

сит от требуемой точности системы и ее быстродействия, от параметров среды, таких как наличие ориентиров, их количество и физические характеристики и от многих других факторов. В последние годы все большее распространение получает алгоритм FastSlam и постепенно вытесняет расширенный фильтр Калмана. В настоящей работе были исследованы оба подхода, проведены модельные эксперименты и сделаны соответствующие выводы. Для дальнейших, более углубленных, исследований выбран алгоритм FastSlam, и в настоящее время производятся работы по проведению натурных экспериментов, разрабатываются подходы к созданию многоагентных систем на основе алгоритма FastSlam.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Александрова Р.И. и др. Универсальная бортовая система управления для автономных мобильных объектов ВВТ // Материалы III научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Т. 1. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008.
2. Романов М.П., Гарцеев И.Б. Интеллектуальная система навигации для малоразмерных подвижных объектов ВВТ // Материалы III научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Т. 2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008.
3. Castellanos J.A., Neira J., Tardos J.D. Limits to the consistency of the EKF-based SLAM. In Intelligent Autonomous Vehicles (IAV-2004) (Lisboa, PT, July 2004).
4. Durrant-Whyte, Hugh. Localization, Mapping, and the Simultaneous Localization and Mapping Problem. Australian Center for Field Robotics. Sydney. 2002.
5. Montemerlo M., Thrun S., Koller D., Wegbreit B. Fastslam: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem. In AAAI-2002 (Vancouver, BC, July 2002).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор О.С. Колосов.

**Кучерский Роман Владимирович** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики» (МГТУ МИРЭА); e-mail: cpd@mirea.ru, kpu-mirea@yandex.ru; 119454, г. Москва, пр-кт Вернадского, 78; тел. 84954349232; кафедра «Проблемы управления»; аспирант.

**Манько Сергей Викторович** – д.т.н.; профессор.

**Kuchersky Roman Vladimirovich** – Moscow State Technical University of Radioengineering, Electronics and Automation (MSTU MIREA); e-mail: cpd@mirea.ru, kpu-mirea@yandex.ru; 78, Vernadskiy av., Moscow, 119454, Russia; phone: +74954349232; control problems department; post-graduate student.

**Man'ko Sergej Victorovich** – dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.51:004.7:621.865

**А.А. Дьяченко**

#### **ЗАДАЧА ФОРМИРОВАНИЯ СТРОЯ В ГРУППЕ БПЛА\***

*Статья посвящена рассмотрению актуальной темы группового применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Данная задача является перспективной и имеет множество практических применений. Группы БЛА могут применяться для мониторинга окружающей обстановки, для картографирования местности, для поиска объектов на больших территориях и т. п.*

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 11-08-01196-а.

*В статье рассмотрена задача формирования строя состоящего из группы БЛА. Рассмотрены задачи определения формации, задания критериев качества и обеспечение безопасности движения и перестроения БЛА относительно друг друга. Рассмотрен метод оптимизированного распределения группы БЛА по местам строя основанный на методе итерационного улучшения плана. Данная задача относится к классической задаче о назначениях.*

*Приводятся результаты математического моделирования процесса распределения для различных конфигураций заданного строя.*

*Беспилотные летательные аппараты; оптимизированное распределение; задача о назначениях; групповое применение БПЛА.*

**A.A. Dyachenko**

### **THE TASK OF FORMING STRUCTURE IN GROUP OF UAVS**

*The article is devoted to the actual topic a group use unmanned aerial vehicles (UAVs). This task is promising and has many practical applications. Group of UAVs can be used for monitoring the environment, for mapping areas, to search for objects over large areas, etc.*

*In this paper we consider the problem of forming structure consists of a group of UAVs. We consider the problem of determining the formation, set the criteria of quality and safety of motion and rebuild the UAV relative to each other. We consider a method for optimized distribution of UAV system to places based on a method of the iterative improvement plan. This task belongs to the classical problem of the assignment.*

*The results of mathematical modeling of the distribution for different configurations of the given structure.*

*Unmanned aerial vehicles; optimized distribution; assignment problem; group use of UAVs.*

**Введение.** В настоящее время широкое распространение получили беспилотные летательные аппараты (БПЛА), этому способствуют новейшие достижения в ОБПЛАсти электроники, вычислительной технике, средств связи и систем управления. Перспективными ОБПЛАстями применения БПЛА являются: обследование территорий для поиска очагов пожаров, загрязнений и т.п., картографирование местности, поиск людей на суше и на воде, применение в военных ОБПЛАстях. Сам по себе БПЛА имеет большие преимущества по сравнению с пилотируемыми летательными аппаратами – это и меньшая стоимость при производстве и эксплуатации, и более продолжительное пребывание в воздухе, и отсутствие рисков для человека (пилота) при нахождении БПЛА в экстремальных условиях [1].

**Групповое применение БПЛА.** Как правило, на практике применяются одиночные БПЛА, это в свою очередь приводит к невысокой эффективности выполнения задания, особенно если оно выполняется на большой территории. Ограничения эти связаны с тем, что сенсорные системы БПЛА имеют ограниченные зоны действия. Применение же нескольких независимых БПЛА повышает эффективность выполнения задачи, но при этом возникают дополнительные проблемы, связанные с координацией действий при выполнении единого задания. В связи с этим возникает задача группового управления БПЛА.

Задача группового управления БПЛА очень перспективна, так как применение группы БПЛА существенно повышает эффективность выполнения задания, при этом многие задачи существенно упрощаются. Появляется возможность проведения мониторинга больших территорий за короткое время без упущения важных деталей, что очень вероятно при использовании одиночных БПЛА. При групповом управлении БПЛА производится взаимодействие между отдельными БПЛА таким образом, чтобы было полное соответствие их действий, с поставленными перед ними задачами.

В числе многих задач, решаемых при групповом применении БПЛА, одной из главных является распределение заданий среди членов группы. Среди множества задач распределения рассмотрим одну из них, задачу формирования строя (формации).

Задача формирования строя и безопасной навигации – избежание опасного сближения и столкновения БПЛА между собой и с другими объектами. Задача обеспечения безопасного полета как в строю, так и вне его довольно непростая. Особенно когда расстояние между БПЛА составляет порядка нескольких десятков метров.

**Постановка задачи формирования строя БПЛА.** В основе применения группы БПЛА лежит их взаимодействие. Одной из главных задач при групповом взаимодействии является распределение заданий или действий, которые возлагаются на тот или иной БПЛА. Для эффективного применения группы БПЛА, ею необходимо эффективно управлять.

Одной из задач группового управления является построение строя или формации для упорядоченного полета из одного места в другое. Другой задачей распределения, является распределение по некоторой заданной конфигурации в пространстве, которую необходимо принять группе БПЛА для выполнения конкретного задания.

В некоторый момент времени группа БПЛА находится в воздухе в состоянии полета, занимая некоторое произвольное положение в воздухе. При этом БПЛА могут иметь различные друг от друга направления полета (курс) и скорость (рис. 1).

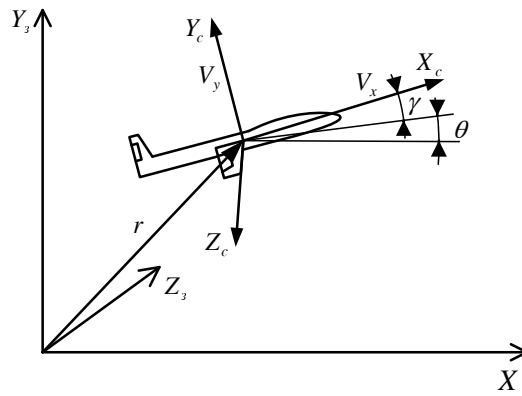


Рис. 1. Система координат БПЛА

Здесь  $X_z, Y_z, Z_z$  – система координат связанная с землей;  $X_c, Y_c, Z_c$  – система координат связанная с центром масс БПЛА;  $V_x, V_y$  – скорости по осям  $X_c$  и  $Y_c$  в системе координат связанной с БПЛА;  $\theta, \gamma$  – текущий курсовой угол и угол тангажа;  $r$  – радиус-вектор координат БПЛА.

Для того чтобы группа БПЛА приняла некоторую конфигурацию в пространстве, называемую формацией, необходимо группу БПЛА распределить по местам формации.

Формация предназначена для сгруппированного, слаженного полета группы БПЛА, а также для совместного выполнения, какого-либо задания, например, мониторинга окружающей среды или картографирования местности. Формация задается в виде координат целевых точек в абсолютной системе координат, связанной с землей.

Задача перехода в заданную формацию заключается в том, чтобы привести группу БПЛА из произвольного состояния в заданное с необходимыми переменными состояниями  $\mathbf{x}^0 \rightarrow \mathbf{x}^f$  (рис. 2).

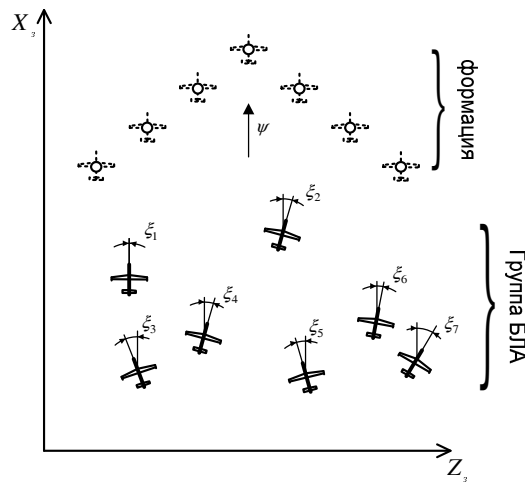


Рис. 2. Произвольное распределение БПЛА и заданные места формации

При этом БПЛА могут располагаться в пространстве произвольным образом, главное чтобы в момент распределения они находились в некоторой ограниченной зоне и имели сходную скорость, а вектор направления скорости был в пределе равен  $\theta_i \leq \psi \pm \Delta\xi$ , где  $\psi$  – заданный курс формации;  $\Delta\xi$  – некоторый угол допустимого отклонения относительно  $\psi$ . Действительное отклонение БПЛА от  $\psi$  обозначается  $\xi_i$ ,  $\xi_i \leq \Delta\xi$  ( $i = \overline{1, n}$ )  $n$  – количество БПЛА в группе (см. рис. 2).

При распределении группы БПЛА по заданной формации, значение имеет то, как задавать формацию, какое «отношение» должно быть между формацией и группой БПЛА до распределения, в момент распределения и после распределения, когда БПЛА начинают занимать заданные места. В этом отношении можно выделить несколько вариантов:

- ◆ центр формации в момент перед распределением закреплен в центре распределения БПЛА;
- ◆ какое-либо из мест в формации заранее закрепляется за определенным БПЛА, который может быть выделен в группе как «ведущий»;
- ◆ центр формации находится на некотором удалении по курсу  $\psi$  от группы БПЛА как показано на рис. 2.

Для последнего случая центр формации вынесен на некоторое расстояние в направлении по курсу заданного движения, и виртуальная формация «зафиксирована» в некоторых координатах, связанных с земной системой координат. В этом случае после распределения группа БПЛА должна переместиться в заданные точки и в некоторый момент времени занять положение формации, и продолжая полет в заданной формации с заданными параметрами.

Для процедуры распределения БПЛА по заданной формации используется критерий наименьшего суммарного перемещения, и как следствие минимизация по перестроению и пересечению траекторий.

Этот критерий позволяет получить минимизацию по суммарному перемещению всех БПЛА из некоторых произвольных координат  $\mathbf{x}_i^0 = \{x_1^0, x_2^0, \dots, x_s^0\}$  ( $i = \overline{1, n}$ ) в желаемые, описываемые вектором состояния  $\mathbf{x}_i^f = \{x_1^f, x_2^f, \dots, x_s^f\}$  ( $i = \overline{1, n}$ ). В данном случае вектор состояния  $\mathbf{x}_i^f$  описывает конечные пространственные координаты  $OXYZ$ .

Рассмотрим метод распределения с критерием «наименьшего суммарного перемещения». Суть данного метода заключается в том, чтобы найти такую комбинацию «БПЛА – цель», чтобы при суммировании всех полученных после распределения расстояний получился наименьший результат. Этот метод известен как «классическая задача о назначениях» [2, 3]. Для поиска решения составляется полный двудольный граф (рис. 3), вершинами которого являются БПЛА  $B\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$  и целевые места формации  $Q\{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ , а ребрами являются элементы матрицы расстояний  $\mathbf{D}$  каждого БПЛА относительно каждой цели. На основе этой матрицы осуществляется поиск необходимой конфигурации для распределения.

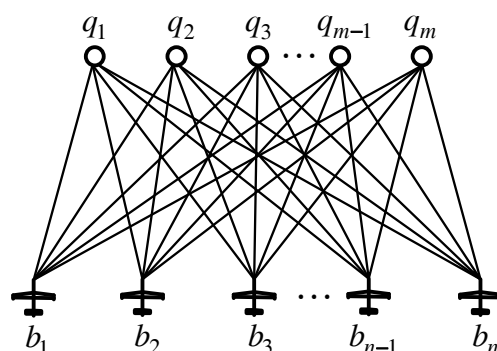


Рис. 3. Двудольный граф полных связей «БПЛА – формация»

**Метод итерационного улучшения плана.** Для распределения группы БПЛА по целевым точкам формации с наименьшим суммарным значением длин используется алгоритм итерационного улучшения плана [2, 3]. За основу берется матрица расстояний  $\mathbf{D}(m \times n)$ , где  $n$  – количество БПЛА в группе;  $m$  – количество целевых точек в формации,  $n=m$ . Значения матрицы  $\mathbf{D} \rightarrow d_{ij}$  – это кратчайшее расстояние между  $j$ -м БПЛА и  $i$ -й целевой точкой в формации:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i^u - x_j^t)^2 + (y_i^u - y_j^t)^2 + (z_i^u - z_j^t)^2},$$

где  $x_i^u, y_i^u, z_i^u$  – координаты  $i$ -й целевой точки формации;  $x_j^t, y_j^t, z_j^t$  – текущие координаты  $j$ -го БПЛА.

При реализации рассматриваемого метода распределения необходимо определить центр распределения строя и центр распределения формации. Для этого используется уравнение расчета центра масс

$$M_c = \frac{\sum_{i=1}^n r_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n w_i},$$

где  $r_i$  – радиус-вектор  $i$ -й точки формации или БПЛА в пространстве;  $w_i$  – вес  $i$ -й точки формации или БПЛА, в нашем случае для всех точек и БПЛА он принят равным единице.

На следующем этапе необходимо совместить центры масс формации и группы БПЛА по двум осям  $X_z$  и  $Y_z$ , а оставшуюся ось  $Z_z$  соответственно сместить на некоторое наперед заданное расстояние  $L$ . Конечно, в действительности смещение должно производиться не в направлении одной из координат, а в зависимости от курса  $\psi$ .

Алгоритм итерационного улучшения плана состоит из 2-х частей. В первой части формируется опорный план, а во второй, посредством итераций формируется окончательное решение [2].

Алгоритм заключается в последовательном поиске более точного решения на каждом шаге выполнения алгоритма.

**Шаг 1.** На первом шаге алгоритма формируется опорный план. Опорный план является базой для последующего улучшения общего плана.

Опорный план можно сформировать несколькими способами, но одним из наиболее приемлемых является следующий.

По имеющейся матрице  $D$  для каждого  $j$ -го БПЛА, начиная с  $j = 1$ , выбирается минимальная оценка  $\delta_j = \min(d_{ij})$  ( $i = \overline{1, m}$ ). После выбора соответствующая строка  $i$  в дальнейшем не принимает участие в формировании опорного плана. Далее такая же процедура выполняется для  $j = 2$  и т.д. Такой способ задания опорного плана позволяет в будущем сократить количество шагов по улучшению общего плана. После того как опорный план сформирован, переходим к следующему шагу.

**Шаг 2.** На этом шаге происходит поиск улучшений общего плана путем выявления наилучших вариантов для парных  $j$ -го и  $k$ -го БПЛА.

Для 1-го БПЛА в первом столбце матрицы  $D$  ищется значение с меньшей величиной расстояния, чем в опорном плане. Если такое найдено в  $\nu$ -й строке, то значение другого  $k$ -го БПЛА, стоящего на  $\nu$ -й строке, должно перейти на строку где стояло значение 1-го БПЛА, при этом данная перестановка улучшит общий план, т.е.  $(d_{\nu,1} + d_{j,k}) < (d_{j,1} + d_{\nu,k})$ . Если же улучшения нет, то перестановка не фиксируется и текущее состояние распределения остается в прежнем состоянии.

Далее эта же процедура выполняется для 2-го БПЛА, где также ищется наименьшее значение дистанции и таким же образом выполняется поиск улучшений плана. Эта процедура выполняется и с оставшимися БПЛА  $j = (\overline{3, n})$ .

После первого прохода мы имеем некоторый локальный или глобальный оптимум. По завершению второго шага алгоритма переходим к третьему шагу.

**Шаг 3.** На этом шаге, после процедуры по улучшению общего плана, должно выполняться соотношение

$$S^{k-1} - S^k > \varepsilon, \quad (1)$$

где  $S^{k-1}$  – сумма оценок, сформированная на предыдущем шаге;  $S^k$  – сумма оценок, сформированная на текущем шаге;  $\varepsilon$  – некоторая малая наперед заданная величина. Если условие (1) выполняется, то возвращаемся к шагу 2.

Условием окончания процедуры поиска оптимизированного распределения является один из двух вариантов:

- ◆ отсутствие новых перестановок в итерационной процедуре улучшения плана;
- ◆ достижение некоторого значения после, которого улучшение в общем плане с ростом количества итераций практически не происходит, т. е. условие (1) не выполняется.

Результатом работы алгоритма является вектор  $p$  ( $1 \times n$ ), где  $p_j$  – номер места в формации для  $j$ -го БПЛА.

**Модель БПЛА.** Для моделирования полета БПЛА при отработке алгоритма распределения применялась упрощенная математическая модель БПЛА с управлением в плоскости  $OXZ$  и с возможностью перестроения в вертикальной плоскости  $OXY$ .

Математическая модель БПЛА имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{V}_x &= \frac{1}{M}(P_x - c_x V_x^2); & \dot{V}_y &= \frac{1}{M}(P_y - c_y V_y^2); & \dot{\theta} &= \frac{V_x}{K_r} \sin(\alpha_r); \\ \dot{X}_z &= V_x \cos(\theta); & \dot{Y}_z &= V_x \sin(\theta); & \dot{Z}_z &= V_y. \end{aligned}$$

Здесь  $V_x, V_y, \dot{V}_x, \dot{V}_y$  – скорости и ускорения по осям  $X_c$  и  $Y_c$ ;  $M$  – масса БПЛА (одинакова для всех БПЛА);  $P_x, P_y$  – силы тяги, действующие на БПЛА по осям  $X_c$  и  $Y_c$  соответственно;  $c_x, c_y$  – коэффициенты проекций аэродинамических сил по осям  $X_c$  и  $Y_c$ ;  $\theta, \dot{\theta}$  – текущий курсовой угол и скорость его изменения;  $K_r$  – коэффициент радиуса разворота;  $\alpha_r$  – угол поворота руля;  $X_z, Y_z, Z_z$  – координаты БПЛА связанные с земной системой координат.

Так как в нашу задачу не входило моделирование процессов управления БПЛА нижнего уровня, поэтому и модель БПЛА и регулятор нижнего уровня принимались в упрощенном виде и здесь не рассматриваются. Упрощены также силы гравитации, моменты инерции, взаимные влияния различных сил в зависимости от пространственного положения БПЛА.

**Результаты моделирования.** На рис. 4,а представлены результаты распределения одиннадцати БПЛА. Как видно из рисунка, при таком методе распределения прямые соединяющие БПЛА и места формации получаются без пересечений и минимальны по суммарному расстоянию. За счет этого траектории, моделируемого полета БПЛА, должны иметь минимальное количество пересечений, так как обеспечивается некоторый запас по дистанции между ними. На рис. 4,б представлены траектории полета БПЛА к заданным местам формации. Координаты БПЛА задаются произвольным образом в ОБПЛАсти с координатами  $X = [0, 120]$  и  $Z = [0, 120]$ , при этом начальные курсовые углы  $\theta_i$  БПЛА отличаются от заданного направления формации  $\psi$ . По достижении БПЛА соответствующих мест формации они продолжают полет в направлении  $\psi$ . Небольшие отрезки, исходящие из крестиков, указывают на начальный курсовой угол БПЛА.

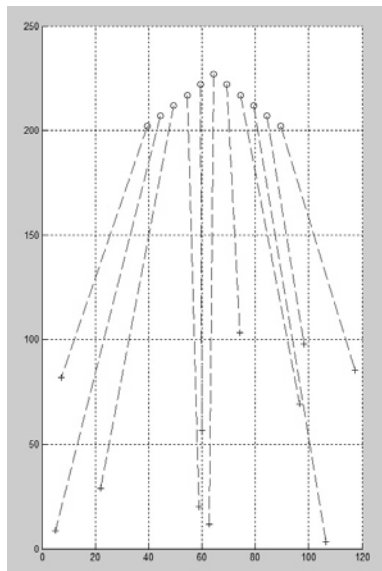


Рис. 4,а. Распределение группы БПЛА на основе формации «клин»

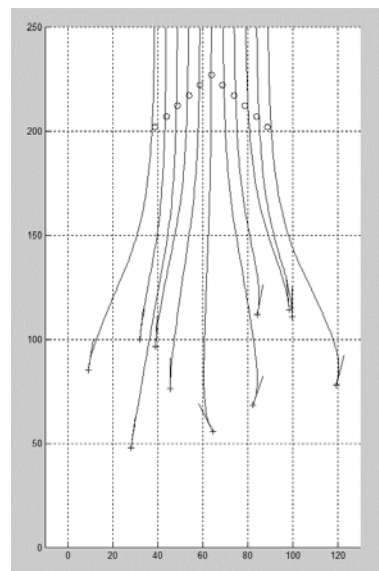


Рис. 4,б. Траектории полета группы БПЛА к формации типа «клин»

Как видно на рис. 4,б, несмотря на отклонения  $\xi_i = [-25^\circ \dots 25^\circ]$ , в целом все БПЛА достигли намеченных мест с допустимыми значениями координат и углов. Здесь расстояние  $L$  составляло приблизительно 120 м.

Далее результаты моделирования приводятся на графиках с тремя пространственными координатами.

На рис. 5,а приведена проекция на оси  $X_3, Z_3$ , а на рис. 5,б показаны траектории по трем координатам.

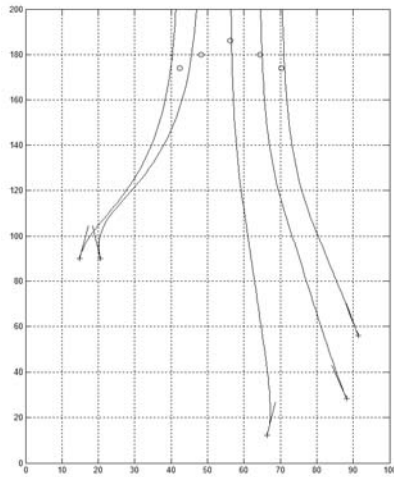


Рис. 5,а. Траектории полета группы БПЛА к формации типа «клин», проекция на плоскость

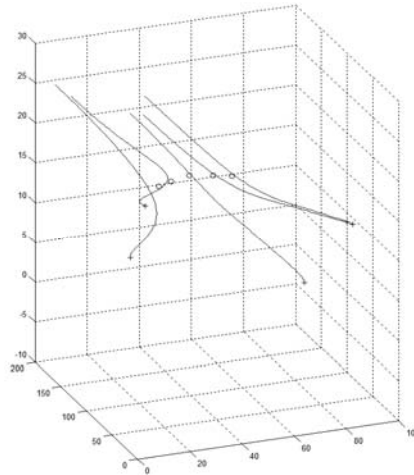


Рис. 5,б. Траектории полета группы БПЛА к формации типа «клин» в координатах OXYZ

На рис. 6,а,б представлены результаты моделирования ситуации смены формации в случае сдвижки формаций относительно друг друга. Перед началом перестроения отклонения от курсового угла формации составляли не более  $\pm 5^\circ$ . По высоте разброс составлял не более  $\pm 2,5$  м.

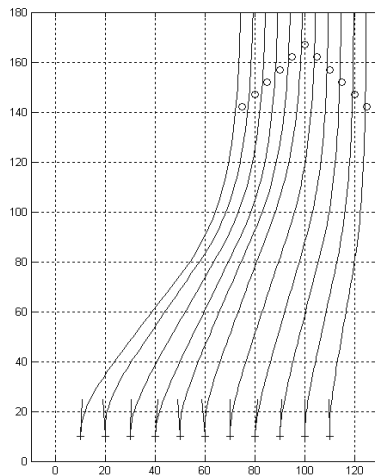


Рис. 6,а. Траектории полета группы БПЛА из формации типа «линия» к формации типа «клин» со смещением

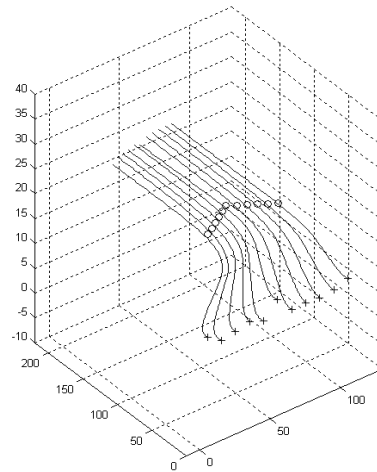


Рис. 6,б. Траектории полета группы БПЛА из формации типа «линия» к формации типа «клин» со смещением в координатах OXYZ



На рис. 7,а,б приведены результаты моделирования в ситуации, когда при смене формации происходило изменение направления полета с  $\psi = 90^\circ$  на  $\psi = 60^\circ$ .

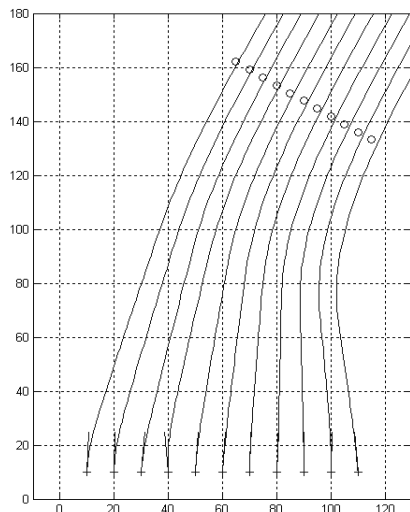


Рис. 7,а. Траектории полета группы БПЛА без изменения формации, но с изменением направления

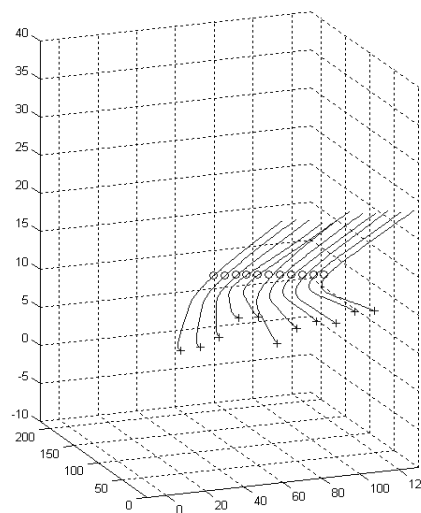


Рис. 7,б. Траектории полета группы БПЛА без изменения формации, но с изменением направления в координатах OXYZ

Обобщая и делая вывод по проведенному моделированию, следует отметить следующее. Данный подход, который был применен для распределения БПЛА по местам формации, позволяет получать надежное распределение с минимальным количеством пересечений в планируемых траекториях достижения заданных мест в формации. Для улучшения безопасности при достижении намеченных целей, рекомендуется увеличить расстояние между местами в формациях. Конечно, при этом необходимо использовать и соответствующие сенсорные системы, которые будут обеспечивать контроль за движением соседних БПЛА.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Себряков Г.Г. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / Под. ред. М.Н. Красильщикова. – М.: Физматлит, 2003. – 280 с.
2. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
3. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. – 2-е изд. / Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2005. – 1296 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Илюхин.

**Дьяченко Александр Александрович** – Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: aleksandernet@mail.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: 88634315494; младший научный сотрудник.

**Dyachenko Aleksandr Aleksadrovich** – SFedU Acad. Kalyaev Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems; e-mail: aleksandernet@mail.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634315494; junior researcher.