

6. Zubov V. I. Theorie de la Commande, Moscow, Mir, 1978 (in Russian).
7. Lurie A. I. Analytical Mechanics, Berlin, Springer-Verlag, 2002.
8. Filippov A. F. Differential Equations with Discontinuous Righthand Sides, Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1988.
9. Krasovskii N. N. Rendezvous Game Problems, JPRS Publ., 1971.
10. Pontryagin L. S. Boltyanskii V. G., Gamkrelidze R. V., Mishchenko E. F. The Mathematical Theory of Optimal Processes. New York: Interscience, 1962.

11. Park Y. Robust and optimal attitude stabilization of spacecraft with external disturbances, *Aerospace Science and Technology*, 2005, vol. 9, no. 3, pp. 253–259.
12. Ding S. H., Li S. H. Stabilization of the attitude of a rigid spacecraft with external disturbances using finite-time control techniques, *Aerospace Science and Technology*, 2009, vol. 13, no. 4–5, pp. 256–265.
13. Xia Y. Q., Zhu Z., Fu M. Y., Wang S. Attitude tracking of rigid spacecraft with bounded disturbances, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, no. 2, pp. 647–659.

УДК 004.896

DOI: 10.17587/mau.17.419-425

В. А. Нестеров, д-р техн. наук, проф., **Я. Р. Кадыров**, аспирант, yankadyrov@yandex.ru
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Управление группой беспилотных летательных аппаратов в режиме радиомолчания

Рассматривается задача нанесения максимального ущерба противнику группой беспилотных летательных аппаратов в условиях отсутствия прямого обмена информацией между ее участниками. Предложены принципы организации и метод управления группой без использования средств обмена информацией. Получена оценка групповой эффективности в случае применения предлагаемого метода.

Ключевые слова: оптимальное целераспределение, групповое управление, режим радиомолчания, виртуальная цель, групповая эффективность

Введение

Разработка алгоритмов группового применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) актуальна для дальнейшего развития военной науки и техники. На сегодняшний день вопросы применения одиночного БЛА хорошо изучены, как и меры противодействия БЛА на различных этапах боевой операции. Большое число разрабатываемых концепций группового применения БЛА для нанесения ударов по наземным целям противника говорит об актуальности и востребованности подобного направления исследований. Речь идет в первую очередь о задаче подавления средств противовоздушной обороны (ПВО) противника [1]. Групповое применение БЛА по аналогии с использованием пилотируемых ЛА целесообразно прежде всего для создания большой плотности ракетно-бомбового удара.

На рис. 1 (см. третью сторону обложки) приведено дерево поиска оптимальной конфигурации системы подавления ПВО.

В ходе анализа боевого применения БЛА выделен следующий перечень преимуществ применения БЛА по сравнению с пилотируемыми ЛА: более высокая живучесть БЛА (вследствие меньшей заметности в радиолокационном, инфракрасном, оптическом и акустическом диапазонах); большая продолжительность полета (исчисляется на сегодня уже сутками); меньшая вероятность обнаружения и поражения средствами ПВО противника; способность осуществлять контролируемый безопасный

полет на предельно малых высотах (порой недоступных для пилотируемых ЛА); возможность нахождения в высокой степени боевой (оперативной) готовности практически неограниченное время, а также существенно меньшая стоимость разработки, серийного производства и войсковой эксплуатации БЛА и подготовки операторов наземных или иных командных пунктов (КП).

В настоящее время все больше создается мобильных комплексов ПВО, трудно обнаруживаемых, неразличимых на фоне местности для систем распознавания БЛА, что, в свою очередь, предполагает решение задачи поиска. На сегодняшний день основным путем решения задачи группового поиска принято считать разработку алгоритмов децентрализованного управления, основанных на обмене информацией между участниками группы [3]. Однако современные средства радиоэлектронного противодействия (РЭП) успешно создают помехи каналам связи и управления группой и в ряде случаев сводят боевую эффективность группы БЛА к нулю. Таким образом, направление исследований в области организации групповых действий БЛА без прямого обмена информацией между участниками группы, т. е. в режиме радиомолчания, на сегодняшний день крайне актуально (радиомолчание — запрет работы радиотехнических средств на передачу в целях сокрытия от радиоразведки противника местонахождения и действий своих сил).

Современное состояние области группового управления в режиме радиомолчания

Управление децентрализованной группой в режиме радиомолчания предполагает достижение максимальной эффективности действий при условии, что участники группы не связаны друг с другом радиосвязью. Отсутствие радиосвязи, как указывает И. А. Каляев в работе [4], свойственно стайной стратегии группового управления.

Примерами стайной стратегии в природе являются кооперация муравьев для перемещения тяжелых объектов, работа пчел-строителей при создании улья, поведение стаи волков на охоте и т. п. Алгоритмы стайной стратегии основываются на теории адаптивного управления, применимы для большого числа малогабаритных роботов малого радиуса действия, степень удельного воздействия которых на цель крайне мала.

Опыт локальных войн показал целесообразность маловысотного полета группы ЛА при преодолении зоны ПВО, а также эффективность применения высокоточного оружия (ВТО) по сравнению с неуправляемыми авиационными средствами поражения (АСП). Так, из существующего ряда АСП в рассматриваемом случае наиболее целесообразно применение управляемой авиационной бомбы (УАБ), управление которой осуществляется с борта БЛА-носителя. Маловысотный полет определяет условия применения УАБ [5], а именно, непосредственную близость траектории атаки БЛА к атакуемой цели. Таким образом, при решении задачи подавления ПВО представляется эффективным использование малой группы БЛА многократного применения, оснащенных УАБ, среднего радиуса действия, большого удельного воздействия на цель. Следовательно, стайные алгоритмы принципиально не подходят для управления группой БЛА в режиме радиомолчания.

Для подавления современных комплексов ПВО группой автономных БЛА необходимо, чтобы каждый БЛА обладал высокоинтеллектуальной системой, обеспечивающей идентификацию целей, учет возможных вариантов противодействия со стороны противника, вычисление оптимального варианта группового целераспределения.

Вопросами группового управления БЛА активно занимается группа ученых индийского Аэрокосмического инженерного института. П. Б. Сужит, А. Синга, используя ряд условий и допущений в постановке задачи применительно к режиму радиомолчания, предложили использовать теорию коллективного управления при разработке алгоритма группового целераспределения [6]. Групповое управление достигнуто за счет независимых решений каждого БЛА на основе информации о целях и других участниках группы в пределах собственной зоны обнаружения. Для доказательства эффективности разработанного алгоритма групповое поведение БЛА моделировалось в виртуальной среде,

а полученные результаты сравнивались с результатами моделирования поведения группы в режиме радиосвязи. Сравнение показало, что в ряде случаев групповое управление в режиме радиомолчания может быть эффективней алгоритмов, реализованных в режиме радиосвязи.

Анализ принятых авторами допущений позволил сформулировать ряд нерешенных технических проблем, к которым относятся:

- проблема неоднозначной идентификации целей участниками группы БЛА. В общем случае вероятность распознавания зависит от времени суток, состояния атмосферы, ракурса обзора, положения цели и ее контрастности и, не в последнюю очередь, возможностей бортовой аппаратуры идентификации;
- проблема неоднозначности выбора цели для атаки. Приоритетность цели может назначаться по ряду несводимых друг к другу критериев: степени потенциальной угрозы, удобства атаки, затрат времени для атаки. Следует учитывать, что в зависимости от поставленной групповой цели боевой операции каждая цель может иметь тот или иной приоритет;
- проблема неоднородности целей. В зависимости от конфигурации цели и от состояния среды тип и число АСП, целесообразных для уничтожения цели, могут сильно различаться;
- проблема идентификации других БЛА посредством бортовых средств локации, работающих в оптическом диапазоне. Измерение координат других БЛА необходимо для реализации алгоритма целераспределения, в том числе и для предотвращения дублирования атаки несколькими БЛА одной цели и столкновений в воздухе, так как между участниками группы отсутствует обмен информацией.

Решение всех вышеобозначенных проблем управления группой БЛА в режиме радиомолчания выходит далеко за рамки данной работы. Рассмотрим задачу оптимального целераспределения с учетом динамики БЛА при следующих допущениях:

- характеристика цели (его положение и приоритетность), которая находится в зоне обнаружения нескольких БЛА, однозначно идентифицируется этими БЛА;
- БЛА идентифицирует параметры полета других БЛА в зоне обнаружения с необходимой точностью;
- БЛА полностью идентичны, в том числе по типам АСП на борту;
- один БЛА атакует в каждый момент времени одну цель;
- для уничтожения одной цели достаточно одной атаки;
- траектория полета БЛА проходит над выбранной для атаки целью;
- полет всех БЛА проходит в одной плоскости;
- полет всех БЛА проходит на постоянной скорости V на протяжении всей операции.

Таким образом, из постановки задачи следует бесполезность оснащения БЛА бортовой радиолокационной станцией (БРЛС). Задача идентификации целей решается посредством использования оптико-локационной станции (ОЛС). Для решения задачи идентификации БЛА целесообразно использовать тепловизор и лазерный дальномер того же ОЛС [7], что существенно удешевляет стоимость производства БЛА в целом.

В качестве расчетной боевой задачи рассматривается нанесение авиационного удара по групповой неоднородной рассредоточенной наземной цели, защищенной системой ПВО ближнего действия. К такой цели относится, например, рассредоточенная танковая рота, состоящая из танков, боевых машин пехоты (БМП), бронетранспортеров (БТР) и специальных автомобилей со средствами связи, управления и технического обеспечения. Система ПВО имеет в своем составе средства постановки активных радиопомех, станции радиоразведки. Огневое противодействие со стороны противника в данной работе не рассматривается.

Группу БЛА предлагается рассматривать как средство нанесения ущерба противнику за отведенный для операции ограниченный интервал времени $[t_0, t_f]$. Ущерб пропорционален приоритетности уничтоженных целей, их числу и обратно пропорционален временным затратам на проведение атаки цели. О задаче поиска оптимального решения при наличии различных несводимых друг к другу критериев оптимальности, если такого рода задачи решаются методами математического программирования, говорят как о задаче многокритериальной оптимизации. Одним из известных методов решения задач многокритериальной оптимизации является сведение многих критериев к одному путем введения экспертных весовых коэффициентов для каждого из критериев таким образом, что более важный критерий получает более высокий вес [8].

Формулирование математической задачи нанесения максимального ущерба противнику

Очевидно, что для задачи группового управления в условиях нестационарной среды в зоне боевых действий необходимо, чтобы управление было найдено за достаточно малое время δt , за которое состояние среды существенным образом не изменится. Обозначим t_1 — время, потребное для идентификации других БЛА в зоне обнаружения, t_2 — время, необходимое для нахождения оптимального решения задачи целераспределения в зоне обнаружения. Параметрами идентификации БЛА как объекта измерения являются текущие координаты и вектор скорости. Предполагается, что наземные цели, попавшие в зону обнаружения, однозначно распознаются БЛА за время, меньшее чем t_1 , зона обнаружения целей и зона обнаружения БЛА эквивалентны и равны R_{rec} , тогда время поиска оптимального управления равно $\delta t = t_1 + t_2$.

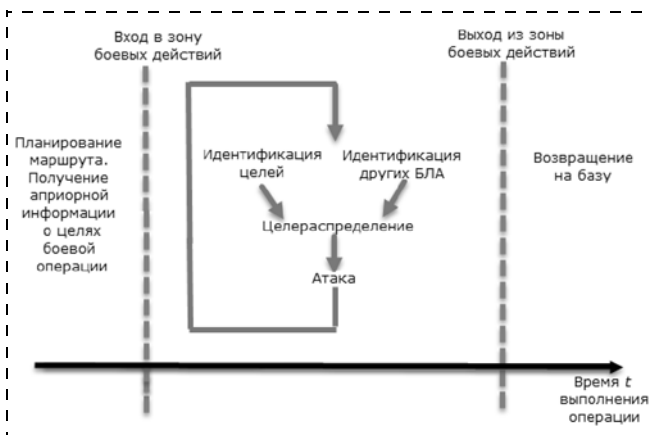


Рис. 2. Алгоритм действий БЛА в составе группы в режиме радиомолчания

На рис. 2 схематично представлена последовательность действий алгоритма БЛА при решении задачи нанесения авиаудара.

Цикл повторяется с определенным интервалом времени $\Delta t \geq \delta t + t_{упр}$, где $t_{упр}$ — время, необходимое для изменения текущей динамики БЛА. Пусть в момент времени $\hat{t} \in [t_0, t_f - \Delta t]$ в зоне обнаружения выбранного БЛА находится M членов группы, включая его самого. Тогда каждый БЛА U_j ($j \in [1, M]$) может выбирать для атаки одну цель T_l из m целей, выявленных в рассматриваемой зоне обнаружения. Критерий оптимальности, выражающий оценку нанесенного противнику группового ущерба за отведенное время, обозначим Y .

Так как нет никакого обмена информацией между участниками группы, каждый БЛА должен самостоятельно исследовать весь район предполагаемого расположения целей. Местоположение целей определяется в процессе выполнения задачи поиска. Алгоритм поиска определяет модель поведения БЛА U_j при отсутствии целей или в случае, если атака цели данным БЛА влечет за собой отказ от атаки цели БЛА U_h ($h \in [1, M]$, $h \neq j$) с более выгодным показателем эффективности атаки цели. Поиск реализуется посредством назначения для каждого БЛА из числа M координат случайной точки на карте в качестве виртуальной цели с малым приоритетом. Тогда общее число целей составляет $k = m + M$, а выбор цели T_l ($l \in [1, k]$) БЛА U_j дает приращение целевого функционала:

$$\Delta Y_{l,j} = I_{T_l} k_i - C_{l,j} k_c,$$

где I_{T_l} — приоритетность цели T_l ; $C_{l,j}$ — затраты, возникающие при атаке БЛА U_j цели T_l ; k_i , k_c — весовые коэффициенты критерия приоритетности цели и критерия временных затрат соответственно. Значения весовых коэффициентов подчиняются условию нормировки $k_i + k_c = 1$ и вычисляются на основе экспертных оценок. Далее будем рассматривать случай $k_i = k_c = 1/2$, т. е. приоритетность це-

ли так же важна, как и затрачиваемое время на ее уничтожение.

На основе экспертных оценок каждому типу цели назначена степень приоритетности в диапазоне от 0 до 1. Типы целей и их приоритетность приведены в таблице.

Типы целей и их приоритетность

Тип цели	Приоритетность
Танк	0,9
БТР	0,7
Средства связи	0,5
Автомобиль технического обеспечения	0,3
Виртуальная цель	0,2

Оценка затрат при атаке цели $C_{l,j}$ может включать как затраты времени, так и экономические затраты (расход топлива). В дальнейшем будем рассматривать отношение времени $t_{l,j}$ реализации атаки цели T_l к отведенному интервалу времени выполнения боевой операции $t_f - t_0$ в качестве безразмерной оценки затрат $C_{l,j} = \frac{t_{l,j}}{t_f - t_0}$.

Обозначим $x_{l,j}$ — принимаемое решение БЛА U_j по атаке цели T_l , которое может принимать значение либо 0 (цель T_l не выбрана) либо 1 (цель T_l выбрана). Задача, решаемая БЛА U_j , сводится к распределению целей T_l ($l \in [1, k]$) между группой БЛА из M в зоне обнаружения БЛА U_j таким образом, чтобы

$$Y = \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^k \Delta Y_{l,j} x_{l,j} \rightarrow \max,$$

при условии, что $\sum_{l=1}^k x_{l,j} = 1$ (БЛА из числа M может

выбирать только одну цель) и $\sum_{j=1}^M x_{l,j} \leq 1$ (цель может

быть выбрана только одним БЛА или не выбрана вовсе). Заметим, что выбор БЛА U_j виртуальной цели предполагает реализацию им задачи поиска.

Таким образом, задача коллективного распределения целей сводится к оптимизационной задаче, решаемой методом целочисленного линейного программирования.

Задав Земную систему координат OXY так, что ось OY сонаправлена вектору скорости V_j БЛА U_j , обозначим $J(x_j, y_j)$ — текущие координаты БЛА U_j . Так как рассматривается плоская задача, координаты цели T_l тождественны координатам проекции цели на плоскости полета $T_l(x_l, y_l)$. Время выполнения атаки цели T_l БЛА U_j может быть представ-

лено в виде функции $t_{l,j} = f(x_j, y_j; x_l, y_l; V_j)$. Атака цели сведена к задаче перемещения БЛА в координаты точки проекции цели. При постоянной скорости БЛА U_j имеет фиксированный радиус разворота R , а кратчайшую траекторию полета БЛА до цели аналогично работе [9] будем представлять в виде комбинации участков полета по прямой и на вираже. Вираще — разворот самолета с креном в горизонтальной плоскости. Далее будет рассматриваться правильный вираще, т. е. такой разворот, при выполнении которого не изменяются модуль скорости и крен и отсутствует скольжение.

Согласно работе [10] уравнения, описывающие динамику БЛА при выполнении правильного вираще по трем осям, выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} m j_x &= \frac{G}{g} \frac{dV_j}{dt} = P - Q; \\ m j_y &= 0 = Y \cos \gamma - G; \\ m j_z &= \frac{G}{g} \frac{V_j^2}{R} = Y \sin \gamma, \end{aligned} \quad (1)$$

где G — вес БЛА; P — сила тяги; Q — сила лобового сопротивления; g — ускорение свободного падения; Y — подъемная сила; γ — угол крена.

Разрешая второе уравнение системы (1) относительно G , получаем $G = Y \cos \gamma$, далее в силу определения вертикальной (нормальной) перегрузки $n_y = \frac{Y}{G}$ получаем $\cos \gamma = \frac{1}{n_y}$, т. е. чем больше допустимые значения потребной перегрузки n_y , тем больше угол крена γ и тем меньше радиус разворота R .

Продольная скорость полета на вираже остается постоянной: $P = Q$.

Радиус вираще вычисляется по формуле $R = \frac{V^2}{g \sqrt{n_y^2 - 1}}$, а время разворота на угол ϕ равно

$$t_{\text{разв}} = \frac{\phi}{360} \cdot 0,64 \cdot \frac{V}{\text{tg} \gamma}.$$

Обозначим $B(x_b, y_b)$ точку касания отрезка $[BT_l]$ с дугой окружности $[JB]$. Уравнения окружности радиуса R с центром в точке $O_1(x_{O1}, y_{O1})$, проходящей через точки $B(x_b, y_b)$ и $J(x_j, y_j)$, и уравнения прямой, проходящей через точки $B(x_b, y_b)$ и $T_l(x_l, y_l)$, составляют следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} (x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 &= R^2; \\ y &= kx + b; \\ y_l &= kx_l + b. \end{aligned} \quad (2)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} (1 + k^2)x^2 - 2(x_j + k(kx_l - y_l - y_j))x + \\ + (kx_l - y_l - y_j)^2 + x_j - R^2 = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Единственность решения квадратного уравнения (2) подразумевает условие $D = 0$. Из уравнения

$$(x_j + k(kx_l - y_l - y_j))^2 - (1 + k^2)((kx_l - y_l - y_j)^2 + x_j - R^2) = 0$$

находим k_1, k_2 . Находим значение k из следующих соображений:

если $|x_{01} - x_j| \leq |x_b - x_j|$, то $k = \max(k_1, k_2)$;

если $|x_{01} - x_j| > |x_b - x_j|$, то $k = \min(k_1, k_2)$;

далее последовательно находим

$$x_b = \frac{(x_j + k(kx_l - y_l - y_j))}{2(1 + k^2)}, b, y_b.$$

Отрезок пути $[BT_l] = \sqrt{(x_l - x_b)^2 + (y_l - y_b)^2}$. Тогда полет по отрезку пути $[BT_l]$ займет время

$t_{[BT_l]} = \frac{[BT_l]}{V_j}$, а полет по дуге окружности $[JB]$ —

время $t_{[JB]} = \frac{[JB]}{V_j}$.

Время на проведение атаки цели $t_{l,j} = t_{[JB]} + t_{[BT_l]}$.

Имитационное моделирование выполнения задачи группой БЛА в режиме радиомолчания

Было проведено имитационное моделирование ударной операции в среде MATLAB для четырех БЛА с ограниченными зонами обнаружения. Для сравнения также было проведено моделирование поведения группы БЛА, связанных между собой радиообменом. Групповое управление БЛА в режиме радиообмена реализовывалось на основе описанного выше алгоритма при условии, что каждому участнику группы БЛА доступна информация обо всех объектах, попавших в зону обнаружения БЛА группы. В каждый момент времени в рассматриваемом пространстве находятся четыре цели с различной степенью приоритетности. По мере уничтожения целей в случайном месте появляются новые цели.

На рис. 3 (см. третью сторону обложки) показан этап выполнения сценария ударной операции. Стрелками выделены векторы скорости БЛА, звездочками — цели, пунктирными окружностями красного цвета — зона обнаружения. Цветными линиями выделены траектории до обнаруженных целей, пунктирными — траектории до виртуальных целей, жирным выделены выбранные траектории до целей в соответствии с оптимальным целераспределением с учетом динамики самих БЛА, стрелками указаны направления текущих векторов скорости БЛА.

Так как группа работает в заранее неизвестной среде, управление группой БЛА реализуется в тече-

ние ближайшего отрезка времени Δt , в течение которого БЛА следует по траектории в соответствии с оптимальным планом целераспределения. По истечении времени Δt БЛА группы занимают новое положение, зона обнаружения при этом изменяется, цикл вычисления оптимального управления повторяется, по результатам чего либо принятая цель для атаки подтверждается, либо назначается новая цель.

Показателем эффективности является значение функции вида

$$Y_l = \sum_{l=1}^n I_{T_l},$$

где n — число уничтоженных целей за рассматриваемый период времени. В случае радиообмена между участниками группы решение оптимального целераспределения охватывает все цели, находящиеся в контролируемой группой БЛА области. Однако помимо увеличения объема вычислений в связи с обработкой гораздо большего объема информации, задержками связи главным недостатком стратегий управления, основывающихся на обмене информацией, является уязвимость перед РЭП. Эффективность режима радиомолчания как одного из факторов, составляющих успех боевой операции, зависит от типа ПВО противника, его возможностей по распознаванию, перехвату радиоканалов, созданию помех. Если ПВО противника не располагает средствами радиоразведки и постановщиками помех, радиомолчание — недостаток, а не преимущество. Но в случае активного РЭП преимущество применения алгоритмов управления по сути автономных БЛА очевидно.

Результаты моделирования, представленные на рис. 4, показали, что режим радиомолчания, обладая явным преимуществом в скрытности и надежности работы по сравнению с режимом радиообмена, лишь незначительно уступает ему в эффективности.

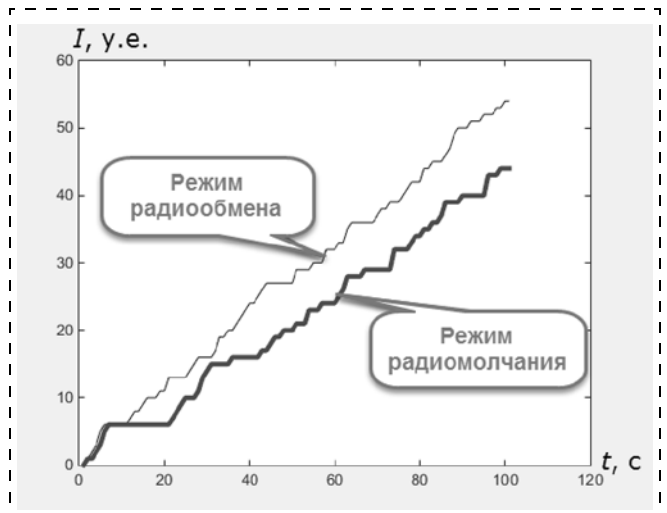


Рис. 4. Графики эффективности группы БЛА, функционирующей в режиме радиообмена и в режиме радиомолчания

Заклучение

Разработанный алгоритм позволяет решать задачу нанесения авиаудара группой БЛА, функционирующих в режиме радиомолчания.

Режим радиомолчания имеет преимущество в скрытности, автономности и надежности выполнения боевой задачи по сравнению с режимом радиобмена, незначительно уступая ему в эффективности, что подтверждено результатами моделирования.

В дальнейшем планируется рассмотреть вопросы влияния значений приоритетности виртуальных целей и их расположения на эффективность группового управления, а также исследовать способы идентификации других участников группы БЛА, необходимые для реализации предлагаемого алгоритма.

Список литературы

1. **DARPA** атакует врагов армией беспилотников // Популярная механика: интернет-журнал 2.04.2015. URL: <http://www.popmech.ru/weapon/57107-darpa-atakuet-vragov-armiy-bspilotnikov/> (дата обращения 10.09.2015).

2. **Авиация ВВС России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра** / Под ред. Е. А. Федосова. М.: Дрофа, 2005. 734 с.

3. **Min-Hyuk Kim, Hyeoncheol Baik, Seokcheon Lee.** Response Threshold Model Based UAV Search Planning and Task Allocation // *J. Intell. Robot. Syst.* — 2014. — DOI 10.1007/s 10846-013-9887-6 — Springer Science+Business Media Dordrecht 2013. № 75. P. 625—640.

4. **Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г.** Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. С. 44—45.

5. **Нестеров В. А., Куприков М. Ю., Обносов Б. В., Семенов И. М., Тихонов К. М., Трусов В. Н.** Механика авиационных робототехнических систем. М.: ИТК "Дашков и К", 2014. 464 с.

6. **Sujit P. V., Sinha A., Goes D.** Multi-UAV Task Allocation using Team Theory. Indian Institute of science, 2005.

7. **Нестеров В. А., Правидло М. Н., Обносов Б. В., Трусов В. Н.** Конструирование и проектирование установок ракетного вооружения летательных аппаратов. М.: ИТК "Дашков и К", 2014. 928 с.

8. **Обносов Б. В., Нестеров В. А., Правидло М. Н.** Теоретические основы формирования рационального облика авиационных управляемых ракет и их систем деления при создании перспективных авиационных боевых комплексов. М.: ИТК "Дашков и К", 2013. С. 78—79.

9. **Joel G. Manathara, P. V. Sujit, Randal W. Beard** Multiple UAV Coalitions for a Search and Prosecute Mission // *J Intell Robot Syst.* 2011. Springer Science+Business Media B.V. 2010. № 62. P. 125—158. DOI 10.1007/s10846-010-9439-2.

10. **Вотяков А. А., Каюнов Н. Т.** Аэродинамика и динамика полета самолета: учеб. пособие. М.: ДОСААФ, 1975. С. 238—249.

The Group Management of Unmanned Aerial Vehicles in the Radio Silence Mode

V. A. Nesterov, J. R. Kadyrov, yankadyrov@yandex.ru✉,

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation

Corresponding author: **Kadyrov Jan R.**, Postgraduate, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: yankadyrov@yandex.ru

Received on February 25, 2016

Accepted on March 04, 2016

Today due to the modern electronic countermeasures (ECM) progress for opening and interception of radio traffic channels, the group control task of unmanned aerial vehicles (UA V) in the radio silence mode is relevant as ever before. The aim of this work is to develop a UAV group control algorithm in radio silence. Group management refers to the optimization problem of actions of all group participants to achieve maximum group efficiency. In the case of lack of communication every UAV due to the onboard sensors identifies goals and other UA Vs in the detection area and operates according to its own optimum plan of target distribution, based on the available information. The optimality criterion considered as a function of two factors: the losses inflicted on the enemy when attacking the target, and the time spent to attack the target. Aviation blow to the group heterogeneous distributed ground targets is considered as subject. Fire resistance from the enemy in this work is not considered. Each target in the UAV detection area is given the value of the optimality criterion, based on the expert assessments. The search task for each UA V interpreted as goal attack virtual non-existent target, which has stochastic coordinates. For all targets and group members in the detection area, the UAV has a lot of plans of target distribution and acts in accordance with the preferred option. To estimate the effectiveness of the algorithm the simulation of shock operations in Matlab was performed for a UA V group that has been operating in the radio silence mode, and for a UAV group united by a common channel for the information exchange. The comparison of the simulation results showed the feasibility of applying the proposed algorithm.

Keywords: the optimal target distribution, group management, radio silence, group efficiency, virtual target

For citation:

Nesterov V. A., Kadyrov J. R. The Group Management of Unmanned Aerial Vehicles in the Radio Silence Mode, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 419—425.

DOI: 10.17587/mau.17.419-425

References

1. **DARPA атакует врагов армией беспилотников** (DARPA attacks enemies with armed drones), *Populjarnaja Mehanika: Internet-Maga-*

zine. 2.04.2015, available at: <http://www.popmech.ru/weapon/57107-darpa-atakuet-vragov-armiy-bspilotnikov/> (date of access 10.09.2015).

2. **Fedosov E. A.** ed. *Aviacija VVS Rossii i nauchno-tehnicheskij progress. Boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnja, zavtra* (The air forces of Russia and scientific-technical progress. Combat systems and system yesterday, today and tomorrow), Moscow, Drofa, 2005, 734 p. (in Russian).

3. **Min-Hyuk Kim, Hyeoncheol Baik, Seokcheon Lee.** Response Threshold Model Based UAV Search Planning and Task Allocation, *J. Intell. Robot Syst.*, 2014, Springer Science + Business Media Dordrecht 2013, no. 75, pp. 625—640, DOI 10.1007/s10846-013-9887-6.

4. Kaljaev I. A., Gajduk A. R., Kapustjan S. G. *Modeli i algoritmy kolektivnogo upravlenija v gruppah robotov* (Models and algorithms of collective control in groups of robots), Moscow, Fizmatlit, 2009, pp. 44–45 (in Russian).

5. Nesterov V. A., Kuprikov M. Ju., Obnosov B. V., Semenov I. M., Tihonov K. M., Trusov V. N. *Mehanika aviacionnyh robototekhnicheskijh sistem* (Mechanics aviation robotic systems), Manual, Moscow, Publishing House "Dashkov & K'", 2014, 464 p. (in Russian).

6. Sujit P. B., Sinha A., Goes D. *Multi-UAV Task Allocation using Team Theory*, Indian Institute of science, 2005.

7. Nesterov V. A., Pravidlo M. N., Obnosov B. V., Trusov V. N. *Konstruirovanie i proektirovanie ustanovok raketnogo vooruzhenija letatel'nyh apparatov* (The construction and design of rocket armament of aircrafts), Manual, Moscow, Publishing House "Dashkov & K'", 2014, 928 p. (in Russian).

8. Obnosov B. V., Nesterov V. A., Pravidlo M. N. *Teoreticheskie osnovy formirovanija racional'nogo oblika aviacionnyh upravljaemyh raket i ih sistem otdelenija pri sozdanii perspektivnyh aviacionnyh boevyh kompleksov* (The theoretical basis for the formation of a reasonable appearance of aircraft guided missiles and their systems department in the creation of advanced aviation weapons systems), Moscow, Publishing House "Dashkov & K'". 2013, pp. 78–79 (in Russian).

9. Joel G. Manathara, P. B. Sujit, Randal W. Beard Multiple UAV Coalitions for a Search and Prosecute Mission, *J. Intell. Robot Syst.*, 2011, Springer Science+Business Media B. V., 2010, no. 62, pp. 125–158, DOI 10.1007/s10846-010-9439-2.

10. Votjakov A. A., Kajunov N. T. *Ajerodinamika i dinamika poleta samoleta* (Aerodynamics and flight dynamics of aircraft), tutorial, Moscow, "DOSAAF", 1975, pp. 238–249 (in Russian).

УДК 533.65.013.622

DOI: 10.17587/mau.17.425-432

С. З. Свердлов, канд. техн. наук, доц., проф., c3c@uni-vologda.ac.ru,
Вологодский государственный университет

Скороподъемность электрического мультикоптера

Получена зависимость скорости вертикального подъема электрического многороторного вертолета от высоты с учетом тяговооруженности, характеристики электродвигателя и силы лобового сопротивления. Получена формула для потолка висения. Приведены аппроксимированные аэродинамические характеристики пропеллеров, используемых в мультикоптерах. Предложен метод расчета скороподъемности и потолка висения при изменении напряжения питания.

Ключевые слова: беспилотный многороторный электрический вертолет, мультикоптер, скороподъемность, потолок висения, тяговооруженность, бесколлекторный электромотор

Целью исследования является изучение зависимости скорости вертикального подъема электрического многороторного вертолета (мультикоптера) от высоты. Скорость подъема вычисляется при работе электропривода летательного аппарата (ЛА) при 100 % газа. Определяются скороподъемность у поверхности Земли и потолок висения.

Принимаются во внимание следующие обстоятельства:

1. На мультикоптере используются электрические бесколлекторные (вентильные) электродвигатели, работа которых (но не работа винтомоторной группы) не зависит от плотности воздуха и высоты.

2. Используются несущие винты (пропеллеры) фиксированной геометрии.

3. Масса ЛА в течение полета остается неизменной.

4. Напряжение (ЭДС) аккумуляторной батареи снижается по мере расходования ее заряда.

5. Если не рассматривать момент старта, силы инерции не играют существенной роли при вертикальном полете ЛА рассматриваемого класса при 100 % газа. Как показывает расчет, ускорение (замедление) в этом случае не превышает $0,05 \text{ м/с}^2$, т. е. $0,5 \%$ ускорения свободного падения.

6. Уменьшением веса ЛА (ускорения свободного падения) с высотой можно пренебречь. На высоте 10 км это уменьшение составляет лишь $0,3 \%$.

Тяговооруженность мультикоптера

Ключевым фактором, определяющим скорость вертикального полета, является тяговооруженность — отношение максимальной тяги к весу мультикоптера у поверхности Земли:

$$k_T = \frac{T_{\max}}{G}, \quad (1)$$

где k_T — коэффициент запаса тяги (тяговооруженность); T_{\max} — максимальная тяга; G — вес летательного аппарата. Характерные значения тяговооруженности мультикоптеров $1,2 \dots 2,5$.

Запас тяги существующего мультикоптера может быть определен экспериментально измерением тяги ЛА или отдельной винтомоторной группы. Для расчета тяговооруженности при проектировании нового ЛА нужно знать параметры электромотора, определяющие его механическую характеристику (зависимость угловой скорости от крутящего момента), и аэродинамические коэффициенты пропеллера. Производители бесколлекторных моторов публикуют данные испытаний двигателей с различными пропеллерами, в которых присутствуют сведения о тяге и оборотах двигателя при 100 % газа, позволяющие определить тяговооруженность.

Будем считать, что значение тяги $T_{\max} = T_{100}$ и частота вращения мотора n_{100} (об/с) при 100 % газа известны.