

Раздел III. Распределенные вычисления и системы

УДК 007.52:004.896:004:942

DOI 10.18522/2311-3103-2016-12-5570

И.А. Каляев, С.Г. Капустян, Л.Ж. Усачев

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕЛЕЙ В ГРУППЕ БЛА СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ*

Целью исследования является повышение эффективности функционирования беспилотных летательных аппаратов (БЛА) за счет их группового применения. Использование сетевых принципов информационного взаимодействия между БЛА группы позволяет существенно расширить круг решаемых задач с использованием мобильных роботов, в том числе и БЛА. Модельным примером группового применения БЛА является задача мониторинга обширных территорий и поиска различных объектов. Дана формальная постановка задачи распределения между БЛА группы некоторого множества областей сканирования таким образом, чтобы минимизировать время сканирования. Предложено данную задачу разбить на три подзадачи и решать ее поэтапно. Сначала определяется количество БЛА, необходимое для сканирования каждой области, затем распределить области сканирования между БЛА группы и, наконец, распределить полосы сканирования, на которые разбивается каждая область, между БЛА подгруппы, назначенной для сканирования данной области. Причем две последние подзадачи могут быть сведены к классической задаче о назначениях и для их решения можно использовать один и тот же алгоритм, например, венгерский или его различные модификации. Предложенный в статье подход позволяет решать задачу распределения целей (областей сканирования) между БЛА группы бортовыми устройствами управления отдельных БЛА, объединенными каналами связи в вычислительную сеть и применим для решения множества различных классов задач группами БЛА. При этом предложенный метод решения задачи распределения областей сканирования позволяет минимизировать возможные пересечения траекторий движения БЛА и тем самым уменьшить вероятность столкновения БЛА друг с другом. Для проведения экспериментальных исследований предложенного подхода методами компьютерного моделирования была разработана имитационная программная модель функционирования группы БЛА при решении задач сканирования заданных областей. Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного подхода и показывают, что удается получить близкий к оптимальному вариант распределения областей сканирования между БЛА группы с точки зрения минимизации суммарных временных затрат и обеспечения безопасности перемещения БЛА группы к целям.

Группа БЛА; распределение целей; сетевая система; система группового управления; метод; алгоритм; имитационная модель.

* Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания на 2016 г. № 007-01114-16 ПР, номер проекта № 0256-2014-0008, а также при поддержке РФФИ, проекты № 16-29-04194, № 16-29-04178.

I.A. Kalyaev, S.G. Kapustyan, L.Z. Usachev

THE METHOD OF SOLVING THE PROBLEM OF THE DISTRIBUTION OF GOALS IN THE GROUP OF UAVS BY NETWORK-CENTRIC CONTROL SYSTEM

The aim of the study is to improve the efficiency of unmanned aerial vehicles (UAVs) by using them in group. Using the network-centric principles of information exchange between UAVs of the group can significantly extend the range of tasks to be solved with the use of mobile robots, including UAVs. Model example of the UAVs group application is the task of monitoring the vast territories and search for various objects. Given is the formal statement of the problem of distribution of a certain set of scan areas between the UAV group so that to minimize the scan time. It is proposed to solve this problem by dividing it into three sub-tasks and solving them step by step. First, determined is the number of UAVs required to scan each area, and then distributed is the scanning area between the UAVs of group and finally the strips of scanning are distributed, on which each area is divided, between the UAV subgroups assigned to scan this area. The last two sub-tasks can be reduced to the classical problem of appointments and for their solving may be used the same algorithm, for example, Hungarian algorithm or its various modifications. The approach proposed in the article allows solving the problem of distribution of targets (scan areas) between the UAVs of the group by control devices of separate UAVs, combined by communication channels in computer networks and is applicable for solving a variety of different classes of tasks in groups of UAVs. At that the proposed method of solving the problem of the distribution of scan areas allows minimizing the possible intersection of UAVs trajectories and reducing the probability of collision between UAVs. For experimental studies of the proposed approach by methods of computer simulation developed was the simulation software model of functioning of groups of UAVs when solving the scanning tasks of prescribed areas. The simulation results confirm the efficiency of the proposed approach and show that it is possible to get close to the optimal variant of the distribution of scan areas between UAVs group from the viewpoint of minimizing the total time-consuming and providing the security of moving of UAVs to targets.

UAVs group; distribution of targets; network-centric system; group control system; method; algorithm; simulation model.

Введение. В настоящее время наиболее востребованными автономными робототехническими системами являются беспилотные летательные аппараты (БЛА) [1–7]. Основными задачами, решаемыми БЛА, являются: обзор и разведка территорий, обнаружение опасных объектов или мест возникновения чрезвычайных ситуаций, поиск пострадавших и т.п. Очевидно, что эффективность решения перечисленных выше задач можно существенно повысить путем одновременного использования некоторого множества (группы) БЛА, которые могут осуществлять "параллельное" сканирование (осмотр) различных областей пространства [8–15]. При этом, если таких областей пространства, требующих сканирования с помощью БЛА, несколько, то возникает задача оптимального или близкого к оптимальному распределения этих областей между БЛА группы. Именно решению данной задачи посвящена настоящая работа.

В работах [8, 16, 17] показано, что наиболее эффективно данная задача решается децентрализованно распределенными сетевыми системами группового управления.

Формальная постановка задачи. Допустим, что задано N областей S_i , требующих сканирования с помощью группы БЛА, причем каждая такая область S_i ($i = \overline{1, N}$) определяется некоторым прямоугольником, для которого известны координаты $\langle x_i^c, y_i^c \rangle$ его центра, H_i – длина, F_i – ширина и ϕ_i – угол ориентации, как это показано на рис. 1.

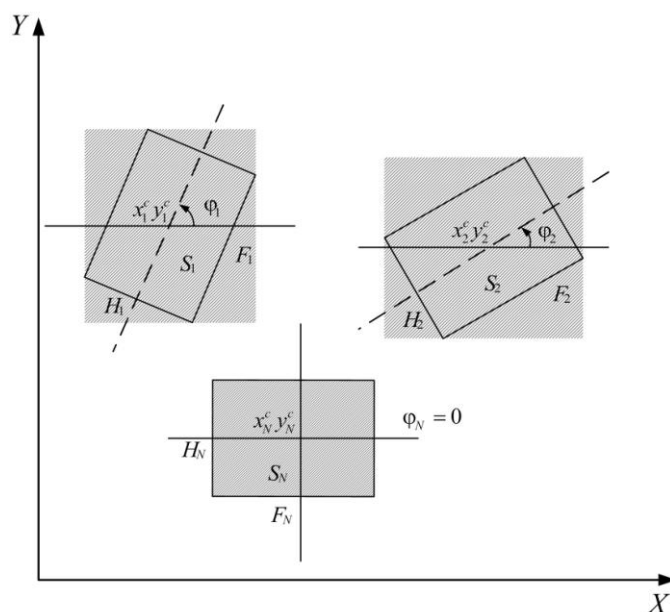


Рис. 1. Задание областей сканирования S_i ($i = \overline{1, N}$)

Будем считать, что в состав группы входят M БЛА, причем каждый БЛА R_i ($i = \overline{1, M}$) описывается тремя параметрами: L_i – ширина полосы сканирования, V_i – скорость сканирования (или иначе скорость движения БЛА при сканировании) и $\langle x_i, y_i \rangle$ – координаты его текущего положения в пространстве. Для простоты дальнейших построений будем считать, что все БЛА, входящие в группу, одинаковы и, соответственно, имеют одинаковые значения параметров L_i ($i = \overline{1, M}$) = L и V_i ($i = \overline{1, M}$) = V .

Задача состоит в распределении областей между БЛА R_i ($i = \overline{1, M}$) группы по областям S_i ($i = \overline{1, N}$) таким образом, чтобы минимизировать общее время сканирования.

Решение сформулированной выше задачи предлагается осуществлять в три этапа.

На первом этапе необходимо определить количество БЛА группы, направляемых на сканирование той или иной области S_i ($i = \overline{1, N}$).

На втором этапе необходимо распределить БЛА группы по конкретным областям S_i ($i = \overline{1, N}$) с учетом их текущего положения в пространстве, а также количества БЛА, уже направленных для сканирования той или иной области S_i ($i = \overline{1, N}$).

И, наконец, на третьем этапе необходимо определить конкретные полосы (траектории) сканирования для каждого БЛА группы.

Подобная задача рассматривается в работах [8, 9, 11, 13, 15–17]. Однако здесь основное внимание уделяется решению задач управления БЛА группы при движении к заданным целям, а задача распределения целей между БЛА группы не рассматривается.

Подзадача определения количества БЛА, необходимых для сканирования областей. Для решения данной подзадачи первым делом необходимо определить число БЛА, которые могут осуществлять одновременное сканирование области S_i . Очевидно, что с помощью БЛА R_i целесообразно осуществлять сканирование некоторой полосы в области S_i шириной L вдоль всей ее длины, поскольку, если сканирование данной полосы будет одновременно осуществлять несколько БЛА, то они будут просто мешать друг другу. Исходя из этих соображений, можно сделать вывод, что одновременно осуществлять сканирование области S_i могут не более чем M_i БЛА, причем

$$M_i = \left\lceil \frac{F_i}{L} \right\rceil, \quad (1)$$

где F_i – ширина области S_i ; L – ширина полосы сканирования БЛА; $\lceil \cdot \rceil$ – округление до большего целого.

При этом если сканирование всей области S_i будет осуществляться одним БЛА, то общее время сканирования составит

$$T_i^{\max} = \left\lceil \frac{H_i}{V} M_i \right\rceil, \quad (2)$$

где H_i – длина области S_i . Если же сканирование области S_i будет одновременно M_i БЛА, то соответственно, общее время сканирования можно уменьшить в M_i раз, т.е. в данном случае

$$T_i^{\min} = \frac{H_i}{V} \quad (3)$$

Таким образом, в зависимости от количества БЛА, участвующих в сканировании, время сканирования $T_{\text{скан}}^i$ области S_i может лежать в пределах

$$\left\lceil \frac{H_i}{V} \right\rceil \leq T_i \leq \left\lceil \frac{H_i}{V} M_i \right\rceil$$

Тогда, общее время сканирования всех N областей S_i ($i = \overline{1, N}$), начиная от момента постановки задания, будет составлять

$$T = \max(T_i; (i = \overline{1, N})). \quad (4)$$

Если число БЛА в группе не меньше числа БЛА, необходимых для "параллельного" сканирования всех областей S_i ($i = \overline{1, N}$), то очевидно, что для минимизации общего времени сканирования T в область S_i необходимо направить M_i БЛА, где M_i определяется выражением (1).

Сложнее дело обстоит в случае, если $M < \sum_{i=1}^N M_i$. Очевидно, что в данном случае минимум общего времени сканирования будет достигаться в случае, если максимальное среди значений T_i ($i = \overline{1, N}$) будет минимальным, т.е.

$$\max(T_i; (i = \overline{1, N})) \rightarrow \min .$$

Можно предположить, что последнее будет достигаться в случае, если время сканирования всех областей S_i ($i = \overline{1, N}$) будет одинаковым, т.е.

$$T_i = T_j (i = \overline{1, N}, j = \overline{1, N}).$$

Исходя из этих соображений, можно предложить следующий метод определения числа БЛА, направляемых на сканирование различных областей S_i ($i = \overline{1, N}$).

Сначала определим среднее время сканирования различных областей S_i ($i = \overline{1, N}$) как

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^N T_i^{\max} = \frac{\sum_{i=1}^N \left[\frac{H_i}{V} M_i \right]}{M} \quad (5)$$

Далее определим количество БЛА, необходимое для сканирования области S_i за время T_{cp} , исходя из следующих соображений: если для сканирования области S_i за время T_i^{\min} требуется M_i БЛА, то соответственно для сканирования той же области S_i за время T_{cp} потребуется M_i^* БЛА

$$M_i^* = \left[\frac{T_i^{\min} \cdot M_i}{T_{cp}} \right] \quad (6)$$

где $[\]$ – округление до ближайшего целого.

Подзадача распределения областей сканирования между БЛА. После того, как определено количественное распределение БЛА группы между областями сканирования S_i ($i = \overline{1, N}$), возникает следующая подзадача – распределение конкретных областей сканирования между конкретными БЛА. Для решения данной подзадачи можно предложить следующий подход.

Допустим, что в результате решения первой подзадачи получено, что на сканирование области S_i ($i = \overline{1, N}$) должно быть направлено M_i^* БЛА. Будем также считать, что все БЛА в группе пронумерованы R_1, R_2, \dots, R_M .

На основании данных о координатах центров всех областей S_i ($i = \overline{1, N}$) БЛА R_1 выбирает в качестве целевой ближайшую область S_i , т.е. область для которой выполняется условие

$$\sqrt{(x_1 - x_i^c)^2 + (y_1 - y_i^c)^2} = \min ,$$

где x_1, y_1 – текущие координаты БЛА R_1 .

При этом значение M_i^* , определяющее количество БЛА, направляемых на сканирование области S_i , уменьшается на единицу, т.е. $M_i^* = M_i^* - 1$.

Далее решение принимает БЛА R_2 . Он выбирает в качестве целевой область S_j , для которой, во-первых, $M_j^* \neq 0$, а, во-вторых, выполняется условие

$$\sqrt{(x_2 - x_i^c)^2 + (y_2 - y_i^c)^2} = \min .$$

При этом значение M_j^* соответственно уменьшается на единицу.

Аналогичным образом осуществляется последовательный выбор целевых областей всех БЛА группы. При этом очередной БЛА осуществляет выбор только среди тех областей, которые еще не обеспечены требуемым количеством БЛА, т.е. для которых выполняется условие $M_j^* \neq 0$.

Предложенный алгоритм достаточно прост, не требует больших временных затрат на его реализацию и может быть отнесен к классу "жадных" алгоритмов, поскольку при принятии решения о выборе области сканирования, каждый БЛА учитывает насколько данное распределение выгодно для него, но не для остальных БЛА группы. В результате, в некоторых ситуациях, полученное распределение будет весьма далеко от оптимального, в частности, линии, характеризующие направление перемещения БЛА группы к областям сканирования, могут пересекаться в пространстве и во времени, что потенциально может привести к аварийным ситуациям. Отмеченный недостаток является существенным, поскольку обеспечение безаварийного перемещения БЛА в заданные (целевые) точки пространства, является серьезной проблемой, возникающей при выполнении любых маневров группы БЛА. В данном случае, для её решения необходимо искать такое распределение областей сканирования S_i ($i = \overline{1, N}$) между БЛА R_j ($j = \overline{1, M}$), которое минимизировало бы риск возможного пересечения траекторий движения БЛА к областям сканирования. При этом было бы логично свести данную задачу к задаче о назначениях и решать ее с помощью венгерского алгоритма, обеспечивающего наилучшее распределение в соответствии с выбранным критерием оценки эффективности назначения [18]. Понятно, что интерес представляет типичный случай, когда $M > N$ и применение венгерского алгоритма без некоторых специальных приемов невозможно.

В этом случае, для сведения задачи распределения БЛА между областями сканирования к задаче о назначениях, предлагается "размножить" каждую область S_i в соответствии с количеством БЛА M_i^* , требуемых для сканирования данной области.

При этом, поскольку $\sum_{i=1}^N M_i^* = M$, БЛА R_j с координатами $\langle x_j, y_j \rangle$ ($j = \overline{1, M}$)

будут назначены на геометрические центры прямоугольных областей S_k ($k = \overline{1, M}$), причем будет иметься M_i^* точек для каждой i -й области с одинаковыми координатами $\langle x_i^c, y_i^c \rangle$. Отметим, что поскольку венгерский алгоритм распределяет один объект на одну целевую точку, то на i -ю область сканирования будет назначено ровно M_i^* БЛА.

При использовании венгерского алгоритма необходимо сформировать матрицу оценок эффективности назначений. Для этого предлагается подход [19, 20], суть которого заключается в следующем.

В общем случае, для каждого БЛА группы R_j ($j = \overline{1, M}$) с определенной дискретностью может быть построена траектория движения к центрам прямоугольников S_k ($k = \overline{1, M}$) за некоторое заданное время Δt , обеспечивающая минимальное отклонение от прямой, соединяющей начальную $\langle x_j, y_j \rangle$ и целевую точку $\langle x_k^c, y_k^c \rangle$. В результате будет сформирован двумерный массив траекторий

$\{TR_{jk}\} (j, k = \overline{1, M})$. При этом каждая траектория будет представлять собой массив векторов координат $\langle x_{jk}^t, y_{jk}^t \rangle (t = \overline{1, T})$, где T – количество точек дискретизации каждой траектории. Пусть БЛА R_j выбрал некоторую целевую точку S_k . Тогда для траектории TR_{jk} выполняется поэлементное сравнение с траекториями движения $TR_{mn} (m, n = \overline{1, M}, m \neq j, n \neq k)$ остальных БЛА группы к другим целевым точкам. Если точки траекторий TR_{jk} и TR_{mn} , соответствующие одному и тому же моменту времени t , находятся в опасной близости, что можно определить условием $r < r_{\min}$, где r_{\min} есть некоторое допустимое безопасное расстояние, то считается, что при выборе j -м БЛА k -й целевой точки будет создана помеха для достижения БЛА R_m n -й целевой точки. При этом r определяется соотношением

$$r = \sqrt{(x_{jk}^t - x_{mn}^t)^2 + (y_{jk}^t - y_{mn}^t)^2}.$$

При выполнении данной процедуры для всех траекторий $\{TR_{jk}\} (j, k = \overline{1, M})$ мы получим матрицу \mathbf{D} размерности $M \times M$ оценок эффективности назначения БЛА $R_j (j = \overline{1, M})$ на области сканирования $S_k (k = \overline{1, M})$. Каждая оценка $d_{jk} (j, k = \overline{1, M})$ будет представлять собой суммарное количество опасных ситуаций (помех), которые БЛА R_j при выборе им области S_k создает для других БЛА группы при выборе ими других областей сканирования. Имея такую матрицу оценок эффективности назначений, предлагается искать такое распределение областей сканирования между БЛА группы, при котором суммарное количество помех для всех БЛА группы, определяемое по матрице \mathbf{D} , будет минимальным. В свою очередь, такое распределение легко находится при использовании венгерского алгоритма. В то же время, необходимо отметить, что рассмотренная выше процедура формирования матрицы назначений отличается достаточно высокой вычислительной сложностью и её применение не всегда возможно. Если предположить, что для достижения выбранной цели каждый БЛА будет совершать перемещения, обеспечивающие минимальное отклонение от прямой, соединяющей начальную и целевую точку (кратчайший путь к цели), то для упрощения формирования матрицы назначений, предлагается не сравнивать траектории, а проверять пересечение прямых, соединяющих БЛА и геометрические центры областей сканирования. То есть, если отрезки прямых, проходящих через точки с координатами $\langle x_j, y_j \rangle, \langle x_k^c, y_k^c \rangle$, соответствующие БЛА R_j и центру области сканирования S_k , и через другие точки с координатами $\langle x_m, y_m \rangle, \langle x_n^c, y_n^c \rangle$, соответствующие произвольному БЛА R_m и некоторой области сканирования $S_n (m, n = \overline{1, M}, m \neq j, n \neq k)$, пересекаются, то соответствующий элемент матрицы эффективности назначений d_{jk} увеличивается на единицу. Пример формирования элементов матрицы назначений в данном случае приведен на рис. 2. При этом вычислительная сложность процедуры формирования матрицы назначений многократно снижается, что делает возможным применение данного подхода для групп, состоящих из нескольких десятков БЛА.

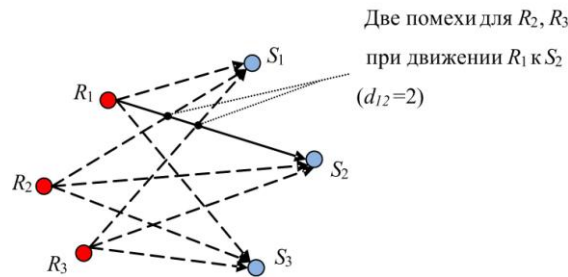


Рис. 2. Пример формирования элементов матрицы оценок эффективности назначений

Подзадача выбора полосы сканирования БЛА. После того, как областям сканирования распределены между БЛА группы, необходимо определить конкретную полосу сканирования для каждого БЛА.

Пусть для сканирования области S_i выделено M_i^* БЛА. Если ширина области S_i равна F_i , то, как это показано на рис. 5, для ее полного сканирования необходимо пройти

$$M_i = \left\lceil \frac{F_i}{L} \right\rceil$$

полос с координатами точек входа и выхода $\langle x_j^1, y_j^1 \rangle$ и $\langle x_j^2, y_j^2 \rangle, j = \overline{1, M_i}$, определяемыми выражениями

$$\begin{cases} \bar{x}_j^1 = x_i^c - \frac{H_i}{2}, \\ \bar{y}_j^1 = y_i^c - \frac{F_i}{2} + (j-1) \cdot L + \frac{L}{2}, \\ x_j^1 = x_i^c + (\bar{x}_j^1 - x_i^c) \cdot C - (\bar{y}_j^1 - y_i^c) \cdot S, \\ y_j^1 = y_i^c + (\bar{x}_j^1 - x_i^c) \cdot S + (\bar{y}_j^1 - y_i^c) \cdot C. \end{cases} \quad (7)$$

и

$$\begin{cases} \bar{x}_j^2 = x_i^c + \frac{H_i}{2}, \\ \bar{y}_j^2 = y_i^c - \frac{F_i}{2} + (j-1) \cdot L + \frac{L}{2}, \\ x_j^2 = x_i^c + (\bar{x}_j^2 - x_i^c) \cdot C - (\bar{y}_j^2 - y_i^c) \cdot S, \\ y_j^2 = y_i^c + (\bar{x}_j^2 - x_i^c) \cdot S + (\bar{y}_j^2 - y_i^c) \cdot C \end{cases} \quad (8)$$

где H_i – длина области сканирования S_i ; F_i – ширина области сканирования S_i ; L – ширина полосы сканирования БЛА; ϕ_i – угол ориентации области сканирования S_i ; $\langle x_i^c, y_i^c \rangle$ – координаты геометрических центров областей сканирования; $\langle \bar{x}_j^1, \bar{y}_j^1 \rangle, \langle \bar{x}_j^2, \bar{y}_j^2 \rangle$ – координаты центров полос до поворота на угол ϕ_i ; $C, S = \cos(\phi_i), \sin(\phi_i)$.

Если $M_i = M_i^*$, т.е. число БЛА, назначенных на область S_i , равно числу полос сканирования, то каждый из БЛА из множества M_i^* выбирает себе одну из полос. Например, БЛА R_m^* ($m = \overline{1, M_i^*}$), берет на себя сканирование полосы с координатами входа $\langle x_m^1, y_m^1 \rangle$ или $\langle x_m^2, y_m^2 \rangle$ $m = \overline{1, M_i^*}$, определяемыми выражениями (7) и (8). При этом выбор 1-й или 2-й точек входа зависит от направления полета группы БЛА к областям сканирования, которое может быть определено следующим образом.

Пусть $\langle x_{ij}^1, y_{ij}^1 \rangle$ и $\langle x_{ij}^2, y_{ij}^2 \rangle$ координаты возможных точек входа в полосы сканирования областей S_i ($i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, M_i}$). Тогда для полос сканирования области S_i можно вычислить некоторые средние значения

$$x_i^1 = \frac{\sum_{j=1}^{M_i} x_{ij}^1}{M_i}, \quad y_i^1 = \frac{\sum_{j=1}^{M_i} y_{ij}^1}{M_i}, \quad x_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^{M_i} x_{ij}^2}{M_i}, \quad y_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^{M_i} y_{ij}^2}{M_i}$$

для всех областей сканирования

$$x^1 = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^1}{N}, \quad y^1 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i^1}{N}, \quad x^2 = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N}, \quad y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i^2}{N},$$

а также координаты геометрического центра группы БЛА

$$x^r = \frac{\sum_{j=1}^M x_j}{M}, \quad y^r = \frac{\sum_{j=1}^M y_j}{M}$$

и расстояния l_1, l_2 от геометрического центра группы БЛА $\langle x^r, y^r \rangle$ до точек $\langle x^1, y^1 \rangle$ и $\langle x^2, y^2 \rangle$

$$l_1 = \sqrt{(x^1 - x^r)^2 + (y^1 - y^r)^2},$$

$$l_2 = \sqrt{(x^2 - x^r)^2 + (y^2 - y^r)^2}.$$

При выполнении условия, что $l_2 > l_1$, точки с координатами $\langle x_{ij}^1, y_{ij}^1 \rangle$ используются как точки входа в полосу сканирования. В противном случае, в качестве точек входа используются точки с координатами $\langle x_{ij}^2, y_{ij}^2 \rangle$.

Данный подход требует минимальных вычислительных затрат, связанных лишь с вычислением центров полос сканирования, однако, как и при использовании "жадного" алгоритма для назначения БЛА на области сканирования, не решает проблему возможного пересечения траекторий движения БЛА к точкам входа полос сканирования.

Для устранения данного недостатка, предлагается использовать тот же самый подход, что и на этапе распределения областей сканирования между БЛА, то есть осуществлять назначение БЛА R_m^* ($m = \overline{1, M_i^*}$) на M_i^* полос сканирования в соответствии с венгерским алгоритмом. При этом матрица оценок эффективности назначений \mathbf{D}_i^* для каждой области S_i будет иметь размерность $M_i^* \times M_i^*$, а каждая оценка d_{mj} ($m, j = \overline{1, M_i^*}$) будет представлять собой суммарное количество помех,

которые создает БЛА R_m^* при выборе им некоторой j -й полосы сканирования, для других БЛА, назначенных на данную область сканирования, при их движении к другим полосам сканирования.

Достоинством предлагаемого подхода является то, что как на этапе назначения БЛА на области сканирования, так и при назначении БЛА на конкретные полосы сканирования каждой области, используется тот же самый алгоритм формирования матрицы оценок эффективности назначений и венгерский алгоритм, позволяющий получать наилучший вариант назначения с точки зрения возможного пересечения траекторий движения БЛА к выбранным полосам сканирования.

В случае если $M_i > M_i^*$, то область S_i будет просканирована за K проходов по M_i^* полос сканирования, где число проходов определяется соотношением

$$K = \left\lceil \frac{M_i}{M_i^*} \right\rceil.$$

В этом случае предлагается назначать M_i^* БЛА, назначенных на область S_i , на первые M_i^* полос $j = \overline{1, M_i^*}$ в соответствии с описанным выше способом (проход $k = 1$). Для остальных проходов ($k = \overline{2, K}$) при выборе полос сканирования предлагается использовать соотношения

$$\begin{cases} p^k = k \cdot M_i^* - p^1 + 1, & \text{если } k - \text{четное,} \\ p^k = k \cdot M_i^* + p^1 - M_i^*, & \text{если } k - \text{нечетное} \end{cases} \quad (9)$$

где p^1 – номер полосы сканирования, выбранной БЛА в первом проходе ($k = 1$); p^k – номер полосы сканирования, выбираемой БЛА в k -м проходе; k – номер прохода ($k = \overline{2, K}$); M_i^* – количество БЛА, назначенных на область S_i .

Соотношения (9) обеспечивают для соседних проходов ($k, k + 1$) выбор полос сканирования каждым БЛА в обратном порядке, что позволяет избежать пересечения в пространстве траекторий движения БЛА при выполнении разворотов для захода на точки входа полос сканирования, как это показано на рис. 3.

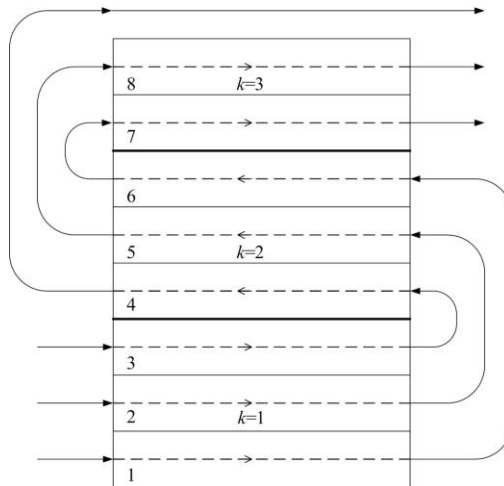


Рис. 3. Сканирование области S_i с общим числом полос $M_i = 8$ и числом распределенных БЛА $M_i^* = 3$ за число проходов $K = 3$

После завершения процедуры сканирования каждой области, соответствующие БЛА могут направляться в зону сбора группы для выполнения последующих задач.

Предложенные алгоритмы назначения БЛА на области и полосы сканирования ориентированы на их реализацию сетевидной системой группового управления, состоящей из бортовых устройств управления отдельных БЛА группы, объединенных каналами связи в вычислительную сеть.

Для экспериментальной проверки работоспособности предложенного подхода была разработана программная модель, реализующая алгоритмы назначения БЛА на области и полосы сканирования. Программная модель кроме модулей непосредственно реализующих процедуру назначения и отображения результатов моделирования, включает специальный редактор сценариев, позволяющий осуществлять размещение, удаление и перемещение объектов на рабочем поле.

Редактор позволяет также растягивать (сжимать) объекты по координатам, а также поворачивать их на заданный угол относительно геометрического центра. Предусмотрена возможность сохранения созданных сценариев в специальных файлах и загрузка готовых сценариев.

Примеры работы программной модели показаны на рис. 4–6. На рис. 4 представлены результаты распределения областей сканирования между БЛА группы с использованием жадного алгоритма.

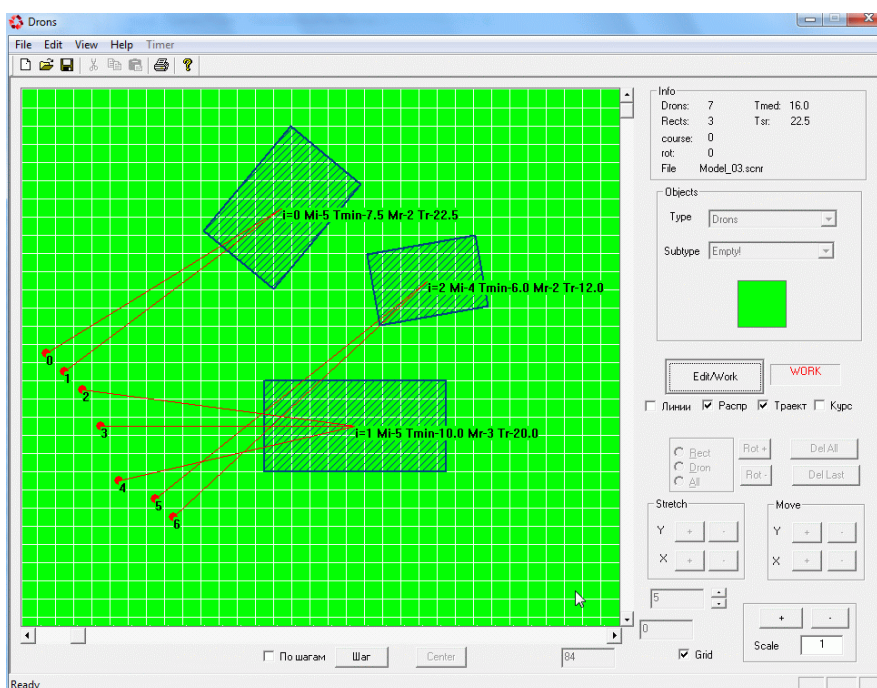


Рис. 4. Экранная форма программной модели, отображающая результаты распределения областей сканирования между БЛА группы с использованием жадного алгоритма

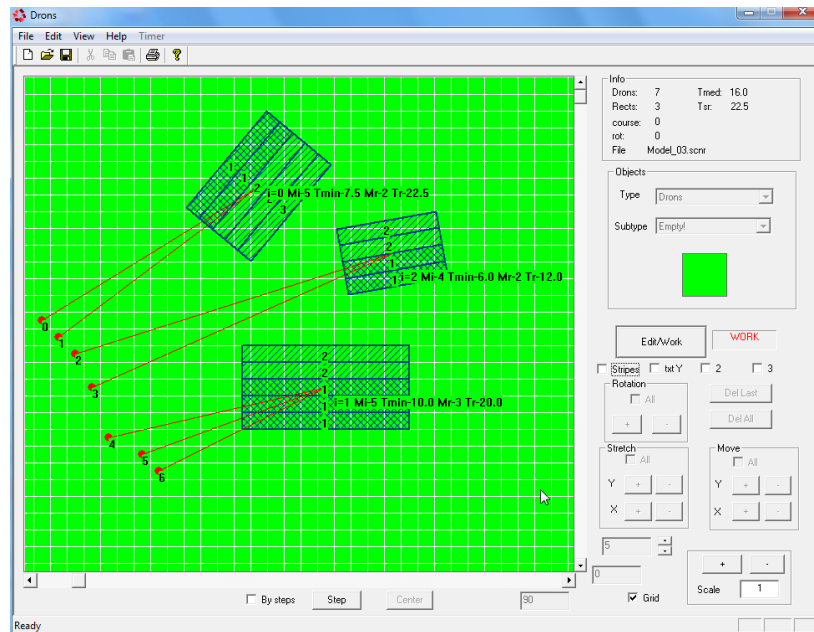


Рис. 5. Экранная форма программной модели, отображающая результаты распределения областей сканирования между БЛА группы с использованием венгерского алгоритма

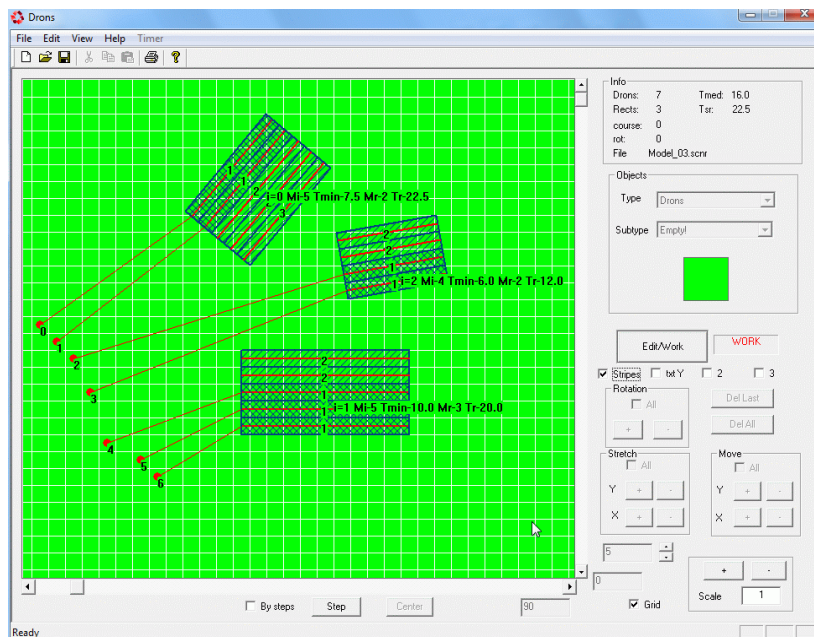


Рис. 6. Экранная форма программной модели, отображающая результаты распределения полос сканирования между БЛА с использованием венгерского алгоритма

Таблица 1

Оценки времени сканирования при различных вариантах распределения
БЛА по областям

	$n1$	$m1$	$m2$	$n2$	T_i	T
1	0	2	0	–	22.5	22.5
	1	3	0	–	20.0	
	2	2	0	–	12.0	
2	0	3	0	–	15.0	30.0
	1	2	0	–	30.0	
	2	2	0	–	12.0	
3	0	2	0	–	22.5	24.0
	1	4	0	–	20.0	
	2	1	0	–	24.0	
4	0	4	0	–	15.0	50.0
	1	1	0	–	50.0	
	2	2	0	–	12.0	
5	0	5	0	–	7.5	30.1
	1	0	5	0	30.1	
	2	2	0	–	12.0	

В данной таблице приняты следующие обозначения.

$n1$ – номер области сканирования;

$m1$ – количество БЛА, назначенных на область $n1$;

$m2$ – количество БЛА, назначенных на область $n1$ дополнительно из области с номером, задаваемым столбцом $n2$ (участвуют в сканировании области $n1$ по окончании сканирования своей области $n2$ и перелете к области $n1$);

T_i – полное время сканирования (в условных единицах) области с учетом времени сканирования группой из $m2$ БЛА своей области и времени перелета $m2$ БЛА к данной области сканирования, если $m2$ отлично от нуля.

T – полное время сканирования (в условных единицах) всех областей $\max(T_i (i = \overline{1, N}))$.

Как видно из табл. 1, первое распределение (светло-серый фон), полученное в результате использования рассмотренного выше подхода, обеспечивает минимальное время сканирования по сравнению с другими вариантами распределения.

Заключение. Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы.

Предложенные в работе методы и алгоритмы решения задачи распределения областей сканирования между БЛА группы просты и обладают невысокой вычислительной сложностью, что позволяет их реализацию бортовыми устройствами управления отдельных БЛА группы, объединенных каналами связи в вычислительную сеть.

В отличие от известных работ [8, 9, 11, 13, 15–17], в которых рассматривается проблема группового управления БЛА при решении различных целевых задач и в которых основное внимание уделяется вопросам отработки заранее спланированных траекторий движения отдельных БЛА, в данной работе предложен подход к автономному планированию траекторий, позволяющий минимизировать пересечения траекторий и тем самым снизить риск столкновений БЛА друг с другом в процессе функционирования.

Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного подхода и показывают, что удастся получить близкий к оптимальному вариант назначения БЛА на области сканирования с точки зрения минимизации суммарных временных затрат и обеспечения безопасности перемещения БЛА группы к полосам сканирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов В.Б., Теряев Е.Д. Беспилотные летательные аппараты: некоторые вопросы развития и применения (обзор по материалам публикаций в Интернете) // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – 2008. – № 2. – С. 12-23.
2. Божко Н.А., Баховчук А.М., Мытько Л.Р. Применение беспилотных летательных аппаратов при проектировании и содержании автомобильных дорог // Наука – образованию, производству, экономике: Материалы 13-й Международной научно-технической конференции. – 2015. – № 3. – С. 60.
3. Полтавский А.В., Жумабаева А.С., Бикеев Р.Р. Многофункциональные комплексы беспилотных летательных аппаратов: Развитие в системе вооружения // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 39-46.
4. Присяжнюк С.П. Беспилотные летательные аппараты в лесопромышленном комплексе: возможности новых технологий // Геоинформатика. Специальный выпуск. – 2012. – № 1. – С. 6-11.
5. Савин И.Ю., Вернюк Ю.И., Фараслис И. Возможности использования беспилотных летательных аппаратов для мониторинга продуктивности почв // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2015. – № 80. – С. 95-106.
6. Цариченко С.Г., Родищенко Н.С. Беспилотные летательные аппараты, как средство повышения эффективности оперативно-тактической деятельности пожарно-спасательных подразделений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С. 14-24.
7. Puri A., Valavanis K.P., Kontitsis M. Statistical Profile Generation for Traffic Monitoring Using Real-time UAV based Video Data // Control & Automation, 2007. MED'07. Mediterranean Conference on. IEEE, 2007. – P. 1-6.
8. Гайдук А.Р., Капустян С.Г., Меркулов В.И., Бесклубова К.В. Групповое управление БЛА // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2014. – № 11. – С. 24-36.
9. Chandra R.S., Breheny S.H., D'Andrea R. Antenna array synthesis with clusters of unmanned aerial vehicles // Automatica. – 2008. – No. 44. – P. 1976-1984.
10. Franchi A., Secchi C., Ryll M., Bulthoff H.H. & Giordano P.R. Shared control: Balancing autonomy and human assistance with a group of quadrotor UAVs // Robotics & Automation Magazine, IEEE. – 2012. – Vol. 19 (3). – P. 57-68.
11. Kingston D., Beard R.W., Holt R.S. Decentralized perimeter surveillance using a team of UAVs // IEEE Transactions on Robotics. – 2008. – No. 24. – P. 1394-1404.
12. Casbeer D.W. [et al.]. Forest fire monitoring with multiple small UAVs // Proceedings of the 2005 American Control Conference. – 2005. – P. 3530-3535.
13. Spry S.C., Girard A.R., Hedrick J.K. Convoy Protection using Multiple Unmanned Aerial Vehicles: Organization and Coordination // Proc. of the 24th American Control Conference, Portland, OR., June 2005.
14. Tonetti, S., Hehn, M., Lupashin, S., D'Andrea, R. Distributed control of antenna array with formation of UAVs // In World Congress. – 2011, August. – Vol. 18, No. 1. – P. 7848-7853.
15. Chung J. Cooperative Control of UAVs Using a Single Master Subsystem for Multi-task Multi-target Operations // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2015. – Vol. 345. – P. 193-212.
16. Меркулов В.И., Самодов И.О. Исследование эффективности коллективного управления беспилотными летательными аппаратами в составе локальной сети // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2014. – № 3. – С. 39-42.
17. Верба В.С., Меркулов В.И., Садовский П.А. Групповое управление беспилотными летательными аппаратами. Возможности и ограничения // Полет. – 2015. – № 8, 9. – С. 16-23.
18. Трифонов А.Г. Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения // SoftLine Co. Свободный режим доступа: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/index.php (дата обращения: 25.08.2016).

19. Усачев Л.Ж., Дьяченко А.А. Способ формирования строя в группе БЛА // Материалы конференции "Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах" (УТЭОСС-2012).– СПб.: ГИЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электронприбор", 2012. – С. 1220-1223.
20. Усачев Л.Ж., Иванов Д.Я. Выбор целей движения при изменении строя в группе БЛА // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014 г.: Труды. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 2015-2020. ISBN 978-5-91450-151-5. Номер государственной регистрации: 0321401153.

REFERENCES

1. Sokolov V.B., Teryaev E.D. Bepilotnye letatel'nye apparaty: nekotorye voprosy razvitiya i primeneniya (obzor po materialam publikatsiy v Internetе) [Drones: some questions of development and application (review of the published materials on the Internet)], *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2008, No. 2, pp. 12-23.
2. Bozhko N.A., Bakhovchuk A.M., Myr'ko L.R. Primenenie bepilotnykh letatel'nykh apparatov pri proektirovani i soderzhanii avtomobil'nykh dorog [The use of unmanned aerial vehicles in the design and maintenance of roads], *Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike: Materialy 13-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Science – education, production, economy: Materials of 13th International scientific and technical conference], 2015, No. 3, pp. 60.
3. Poltavskiy A.V., Zhumabaeva A.S., Bikeev R.R. Mnogofunktsional'nye komplekсы bepilotnykh letatel'nykh apparatov: Razvitie v sisteme vooruzheniya [Multifunctional complexes of unmanned aerial vehicles, the Development of weapons systems], *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems], 2016, No. 1 (13), pp. 39-46.
4. Prisyazhnyuk S.P. Bepilotnye letatel'nye apparaty v lesopromyshlennom komplekse: vozmozhnosti novykh tekhnologiy [Unmanned aerial vehicles in the timber industry: new technologies], *Geoinformatika. Spetsial'nyy vypusk* [Geoinformatics. Special edition], 2012, No. 1, pp. 6-11.
5. Savin I.Yu., Vernyuk Yu.I., Faraslis I. Vozmozhnosti ispol'zovaniya bepilotnykh letatel'nykh apparatov dlya monitoringa produktivnosti pochv [The possibility of using unmanned aerial vehicles to monitor the productivity of soils], *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva* [Bulletin of Soil Institute. V. V. Dokuchaev], 2015, No. 80, pp. 95-106.
6. Tsarichenko S.G., Rodinchenko N.S. Bepilotnye letatel'nye apparaty, kak sredstvo povysheniya effektivnosti operativno-takticheskoy deyatelnosti pozharно-spasatel'nykh podrazdeleniy [Unmanned aerial vehicles as a means to increasing the efficiency of tactical activity of fire and rescue units], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 1 (162), pp. 14-24.
7. Puri A., Valavanis K.P., Kontitsis M. Statistical Profile Generation for Traffic Monitoring Using Real-time UAV based Video Data, *Control & Automation, 2007. MED'07. Mediterranean Conference on. IEEE, 2007*, pp. 1-6.
8. Gayduk A.R., Kapustyan S.G., Merkulov V.I., Besklubova K.V. Gruppovoe upravlenie BLA [Group control UAV], *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and control system], 2014, No. 11, pp. 24-36.
9. Chandra R.S., Breheny S.H., D'Andrea R. Antenna array synthesis with clusters of unmanned aerial vehicles, *Automatica*, 2008, No. 44, pp. 1976-1984.
10. Franchi A., Secchi C., Ryll M., Bulthoff H.H. & Giordano P.R. Shared control: Balancing autonomy and human assistance with a group of quadrotor UAVs, *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 2012, Vol. 19 (3), pp. 57-68.
11. Kingston D., Beard R.W., Holt R.S. Decentralized perimeter surveillance using a team of UAVs, *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, No. 24, pp. 1394-1404.
12. Casbeer D.W. [et al.]. Forest fire monitoring with multiple small UAVs, *Proceedings of the 2005 American Control Conference*, 2005, pp. 3530-3535.
13. Spry S.C., Girard A.R., Hedrick J.K. Convoy Protection using Multiple Unmanned Aerial Vehicles: Organization and Coordination, *Proc. of the 24th American Control Conference, Portland, OR., June 2005*.

14. Tonetti, S., Hehn, M., Lupashin, S., D'Andrea, R. Distributed control of antenna array with formation of UAVs, *In World Congress*, 2011, August, Vol. 18, No. 1, pp. 7848-7853.
15. Chung J. Cooperative Control of UAVs Using a Single Master Subsystem for Multi-task Multi-target Operations, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015, Vol. 345, pp. 193-212.
16. Merkulov V.I., Samodov I.O. Issledovanie effektivnosti kollektivnogo upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami v sostave lokal'noy seti [Study of the effectiveness of collective management of unmanned aerial vehicles as part of the local network], *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and control system], 2014, No. 3, pp. 39-42.
17. Verba V.S., Merkulov V.I., Sadovskiy P.A. Gruppovoe upravlenie bespilotnymi letatel'nymi apparatami. Vozможности i ogranicheniya [Group control of unmanned summer-tive devices. Possibilities and limitations], *Polet* [Flight], 2015, No. 8, 9, pp. 16-23.
18. Trifonov A.G. Postanovka zadachi optimizatsii i chislennyye metody ee resheniya [Formulation of optimization problem and numerical methods of its solution], SoftLine So. Free access mode: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/index.php (accessed 25 August 2016).
19. Usachev L.Zh., Dyachenko A.A. Sposob formirovaniya stroya v gruppe BLA [A method of forming a system in the group blah BLAH], *Materialy konferentsii "Upravlenie v tekhnicheskikh, ergaticheskikh, organizatsionnykh i setevykh sistemakh" (UTEOSS-2012)* [Materials of the conference "Control in technical, ergatic, organizational and network systems" (UTEOS-2012)]. St. Petersburg: GNTs RF OAO "Kontsern "TsNII "Elektropribor", 2012, pp. 1220-1223.
20. Usachev L.Zh., Ivanov D.Ya. Vybór tseley dvizheniya pri izmenenii stroya v gruppe BLA [The choice of the objectives of the movement when you change the system in the group blah BLAH], *XII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014. Moskva, 16-19 iyunya 2014 g.: Trudy* [XII all-Russian meeting on control problems VCPU-2014. Moscow, June 16-19, 2014: Proceedings]. Moscow: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2014, pp. 2015-2020. ISBN 978-5-91450-151-5. Number of state registration: 0321401153.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Э.В. Мельник.

Каляев Игорь Анатольевич – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН); e-mail: kaliaev@mvs.sfedu.ru; 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41; тел.: 8863460757; академик РАН; д.т.н.; профессор; главный научный сотрудник.

Капустян Сергей Григорьевич – e-mail: kap56@mail.ru; тел.: 88634361594; д.т.н.; ведущий научный сотрудник.

Усачев Леонид Жанович – Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем им. академика А.В. Каляева ЮФУ; e-mail: leon57@hotmail.ru; г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: 88634361594; к.т.н.; старший научный сотрудник.

Kalyaev Igor Anatolievich – Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences; e-mail: kaliaev@mvs.sfedu.ru; 41, Chekhov av., Rostov-on-Don, 344006, Russia; phone: +78634360757; academician of RAS; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.

Kapustyan Sergey Grigorievich – e-mail: kap56@mail.ru; phone: +78634361594; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Usachev Leonid Zhanovich – Acad. Kalyaev Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems SFedU; e-mail: kap56@mail.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, Russia; phone: +78634361594; cand. of eng. sc.; senior researcher.