

Горбунов Александр Александрович – НТЦ «Техноцентр» ЮФУ; e-mail: alexillaiho@gmail.com; 347900, Таганрог, ул. 2-я Котельная, 24, тел.: +79286277155; м.н.с.

Sinutin Sergey Alekseevich – Southern Federal University; e-mail: ssin@mail.ru; 347900, 16 A, Maliy Sadoviy per., Taganrog, 347900, Russia; phone: +79660294767; the department of embedded systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Gorbunova Ekaterina Borisovna – e-mail: kattag@gmail.com; 24, 2-d Kotelnaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79286277299; postgraduate student.

Gorbunov Alexandr Alexandrovich – Engineering Center “Technocenter” SFedU; e-mail: alexillaiho@gmail.com; 24, 2-d Kotelnaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79286277155; junior research assistant.

УДК 629.7.01

В.Н. Евдокименков, М.Н. Красильщиков, Г.Г. Себряков

**РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ:
АРХИТЕКТУРА И ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

Описан облик распределенной системы интеллектуального управления группой ударно-разведывательных беспилотных летательных аппаратов (БЛА), объединяющей внебортовую и бортовую компоненты. Рассмотрены современные подходы к разработке алгоритмов, составляющих основу внебортовой компоненты. Эти подходы различаются сценариями целевого применения групп БЛА, требованиями к информационному обмену между ними и тем математическим аппаратом, который составляет основу планирования. В современной литературе получили развитие группы методов предполетного планирования, базирующиеся на использовании: методов математического программирования, сетей Петри, диаграммы Вороного, триангуляции Делоне. Наряду с изложением существующих подходов представлены результаты собственных исследований авторов. В частности, описан оригинальный метод предполетного планирования групповых действий БЛА, развивающий известные работы на основе триангуляции Делоне. Рассмотрен алгоритм планирования действий группы БЛА в операции поражения (разведки) комплекса наземных объектов в условиях неопределенности данных о местоположении источников потенциальной угрозы. Работа алгоритма иллюстрируется практическим примером решения задачи предполетного планирования для группы, объединяющей четыре БЛА, действующих по комплексу из четырех наземных объектов, важность которых различна, в условиях присутствия статистической неопределенности относительно расположения источников угрозы в районе применения группы. Изложены алгоритмы распознавания тактических ситуаций и выработки управляющих решений, реализованные в составе бортовой компоненты. С учетом особенностей их реализации эти алгоритмы объединены в две группы: 1) алгоритмы распознавания тактических ситуаций и принятия решений, использующие элементы искусственного интеллекта, применение которых целесообразно для типовых ситуаций, характеризующихся высокой степенью неопределенности в оценке текущих условий применения группы БЛА; 2) алгоритмы распознавания тактических ситуаций и принятия решений на основе математических моделей и методов оптимизации. Данная группа алгоритмов особенно эффективна при управлении действиями группы БЛА на этапах, предшествующих непосредственным контактам с противником. Более подробно представлены алгоритмы распознавания тактических ситуаций и принятия решений на основе математических моделей и методов оптимизации. В качестве примера реализации подобного алгоритма рассмотрен алгоритм управления полетом БЛА в групповых порядках, основанный на использовании традиционных пропорциональных интегрально-дифференциальных

регуляторов (ПИД-регуляторов). Показано, что описанный вариант реализации системы управления ведомого БЛА на основе классического ПИД-регулятора обеспечивает выдерживание заданной конфигурации строя даже при многократном маневрировании ведущего БЛА по скорости и курсу.

Беспилотный летательный аппарат; интеллектуальное управление групповыми действиями; алгоритмы предполетного планирования; алгоритмы распознавания тактических ситуаций.

V.N. Evdokimenkov, M.N. Krasilshchikov, G.G. Sebrjakov

DISTRIBUTED INTELLECTUAL CONTROL SYSTEM FOR THE GROUP OF UNMANNED AERIAL VEHICLES: ARCHITECTURE & SOFTWARE AND MATHEMATICAL SUPPORT

The paper contains description of intellectual control system both architecture and algorithms applying to shock & intelligence groups of unmanned flying vehicles (UAV). The system mentioned unites on-board and out-board components. The main attention is paid to development of out-board component algorithms, based on advanced approaches, which depend on various groups operation scenarios, data exchange requirements as well as on specific features of formal scheduling procedures. Nowadays the following approaches are considered as most useful for pre-flight group mission scheduling: mathematical programming, Petri networks, Voronoi's diagram and Delanay triangulation. The paper presents original author's results, in particular, specific method of pre-flight mission scheduling, which updates known ones, based on Delanay triangulation. Besides, paper also presents algorithms of both tactical situations recognition and decision making, which are implemented as on-board system component. These algorithms include two groups, namely: 1) algorithms, based on artificial intellect; 2) algorithms, based on mathematical models and optimization procedures. The last group of algorithms is presented more detailed in paper. The example such algorithm utilization considers unmanned vehicle group flight control algorithm, based on traditional PID-regulator.

Unmanned flight vehicle; intellectual control system; mission planning algorithms; tactical situation recognizing algorithms.

1. Архитектура распределенной системы интеллектуального управления группой беспилотных летательных аппаратов. В настоящее время к беспилотным летательным аппаратам (БЛА) гражданского и военного назначения проявляется все более устойчивый интерес, что подтверждается разнообразием их существующих образцов. В максимальной степени достоинства БЛА проявляются в условиях их группового применения в интересах решения прежде всего ударно-разведывательных задач. Однако, практическая реализация группового применения БЛА требует разработки соответствующего интеллектуального комплекса, обеспечивающего их координированное траекторное и информационное взаимодействие в процессе коллективных действий.

Уникальность и новизна задачи управления группой БЛА обусловлена тем, что для ее решения необходимо создание принципиально нового класса интеллектуальных управляющих комплексов, объединяющих две компоненты: внебортовую и бортовую (рис. 1).

Внебортовая компонента обеспечивает планирование группового применения БЛА и подготовки для каждого из участников группы полетного задания. В процессе предполетного планирования проводится:

- ♦ сбор, обработка и отображение на электронной карте данных о местности, над которой пролегает маршрут БЛА, метеоусловиях в районе целевого применения, наличии источников потенциальной угрозы (зенитно-ракетных комплексов противника);

- ◆ определение требуемого состава группы для решения поставленной целевой задачи, распределение БЛА по задачам и целям;
- ◆ построение оптимальных в смысле выбранного критерия маршрутов для каждого БЛА в составе группы.

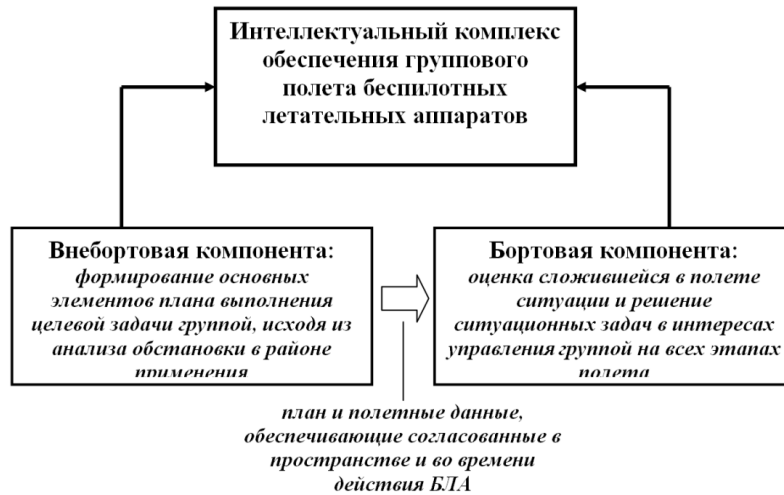


Рис. 1. Структура интеллектуального комплекса обеспечения групповых действий БЛА

В результате формируется план и полетные данные, обеспечивающие согласованные в пространстве и во времени действия всех БЛА-В, участвующих в решении целевой задачи.

Бортовая компонента интеллектуального комплекса обеспечения групповых действий размещается на борту каждого БЛА и обеспечивает оценку сложившейся в полете ситуации и выработку управляющих команд на всех этапах полета. Способ конкретной реализации бортовой компоненты во многом зависит от выбранной стратегии управления и реализующей ее схемы информационного обмена.

Дальнейшее изложение посвящено обзору конкретных методов и алгоритмов, составляющих программно-математическую основу перечисленных выше компонент интеллектуального комплекса обеспечения групповых действий БЛА.

2. Программно-математическое обеспечение внебортовой компоненты распределенной системы интеллектуального управления группой беспилотных ЛА. Как указывалось выше, внебортовая компонента распределенной системы интеллектуального управления группой БЛА входит в состав автоматизированного комплекса планирования применения БЛА, их средств поражения и подготовки для них полетных заданий. В результате обеспечивается принятие обоснованных решений по основным элементам плана выполнения задачи вылета.

В настоящее время наблюдается значительный интерес прежде всего со стороны зарубежных специалистов к проблеме алгоритмической поддержки процесса предполетного планирования групповых действий авиации. Например, в работах [1-10] развивается подход, использующий аппарат математического программирования для решения задач планирования групповых действий БЛА. Различные алгоритмы в рамках подобного подхода объединяет то, что задача целераспределения, то есть назначения для каждого БЛА в составе группы наиболее предпочтительного целевого объекта, в конечном итоге интерпретируется как задача математического программирования. В [11-16] предлагается использование сети Петри

для решения задач предполетного планирования маршрутов выхода БЛА на целевые объекты и последующей коррекции первоначального плана с учетом фактически сложившейся ситуации. В качестве модели, описывающей сценарий группового применения БЛА, в упомянутых работах используется ориентированный граф. В [17] изложен метод построения маршрутов БЛА применительно к задаче обнаружения наземных объектов. В основе метода лежит использование математического ожидания информационной энтропии для оценки оптимальности альтернативных вариантов маршрута.

В последние годы появилось большое число работ, основу которых составляет использование триангуляции Делоне [18–23] для решения задачи предполетного планирования групповых действий БЛА. В этом случае маршрут формируется в виде набора промежуточных пунктов маршрута (ППМ), прохождение которых является обязательным. На характер маршрута движения БЛА между ППМ жестких ограничений не накладывается, что позволяет строить траектории, максимально учитывающие динамические возможности БЛА (рис. 2).

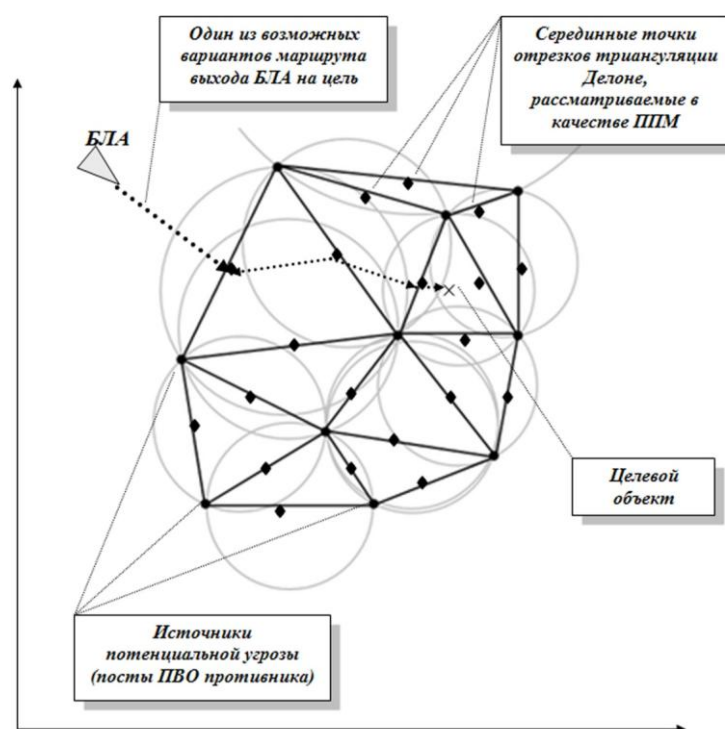


Рис. 2. Пример построения триангуляции Делоне в задаче планирования маршрутов БЛА

Однако, известные методы предполетного планирования, базирующиеся на триангуляции Делоне, требуют развития, так как не учитывают следующие важные особенности применения групп БЛА:

- ◆ наличие неопределенности в расположении источников потенциальной угрозы (постов противовоздушной обороны противника);
- ◆ наличие в составе группы БЛА различных типов, что предполагает их ранжирование по степени важности;

- ◆ неоднородность состава наземных целевых объектов, являющихся областью применения группы БЛА, требующая в процессе планирования учета степени важности каждого из них.

Учитывая это, разработан альтернативный метод предполетного планирования действий группы БЛА, развивающий известные подходы на основе триангуляции Делоне с учетом вышеперечисленных особенностей группового применения ударно-разведывательных БЛА.

Алгоритм, реализующий разработанный метод, обеспечивает выработку решений по выбору наиболее предпочтительного варианта применения группы ЛА в операции поражения (разведки) наземных целей, когда имеет место статистическая неопределенность относительно местоположения комплексов противовоздушной обороны (ПВО) в районе целевого применения. Статистическая интерпретация подобной неопределенности представляется наиболее адекватной реальным условиям применения групп БЛА, действия которых поддерживаются разведывательной информацией, на основе которой может быть сформирована модель, содержащая априорную статистику относительно координат местоположения комплексов ПВО.

В качестве исходных данных для работы алгоритма используется следующая информация: 1) состав группы БЛА, привлекаемой для решения задачи поражения (разведки) группы наземных объектов; 2) координаты, определяющие положение каждого БЛА в момент выхода в район целевого применения в инерциальной системе координат, начало которой совмещено с аэродромом вылета; 3) заданная высота (эшелон) движения каждого БЛА; 4) заданная постоянная скорость каждого БЛА; 5) весовые коэффициенты, определяющие ценность каждого из БЛА с учетом его типа, статуса (ведущий – ведомый), боевого оснащения и т.д.; 6) множество наземных целевых объектов; 7) известные координаты местоположения каждого из целевых объектов; 8) весовые коэффициенты, определяющие значимость каждого из целевых объектов, как объекта атаки; 9) множество комплексов ПВО, располагаемых в районе целевого применения группы БЛА; 10) функции плотности, характеризующие статистическую неопределенность данных о координатах местоположения комплексов ПВО противника.

Результатом работы алгоритма являются:

- 1) матрица R , определяющая оптимальный вариант целераспределения, то есть вариант распределения БЛА по целевым объектам с учетом их значимостей;
- 2) матрица S , определяющая в рамках конкретного варианта целераспределения, задаваемого структурой матрицы R , схему маршрута выхода БЛА на назначенную цель. Элементы матрицы S задают для каждого БЛА порядок прохождения промежуточных пунктов маршрута (ППМ), причем нулевое значение указывает на то, что соответствующий ППМ не включается в маршрут.

Основу алгоритма составляет предложенное в [19] для случая, когда положение источников угрозы известно точно, решение задачи оптимального целераспределения и формирования маршрутов движения БЛА к целям на основе триангуляции Делоне, которая покрывает весь район целевого применения группы ЛА сетью треугольников. Вершинами этих треугольников выступают точки местоположения источников потенциальных угроз. С целью определения наилучшего варианта маршрутов выхода ЛА на целевые объекты использована критериальная функция, которая оценивает предпочтительность каждого из участков маршрута с учетом

двух факторов: опасность потери ЛА при его обнаружении средствами ПВО и ожидаемый расход топлива при движении ЛА по данному участку маршрута. Оптимальным с точки зрения указанных факторов полагается такой участок маршрута, реализация которого требует наименьшего расхода топлива при минимуме опасности обнаружения ЛА средствами ПВО. По аналогии с [19] эта опасность оценивалась по удалению ЛА от ближайшего средства ПВО.

Поскольку алгоритм [19] обеспечивает решение задачи планирования в ситуации, когда группа образована однотипными ЛА, действующими при наличии достоверных сведений об источниках угрозы в районе целевого применения, была проведена его модификация, позволившая учесть: различную «стоимость» потери БЛА при решении задачи целераспределения, а также априорную статистику относительно координат расположения постов ПВО противника. Для получения решения задачи предполетного планирования в условиях неопределенности данных о местоположении постов ПВО противника использована комбинированная схема на основе алгоритма [19] и метода Монте-Карло.

В качестве примера работы алгоритма ниже рассмотрена задача планирования действий группы БЛА, участвующих в операции нанесения удара по комплексу из четырех наземных объектов. Данные о начальном расположении БЛА и значения коэффициентов, устанавливающих их статус (важность) в группе, представлены в табл. 1. В табл. 2 приведены данные по расположению целевых объектов и значениям коэффициентов, определяющих их ценность, как объектов атаки.

Таблица 1

Координаты начального положения БЛА и значения коэффициентов, устанавливающих их важность

U_i	$X_{U_i}, \text{км}$	$Y_{U_i}, \text{км}$	k_{U_i}
U_1 (БЛА)	350	750	0.1
U_2 (БЛА)	150	650	0.1
U_3 (БЛА)	100	400	0.1
U_4 (БЛА)	100	300	0.1
U_5 (ПЛА)	400	100	0.9

Таблица 2

Координаты начального положения целевых объектов и значения коэффициентов, устанавливающих их ценность как объектов применения группы БЛА

C_j	$X_{C_j}, \text{км}$	$Y_{C_j}, \text{км}$	k_{C_j}
C_1	525	250	0.1
C_2	235	435	0.6
C_3	760	480	0.3
C_4	620	650	0.2

Предполагалось также, что в районе применения группы БЛА присутствуют восемь постов ПВО противника, оснащенные радиолокационными средствами обнаружения воздушных целей и ракетными средствами поражения. Информация о постах ПВО ограничена знанием гауссовских функций плотности $p(x_{pk}, y_{pk}), k = 1, \dots, 8$ совместного распределения координат точек их расположения (табл. 3).

Таблица 3

Параметры функций плотности совместного распределения значений координат точек расположения источников угрозы

P_k	$m_{xk}, \text{км}$	$m_{yk}, \text{км}$	$\sigma_{xk}^2, \text{км}^2$	$\sigma_{yk}^2, \text{км}^2$	r_k
P_1	100	500	50	100	0,42
P_2	300	200	50	150	0,23
P_3	640	100	170	90	-0,16
P_4	850	350	50	130	0,31
P_5	750	650	10	100	0,16
P_6	500	750	25	15	0,10
P_7	370	600	75	75	0,01
P_8	650	430	30	100	-0,18

Используя метод Монте-Карло, в соответствии с функциями плотности $p(x_{pk}, y_{pk}), k = 1, \dots, 8$ моделировались реализации $(x_{pk}^t, y_{pk}^t), k = 1, \dots, 8; t = 1, \dots, 1000$, задающие положение точек расположения постов ПВО. Для каждого конкретного набора реализаций $(x_{pk}^t, y_{pk}^t), k = 1, \dots, 8$ выполнялся алгоритм [19], результатом работы которого, как и в рассмотренном ранее примере, являются:

- ♦ оптимальная матрица целераспределения R_t^* размера 5×4 , определяющая наилучший с учетом критерия вариант распределения БЛА в составе группы по целевым объектам. Каждый элемент $R_{ij}, i = 1, \dots, 5; j = 1, \dots, 4$ этой матрицы может принимать одно из двух возможных значений $R_{ij} = 1$, если в качестве приоритетной цели для i -го ЛА выбран j -ый целевой объект и $R_{ij} = 0$ – в противном случае;
- ♦ матрица S_t^* размера 5×15 , определяющая в рамках конкретного варианта целераспределения, задаваемого структурой матрицы R_t^* , оптимальный в маршрут выхода БЛА на назначенную цель (порядок обхода серединных точек триангуляции Делоне). То есть элементы $S_{ij}, j = 1, \dots, 15$ i -ой строки этой матрицы принимают значения $0, 1, \dots, 15$, где значение 1 указывает на то, что соответствующая серединная точка триангуляции Делоне соответствует первому промежуточному пункту маршрута, значение 15 – последнему. Значение 0 указывает на то, что соответствующая серединная точка триангуляции Делоне не включена в маршрут.

Описанная процедура в соответствии со схемой метода статистических испытаний (Монте-Карло) повторялась 1000 раз, в результате чего было получено 1000 реализаций критериальной функции и соответствующих им матриц R_t^*, S_t^* . Анализ полученных реализаций показал, что в 90% случаев наилучшее решение задачи предполетного планирования достигалось на паре матриц R^*, S^* с ненулевыми компонентами. Элементы $R_{14}^* = R_{23}^* = R_{32}^* = R_{42}^* = R_{51}^* = 1$ матрицы R^* определяют факт назначения ЛА смешанной группы соответствующих целевых объектов. Элементы $S_{14}^* = 1, S_{15}^* = 2, S_{15}^* = 2, S_{19}^* = 3; S_{23}^* = 1, S_{24}^* = 1, S_{25}^* = 2, S_{29}^* = 3, S_{212}^* = 4; S_{31}^* = 1, S_{41}^* = 1, S_{58}^* = 1$. матрицы S^* задают для каждого ЛА порядок обхода промежуточных пунктов маршрута.

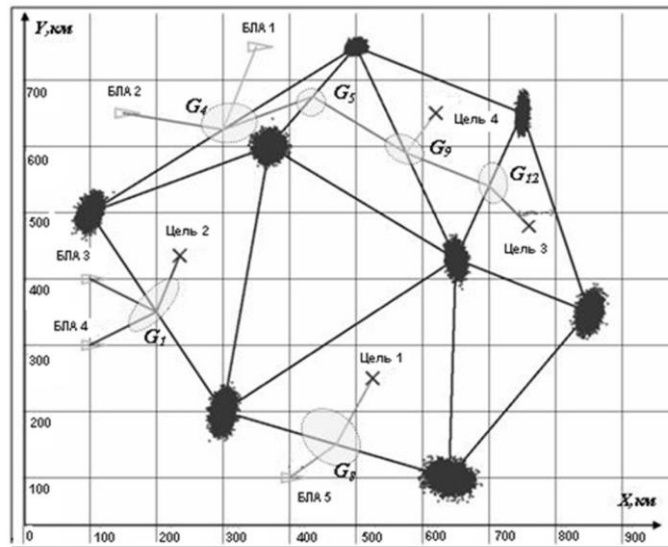


Рис. 3. Решение задачи предполетного планирования групповых действий БПА по комплексу наземных объектов условиях статистической неопределенности расположения источников угрозы

На рис. 3 представлены результаты статистических испытаний, где темные зоны соответствуют областям неопределенности расположения постов ПВО противника, треугольными символами помечены БПА группы, крестами – целевые объекты. Заметим, что пара матриц R^* , S^* задает только оптимальный вариант целераспределения и последовательность обхода серединных точек отрезков, соединяющих соответствующие вершины триангуляции Делоне. В процессе статистических испытаний для каждой реализации (x_{pk}^t, y_{pk}^t) , $k = 1, \dots, 8$; $t = 1, \dots, 1000$, определялись координаты (x_{sl}^t, y_{sl}^t) , $l = 1, \dots, 15$; $t = 1, \dots, 1000$ серединных точек отрезков, соединяющих соответствующие вершины триангуляции Делоне. На плоскости XOY эти реализации в совокупности образуют точки, ограниченные некоторой областью (на рис. 2. эти области обозначены как $G_1, G_4, G_5, G_9, G_{12}$). Координаты (x_{sl}, y_{sl}) , $l = 1, \dots, 15$ связаны с координатами (x_{pk}, y_{pk}) , $k = 1, \dots, 8$, задающими положение вершин триангуляции Делоне нелинейной зависимостью. Поэтому, несмотря на то, что плотность $p(x_{pk}, y_{pk})$ совместного распределения значений (x_{pk}, y_{pk}) полагалась гауссовской, распределение значений (x_{sl}, y_{sl}) , $l = 1, \dots, 15$ не является нормальным распределением. Это обстоятельство затрудняет точное построение областей $G_1, G_4, G_5, G_9, G_{12}$. Учитывая это, в алгоритме использована аппроксимация указанных областей доверительными эллипсами. То есть в качестве областей $G_1, G_4, G_5, G_9, G_{12}$ использовались доверительные эллипсы, которым с вероятностью 0,95 принадлежат соответствующие серединные точки. В качестве координат промежуточных пунктов маршрутов ЛА в рамках оптимального варианта целераспределения использовались координаты центров доверительных эллипсов.

3. Программно-математическое обеспечение бортовой компоненты распределенной системы интеллектуального управления смешанной тактической группой пилотируемых и беспилотных ЛА. Алгоритмы распознавания тактических ситуаций и принятия решений, составляющие основу бортовой компоненты системы интеллектуального управления группой БЛА, можно объединить в две группы:

- 1) алгоритмы распознавания тактических ситуаций и принятия решений, использующие элементы искусственного интеллекта [24];
- 2) алгоритмы распознавания тактических ситуаций и принятия решений на основе математических моделей и методов оптимизации [25].

В качестве наиболее предпочтительных подходов к разработке алгоритмов распознавания тактических ситуаций и принятия решений в системах с искусственным интеллектом выделим следующие:

- 1) на основе продукционных систем с нечеткой логикой;
- 2) алгоритм принятия решений нейросетевого типа;
- 3) алгоритм управления типа «ситуация-действие», основанный на прецедентах;
- 4) алгоритм принятия решений на основе многозначной логики.

Перечисленные выше алгоритмы особенно эффективны в ситуациях, когда достижение целей управления осложняется недостаточной ситуационной осведомленностью. Однако, в некоторых случаях разработка алгоритмов, обеспечивающих управление группой БЛА, может быть достигнута с использованием традиционных подходов, основу которых составляют математические модели объектов управления и методы оптимизации. В частности, это касается такого важнейшего этапа выполнения целевой задачи, как полет строем в район боевого применения. Оказывается, что управление полетом БЛА в групповых порядках может быть достигнуто за счет использования комплекса пропорционально-интегральных регуляторов (ПИ-регуляторов), реализованных в системах управления БЛА.

Рассмотрим в качестве примера задачу управления в горизонтальной плоскости парой, образованной беспилотными ЛА, один из которых является ведущим, а другой ведомым. Целью автоматического управления является сохранение ведомым БЛА заданного положения относительно ведущего, в том числе при маневрировании последнего по положению и скорости. Геометрическая иллюстрация задачи приведена на рис. 4, где индекс L у параметра соответствует ведущему БЛА, а W – ведомому БЛА. Таким образом, на рис. 4 переменные V_w, ψ_w обозначают соответственно текущую скорость ведомого БЛА и его курсовой угол, а V_L, ψ_L – аналогичные параметры движения ведущего БЛА. Движение пары БЛА рассматривается в инерциальной системе координат (СК) $Ox_G y_G$, в которой ось Oy_G направлена на север. Курсовые углы обоих ЛА отсчитываются от этой оси.

Кинематические соотношения, описывающие изменение взаимного положения ведущего и ведомого БЛА удобнее представлять в подвижной системе координат $Ox_L y_L$, центр которой совпадает с центром масс ведомого БЛА, а ось Oy_L направлена вдоль вектора скорости V_w . В этой системе координат задаются параметры строя: дистанция X и интервал Y . Эти параметры представлены на рис. 6 вместе с другими параметрами, которые будут использованы в дальнейшем при синтезе алгоритма автоматического управления: R – линейное расстояние между ПЛА и БЛА, $\psi_E = \psi_L - \psi_w$ – текущее рассогласование между их курсовыми углами.

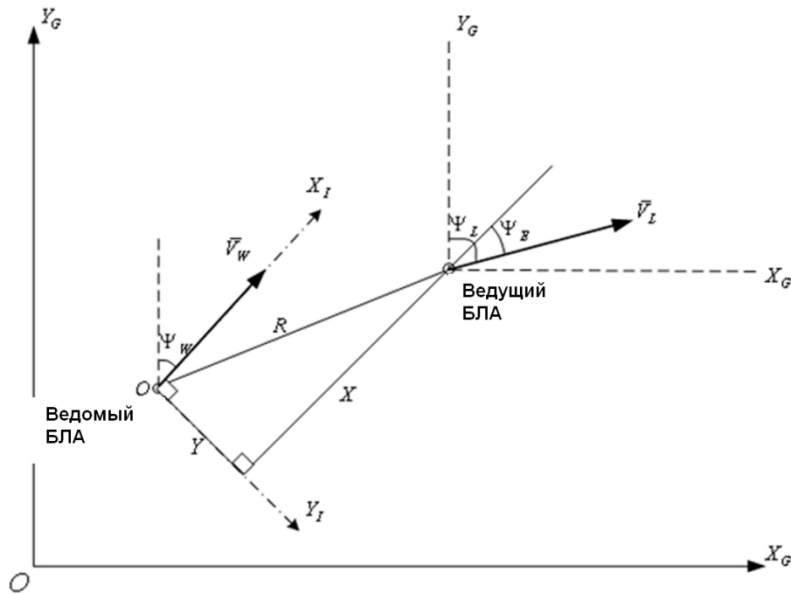


Рис. 4. Геометрическая иллюстрация задачи управления парой БЛА

С учетом введенных обозначений линеаризованные уравнения, описывающие взаимное положение ведущего и ведомого БЛА имеют вид:

$$\begin{cases} \Delta \dot{X} = -\frac{Y_R}{\tau_{\psi W}} \psi_w - V_w + V_L + \frac{Y_R}{\tau_{\psi W}} \psi_{wC}, \\ \dot{V}_w = -\frac{1}{\tau_{VW}} V_w + \frac{1}{\tau_{VW}} V_{wC}, \\ \dot{V}_L = -\frac{1}{\tau_{VL}} V_L + \frac{1}{\tau_{VL}} V_{LC}, \\ \Delta \dot{Y} = \left(\frac{X_R}{\tau_{\psi W}} - V_N\right) \psi_w + V_N \psi_L + V_L - \frac{X_R}{\tau_{\psi W}} \psi_{wC}, \\ \dot{\psi}_w = -\frac{1}{\tau_{\psi W}} \psi_w + \frac{1}{\tau_{\psi W}} \psi_{wC}, \\ \dot{\psi}_L = -\frac{1}{\tau_{\psi L}} \psi_L + \frac{1}{\tau_{\psi L}} \psi_{LC} \end{cases} \quad (1)$$

где $\Delta X = X - X_R$, $\Delta Y = Y - Y_R$, X_R , Y_R – соответственно требуемые значения интервала и дистанции; ψ_{wC} , V_{wC} – командные значения угла курса и скорости ведомого БЛА, интерпретируемые как управления; ψ_{LC} , V_{LC} – командные значения угла курса и скорости ведущего БЛА, интерпретируемые как возмущения; $\tau_{\psi W}$, τ_{VW} , $\tau_{\psi L}$, τ_{VL} – постоянные времени, характеризующие динамические свойства ведомого и ведущего БЛА в каналах управления углом курса и скоростью

Модель (1), описывающая динамику пары БЛА, позволяет сформировать систему управления в виде двух независимых каналов (рис. 5).

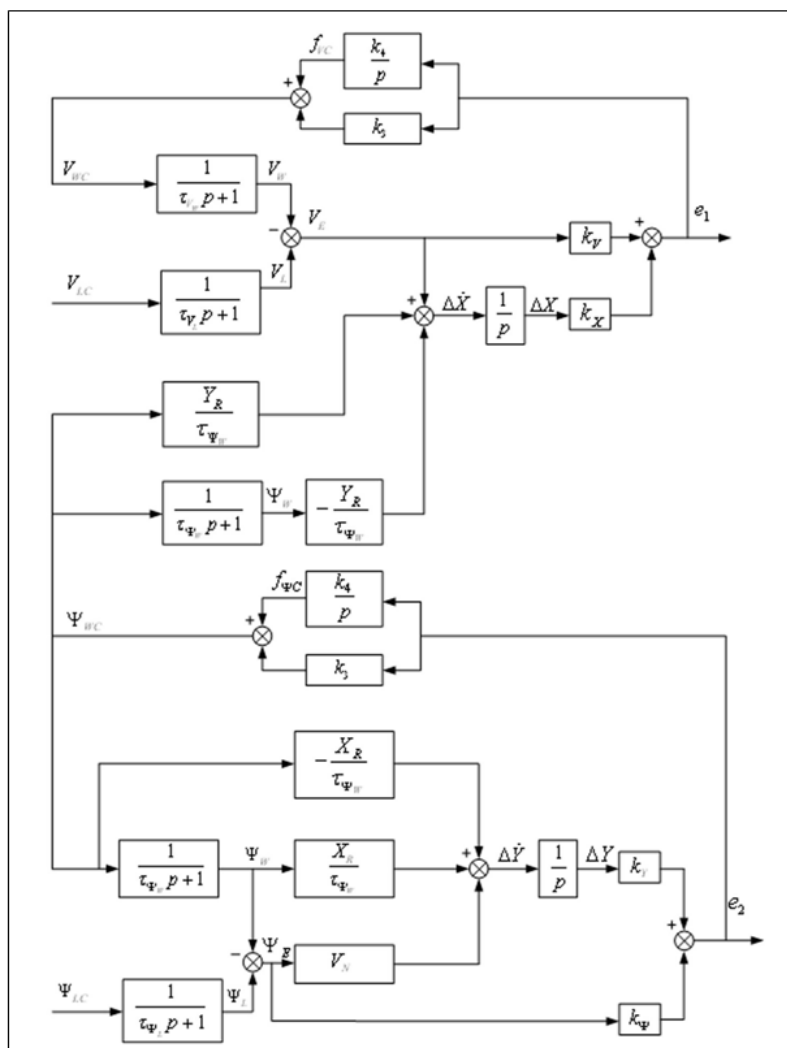


Рис. 5. Структурная схема системы управления ведомого БЛА

Управляющим сигналом во втором канале является командное значение курсового угла ведомого БЛА Ψ_{WC} , за счет которого обеспечивается устранение рассогласования по интервалу ΔY и курсовому углу Ψ_E . В качестве возмущающего сигнала в этом контуре выступает командное значение курсового угла Ψ_{LC} .

Первый канал управления имеет один основной управляющий сигнал – командное значение скорости ведомого БЛА V_{WC} и командное значение курсового угла ведомого БЛА, синтезированное во втором канале. За счет этих сигналов обеспечивается устранение рассогласования по дистанции ΔX и скорости ΔV относительно требуемых значений.

Для компенсации ошибок в указанных выше каналах предлагается использовать традиционные ПИ-регуляторы. Использование ПИ-регулятора во втором канале приводит к реализации следующего закона управления:

$$\Psi_{w_c}(t) = k_1 e_2(t) + k_2 \int_0^t e_2(t) dt, \quad (2)$$

$$e_2(t) = k_Y \Delta Y(t) + k_\Psi \Delta \Psi(t), \quad (3)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты ПИ-регулятора, с помощью которых осуществляется его настройка, k_Y, k_Ψ – весовые коэффициенты, за счет выбора которых устанавливается компромисс между рассогласованиями по интервалу и курсовому углу относительно требуемых значений. Аналогичным образом представляется закон управления для первого канала

$$V_{w_c}(t) = k_3 e_1(t) + k_4 \int_0^t e_1(t) dt, \quad (4)$$

$$e_1(t) = k_X \Delta X(t) + k_V \Delta V(t), \quad (5)$$

где k_3, k_4 – коэффициенты ПИ-регулятора, k_X, k_V – весовые коэффициенты, за счет выбора которых устанавливается компромисс между рассогласованиями по дистанции и скорости относительно требуемых значений.

Настройка ПИ-регуляторов производилась путем выбора таких коэффициентов усиления пропорциональной и интегральной составляющих, при которых достигалось минимальное время переходных процессов в соответствующих каналах управления. Поиск оптимальных настроек ПИ-регулятора проведен путем имитационного моделирования, в процессе которого также исследовалось влияние параметров, присутствующих в модели, на качество управления ведомым БЛА при движении в составе пары.

Начальные условия для уравнений (1–5) выбирались следующими: $\Delta X_0 = \Delta Y_0 = 0$, $V_w = V_L = 150 \frac{M}{c}$, $\Psi_w = \Psi_L = 0 \text{ рад}$. В качестве постоянных времени в модели ведущего БЛА приняты $\tau_{V_L} = 4.5 \text{ с}$, $\tau_{\Psi_L} = 4 \text{ с}$. Постоянные времени в модели ведомого БЛА равны $\tau_{V_w} = 2.5 \text{ с}$, $\tau_{\Psi_w} = 2 \text{ с}$.

Предполагалось, что изначально пара ведомый-ведущий БЛА совершает полет строем с параметрами: интервал $Y_R = 27 \text{ м}$, дистанция $X_R = 42 \text{ м}$, значения курсовых углов $\Psi_w = \Psi_L = 0 \text{ рад}$, скоростей $V_w = V_L = 150 \frac{M}{c}$. Начальные рассогласования по дистанции и интервалу отсутствуют $\Delta X_0 = \Delta Y_0 = 0$. В процессе движения ведущий БЛА совершает однократный маневр с изменением курсового угла и скорости. На рис. 6 приведены зависимости, отражающие обработку системой управления ведомого БЛА рассогласований по параметрам строя (интервалу и дистанции), скорости и курсовому углу, возникших в результате маневра, предпринятого ведущим БЛА. Видим, что система управления ведомого БЛА на основе ПИ-регуляторов обеспечивает возврат к заданной конфигурации строя в течение 26 с.

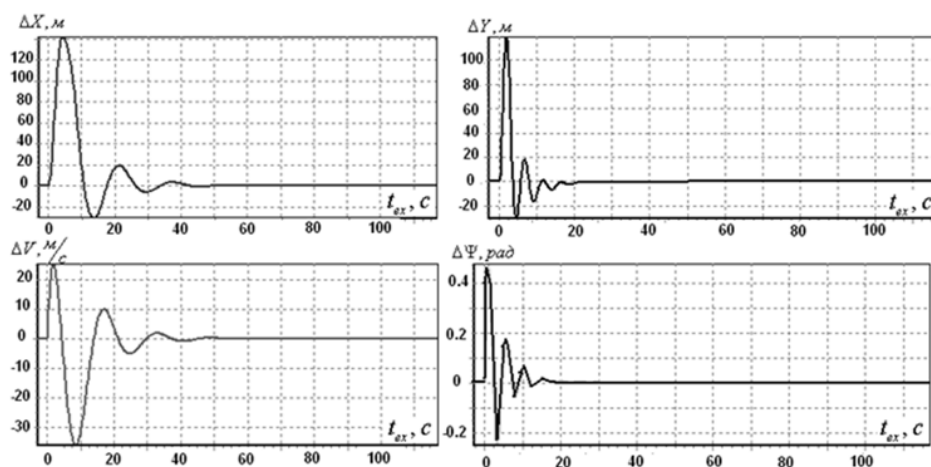


Рис. 6. Качество процессов регулирования в каналах управления углом курса и скоростью ведомого БЛА при однократном маневре ведущего БЛА

Заключение. В докладе представлены теоретические положения и описаны алгоритмы, необходимые для решения прикладных задач анализа и синтеза управления группами БЛА. На основе анализа целевых задач, составляющих область приоритетного использования групп БЛА, и вариантов их информационного взаимодействия разработана архитектура распределенной системы интеллектуального управления, включающей внебортовую и бортовую компоненты. Рассмотрены примеры алгоритмов, составляющих программно-математическую основу этих компонент и результаты, иллюстрирующие их работу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Schumacher C., Chandler P., Pachter M., Pachter L.S. UAV task assignment with timing constraints, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, August, Austin, Texas, 2003, AIAA 2003-5664.
2. Schumacher C., Chandler P.R., Rasmussen S.J., Walker D. Task allocation for wide area search munitions with variable path length // Proc. of the American Control Conference, June, Denver, Colorado, 2003. – P. 3472-3477.
3. Chandler P., Pachter M., Rasmussen S.J., Schumacher C. Distributed control for multiple UAVs with strongly coupled tasks, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, August, Austin, Texas, 2003, AIAA 2003-5799.
4. Mitchell J.W., Chandler P., Pachter M., Rasmussen S.J. Communication delays in the cooperative control of wide area search munitions via iterative network flow, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, August, Austin, Texas, 2003, AIAA 2003-5665.
5. Curtis J.W. and Murphey R. Simultaneous area search and task assignment for a team of cooperative agents, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, August, Austin, Texas, 2003, AIAA 2003-5584.
6. Turra D., Pollini L., Innocenti M. Real-time unmanned vehicles task allocation with moving targets, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, August, Providence, Rhode Island, 2004, AIAA 2004-5253.
7. Rajnarayan G. and Ghose D. Multiple agent team theoretic decision-making for searching unknown environments // Proc. IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii. – December 2003. – P. 2543-2548.
8. Rusmevichientong P. and Van Roy B. Decentralized decision-making in a large team with local information // Games and Economic Behavior. – 2003. – Vol. 43:2. – P. 266-295.

9. Jia Zeng, Xiaoke Yang, Lingyu Yang, and Gongzhang Shen. Modeling for UAV resource scheduling under mission synchronization // Journal of Systems Engineering and Electronics. – October 2010. – Vol. 21, No. 5.
10. Chanthery E., Barbier M. and Farges J.L. (2004a). Integration of mission planning and scheduling for unmanned aerial vehicles. In: ECAI'04 - Workshop on "Planning and Scheduling: Bridging Theory to Practice". Valencia, Spain.
11. Chanthery E., Barbier M. and Farges J.L. (2004b). Mission planning for autonomous aerial vehicles. In: IAV2004 - 5th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles.
12. Chanthery E. and Barbier M. Functional modules for intermixed planning and execution of an observation mission // in Proceedings of the 18th Bristol UAV Systems Conference, April 2003.
13. Chanthery E., Barbier M., and Farges J.L. Mission planning for autonomous aerial vehicles // in IAV2004 - 5th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, 2004.
14. Frank J. and Kurklu E. Sofia's choice: Scheduling observations for an airborne observatory // in Proceedings of the 13th International Conference on Automated Planning & Scheduling, 2003.
15. Lemai S. and Ingrand F. Interleaving temporal planning and execution: Ixtet-exec // in ICAPS 03 Workshop on Plan Execution, 2003.
16. Murata T. Petri nets: properties, analysis and applications // in IEEE. – No. 77 (4). – P. 541-580. DCSD ONERA. <http://www.cert.fr/dcsd/cd/procosa>.
17. Kamrani, Farzad & Lozano, Mariana Garcia & Ayani, Rasul. Path planning for UAVs using symbiotic simulation // Proceedings of the 20th annual European Simulation and Modeling Conference, ESM'2006. Toulouse, France. – October 2006. – P. 215-238.
18. Winstrand M. Mission Planning and Control of Multiple UAV's. Scientific Report № FOI-R-1382-SE Swedish Defence Research Agency, 2004.
19. Rong Zhu, Dong Sun, Zhaoying Zhou. Cooperation Strategy of Unmanned Air Vehicles for Multitarget Interception // Journal Guidance. – 2005. – Vol. 28, No. 5.
20. Sasiadek J.Z., Duleba I. 3D Local Trajectory Planner for UAV // Journal of Intelligent and Robotics System. – 2000. – Vol. 29, No 2.
21. Chandler P.R., Pachter M., Rasmussen S. UAV Cooperative Control // Proceedings of American Control Conference, Inst. Of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2001.
22. Hoff K.I., Culver T., Keyser J., Lin M.C., Manocha D. Interactive Motion Planning Using Hardware-Accelerated Computation of Generalized Voronoi Diagrams // Proceeding of the 2000 IEEE Transaction on Robotics and Automation. Vol 3, Inst. of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, 2000.
23. Guibas L.J., Knuth D.E., Sharir M. Randomized Incremental Construction of Delanay and Voronoi Diagrams // Algoritmica. – 1992. – Vol 7, No. 4.
24. Оркин Б.Д., Оркин С.Д. Имитационное моделирование боевого функционирования палубных истребителей, зенитных, ракетных и артиллерийских комплексов корабельных групп при решении задач ПВО. – М.: Изд-во МАИ, 2009. – 699 с.
25. Евдокименков В.Н., Красильщиков М.Н., Оркин С.Д. Управление смешанными группами пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в условиях единого информационно-управляющего поля. – М.: Изд-во МАИ, 2015. – 272 с.

REFERENCES

1. Schumacher C., Chandler P., Pachter M., Pachter L.S. UAV task assignment with timing constraints, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, August, Austin, Texas, 2003, AIAA 2003-5664.
2. Schumacher C., Chandler P.R., Rasmussen S.J., Walker D. Task allocation for wide area search munitions with variable path length, Proc. of the American Control Conference, June, Denver, Colorado, 2003, pp. 3472-3477.
3. Chandler P., Pachter M., Rasmussen S.J., Schumacher C. Distributed control for multiple UAVs with strongly coupled tasks, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, August, Austin, Texas, 2003, AIAA 2003-5799.
4. Mitchell J.W., Chandler P., Pachter M., Rasmussen S.J. Communication delays in the cooperative control of wide area search munitions via iterative network flow, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, August, Austin, Texas, 2003, AIAA 2003-5665.

5. Curtis J.W. and Murphey R. Simultaneous area search and task assignment for a team of cooperative agents, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, August, Austin, Texas, 2003, AIAA 2003-5584.
6. Turra D., Pollini L., Innocenti M. Real-time unmanned vehicles task allocation with moving targets, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, August, Providence, Rhode Island, 2004, AIAA 2004-5253.
7. Rajnarayan G. and Ghose D. Multiple agent team theoretic decision-making for searching unknown environments // Proc. IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii. December 2003, pp. 2543-2548.
8. Rusmevichientong P. and Van Roy B. Decentralized decision-making in a large team with local information, *Games and Economic Behavior*, 2003, Vol. 43:2, pp. 266-295.
9. Jia Zeng, Xiaoke Yang, Lingyu Yang, and Gongzhang Shen. Modeling for UAV resource scheduling under mission synchronization, *Journal of Systems Engineering and Electronics*, October 2010, Vol. 21, No. 5.
10. Chantry E., Barbier M. and Farges J.L. (2004a). Integration of mission planning and scheduling for unmanned aerial vehicles. In: ECAI'04 - Workshop on "Planning and Scheduling: Bridging Theory to Practice". Valencia, Spain.
11. Chantry E., Barbier M. and Farges J.L. (2004b). Mission planning for autonomous aerial vehicles. In: IAV2004 - 5th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles.
12. Chantry E. and Barbier M. Functional modules for intermixed planning and execution of an observation mission // in Proceedings of the 18th Bristol UAV Systems Conference, April 2003.
13. Chantry E., Barbier M., and Farges J.L. Mission planning for autonomous aerial vehicles // in IAV2004 - 5th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, 2004.
14. Frank J. and Kurklu E. Sofia's choice: Scheduling observations for an airborne observatory // in Proceedings of the 13th International Conference on Automated Planning & Scheduling, 2003.
15. Lemai S. and Ingrand F. Interleaving temporal planning and execution: Ixtet-exec, in *ICAPS 03 Workshop on Plan Execution*, 2003.
16. Murata T. Petri nets: properties, analysis and applications, in *IEEE*, No. 77 (4), pp. 541-580. DCSD ONERA. Available at: <http://www.cert.fr/dcsd/cd/procosa>.
17. Kamrani, Farzad & Lozano, Marianela Garcia & Ayani, Rassul. Path planning for UAVs using symbiotic simulation, *Proceedings of the 20th annual European Simulation and Modeling Conference, ESM'2006. Toulouse, France*. October 2006, pp. 215-238.
18. Winstrand M. Mission Planning and Control of Multiple UAV's. Scientific Report № FOI-R-1382-SE Swedish Defence Research Agency, 2004.
19. Rong Zhu, Dong Sun, Zhaoying Zhou. Cooperation Strategy of Unmanned Air Vehicles for Multitarget Interception, *Journal Guidance*, 2005, Vol. 28, No. 5.
20. Sasiadek J.Z., Duleba I. 3D Local Trajectory Planner for UAV, *Journal of Intelligent and Robotics System*, 2000, Vol. 29, No 2.
21. Chandler P.R., Pachter M., Rasmussen S. UAV Cooperative Control, *Proceedings of American Control Conference, Inst. Of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2001*.
22. Hoff K.I., Culver T., Keyser J., Lin M.C., Manocha D. Interactive Motion Planning Using Hardware-Accelerated Computation of Generalized Voronoi Diagrams, *Proceeding of the 2000 IEEE Transaction on Robotics and Automation. Vol 3, Inst. of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, 2000*.
23. Guibas L.J., Knuth D.E., Sharir M. Randomized Incremental Construction of Delaney and Voronoi Diagrams, *Algoritmica*, 1992, Vol 7, No. 4.
24. Orkin B.D., Orkin S.D. Imitatsionnoe modelirovanie boevogo funktsionirovaniya palubnykh istrebiteley, zenitnykh, raketnykh i artilleriyskikh kompleksov korabel'nykh grupp pri reshenii zadach PVO [Simulation military operation PA-Lubna fighters, anti-aircraft, missile and artillery systems of the ship groups at the decision of tasks of air defense]. Moscow: Izd-vo MAI, 2009, 699 p.
25. Evdokimenkov V.N., Krasil'shchikov M.N., Orkin S.D. Upravlenie smeshannymi gruppami pilotiruemykh i bespilotnykh letatel'nykh apparatov v usloviyakh edinogo informatsi-onno-upravlyayushchego polya [Management of mixed teams of manned and unmanned aircraft in a single information and control fields]. Moscow: Izd-vo MAI, 2015, 272 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Малышев.

Евдокименков Вениамин Николаевич – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: evn@netland.ru; 125993, Москва, ул. Волоколамское шоссе, 4; тел.: +79165054349; кафедра информационно-управляющих комплексов летательных аппаратов; д.т.н.; профессор.

Красильщиков Михаил Наумович – e-mail: mnkr@mail.ru; тел.: 89161606906; зав. кафедрой информационно-управляющих комплексов летательных аппаратов; д.т.н.; профессор.

Себряков Герман Георгиевич – ФГУП Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем; e-mail: sebr@gosniias.ru; Москва, ул. Викторенко, 81; тел.: +74991575097; начальник отделения, чл.-корр. РАН; профессор.

Evdokimenkov Veniamin Nikolaevich – Moscow Aviation Institute (national research university); e-mail: evn@netland.ru; 4, Volokolamskoe shosse street, Moscow, 125993, Russia; phone: +79165054349; the department of Information & Control Complexes; dr. of eng. sc.; professor.

Krasilshchikov Mikhail Naumovich – e-mail: mnkr@mail.ru; phone: +79161606906; head of department of information & control complexes; dr. of eng. sc.; professor.

Sebrjakov German Georgievich – State Research Institute of Airborne system; e-mail: sebr@gosniias.ru; 81, Viktorenko street, Moscow, Russia; phone: +74991575097; head of department; professor.