) - q_j(t) = \Delta_j(t). \quad (6)$$

Если ошибка (6) не равна нулю, то функции $f_j(q_j, \dot{q}_j)$ нуждаются в корректировке. Решим задачу уточнения функций $f_j(q_j, \dot{q}_j)$ на основе динамической ошибки $\Delta_j(t)$. Будем считать, что фактическая траектория движения $p_j(t)$, а также ее производные доступны для измерения. Для уточнения параметров модели $f_j(q_j, \dot{q}_j)$ воспользуемся методами градиентного спуска.

Корректировку функций $f_j(q_j, \dot{q}_j)$ будем проводить для каждого БЛА в отдельности. Рассмотрим сначала линейную модель и запишем уравнение (1) в следующей форме:

$$a_0 \ddot{q}_j + a_1 \dot{q}_j + a_2 q_j = U_j(t), \quad (7)$$

где для удобства изложения обозначили $m_j = a_0$, a_1 , a_2 – коэффициенты при линейных составляющих функции $f_j(q_j, \dot{q}_j)$. Для уточнения коэффициентов (7) воспользуемся известным подходом на основе «идентификации методом обучения» [13, 14].

Пусть на основе коэффициентов a_k рассчитано оптимальное управление $U_j(t)$. Далее $U_j(t)$ подадим на вход реальной системы

$$b_0 \ddot{p}_j + b_1 \dot{p}_j + b_2 p_j = U_j(t), \quad (8)$$

где b_k – неизвестные коэффициенты. Решение $p_j(t)$ для реальной системы с оптимальным управлением $U_j(t)$ получено в результате измерений. Подставим фактическое решение $p_j(t)$ в исходную модель (7)

$$a_0 \ddot{p}_j + a_1 \dot{p}_j + a_2 p_j = A_j(t). \quad (9)$$

Если коэффициенты $b_k \neq a_k$, то $q_j(t) \neq p_j(t)$ и для истинности (9) управление должно измениться. Будем считать, что решение $p_j(t)$ является решением уравнения (9), если управление (правая часть (9)) равно $A_j(t)$. Вычислим разницу в управлениях

$$e_j(t) = A_j(t) - U_j(t) = (a_0 - b_0) \ddot{p}_j + (a_1 - b_1) \dot{p}_j + (a_2 - b_2) p_j. \quad (10)$$

Задача будет решена, если ошибка $e_j(t)$ с течением времени будет стремиться к нулю. Очевидно, что в этом случае также будет стремиться к нулю ошибка $\Delta_j(t)$. Будем рассматривать коэффициенты $a_k =$

$a_k(t)$ как функции времени t . Необходимо изменить $a_k(t)$ таким образом, чтобы минимизировать $e_j(t)$. Очевидно, что ошибка равна нулю при выполнении $a_k(t) = b_k$. Введем функцию качества

$$V(t) = ((a_0(t) - b_0)^2 + (a_1(t) - b_1)^2 + (a_2(t) - b_2)^2)/2. \quad (11)$$

Заметим, что $V(t)$ положительно определенная, $V(t) = 0$, при $a_k(t) = b_k$, т.е. минимум $V(t)$ соответствует минимуму $e_j(t)$. Вычислим

$$\frac{dV}{dt} = (a_0(t) - b_0) \frac{da_0}{dt} + (a_1(t) - b_1) \frac{da_1}{dt} + (a_2(t) - b_2) \frac{da_2}{dt}. \quad (12)$$

Найдем условия, при которых производная (12) по времени будет меньше нуля. Предварительно отметим, что производная ошибки $e_j(t)$ по a_k из (10) равна

$$\frac{de_j(t)}{da_k} = \frac{d^k p_j}{dt^k}. \quad (13)$$

Учитывая требование отрицательности производной, выберем

$$\frac{da_k}{dt} = -e_j(t) \frac{d^k p_j}{dt^k}, \quad a_k(t_0) = a_k. \quad (14)$$

При выполнении (14) несложно видеть из (13), что

$$\frac{dV}{dt} = -((a_0(t) - b_0) \frac{d^2 p_j}{dt^2} + (a_1(t) - b_1) \frac{dp_j}{dt} + (a_2(t) - b_2) p_j) e_j(t) = -e_j(t)^2. \quad (15)$$

Таким образом, при выполнении равенства (14), положительно определенная функция качества $V(t)$ имеет отрицательную производную, т.е. постоянно убывает с течением времени. Соответственно значения коэффициентов модели $a_k(t)$ стремятся к параметрам реальной системы b_k . Равенства (14) позволяют получить выражение для вычисления $a_k(t)$

$$\frac{da_k}{dt} = -e_j(t) \frac{d^k p_j}{dt^k} = - \sum_{m=0}^2 (a_m \frac{d^m p_j}{dt^m} - U_j(t)) \frac{d^k p_j}{dt^k}, \quad a_k(t_0) = a_k, \quad k = 0, 1, 2. \quad (16)$$

Система (16) – это система из трех неоднородных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. В аналитическом виде решение (16) получить не всегда возможно, кроме того, $p_j(t)$ – это наблюдение реальной траектории динамической системы. С другой стороны, методы численных решений систем дифференциальных уравнений достаточно развиты и могут быть применены к вычислению $a_k(t)$.

Распространим описанный выше подход на случай, когда коэффициенты уравнения (7) нелинейные функции, считая, что каждый может быть представлен в виде степенного ряда

$$a_k(q_j, \dot{q}_j) = \sum_{s=0}^{\infty} (a_{ks} q_j^s + a_{ks}^* \dot{q}_j^s), \quad a_k = a_{k0} + a_{k0}^*, \quad k = 0, 1, 2. \quad (17)$$

Соответственно, коэффициенты реальной системы дифференциальных уравнений так же представим в виде ряда

$$b_k(p_j, \dot{p}_j) = \sum_{s=0}^{\infty} (b_{ks} p_j^s + b_{ks}^* \dot{p}_j^s), \quad b_k = b_{k0} + b_{k0}^*, \quad k = 0, 1, 2. \quad (18)$$

На практике количество коэффициентов в разложениях (17), (18) выбирается конечным в соответствии с требованиями точности и конкретным видом функций $a_k(q_j, \dot{q}_j)$, $b_k(p_j, \dot{p}_j)$.

С учетом (17), (18) запишем выражение для ошибки, аналогичное (10)

$$e_j(t) = A_j(t) - U_j(t) = \sum_{k=0}^2 \sum_{s=0}^{\infty} ((a_{ks} - b_{ks})p_j^s + (a_{ks}^* - b_{ks}^*)(\frac{dp_j}{dt})^s) \frac{d^k p_j}{dt^k}, \quad (19)$$

где по-прежнему $p_j(t)$ – фактическая траектория движения системы, $U_j(t)$ – синтезированное управляющее воздействие на входе системы, $A_j(t)$ – управляющее воздействие, которое делает истинной модель для решения $p_j(t)$.

Далее будем считать, что коэффициенты a_{ks}, a_{ks}^* зависят от времени и аналогично (11) введем функцию качества

$$V(t) = \sum_{k=0}^2 \sum_{s=0}^{\infty} ((a_{ks}(t) - b_{ks})^2 + (a_{ks}^*(t) - b_{ks}^*)^2)/2. \quad (20)$$

Функция $V(t)$ положительно определенная, $V(t) = 0$ при $a_{ks}(t) = b_{ks}, a_{ks}^*(t) = b_{ks}^*$, т.е. минимум $V(t)$ соответствует минимуму $e_j(t)$. Вычислим

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{k=0}^2 \sum_{s=0}^{\infty} ((a_{ks}(t) - b_{ks}) \frac{da_{ks}}{dt} + (a_{ks}^*(t) - b_{ks}^*) \frac{da_{ks}^*}{dt}). \quad (21)$$

Чтобы выполнить требование отрицательности производной (21), положим

$$\frac{da_{ks}}{dt} = -e_j(t)p_j^s \frac{d^k p_j}{dt^k}, \quad \frac{da_{ks}^*}{dt} = -e_j(t)(\frac{dp_j}{dt})^s \frac{d^k p_j}{dt^k}, \quad a_{ks}(t_0) = a_{ks}, \quad a_{ks}^*(t_0) = a_{ks}^*. \quad (22)$$

В результате с учетом (19) получим равенство

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{k=0}^2 \sum_{s=0}^{\infty} ((a_{ks}(t) - b_{ks}) \frac{da_{ks}}{dt} + (a_{ks}^*(t) - b_{ks}^*) \frac{da_{ks}^*}{dt}) = \quad (23)$$

$$= -e_j(t) \sum_{k=0}^2 \sum_{s=0}^{\infty} ((a_{ks}(t) - b_{ks})p_j^s + (a_{ks}^*(t) - b_{ks}^*)(\frac{dp_j}{dt})^s) \frac{d^k p_j}{dt^k} = -e_j^2(t), \quad (24)$$

т. е. при истинности (22) значения коэффициентов модели $a_{ks}(t), a_{ks}^*(t)$ сходятся к параметрам реальной системы b_{ks}, b_{ks}^* . Равенства (22) позволяют получить выражение для вычисления $a_{ks}(t), a_{ks}^*(t)$:

$$\frac{da_{ks}}{dt} = -(A_j(t) - U_j(t))p_j^s \frac{d^k p_j}{dt^k} = \sum_{k=0}^2 \sum_{s=0}^{\infty} ((a_{ks}p_j^s + a_{ks}^*(\frac{dp_j}{dt})^s)(\frac{dp_j}{dt} - U_j(t))p_j^s \frac{d^k p_j}{dt^k}), \quad a_{ks}(t_0) = a_{ks}, \quad (25)$$

$$\frac{da_{ks}^*}{dt} = -(A_j(t) - U_j(t))(\frac{dp_j}{dt})^s \frac{d^k p_j}{dt^k} = \sum_{k=0}^2 \sum_{s=0}^{\infty} ((a_{ks}p_j^s + a_{ks}^*(\frac{dp_j}{dt})^s)(\frac{dp_j}{dt} - U_j(t))(\frac{dp_j}{dt})^s \frac{d^k p_j}{dt^k}), \quad a_{ks}^*(t_0) = a_{ks}^*. \quad (26)$$

Система (25), (26) является счетной системой обыкновенных дифференциальных уравнений. На практике требуется лишь конечное число коэффициентов разложений (17), которые могут быть найдены из (25), (26) с использованием численных методов. Принципиально (25), (26) не отличается от уравнений (16) и при $s=0$ переходит в (16). Таким образом, модель (25), (26) является универсальной.

Отметим следующее обстоятельство. Алгоритм построения оптимальных управлений $U_j(t)$ [19, 20] предложен для случая постоянных коэффициентов a_{ks}, a_{ks}^* а из (25), (26) получаем функции $a_{ks}(t), a_{ks}^*(t)$. Здесь можно поступить двумя способами: алгоритм легко обобщается на случай переменных коэффициентов, либо необходимо усреднить коэффициенты, положив

$$a_{ks} = \int_{t_0}^{t_0+T} a_{ks}(t)dt/T, \quad a_{ks}^* = \int_{t_0}^{t_0+T} a_{ks}^*(t)dt/T,$$

где T – временной шаг, выбор которого зависит от конкретной ситуации. Отметим также, что все изложенное легко обобщается на случай, когда в (18) коэффициенты $a_{ks}^* = a_{ks}^*(q_j)$, т.е. являются функциями q_j .

2. Схема информационного обмена алгоритма адаптивного управления движением группы БЛА

Рассмотренный алгоритм требует значительных вычислительных ресурсов, поэтому система информационного обмена между БЛА и центральным устройством управления (ЦУУ) должна учитывать это обстоятельство. Рассмотрим систему информационного обмена при централизованной стратегии управления, при котором ЦУУ о состоянии всех БЛА группы и окружающей среды. ЦУУ производит анализ текущей ситуации и принимает решения о действиях БЛА в группе. Каждый БЛА группы передает на центральное устройство управления данные о текущей траектории движения, а также о состоянии окружающей среды. Центральное устройство управления производит обработку собранных сведений согласно изложенного выше алгоритма и передает каждому БЛА группы команды управления. ЦУУ обычно располагается на земле. Такая форма организации информационного обмена при использовании группы БЛА на больших расстояниях требует наличия на каждом БЛА достаточно мощных приемно-передающих устройств, обеспечивающих надежные каналы связи. Более рациональной выглядит схема организации информационного обмена с одним ведущим. Вычислительные функции осуществляет ЦУУ, которое располагается на земле, а информационный обмен между БЛА и ЦУУ организуется следующим образом. Один БЛА (диспетчер) должен обладать многоканальным приемно-передающим модемом (ППМ), мощность которого должна быть достаточной для связи с ЦУУ. Информационный обмен между БЛА организуется по принципу каждый с каждым (частично) и каждый с диспетчером. В системе управления движением каждый БЛА передает координаты реальной траектории движения (функции $p_j(t)$), вычисленные в строго определенные моменты времени t_k с шагом Δt . Величина шага определяется требуемой точностью вычислений. Это требует временной синхронизации между БЛА, что обеспечивается каналами связи между ними. Величины $p_{jk} = p_j(t_k)$ определяются с помощью навигационной системы (GPS, ГЛОНАСС, инерциальная система навигации). Величины p_{jk} передаются БЛА-диспетчеру и каждому БЛА. Последнее необходимо для работы системы предупреждения непредвиденных столкновений. Такая система должна присутствовать на каждом БЛА, ее описание и построение представляет собой отдельную задачу. Потоки p_{jk} , принимаемые БЛА-диспетчером будут разделены по времени. Это обусловлено разными взаимными расстояниями между БЛА и БЛА-диспетчером. В связи с этим общий информационный поток, поступающий БЛА-диспетчеру можно считать пуассоновским. При этом ППМ БЛА-диспетчера можно рассматривать как многоканальную систему массового обслуживания с ограниченной очередью. В соответствии с этим рассчитаем количество каналов, величину очереди и пропускную способность ППМ БЛА-диспетчера. Пусть λ_j (бит/с, $j = 1, \dots, n$) – интенсивность информационного потока, поступающего с j -го БЛА БЛА-диспетчеру. Тогда общий информационный поток имеет интенсивность

$$\lambda = \sum_{j=1}^n \lambda_j. \quad (27)$$

Предположим, что ППМ имеет m каналов с интенсивностью обслуживания канала μ (бит/с) и очередью на обслуживание в k мест. Очередь необходима, чтобы любой поступающий сигнал был обязательно обслужен. В этом случае относительная пропускная способность ППМ будет иметь вид [22]

$$Q = p_{\text{обс}} = 1 - p_{\text{отк}},$$

где $p_{\text{обс}}$ – вероятность обслуживания сигнала, $p_{\text{отк}}$ – вероятность отказа в обслуживании сигнала,

$$p_{\text{отк}} = \frac{\rho^{m+k}}{m^k m!} p_0, \quad \rho = \frac{\lambda}{\mu}, \quad p_0 = \left(1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^m}{m!} + \frac{\rho^{m+1}}{m m!} + \dots + \frac{\rho^{m+k}}{m^k m!}\right)^{-1}.$$

Следующие характеристики ППМ позволят оптимально выбрать структуру его каналов и величину очереди:

абсолютная пропускная способность

$$A = \mu Q,$$

среднее число занятых каналов

$$m_3 = A/\mu = \rho Q,$$

среднее число простаивающих каналов

$$m_{\text{пр}} = m - m_3,$$

коэффициент занятости (использования) каналов

$$K_3 = m_3/m,$$

коэффициент простоя каналов

$$K_{\text{пр}} = 1 - K_3,$$

среднее число заявок, находящихся в очереди,

$$L_{\text{оч}} = \frac{\rho^{m+1}}{mm!} \frac{1 - (\rho/m)^k (k + 1 - k\rho/m)}{(1 - \rho/m)^2} p_0,$$

а в случае, если $\rho/m = 1$, эта формула принимает другой вид

$$L_{\text{оч}} = \frac{\rho^{m+1}}{mm!} \frac{k(k + 1)}{2} p_0,$$

среднее время ожидания в очереди и среднее время пребывания в ППМ определяется выражениями, называемыми формулами Литтла,

$$T_{\text{оч}} = \frac{L_{\text{оч}}}{\lambda}, \quad T_{\text{ППМ}} = \frac{L_{\text{оч}}}{\lambda} + \frac{Q}{\mu}.$$

Возможна схема, при которой функции ЦУУ будет выполнять БЛА-диспетчер с использованием бортовых вычислительных и телекоммуникационных устройств, т.е. будет реализована схема централизованного управления с одним ведущим. Однако в этом случае на бортовые вычислительные устройства ведущего ложится значительная вычислительная нагрузка. При этом обмен информации между БЛА в группе лучше всего организовать по кольцевой схеме. Это выглядит следующим образом. Примем за полный цикл информационного обмена внутри группы БЛА $T_{\text{ц}}$ с. Такой интервал хорошо синхронизируется с временными метками GPS и ГЛОНАСС. Временное разделение информационного обмена внутри группы осуществляется делением цикла $T_{\text{ц}}$ на n временных окон. В каждом временном окне связываются между собой дуплексно различные пары БЛА. В течение цикла информация от каждого абонента к каждому абоненту попадет многократно и может быть мажоритарно сложена. Такая организация информационного обмена внутри группы БЛА обеспечивает высокую степень достоверности в условиях возможного возрастания уровня помех. Схемы информационных связей при централизованном управлении и централизованном управлении с одним ведущим могут быть использованы при сравнительно небольшом количестве БЛА в группе. При увеличении численности группы БЛА растет нагрузка на канал связи и на вычислительные средства устройства управления. Одним из выходов является применение иерархических стратегий управления, при которых группа БЛА делится на кластеры (подгруппы), каждый из которых

имеет своего ведущего, а ведущие кластеры управляются ЦУУ, расположенным на борту одного из БЛА (общего ведущего), либо на земле. Общий ведущий производит оценку общей ситуации и расчет оптимальных управлений и оптимальных траекторий движения. При этом информационный обмен внутри каждого кластера между ведущими кластеров в целях увеличения достоверности доставки необходимо организовать по кольцевому принципу, разделив соответственно временные интервалы обмена. При кластерной стратегии управления усложняется характер информационного обмена между БЛА, вследствие чего предъявляются серьезные требования к бортовой аппаратуре связи, особенно ведущих кластеров. Помехи и сбои в каналах связи крайне негативно отражаются на работе всего кластера. К тому же, выход из строя ведущего кластера или общего ведущего к серьезным проблемам.

Заключение

В работе показано, что система информационного обмена алгоритма адаптивного группой БЛА может быть рассмотрена как многоканальная система массового обслуживания с ограниченной очередью. Каждый канал представляет собой приемно-передающий модем (ППМ), пропускная способность которого определяется объемом передаваемого трафика поступающего от каждого БЛА группы БЛА-диспетчеру и определяемого непосредственно алгоритмом адаптивного управления. Это дает возможность рассчитать технические параметры ППМ. Предложены две схемы организации информационного обмена – с центральным устройством управления и схема централизованного управления с одним ведущим.

References

- [1] M. Wang and J. N. Liu, “Fuzzy logic-based real-time robot navigation in unknown environment with dead ends.”, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 56, no. 7, pp. 625–643, 2008. doi: [10.1016/j.robot.2007.10.002](https://doi.org/10.1016/j.robot.2007.10.002).
- [2] M. M. Mohamad, M. W. Dunnigan, and N. K. Taylor, “Ant colony robot motion planning”, *EUROCON 2005: Intern. conf. on computer as a tool (Belgrade, Serbia, November 21-24, 2005)*, Proc. N.Y.: IEEE, vol. 1, pp. 213–216, 2005. doi: [10.1109/EURCON.2005.1629898](https://doi.org/10.1109/EURCON.2005.1629898).
- [3] H.-P. Huang and S.-Y. Chung, “Dynamic visibility graph for path planning.”, *IEEE-RSJ intern. conf. on intelligent robots and systems: IROS 2004 (Sendai, Japan, Sept. 28 - Oct. 2, 2004)*, Proc. N.Y.: IEEE, vol. 3, pp. 2813–2818, 2004. doi: [10.1109/IROS.2004.1389835](https://doi.org/10.1109/IROS.2004.1389835).
- [4] J. O. Wallgrun, “Voronoi graph matching for robot localization and mapping”, *Transactions on computational science IX. B.*, Springer, pp. 76–108, 2010. doi: [10.1007/978-3-642-16007-3_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-16007-3_4).
- [5] S. M. LaValle, “Planning algorithms”, *Camb.; N.Y.: Camb. Univ. Press*, p. 826, 2006.
- [6] K. Yang and S. Sukkarieh, “3d smooth path planning for a uav in cluttered natural environments”, *IEEE-RSJ intern. conf. on intelligent robots and systems: IROS 2008 (Nice, France, Sept. 22-26, 2008)*, Proc. N.Y.: IEEE, pp. 794–800, 2008. doi: [10.1109/IROS.2008.4650637](https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4650637).
- [7] J. J. Kuffner and S. M. LaValle, “Rrt-connect: An efficient approach to to single-query path planning”, *IEEE intern. conf. on robotics and automation: ICRA'2000 (San Francisco, CA, USA, April 24-28, 2000)*, Proc. N.Y.: IEEE, vol. 2, pp. 995–1001, 2000. doi: [10.1109/ROBOT.2000.844730](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2000.844730).
- [8] N. H. Sleumer and N. Tschichold-Gurman, *Exact cell decomposition of arrangements used for path planning in robotics*. Zurich: Inst. of Theoretical Computer Science, 1999. doi: [10.3929/ethz-a-006653440](https://doi.org/10.3929/ethz-a-006653440).
- [9] L. De Filippis, G. Guglieri, and F. Quagliotti, “A minimum risk approach for path planning of uavs”, *J. of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 61, no. 1, pp. 203–219, 2011.

- [10] L. De Filippis, G. Guglieri, and F. Quagliotti, "Path planning strategies for uavs in 3d environments", *J. of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 65, no. 1, pp. 247–264, 2012.
- [11] S. Osher and J. A. Sethian, "Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on hamilton-jacobi formulations", *J. of Computational Physics*, vol. 79, no. 1, pp. 12–49, 1988.
- [12] S. Avasker, A. Domoshnitsky, M. Kogan, O. Kupervasser, H. Kutomanov, Y. Rofsov, I. Volinsky, and R. Yavich, "A method for stabilization of drone flight controlled by autopilot with time delay", *SN Applied Sciences*, vol. 2, no. 225, pp. 1–12, 2020.
- [13] P. Eickhoff, *Osnovy identichnosti sistem upravleniya*. M.: Mir, 1975.
- [14] A. Aleksandrov, *Optimalnye i adaptivnye sistemy*. M.: Vyshay shkola, 1989.
- [15] C. Cao and N. Hovakimyan, "L1 adaptive controller for systems with unknown time-varying parameters and disturbances in the presence of non-zero trajectory initialization error", *International Journal of Control*, vol. 81, no. 7, pp. 1147–1161, 2008.
- [16] A. I. Gavrilov, C. M. Tu, and E. A. Budnikova, "Synthesis of automatic control system quadcopter", *Collection of Scientific Tr. "Management In Marine And Aerospace Systems" (UMAS-2014)*, pp. 621–624, 2014.
- [17] J. Borenstein and Y. Koren, "The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots", *IEEE Trans. on Robotics and Automation.*, vol. 7, no. 3, pp. 278–288, 1991. DOI: [10.1109/70.88137](https://doi.org/10.1109/70.88137).
- [18] I. Ulrich and J. Borenstein, "Vfh+: Reliable obstacle avoidance for fast mobile robots", *IEEE intern. conf. on robotics and automation (Leuven, Belgium, May 20, 1998)*; Proc. N.Y.: IEEE, vol. 2, pp. 1572–1577, 1998. DOI: [10.1109/ROBOT.1998.677362](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1998.677362).
- [19] E. P. Kubyshkin, L. N. Kazakov, and D. I. Sterin, "Mathematical modeling of flight reconfiguration of a unmanned aerial vehicles group", *2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2018*, Minsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, DOI: [10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457015](https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457015).
- [20] L. N. Kazakov, V. A. Botov, and E. P. Kubyshkin, "Adaptive algorithm for flight restructuring of a group of unmanned aerial vehicles", *2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2022 - Conference Proceedings*, 2022. DOI: [10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840955](https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840955).
- [21] V. F. Zhuravlev, "Fundamentals of theoretical mechanics", M.: Fizmatlit, 2001.
- [22] Y. I. Degtyarev, *Operations research*. M.: M.: Vyshay shkola, 1986.