

# Разработка математической модели информационного взаимодействия беспилотных летательных аппаратов

А.А. Кулик

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный  
технический университет имени Гагарина Ю.А.»  
e-mail: kulikalekse@yandex.ru

А.А. Большаков

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный  
технологический институт (технический  
университет)» e-mail: abolshakov57@gmail.ru

**Аннотация.** Рассматривается управление группой беспилотных летательных аппаратов, предназначенной для выполнения поисково-спасательных работ. Приводится сравнение различных методов управления летательными аппаратами в составе группы. Предложена математическая модель информационного взаимодействия участников группы беспилотных летательных аппаратов, позволяющая определить значения параметров распределения информации между ними. Описывается реконфигурация информационных потоков обмена данными между участниками группы при их отказах. Полученные результаты планируется использовать при разработке программно-алгоритмического обеспечения беспилотных летательных аппаратов, осуществляющих полет в составе группы.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат; математическая модель; управление группой; информационное взаимодействие, алгоритм реконфигурации

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время среди авиационной техники получили широкое распространение беспилотные летательные аппараты (БПЛА), которые применяются для мониторинга наземного и воздушного пространства. Отдельное место в классификации подобных летательных аппаратов занимают малые БПЛА, масса которых варьируется в пределах 50÷500 кг, время полета составляет 8÷9 ч., высота полета – до 4 км. При этом полезная нагрузка аппарата составляет 50% от общей массы, что создает условия для использования их в поисково-спасательных работах в любых погодных условиях. Перемещение рулевых поверхностей БПЛА осуществляется системой управления вертолетом, поэтому решение задачи управления аппаратом в составе группы должно выполняться программно-вычислительными средствами системы управления. При этом в процессе полета летательного аппарата должна обеспечиваться согласованность работы системы управления исполнительными механизмами вертолета и системы управления двигателем внутреннего сгорания. На рис. 1 представлен пример малого БПЛА.

Учитывая, что зоны проведения поисково-спасательных работ могут достигать несколько сотен километров, то появляется необходимость в применении групп БПЛА.



Рис. 1. Малый беспилотный летательный аппарат

Поэтому важной задачей является управление беспилотными летательными аппаратами в составе группы. Полет летательного аппарата в составе группы является сложным организационно-техническим процессом, управление которым представляет самостоятельную научно-техническую задачу. Необходимость ее решения обусловлена повышением требований к эффективности применения БПЛА, в частности, к степени выполнения задачи, поставленной перед летательными аппаратами, к оптимизации маршрутов полета, к дифференциации задач, поставленных перед БПЛА.

В настоящее время существует два основных подхода к управлению группой беспилотных летательных аппаратов, которые разрабатываются на базе «жестких» алгоритмов управления и искусственного интеллекта. В первом случае группой управляет единый вычислительный центр («ведущий» ЛА), принимающий команды от оператора с земли и реализующий заранее заданную программу полета. Преимуществами такого способа управления являются относительно простые алгоритмы полета

ведомых объектов. Однако применение «жестких» алгоритмов требует высокой вычислительной мощности «ведущего» ЛА, обуславливает сложность организации обмена данными между участниками группы во время полета, приводит к потере группы летательных аппаратов при отказе «ведущего» или канала обмена данными. Примером такого способа управления является группа роботов [2], перемещение элементов которой осуществляется по командам ведущего робота, который передает текущие координаты местоположения другим участникам группы.

Альтернативным вариантом решения задачи по управлению группой БПЛА является управление мультиагентными системами [2–5], которые основываются на методах и алгоритмах искусственного интеллекта. В такой системе каждый летательный аппарат представляет отдельный элемент, выполняющий собственную задачу, поставленную разработчиком (пользователем). При этом действия каждого участника группы направлены на достижение единой цели, что создает предпосылки для организации обмена данными между агентами системы. В качестве примера применения мультиагентной системы в управлении беспилотными летательными аппаратами можно привести поражение наземных или воздушных целей противника. Таким образом, использование искусственного интеллекта в управлении БПЛА с реализацией мультиагентной системы позволяет распределить рабочие функции между всеми участниками группы, а также повысить эффективность ее действий при отказе (потере) некоторых летательных аппаратов [5]. Существенные недостатки такого метода управления заключаются в отсутствии внешнего контроля за действием беспилотных летательных аппаратов и необходимости высоких вычислительных мощностей бортового оборудования летательного аппарата для организации обмена данными между ЛА.

## II. ХАРАКТЕРИСТИКА МУЛЬТИКЛАССОВОГО СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ БПЛА

Среди методов управления группой БПЛА следует выделить мультиклассовый способ управления, отличающийся от других разделением летательных аппаратов группы по классам. Каждый класс объединяет 1÷5 аппаратов, что позволяет организовать внешний контроль за состоянием и выполнением полетного задания участников группы. Структурная схема мультиклассового управления группой БПЛА, представлена на рис. 2.

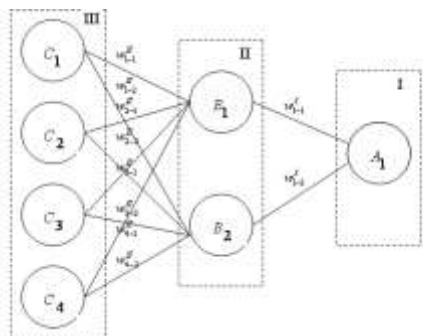


Рис. 2. Структурная схема мультиклассового управления БПЛА

На рисунке представлены следующие обозначения: I÷III – номер класса группы;  $A_1, B_1, B_2, C_1 \div C_4$  – элементы, входящие в состав мультиклассовой системы;  $w_{1-1}^I, w_{2-1}^I$  – переменные, характеризующие обмен данными между элементами мультисистемы, принадлежащих I и II классам;  $w_{1-1}^{II} \div w_{4-2}^{II}$  – переменные, характеризующие обмен данными между элементами мультисистемы, принадлежащих II и III классам системы.

Из структурной схемы видно, что система имеет иерархичное построение, в котором команды и сигналы управления пересылаются от элемента старшего класса к младшему. Следует отметить, что с понижением уровня класса повышается количество элементов, принадлежащих к этому классу. Количество элементов каждого класса можно вычислить по формуле (1).

$$k_n = 2 \cdot k_{n-1}, k_1 = 1, \quad (1)$$

где  $k_{n-1}$  – количество элементов, принадлежащих предыдущему классу.

Отметим, что каждый элемент текущего класса управляет двумя элементами последующего. Тогда распределение информации для рассматриваемой группы БПЛА примет вид (2):

$$\begin{aligned} A_1 &\xleftarrow{w_{1-1}^I} B_1, A_1 \xleftarrow{w_{2-1}^I} B_2, \\ B_1 &\xleftarrow{w_{1-1}^{II}} C_1, B_1 \xleftarrow{w_{2-1}^{II}} C_2, \\ B_2 &\xleftarrow{w_{3-2}^{II}} C_3, B_2 \xleftarrow{w_{4-2}^{II}} C_4 \end{aligned} \quad (2)$$

Мультиклассовый способ управления группой беспилотных летательных аппаратов, позволяет уменьшить нагрузку обмена данными между участниками группы и вычислительные затраты, приходящиеся на бортовое оборудование летательного аппарата. Также представленный способ управления обеспечивает постоянный контроль оператора за состоянием группы, что достигается обменом данных «ведущего» группы с центром управления. Отличительной особенностью мультиклассового управления группой беспилотных летательных аппаратов от мультиагентных систем является организация межклассовой структуры обмена данными между участниками группы.

## III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель настоящей работы заключается в разработке математической модели информационного взаимодействия беспилотных летательных аппаратов в составе группы, что позволит определить распределение потоков информации между объектами управления во времени с учетом задержки передачи данных.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) определить переменные обмена данными между участниками группы и способ их передачи;

2) построить математическую модель обмена данными между участниками группы БПЛА;

3) выполнить моделирование информационного взаимодействия участников группы летательных аппаратов.

Как правило, взаимодействие между участниками группы осуществляется передачей информации, содержащей данные о текущем положении объекта управления и об условиях его полета по радиоканалам. Тогда для математического представления информационного обмена данными между участниками группы требуется применение модели инфокоммуникационной сети [6].

#### IV. ОПИСАНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ОБМЕН ДАННЫМИ МЕЖДУ УЧАСТНИКАМИ ГРУППЫ И СПОСОБ ИХ ПЕРЕДАЧИ

Переменные, характеризующие обмен между элементами мультиклассовой системы, могут быть представлены следующими зависимостями (3):

$$\begin{aligned} w_{1-1}^I &= [w_{1-1}^{I_{\text{вбк}}}, w_{1-1}^{I_{\text{вк}}}], w_{1-2}^I = [w_{1-2}^{I_{\text{вбк}}}, w_{1-2}^{I_{\text{вк}}}], \\ w_{1-1}^{I_{\text{вбк}}}(t) &= w_{1-2}^{I_{\text{вбк}}}(t), w_{1-1}^{I_{\text{вк}}}(t) = w_{1-2}^{I_{\text{вк}}}(t + \tau_{11}); \\ w_{1-1}^{II} &= [w_{1-1}^{II_{\text{вбк}}}, w_{1-1}^{II_{\text{вк}}}], w_{2-1}^{II} = [w_{2-1}^{II_{\text{вбк}}}, w_{2-1}^{II_{\text{вк}}}], \\ w_{3-2}^{II} &= [w_{3-2}^{II_{\text{вбк}}}, w_{3-2}^{II_{\text{вк}}}], w_{4-2}^{II} = [w_{4-2}^{II_{\text{вбк}}}, w_{4-2}^{II_{\text{вк}}}], \\ w_{1-1}^{II_{\text{вбк}}}(t) &= w_{2-1}^{II_{\text{вбк}}}(t), w_{1-1}^{II_{\text{вк}}}(t) = w_{2-1}^{II_{\text{вк}}}(t + \tau_{21}); \\ w_{3-2}^{II_{\text{вбк}}}(t) &= w_{4-2}^{II_{\text{вбк}}}(t), w_{3-2}^{II_{\text{вк}}}(t) = w_{4-2}^{II_{\text{вк}}}(t + \tau_{22}); \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\tau_{11}, \tau_{21}, \tau_{22}$  – расхождение времени обмена данными между элементами группы.

#### V. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБМЕНА ДАННЫМИ МЕЖДУ УЧАСТНИКАМИ ГРУППЫ БПЛА

В процессе осуществления полета летательного аппарата на него воздействуют различные внешние и внутренние факторы, в том числе случайные, способные приводить к задержке передачи сигнала во времени. Поэтому математическое описание переменной обмена данными между элементами системы имеет вид (4):

$$x(t) = A[s(t)\cos\varphi + \bar{s}(t)\sin\varphi] + n(t), \quad (4)$$

где  $s(t), \bar{s}(t)$  – функции сопряжения по Гильберту;  $\varphi$  – случайная начальная фаза, равномерно распределенная во времени на интервале  $[0; 2\pi]$ ;  $n(t)$  – аддитивный гауссовский шум.

$$\bar{s}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)d\tau}{t - \tau}, \quad (5)$$

где  $\tau$  – задержка во времени.

Используя формулы (4) и (5), можно получить выражения (6) распределения информации между участниками группы БПЛА:

$$\begin{aligned} w_{1-1}^{I_{\text{вбк}}} &= A_{w_{1-1}^I} [w_{1-1}^{I_{\text{вбк}}}(t)\cos\varphi + \bar{w}_{1-1}^{I_{\text{вбк}}}(t)\sin\varphi] + n(t), \\ w_{1-1}^{I_{\text{вк}}} &= A_{w_{1-1}^I} [w_{1-1}^{I_{\text{вк}}}(t)\cos\varphi + \bar{w}_{1-1}^{I_{\text{вк}}}(t)\sin\varphi] + n(t), \\ w_{1-2}^{I_{\text{вбк}}} &= A_{w_{1-2}^I} [w_{1-2}^{I_{\text{вбк}}}(t)\cos\varphi + \bar{w}_{1-2}^{I_{\text{вбк}}}(t)\sin\varphi] + n(t), \\ w_{1-1}^{II_{\text{вбк}}} &= A_{w_{1-1}^{II}} [w_{1-1}^{II_{\text{вбк}}}(t)\cos\varphi + \bar{w}_{1-1}^{II_{\text{вбк}}}(t)\sin\varphi] + n(t), \\ w_{1-1}^{II_{\text{вк}}} &= A_{w_{1-1}^{II}} [w_{1-1}^{II_{\text{вк}}}(t)\cos\varphi + \bar{w}_{1-1}^{II_{\text{вк}}}(t)\sin\varphi] + n(t), \\ w_{2-1}^{II_{\text{вбк}}} &= A_{w_{2-1}^{II}} [w_{2-1}^{II_{\text{вбк}}}(t)\cos\varphi + \bar{w}_{2-1}^{II_{\text{вбк}}}(t)\sin\varphi] + n(t), \\ w_{3-2}^{II_{\text{вбк}}} &= A_{w_{3-2}^{II}} [w_{3-2}^{II_{\text{вбк}}}(t)\cos\varphi + \bar{w}_{3-2}^{II_{\text{вбк}}}(t)\sin\varphi] + n(t), \\ w_{3-2}^{II_{\text{вк}}} &= A_{w_{3-2}^{II}} [w_{3-2}^{II_{\text{вк}}}(t)\cos\varphi + \bar{w}_{3-2}^{II_{\text{вк}}}(t)\sin\varphi] + n(t), \\ w_{4-2}^{II_{\text{вбк}}} &= A_{w_{4-2}^{II}} [w_{4-2}^{II_{\text{вбк}}}(t)\cos\varphi + \bar{w}_{4-2}^{II_{\text{вбк}}}(t)\sin\varphi] + n(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $A_{w_{i-k}^j}$  – амплитуда сигнала  $i$ -го принадлежащего мультиклассовой системе.

#### VI. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УЧАСТНИКОВ ГРУППЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В рамках выполнения работы осуществлено моделирование обмена данными между элементами группы беспилотных летательных аппаратов. В процессе моделирования информационного взаимодействия участников группы приняты следующие допущения.

1) Участники подклассов группы получают информацию от ведущих элементов одновременно. Например, элементы  $B_1$  и  $B_2$  одновременно получают данные от элемента  $A_1$ .

2) Ведущие элементы группы получают данные от ведомых одновременно для собственного подкласса. Например,  $B_1$  получает в один и тот же момент времени данные от  $C_1$  и  $C_2$ .

2) При обмене данными между участниками группы величина  $n(t) = 0$ .

В качестве исходного сигнала обмена данными принят гармонический сигнал в форме косинуса с амплитудой в диапазоне 5÷45 В и частотой 50 Гц. Результаты моделирования обмена данными между участниками группы представлены на рис. 3

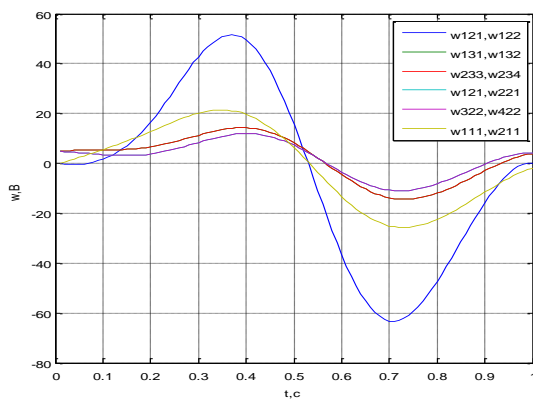


Рис. 3. Распределение сигналов между участниками группы

Из рис. 3 видно, что смещение интервала времени передачи данных между элементами различных классов системы составляет 0,1 с. Причем время передачи данных от элемента А к элементам С достигает 0,2 с. Поэтому в процессе организации распределения потоков информации необходимо учитывать время запаздывания передачи данных от ведущих элементов ведомым, что требуется реализовать в программно-алгоритмическом обеспечении системы управления БПЛА.

Таким образом, выражение (4) позволяет математически представить обмен данными между участниками группы, которое целесообразно использовать в процессе разработки программного обеспечения системы управления группой беспилотных ЛА.

## VII. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РЕКОНФИГУРАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УЧАСТНИКОВ ГРУППЫ

Появляются различные отказы различной с разными последствиями для участников группы, в том числе потеря одного или нескольких участников. Поэтому возникает необходимость в разработке алгоритма реконфигурации взаимодействия участников группы с для сохранения контроля и управления ими. Процесс реконфигурации элементов системы представляет сложный вычислительный процесс, направленный на изменение структуры системы управления, который заключается в перераспределении функций ее элементов при отказе других элементов [7].

Для разработки алгоритма следует выделить основные принципы реконфигурации управления группой беспилотных летательных аппаратов:

- 1) назначение нового ведущего оставшейся группы;
- 2) изменение потоков передачи данных.

Рассмотрим алгоритм реконфигурации распределения информации между участниками группы в случае отказа элементов второго класса.

Этап 1. Инициализация объектов управления из состава группы БПЛА

Этап 2. Проверка наличия обмена данными между элементами I и II класса.

Этап 3. Если обмен данными между одним из элементов II класса с ведущим группы отсутствует, то управление осуществляется оставшимся участником класса.

Этап 4. Проверка наличия обмена данными между элементами II и III класса.

Этап 5. Если обмен данными между ведущими и ведомыми элементами подклассов осуществляется в соответствии с выражением (3), то команды управления должны передаваться от элемента, имеющему связь с ведущим группы, к элементу с отказавшим обменом данными по резервным каналам связи. Иначе оставшийся элемент принимает управление элементами последующего класса. Например,  $B_1 \xleftarrow{w_{1-1}^{II}} C_1$ ,  $B_1 \xleftarrow{w_{2-1}^{II}} C_2$ ,  $B_1 \xleftarrow{w_{3-1}^{II}} C_3$ ,  $B_1 \xleftarrow{w_{4-1}^{II}} C_4$ , где  $B_1 \xleftarrow{w_{1-1}^{II}} C_3$ ,  $B_1 \xleftarrow{w_{4-1}^{II}} C_4$  являются резервными линиями обмена данными.

Этап 4. Если обмен данными между участниками группы из II класса с ведущим отсутствует, то управление третьим классом должно перейти к ведущему группы.

Таким образом, предложенный алгоритм реконфигурации группы беспилотных летательных аппаратов позволит сохранить функции управления в процессе отказа ее элементов. Дальнейшее развитие алгоритма должно быть направлено на его программную реализацию в составе вычислительного комплекса летательного аппарата.

## VIII. ВЫВОДЫ

В результате выполненной работы построена математическая модель информационного взаимодействия элементов группы беспилотных летательных аппаратов, эксплуатируемых в различных погодных условиях для проведения поисково-спасательных работ. Выполнено моделирование информационного взаимодействия участников группы летательных аппаратов. Также предложен алгоритм реконфигурации ее элементов в случае отказа участников группы

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах. Под ред. В.Х. Пшихопова. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2015. 305 с.
- [2] Амелин К.С., Антал Е.И., Васильев В.И., Граничина Н.О. Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов // Стохастическая оптимизация в информатике. 2015. Т. 25, № 10. С. 157-166.
- [3] Щербатов И.А., Проталинский И.О., Проталинский О.М. Управление группой роботов: компонентный подход // Информатика и системы интеллектуального управления. 2015. №1(43). С. 93-103.
- [4] Складов С.А. Синергетическое управление группой мобильных роботов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. №8 (157). С. 147-158.
- [5] Josi Ben-Asher, Moran Feldman, Sharoni Feldman, PiniGurfi Distributed Decision and Control for Cooperative UAVs using Ad-Hoc Communication. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2008. vol. 16, no. 3.
- [6] Зудилова Т.В. Метод моделирования в инфокоммуникационных сетях. СПб. 2013. 131 с.
- [7] Балашова Т.И. Повышение надежности и отказоустойчивости сети передачи данных динамической перестройкой ее топологии // Системы управления и информационные технологии. 2015. Т.61, №3. С. 52-55.