

УДК 623.74

Распределенная сетецентрическая система управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов

Халимов Н. Р., Мефедов А. В.

Постановка задачи. Одним из перспективных направлений развития военной авиации, которое бы значительно повысило эффективность ударных авиационных комплексов, является создание комплексов с беспилотными летательными аппаратами и развитие тактики их применения. Анализ военных конфликтов последних десятилетий показывает значительное повышение роли беспилотной авиации, как при решении задач обеспечения других видов и родов войск, так и при решении разведывательных, ударных и специальных задач. На современном этапе развития военной беспилотной авиации идут работы по созданию новых ударных беспилотных летательных аппаратов, способных решать задачи в составе группы. В связи с этим актуально решение задачи по обоснованию структуры распределённой системы управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов и разработке алгоритмов ее функционирования, позволяющих повысить эффективность группового применения ударных беспилотных летательных аппаратов путем координации их совместных действий в автономном режиме. **Целью работы** является обоснование структуры распределённой системы управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов и разработка алгоритмов координации их взаимодействия для максимизации целевого показателя на мере атаки нескольких не одинаково важных целей в автономном режиме. **Используемые методы.** При обосновании структуры распределенной системы управления группой беспилотных летательных аппаратов и разработке алгоритма координации их взаимодействия использовались методы системного анализа. Для синтеза показателя эффективности координированных действий беспилотных летательных аппаратов использовались метод анализа иерархий и методы линейного программирования, а для оценки эффективности алгоритма координации действий беспилотных летательных аппаратов в различных ситуациях – метод имитационного моделирования. **Новизна.** Элементами новизны является развитие теории функционирования системы управления группой беспилотных летательных аппаратов, позволяющей организовывать их координированные действия в автономном режиме на основе теории мультиагентных систем, а также разработан новый интегральный показатель качества оценки групповых действий беспилотных летательных аппаратов. **Результат.** Использование представленной распределённой сетецентрической системы управления группой беспилотных летательных аппаратов позволяет повысить эффективность групповой атаки ударными беспилотными летательными аппаратами до 23%, средний выигрыш составил 16%. **Практическая значимость.** Предлагаемая авторами распределенная сетецентрическая система управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов и алгоритмы ее функционирования могут быть использованы разработчиками беспилотных летательных аппаратов при проектировании новых образцов авиационной техники.

Ключевые слова: система управления; распределенная система управления; мультиагентная система; беспилотный летательный аппарат; целераспределение; групповые действия; координированная атака.

Библиографическая ссылка на статью:

Халимов Н. Р., Мефедов А. В. Распределенная сетецентрическая система управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 1-13. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10301.

Reference for citation:

Halimov N. R., Mefedov A. V. The distributed network-centric control system of an attacking unmanned aerial vehicles group. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 3, pp. 1-13. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10301 (in Russian).

Актуальность

Анализ последних войн и локальных конфликтов показывает возрастающую роль беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Следует подчеркнуть, что групповое применение БПЛА обеспечивает существенные преимущества по сравнению с одиночным применением, вместе с тем в значительной мере усложняет процедуру коллективного управления и требуемого информационного обеспечения.

Сложность группового применения БПЛА обуславливают следующие факторы [1-3]:

- 1) появление еще одного более высокого иерархического уровня управления, обеспечивающего реализацию целевого назначения группы;
- 2) сложность управления информационными потоками внутри группы;
- 3) сложность формулирования коллективного интереса, который должны реализовать системы управления и информационного обеспечения каждого участника группы;
- 4) сложность организации координированных взаимодействий.

Как показывает практика, одним из наиболее эффективных способов противодействия БПЛА является радиоэлектронная борьба (РЭБ). Системы и средства радиоэлектронной борьбы подавляют в первую очередь каналы управления БПЛА и передачи данных, а также создают помехи системам навигации, что в конечном итоге приводит к срыву выполнения полетного задания группой БПЛА, а в некоторых случаях захвату управления и принудительной посадке отдельных из них.

В работах Вербы В.С., Меркулова В.И. [1, 2, 4], Евдокименкова В.Н., Красильщикова М.Н., Себрякова Г.Г. [5] анализируются и предлагаются современные подходы к построению распределённых систем управления группами БПЛА. Однако в данных работах не достаточно внимания уделено вопросам целераспределения группы БПЛА в автономном режиме в случае использования распределённой сетцентрической системы управления группой БПЛА при координированной атаке нескольких стационарных объектов противника в автономном режиме.

Из вышеизложенного следует, что для сохранения высокой эффективности группового применения БПЛА необходимо применять децентрализованную систему управления, способную функционировать в автономном режиме. Кроме того, для координации совместных действий группы (групп) БПЛА такая система управления должна иметь еще и самоорганизующуюся структуру, способную адаптироваться к любой обстановке. Поэтому работа по созданию новых и совершенствованию существующих систем управления групповыми действиями БПЛА является актуальной научной задачей.

Для создания децентрализованной системы управления группой БПЛА предлагается использовать методы и теорию распределенных мультиагентных систем.

Постановка задачи

Обосновать структуру распределённой системы управления (PCY) группой ударных БПЛА и разработать алгоритмы ее функционирования, позволяющие повысить эффективность группового применения ударных БПЛА путем координации их совместных действий в автономном режиме.

Сетецентрическая система управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов в автономном режиме

Рассмотрим системы группового управления БПЛА, предлагаемые для достижения общих целей [2, 3]:

- 1) централизованное управление, при котором все команды, передаваемые на БПЛА, формируются на пункте управления (ПУ);
- 2) децентрализованное управление (сетецентрическая система управления), при котором индивидуальные команды для каждого БПЛА формируются внутри группы, обеспечивая достижение общей цели;
- 3) управление с лидером, при котором на ПУ формируются команды управления отдельными объектами (лидерами), каждый из которых, в свою очередь, управляет несколькими подчиненными БПЛА.

При этом одним из самых эффективных является коллективное управление в составе сетецентрической системы управления [2, 4]. При таком способе построения системы выполнение спланированных действий в процессе решения общей целевой установки возлагается на бортовые системы управления (БСУ), которые наряду с оператором с помощью коммуникационной системы объединяются в единую информационно-вычислительную сеть (рис. 1).

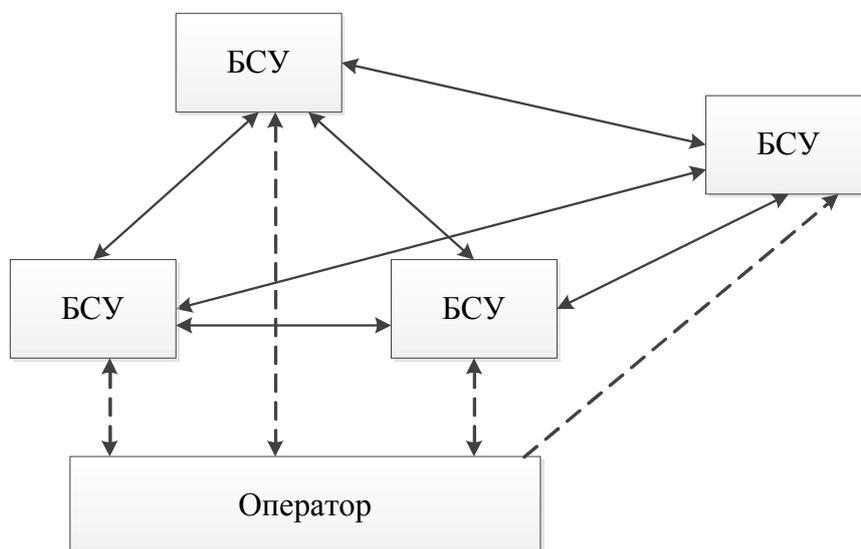


Рис. 1. Схема сетецентрической системы управления группой БПЛА [2, 4]

Воздействия оператора, отображенные на рис. 1 пунктирными линиями, сводятся к постановке целевой задачи для группы и контролю за ходом ее выполнения. Процессы обмена информацией между БСУ о состоянии каждого участника сети иллюстрируются сплошными линиями.

Преимущества сетевидрической системы по сравнению с другими способами реализации совместных действий [2, 4]:

- 1) решение задачи планирования и управления групповыми действиями всех БПЛА может осуществляться последовательно по времени БСУ всех элементов группы;
- 2) высокая живучесть группы БПЛА, так как функции вышедших из строя участников могут быть оперативно перераспределены между оставшимися исправными элементами.

Основным принципом сетевидризма является возможность для любого элемента получать информацию от любого другого участника группы [2-5]. Следует также отметить, что теоретические и прикладные вопросы организации управления в таких системах разработаны недостаточно, в том числе и потому, что отсутствуют алгоритмы, реализующие автономный режим группового управления в процессе решения общей задачи [4-6]. В связи с этим общим недостатком вышеизложенных систем управления группой БПЛА является наличие каналов управления и передачи данных с ПУ. Указанный недостаток при действиях группы БПЛА над территорией противника (при преодолении зоны противовоздушной обороны (ПВО), действиях в зоне оперативной глубины противника) обуславливается следующим:

- 1) каналы управления и передачи данных группы БПЛА могут быть легко обнаружены, подавлены или перехвачены средствами радиотехнической разведки (РТР) и РЭБ противника;
- 2) при обнаружении сигналов управления и передачи данных все огневые средства противника приводятся в повышенную степень боевой готовности, что может привести к полному уничтожению группы БПЛА.

Известен недавний опыт применения террористами в Сирийской арабской республике (САР) группы из тринадцати самодельных малоразмерных ударных БПЛА, несущих на борту авиационные средства поражения (АСП). Десять БПЛА приближались к авиабазе Хмеймим и еще три БПЛА к пункту материально-технического обеспечения Военно-морского флота (ВМФ) России в Тартусе. В результате было перехвачено управление шестью БПЛА боевиков. Из них три были посажены на подконтрольную территорию вне базы, другие три взорвались после столкновения с землей. Оставшиеся семь БПЛА были сбиты зенитным ракетно-пушечным комплексом «Панцирь-С1» [7].

В связи с вышеизложенными существенными недостатками имеющихся систем группового управления, на основе сетевидрической, предлагается распределённая система управления группой ударных БПЛА, отличающаяся тем, что управление групповыми действиями ударных БПЛА осуществляется в автономном режиме, что позволяет обеспечить скрытность, минимизировать потери со стороны группы ударных БПЛА, максимизировать наносимый ущерб противнику и повысить эффективность атаки группой ударных БПЛА в целом (рис. 2).

Структура функционирования аппаратуры ударных БПЛА с РСУ при координации совместных действий приведена на рис. 3.

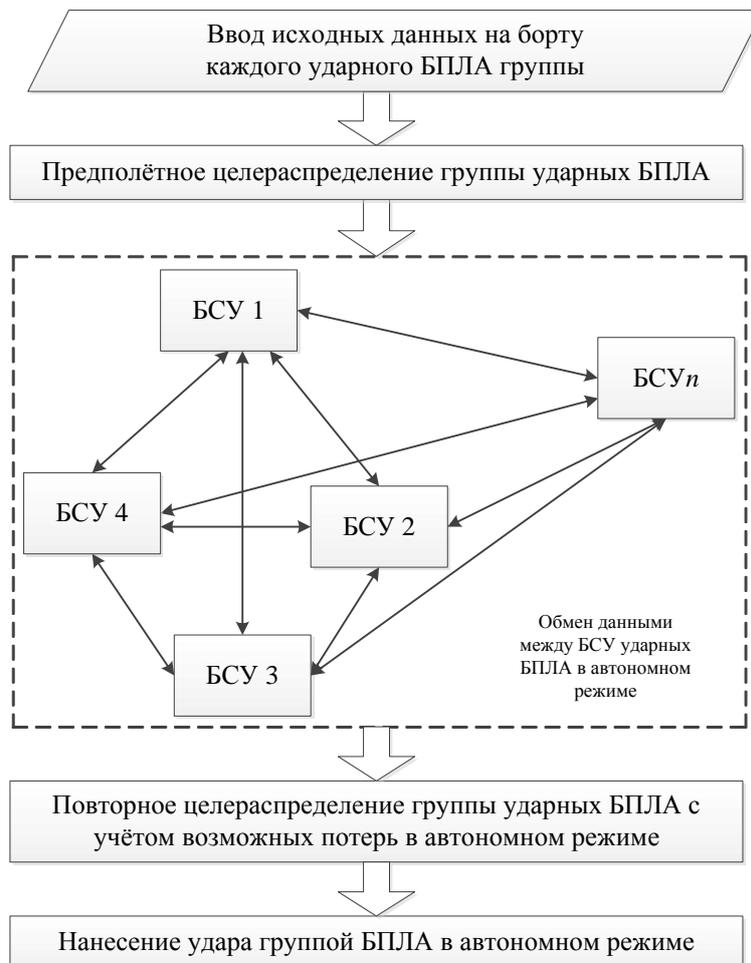


Рис. 2. Схема РСУ группой ударных БПЛА при координированной атаке стационарных разнородных объектов противника

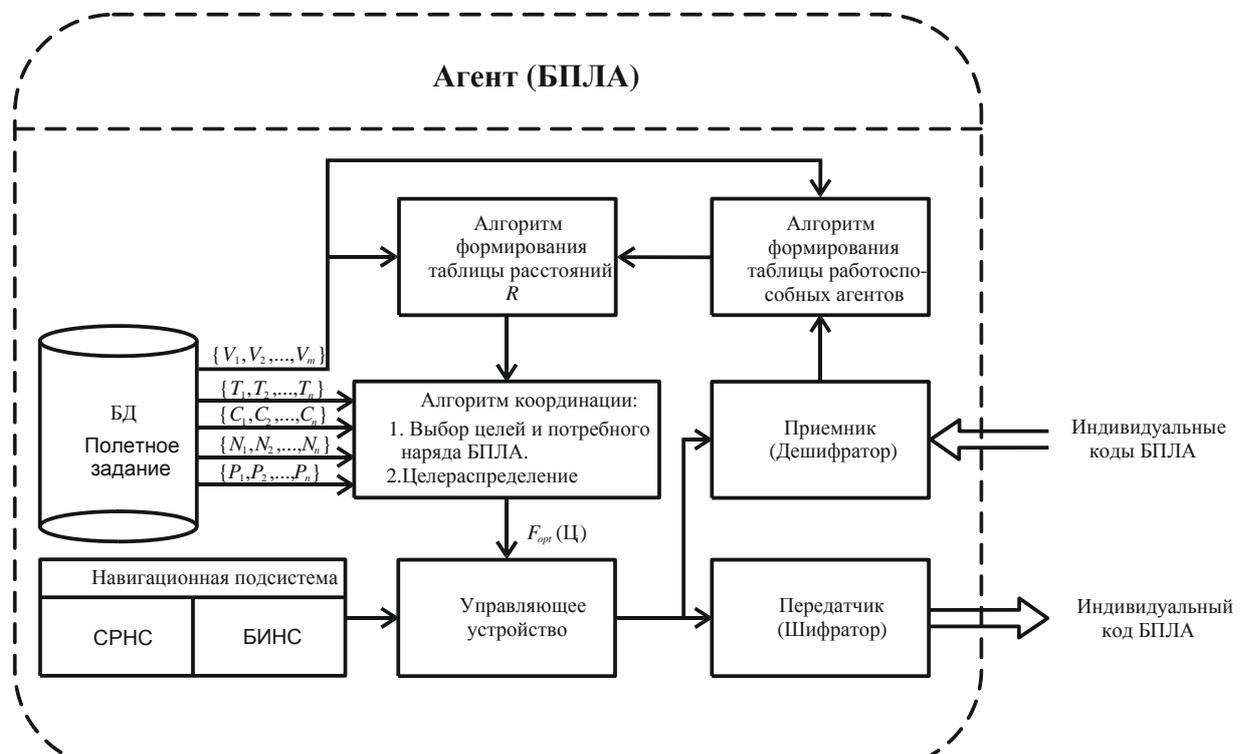


Рис. 3. Структура функционирования аппаратуры ударных БПЛА при координации совместных действий с РСУ

Распределенную систему управления группой БПЛА можно описать как набор $S = \{V, \{P_{i,j}\}\}$, где V – множество БПЛА, P – предикаты, а индекс i обозначает арность отношения (или количество мест предиката), а индекс j дает возможность различать отношения одной и той же арности [8].

При предполётной подготовке в базу данных (БД) каждого БПЛА вводятся координаты всех атакуемых объектов $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$, предварительно полученные экспертами оценки коэффициентов их важности $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, значения потребных нарядов ударных БПЛА на каждый атакуемый объект $\{N_1, N_2, \dots, N_n\}$, координаты промежуточных пунктов маршрута (ППМ), множество БПЛА группы со своими идентификационными номерами $\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ и полная таблица первичного целераспределения в которой каждому БПЛА группы с индивидуальным кодом V_j задана T_i цель (полётное задание).

В простейшем случае полет группы БПЛА в автономном режиме можно обеспечить, используя навигационную подсистему, состоящую из спутниковой радионавигационной системы (СРНС) и бесплатформенной инерциальной системы наведения (БИНС) в сомкнутых порядках. Для избегания столкновений БПЛА в группе можно определить безопасные интервалы, дистанции и высоты полета, которые вычисляются по максимальным ошибкам БИНС на заданном пути, и выставить их при начальном сборе группы под управлением операторов.

После преодоления группой ударных БПЛА активной зоны ПВО противника в автономном режиме, в определённый момент времени БСУ каждого ударного БПЛА излучают свою и осуществляют приём от других БСУ группы коротких кодовых посылок с идентификационным номером и текущими координатами. Для обеспечения одновременного момента излучения идентификационных номеров необходимо синхронизировать бортовые часы всех БПЛА группы и задать требуемое время.

После приема и дешифрования сигналов идентификационных номеров на борту каждого БПЛА в РСУ будет содержаться информация о работоспособных и не сбитых БПЛА группы (предикат работоспособности) и их текущие координаты (предикат местоположения). На основе имеющихся данных о координатах атакуемых объектов противника и работоспособных БПЛА, в БСУ каждого ударного БПЛА определяются расстояния (дальности) от каждого ударного БПЛА до каждого атакуемого объекта противника.

С учетом введенных данных о коэффициентах важности всех атакуемых объектов $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, потребных нарядах ударных БПЛА на каждый атакуемый объект $\{N_1, N_2, \dots, N_n\}$ и имеющейся информации о дальностях до них, в БСУ каждого ударного БПЛА группы осуществляется процесс повторного целераспределения оставшихся после преодоления зоны ПВО ударных БПЛА. Поскольку БСУ каждого БПЛА решает задачу повторного целераспределения с одинаковыми исходными данными и по единому алгоритму, учитывающему только работоспособные БПЛА, то это решение будет одинаковым на всех бортах. Отсюда следует, что при такой распределенной системе управления боль-

ше не требуется передачи никаких дополнительных команд, что обеспечивает автономность работы группы, а БПЛА группы самоорганизуются в соответствии с решением повторного целераспределения.

Таким образом, рассмотренный подход позволяет группе ударных БПЛА нанести максимально возможный ущерб атакуемым объектам противника без участия операторов. Ниже рассмотрим более подробно алгоритм повторного целераспределения группы ударных БПЛА.

Повторное целераспределение группы ударных БПЛА в автономном режиме предлагается осуществлять по следующему алгоритму [9].

Вероятность успешной атаки группой ударных БПЛА напрямую зависит от вероятности преодоления ПВО противника, которая в свою очередь обратно пропорциональна времени полета ударных БПЛА до объектов атаки. Поэтому при целераспределении ударных БПЛА предлагается использовать матрицу расстояний от каждого оставшегося после преодоления ПВО ударного БПЛА до каждого объекта атаки на основе информации о потребных нарядах N_m ударных БПЛА на каждый атакуемый объект противника и дальностях до них. В результате в РСУ группы ударных БПЛА формируется матрица R размером $m \times n$, где m – количество ударных БПЛА в группе, а n – количество атакуемых объектов противника. Расстояния r_{ij} от каждого j -го ударного БПЛА до каждого i -го атакуемого объекта противника указываются на пересечении строк и столбцов данной матрицы. Также при целераспределении группы ударных БПЛА учитывается количество ударных БПЛА в группе:

$$\begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{ij} & \dots & r_{ij} \end{pmatrix} \begin{matrix} N_{m1} \\ \vdots \\ N_m \end{matrix}, \quad (1)$$

$$n_1 \quad \dots \quad n$$

где $r_{11} \dots r_{ij}$ – матрица расстояний; $N_{m1} \dots N_m$ – потребные наряды ударных БПЛА; $n_1 \dots n$ – атакуемые объекты.

Решение задачи целераспределения осуществляется наиболее быстродействующим методом линейного программирования, в частности Венгерским методом. В общем случае задача целераспределения ударных БПЛА может быть решена на основе анализа матрицы размерностью $n \times m$:

$$\begin{bmatrix} W_{11} & W_{11} & \dots & W_{1m} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{n1} & W_{n2} & \dots & W_{nm} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $W_{11} \dots W_{nm}$ – вероятности боевого успеха каждого ударного БПЛА при атаке каждой цели. Задача целераспределения является оптимизационной задачей [9], которую традиционные алгоритмы решают с заметными временными задержками из-за большого количества итераций. В связи с этим необходимо отметить, что в качестве элементов матрицы (2) могут быть выбраны другие по-

казатели эффективности и другие критерии оптимизации решения задачи целераспределения в зависимости от постановки боевой задачи, соотношения числа ударных БПЛА и целей, типа целей, используемых АСП и т.д. Таким образом, решение задачи целераспределения можно представить в виде коэффициентов инцидентной матрицы [9]:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

при этом $x_{ij} = 1$, если j -му БПЛА назначается для атаки i -я цель, в остальных случаях $x_{ij} = 0$, причем одному БПЛА не может быть назначено больше одной цели, то есть:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j \in [1, m]. \quad (4)$$

В общем случае, число матриц (решений целераспределения) со всеми возможными комбинациями пар БПЛА-цель равно $\max\{n, m\}!$. При этом решающий функционал для каждой возможной k -й комбинации пар $D(k)$ будет иметь вид:

$$F_{\{D(k):x_{ij} \in \{0,1\}\}} = \sum_{i=1}^n C_i \prod_j^m (1 - P_{ij})^{x_{ij}}, \quad (5)$$

где C_i – коэффициент, характеризующий важность цели, P_{ij} – вероятность того, что j -й БПЛА уничтожит i -ю цель.

В этом случае задача целераспределения решается путем нахождения максимума из ряда решающих функционалов:

$$R = \max_{\{D(k)\}} \{ F \}. \quad (6)$$

Таким образом, задача целераспределения сводится к нахождению матрицы (2), расчета решающих функционалов (5), определению наилучшей комбинации по правилу (6), а значит и соответствующей матрицы решений (3) [10].

В результате формируется матрица целераспределения D :

$$D = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где единица на пересечении i -й строки и j -го столбца означает назначение j -го ударного БПЛА на i -й атакуемый объект противника, ноль в противном случае.

Решение задачи на данном этапе относится к процессу предварительного (предполётного) целераспределения.

После преодоления зоны ПВО каждым ударным БПЛА группы производится формирование и передача данных о своих текущих координатах и оценка возможных потерь в предлагаемой РСУ группы ударных БПЛА в автономном режиме. Если потерь нет ($N_{nom} = 0$), то осуществляется первичное (предполёт-

ное) целераспределение, если потери есть ($N_{nom} > 0$), то осуществляется процесс повторного целераспределения ударных БПЛА в автономном режиме, который может быть реализован методом не полного перебора, путём расчёта интегрального показателя эффективности, учитывающего важность каждого i -го объекта атаки C_i и вероятность боевого успеха W_{ij} каждого j -го потребного наряда ударных БПЛА при каждом варианте возможных потерь и выбора рационального варианта целераспределения, соответствующего максимальному интегральному показателю эффективности:

$$I = \max \sum_{i=1}^N C_i W_{ij}, \quad (8)$$

где N – количество оставшихся после преодоления зоны ПВО ударных БПЛА.

После распределения группы ударных БПЛА по атакуемым стационарным разнородным объектам противника, осуществляется нанесение удара в автономном режиме.

Алгоритм целераспределения в предлагаемой РСУ группой ударных БПЛА в автономном режиме запрограммирован в среде MATLAB, проведена оценка эффективности координированной атаки группой ударных БПЛА с использованием разработанного алгоритма в предлагаемой РСУ и без его использования. Некоторые результаты исследований представлены на рис. 4-9.

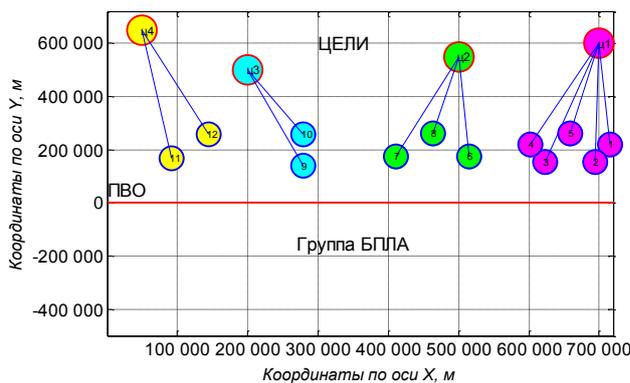


Рис. 4. Первичное целераспределение группы ударных БПЛА

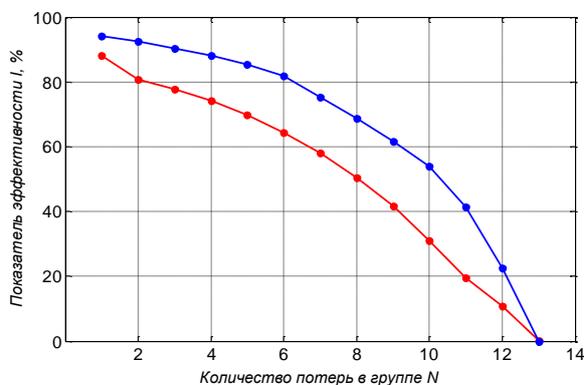


Рис. 6. Зависимость интегрального показателя эффективности (8) от количества потерь в группе БПЛА

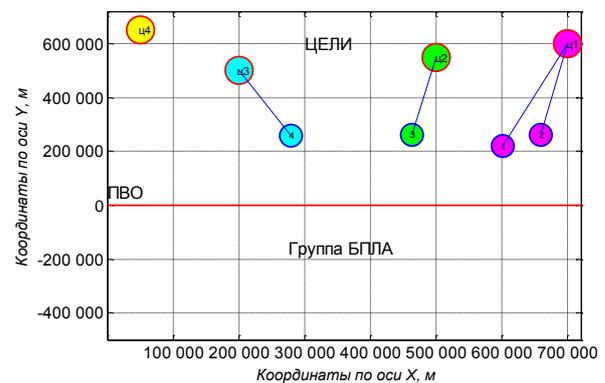


Рис. 5. Целераспределение ударных БПЛА при потерях в группе

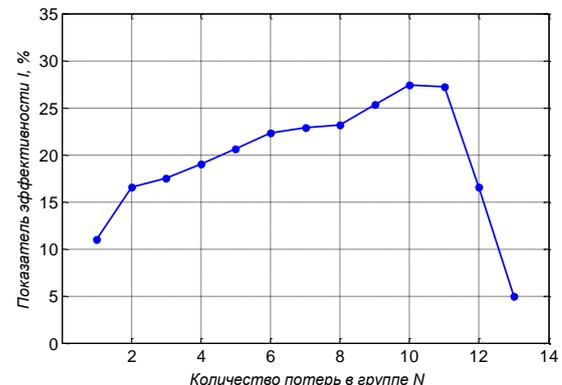


Рис. 7. Эффективность алгоритма целераспределения ударных БПЛА

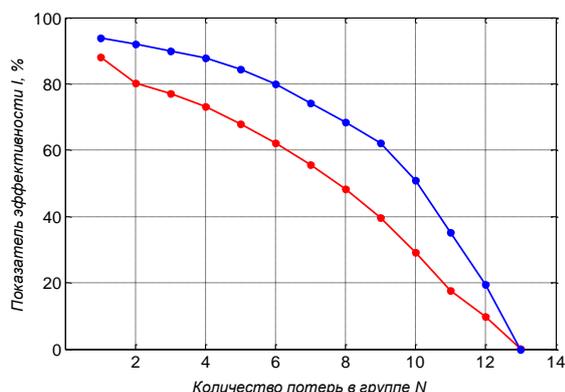


Рис. 8. Зависимость интегрального показателя эффективности (8) от количества потерь при одинаковой важности атакуемых объектов

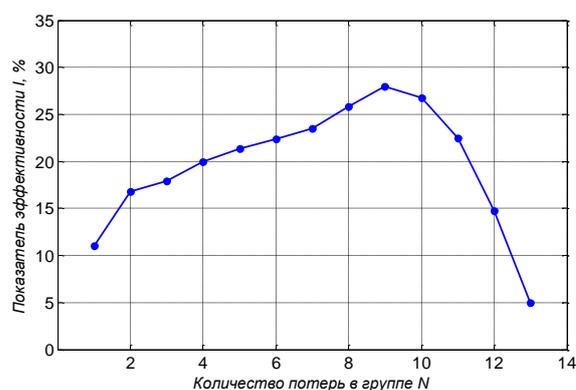


Рис. 9. Эффективность алгоритма целераспределения ударных БПЛА при одинаковой важности атакуемых объектов

Моделирование алгоритма повторного целераспределения для координации действий группы БПЛА показало, что:

- 1) разработанный алгоритм работоспособен, и существующие бортовые цифровые вычислительные машины (БЦВМ) реализуют его в масштабе времени близком к реальному;
- 2) показатель эффективности групповых действий (8), позволяет максимизировать целевой эффект с учетом важности целей;
- 3) алгоритм повторного целераспределения всегда четко выделяет наиболее важные цели и выделяет на них наряд, обеспечивающий заданную вероятность поражения;
- 4) по сравнению с вариантом первичного целераспределения, координация действий группы БПЛА позволяет максимизировать целевой эффект, особенно в ситуациях близких к 50% потерям в группе.

Выводы

В заключение на основе анализа полученных результатов можно отметить следующее:

- 1) была обоснована необходимость применения распределенной сетевой системы управления группой ударных БПЛА для обеспечения автономных действий, без участия операторов на заключительном этапе полетного задания, чего не было сделано в существующих работах;
- 2) предложенная в статье РСУ может быть использована при проектировании новых ударных БПЛА, а алгоритмы, лежащие в её основе могут быть реализованы в современных БЦВМ;
- 3) для достижения максимальной эффективности (координации) действий групп ударных БПЛА в РСУ, требуется процедура идентификации работоспособных БПЛА, заключающаяся в трансляции индивидуальных опознавательных кодов и текущих координат БПЛА в заданном интервале времени, что требует иметь на борту каждого БПЛА

- аппаратуру приема-передачи шифрованных индивидуальных кодов и предполетную синхронизацию временных систем БПЛА группы;
- 4) для оценки эффективности групповых действий предлагается использовать новый интегральный показатель (8), учитывающий важность целей и вероятности их поражений, что не использовалось в существующих работах;
 - 5) использование вторичного алгоритма целераспределения позволило улучшить эффективность действий группы ударных БПЛА по показателю (8), по сравнению с ситуацией, когда каждый БПЛА действует в соответствии с исходным полетным заданием. При этом, в рассматриваемом выше примере, максимальный выигрыш составляет 23 %, а средний – 16 %.

Литература

1. Верба В. С., Меркулов В.И. Авиационные системы радиуправления. Монография. – М.: Радиотехника, 2014. – 376 с.
2. Верба В. С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. Монография. – М.: Радиотехника, 2014. – 528 с.
3. Смирнов С. В. Анализ способов и средств управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 69-100.
4. Меркулов В. И., Миляков Д. А., Самодов И. О. Оптимизация алгоритма группового управления беспилотными летательными аппаратами в составе локальной сети // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 12 (161). С. 157-166.
5. Евдокименков В. Н., Красильщиков М. Н., Себряков Г. Г. Распределенная интеллектуальная система управления группой беспилотных летательных аппаратов: архитектура и программно-математическое обеспечение // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1 (174). С. 29-44.
6. Godwin M. F., Spry S. C., Hedrick J. K. A Distributed System for Collaboration and Control of UAV Groups: Experiments and Analysis. – Center for the Collaborative Control of Unmanned Vehicles University of California, Berkeley, 2007. – 224 p.
7. Война дронов // Информационный портал [Электронный ресурс]. 2018. – URL: https://life.ru/t/сирия/1076718/voina_dronov (дата обращения 05.05.2018).
8. Бутковский А. Г. Структурная теория распределенных систем. – М.: Наука, 1977. – 320 с.
9. Мефедов А. В. Алгоритм оптимального целераспределения автономной группы ударных беспилотных летательных аппаратов // Информация и космос. 2018. № 3. С. 167-171.
10. Broeder G. G., Ellison G. G., Emerling R. E. On Optimum Target Assignments // Operations Research. 1959. Vol. 7. P. 322-326.

References

1. Verba V. S., Merkulov V. I. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia* [Aviation radio control systems]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 376 p. (in Russian).
2. Verba V. S. *Aviatsionnye komplekсы radiolokatsionnogo dozora i navedeniia. Printsipy postroeniia, problemy razrabotki i osobennosti funktsionirovaniia* [Aviation complexes of the radar watch and guidance. Principles of construction, problems of development and features of functioning]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 528 p. (in Russian).
3. Smirnov S. V. The Analysis of Ways and Means to Control the Aircrafts from AWACS. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 69-100 (in Russian).
4. Merkulov V. I., Miliakov D. A., Samodov I. O. Optimization algorithm group control drones on a LAN. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*, 2014, vol. 161, no. 12, pp. 157-166 (in Russian).
5. Evdokimenkov V. N., Krasil'shchikov M. N., Sebriakov G. G. Distributed intellectual control system for the group of unmanned aerial vehicles: architecture and software and mathematical support. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*, 2016, vol. 174, no. 1, pp. 29-44 (in Russian).
6. Godwin M. F., Spry S. C., Hedrick J. K. *A Distributed System for Collaboration and Control of UAV Groups: Experiments and Analysis*. Center for the Collaborative Control of Unmanned Vehicles University of California, 2007. 224 p.
7. Voina dronov. [War of drones]. *Informatsionnyi portal*, 05 May 2018. Available at: https://life.ru/t/сирия/1076718/voina_dronov (accessed 05 May 2018) (in Russian).
8. Butkovskii A. G. *Strukturnaia teoriia raspredelennykh sistem* [Structural theory of distributed systems] Moscow, Nauka Publ., 1977. 320 p. (in Russian).
9. Mefedov A. V. Algorithm of optimal target assignment for an autonomous group of attack unmanned aerial vehicles. *Informatsiia i Kosmos*, 2018, no. 3, pp. 67-71 (in Russian).
10. Broeder G. G., Ellison G. G., Emerling R. E. *On Optimum Target Assignments*. *Operations Research*, 1959, vol. 7, pp. 322-326.

Статья поступила 14 июня 2019 г.

Информация об авторах

Халимов Наиль Ринатович – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры ремонта авиационной техники. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: групповое применение средств воздушного нападения. E-mail: nike-khal@mail.ru

Мefeldov Александр Викторович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адыюнкт кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования. Военный учебно-научный центр Военно-

воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: групповое применение средств воздушного нападения. E-mail: 777vvs@inbox.ru
Адрес: 394052, Россия, г. Воронеж, ул. Краснознамённая, д. 153.

The distributed network-centric control system of an attacking unmanned aerial vehicles group

N. R. Halimov, A. V. Mefedov

Problem statement. Promising areas of the development of military aviation, which would significantly increase the effectiveness of attack aircraft complexes, are unmanned aerial vehicles complexes creating and the development of tactics for their use. Recent decades military conflicts analysis shows a significant increase of the role of unmanned aviation, both in solving the tasks of providing other troops types, and in solving intelligence, attack and special tasks. At the present stage of the development of military unmanned aviation, activities are underway to create new strike unmanned aerial vehicles capable to solve tasks as part of a group. That's why, it is important to solve the problem of justifying the structure of the distributed control system for a group of drone unmanned aerial vehicles and developing algorithms for its operation. These algorithms make it possible to increase the efficiency of group use of drone unmanned aerial vehicles by coordinating their joint actions in autonomous mode. **Purpose.** Justification of the structure of the distributed control system of a group of drone unmanned aerial vehicles and the development of algorithms for coordinating their interaction to maximize the target indicator using as the example an attack of several equally important targets in the autonomous mode are aims of the paper. **Methods.** To justify the structure of the distributed control system for a group of unmanned aerial vehicles and to develop an algorithm for coordinating their interaction systems analysis methods were used. To synthesize the efficiency index of coordinated actions of unmanned aerial vehicles, the method of hierarchy analysis and linear programming methods were used. The method of simulation modeling was used to evaluate the effectiveness of the algorithm for coordinating actions of unmanned aerial vehicles in various situations. **Novelty.** The element of novelty is the development of the theory of the unmanned aerial vehicles group control system functioning, which allows to organize their coordinated actions in an autonomous mode based on the multiagent systems theory. Also a new integral indicator of the quality of assessment of group actions of unmanned aerial vehicles is developed. **Result.** The use of the distributed network-centric control system of a group of unmanned aerial vehicles allows to increase the effectiveness of a group attack by using the unmanned aerial vehicles attack up to 23%. The average gain is 16%. **Practical relevance.** The proposed distributed network-centric control system for a group of drone unmanned aerial vehicles and algorithms for its operation can be used by developers of the unmanned aerial vehicles when designing new types of aircrafts.

Key words: control system; distributed control system; multiagent system; unmanned aerial vehicle; target distribution; group activities; coordinated attack.

Information about Authors

Nail Rinatovich Halimov – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Associate Professor at the Department of aircraft repair. Military educational scientific center of «Air Force of a name of Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin» (Voronezh city). Field of research: group use of means of air attack. E-mail: nike-khal@mail.ru

Aleksandr Viktorovich Mefedov – Doctoral Student. The postgraduate student of the Department of exploitation of aircraft electronic equipment. Military educational scientific center of «Air Force of a name of Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin» (Voronezh city). Field of research: group use of means of air attack. E-mail: 777vvs@inbox.ru

Address: Russia, 394052, Voronezh, ulitsa Krasnoznamjonnaja, 153.