

УДК 629.7.017.1

## Методика построения субоптимальных маршрутов для группы беспилотных летательных аппаратов на основе биоинспирированных алгоритмов при наличии препятствий

Иванов С. В.

**Постановка задачи:** Применение различных алгоритмов решения задачи коммивояжера, таких как метод ветвей и границ, генетический алгоритм, алгоритм имитации отжига, жадный алгоритм, зачастую не учитывают реальных возможностей вычислительных машин, способных их реализовать. Повышенные требования предъявляются к бортовым вычислителям беспилотных летательных аппаратов (БЛА), осуществляющих специфические задачи в условиях неблагоприятной внешней среды. Увеличивать возможности бортового вычислителя до варианта электронной вычислительной машины, реализующей функции расчета на «земле», не представляется, в настоящее время, возможным из-за ограничений, связанных с массово-габаритными показателями аппарата. Поэтому вопросы синтеза алгоритмов оптимизации с целью удовлетворения требований к аппаратно-программной части беспилотного летательного аппарата военного назначения остаются самостоятельной проблемой. **Целью работы** является построение алгоритма решения задачи коммивояжера, основанного на совместном использовании муравьиного и генетического алгоритмов, что позволит реализовать вычислительные процедуры алгоритмов решения различных специальных задач, требующие от вычислителя больших объемов памяти и высокой скорости обработки информации. **Используемые методы:** для решения задачи поиска целевых объектов противника в условиях неблагоприятных действий внешней среды наиболее подходящими по своей вычислительной сложности, оптимальному времени на поиск, и отвечающими требованиям бортовых вычислителей, являются муравьиный и генетический алгоритмы. В качестве критериев оптимизации решаемой задачи в работе предлагается использовать максимизацию количества точек в маршруте и минимизацию времени их облета БЛА. **Новизна:** элементами новизны представленной работы являются с одной стороны, применение комплексного критерия, включающего в себя минимизацию времени решения задачи и максимизацию количества точек облета маршрута, а с другой стороны, построение процедуры итеративного исключения «подциклов», входящих в структуру алгоритма, что позволяет разрешить NP-сложность решения такого типа задач за полиномиальное время. **Результат:** использование представленного алгоритма поиска субоптимального решения задачи коммивояжера с учетом приоритета целей, неравнозначности точек облета и, возникающих на пути препятствий, в условиях дестабилизирующих воздействий противника позволило обеспечить требуемые вычислительные возможности бортового вычислителя БЛА при максимальном покрытии зоны облета. Предложена процедура сужения полного множества оптимальных маршрутов облета неравноценных точек до парето-оптимального множества. Разработанные программы на языке C++, и построенная информационно-вычислительная система с визуальным интерфейсом позволили провести оценку сложности алгоритмов. Комплексирование методов имитации отжига, муравьиного алгоритма с генетическим алгоритмом для решения поставленной задачи позволило снизить время работы алгоритма на 13% по сравнению с методом ветвей и границ. **Практическая значимость:** выполненные в работе исследования показали, что предложенный алгоритм может быть реализован в виде программы, записанной в память современного бортового спецвычислителя БЛА, что позволит осуществлять автономный полет группой БЛА на больших территориях и охватывать более 66 точек облета.

**Ключевые слова:** группа беспилотных летательных аппаратов, метод имитации отжига, генетический алгоритм, задача коммивояжера, муравьиный алгоритм, система поддержки принятия решений, вычислительная сложность.

### Библиографическая ссылка на статью:

Иванов С. В. Методика построения субоптимальных маршрутов для группы беспилотных летательных аппаратов на основе биоинспирированных алгоритмов при наличии препятствий // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 2. С. 1-23. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-1-23

### Reference for citation:

Ivanov S. V. A method for constructing suboptimal routes for a group of unmanned aerial vehicles based on bioinspired algorithms in the presence of obstacles. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 2, pp. 1-23 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-1-23

### Актуальность

В работах И.А. Каляева, А.Р. Гайдука, С.Г. Капустяна [2]; Н.Р. Халимова, А.В. Мефедова [3]; В.С. Вербы, В.И. Меркулова [4]; В.Н. Евдокименкова, М.Н. Красильщикова, Г.Г. Себрякова [5] анализируются и предлагаются современные подходы к построению распределенных систем управления группами беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Однако в данных работах недостаточно внимания уделено вопросам построения оптимального маршрута с учетом деструктивных воздействий внешней среды, учета внезапно возникающих препятствий и различного приоритета целевых точек. Поэтому учет всех вышеизложенных ограничений является неотъемлемой и весьма важной частью исследования.

В работе [1] проведен анализ методов решения задачи коммивояжера для построения маршрута передачи сетевых пакетов по локально-вычислительной сети. Однако авторами в данной предметной области не учитывались ограничения, связанные с препятствиями и приоритетом целевой точки.

Поэтому, в работе, при рассмотрении группировки БЛА в условиях деструктивных воздействий противника приходится учитывать наложенные ограничения.

В настоящее время, построение системы поддержки принятия решений осуществляется преимущественно машинными методами [6]. Решение специфических задач посредством применения БЛА, таких как проведение разведки и нанесение удара по объектам противника обуславливает наличие ограничений на временные показатели и своевременность выполнения задач по предназначению в условиях внезапно меняющейся обстановки в районе проведения разведывательно-ударных действий [7]. С целью сокращения времени на выполнение задач по предназначению и оптимизации вычислительных возможностей на борту БЛА в работе предлагается рассмотрение задачи поиска неравнозначных точек облета и решение задачи оптимальной маршрутизации.

Существующие алгоритмы поиска оптимального маршрута рассмотрены в довольно-таки большом разнообразии [1, 8, 9, 10, 11]. Эти алгоритмы предусматривают решение задачи коммивояжера, суть которой состоит в прохождении всех вершин графа хотя бы один раз.

Анализ, изложенный в статье [1], явно показывает невозможность и слабую реализуемость жадного алгоритма. Хотя реализация данного алгоритма и не требует «больших» вычислительных возможностей и характеризует низкую алгоритмическую сложность, низкая его эффективность с точки зрения проложенного маршрута, когда осуществляется поиск кратчайшего расстояния между вершинами графа, и возникает необходимость «платить за жадность» на последних шагах, не позволяет найти оптимальное решение задачи коммивояжера в условиях противодействия противника и неблагоприятных условиях обстановки.

Другие алгоритмы, проанализированные в [1, 9, 11], не учитывают особенностей физической постановки различных задач и формулируются как *NP*-сложные (недетерминированно-полиномиальные). Это означает, что не су-

ществует алгоритма, который находил бы точное решение задачи коммивояжера за полиномиальное время.

Единственным алгоритмом, который, в принципе, может гарантировать нахождение точного решения, является метод полного перебора. Однако работа программы, реализующая этот алгоритм, занимает адекватное время только при очень малой размерности входных данных (при количестве точек облета менее 15) [9].

В связи с отсутствием эффективных точных методов решения задачи коммивояжера становится необходимым использование эвристических методов, основанных на некоей эвристике (правиле), не всегда следующей из строгих математических принципов, в подавляющем большинстве случаев, дающих решение, близкое к точному.

Одной из возможных для практической реализации задач, в которой могут быть использованы алгоритмы решения задачи коммивояжера, является задача поиска целевых объектов группой БЛА [12]. Особенностью постановки задачи облета всех точек группой БЛА является высокая динамика и влияние внешней среды на объекты при выполнении задач по предназначению.

В работе предлагается представить результаты проведенных исследований, касающиеся построения двух новых алгоритмов поиска целевых объектов противника на основе трех эффективных поисковых алгоритмов.

Проведенные компьютерные исследования и разработанные в среде C++ программы показали, что для решения задачи поиска целевых объектов противника в условиях неблагоприятных действий внешней среды наиболее подходящими по своей вычислительной сложности, оптимальному времени на поиск и соответствующими возможностям бортовых вычислителей являются алгоритм имитации отжига, генетический и муравьиный алгоритмы.

В работе предложены два новых синтезированных алгоритма поиска оптимального маршрута. Разработаны программные коды на языке C++, проведена оценка вычислительной эффективности предложенных алгоритмов и реализация их на современных бортовых вычислителях.

### Постановка задачи

Рассматриваемая задача может быть сформулирована следующим образом.

Пусть

$$\omega = \langle N, P, U, D, \theta, \Omega \rangle,$$

где:  $N$  – множество БЛА (с известными летно-техническими характеристиками с заданными начальным  $x_0$ ,  $y_0$  и конечным  $x_k$ ,  $y_k$  местоположением в декартовой системе координат), состоящее из  $q$  одиночных БЛА  $R_q$ ,  $q = 1, \dots, m$ ;  $P$  – множество точек земной поверхности (вершин графа)  $(x, y)$  в декартовой системе, состоящее из  $j$  координат  $P_j$ ,  $j = 1, \dots, k$ ,  $k > i$ ;  $k$  – количество БЛА, выполняющее задачу в подгруппе, а  $l_k$  – количество точек, которые отдельно взятые члены группы должны облететь;  $U$  – множество связей (рёбер) между точками земной поверхности (вершинами графа), состоящее из  $i$  связей  $U_i$ ,

$i = 1, \dots, l$ ;  $F$  – множество информационных ресурсов (полезной информации), необходимой для сбора по средствам БЛА и дальнейшей передачи на пункт управления  $F_g$ ,  $g = 1, \dots, s$ ;  $\theta$  – множество внешних воздействий на группу БЛА  $\theta_f$ ,  $f = 1, \dots, v$ ;  $\Omega$  – множество препятствий (особенностей рельефа местности)  $\Omega_p$ ;  $p = 1, \dots, t$ .

Функция, описывающая множество маршрутов пролета БЛА из состава группы, имеет следующий вид:

$$M = f(P, U). \quad (1)$$

### Ограничения и допущения

В данной работе были введены следующие ограничения и допущения:

$V_{кр} = \text{const}$ , где  $V_{кр}$  – крейсерская скорость БЛА в режиме установившегося горизонтального полета в км/ч;

$\Delta S \rightarrow 0$ , где  $\Delta S$  – смещение траектории под воздействием силы ветра в м;

$S_{\max}$  – максимальная дальность полета БЛА в км;

$r_{\min} \rightarrow 0$ , где  $r_{\min}$  – минимальный радиус разворота БЛА (в точках  $P_j$  происходит мгновенный поворот к следующей точке);

$k_{p1} = k_{p2} = \dots = k_{pn}$ , где  $k_{pn}$  – приоритет важности  $n$ -й цели;

$d_{p1} = d_{p2} = \dots = d_{pn}$ , где  $d_{pn}$  – вес  $n$ -й цели (вид цели).

В работе предлагается, что для полносвязного графа  $K_n$  любая перестановка из  $n$  вершин, будет задавать гамильтонов цикл (все соседние вершины в перестановке – смежные).

Каждый БЛА обходит свои точки в своем графе и их траектории полета между собой не пересекаются.

### Выбор критерия качества

Определим критерии качества для каждой из сформулированных задач.

Для решения задачи максимизации количества точек в маршруте целесообразно использовать следующий критерий, подлежащий максимизации [10]:

$$P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} p_j \rightarrow \max, (i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m; i \neq j), \quad (2)$$

где:  $p_j$  – весовой коэффициент, характеризующий эффект от включения точки с номером  $j$  в маршрут полета;  $x_{ij}$  – целочисленная булева переменная,  $x_{ij} \in \{0, 1\}$ .

Если  $x_{ij} = 1$ , то, двигаясь по маршруту, БЛА из точки  $j$  перелетает в точку  $i$ , а если  $x_{ij} = 0$ , то перелёт не предусмотрен.

Время выполнения задачи группой БПЛА по облету целей  $T_k$  состоит из времени планирования полета  $\tau_p^*$ , времени подготовки комплекса с БЛА к полету и предполагаемого времени  $\tau_f$  облета всех целей группой БЛА. Время при-

нения решения по применению войск (сил), т.е. планирования полета, регламентировано руководящими документами и не должно быть больше некоторого  $\tau_p$ . Время подготовки комплекса с БЛА к полету определено ТТХ комплекса с БЛА и минимизировать его не представляется возможным.

Для решения задачи минимизации времени полета БЛА в качестве критерия предлагается использовать время выполнения комплексной задачи [10]:

$$T_k = \tau_p^* + \tau_f \rightarrow \min. \quad (3)$$

Оптимизируемая функция эффективности дискретна и немонотонна, в своей области определения и имеет большое количество локальных экстремумов.

**Требуется:** для решения задачи минимизации времени полета БЛА за минимальное время  $\tau_p^*$  (но не более  $\tau_p$ ) сформировать такой план полета группы БЛА  $\Pi^*$ , который бы удовлетворял требованию минимума времени полета группы БЛА  $\tau_f$  при максимальном количестве целей  $P_j$  и имеющихся БЛА  $R_q$ .

$$\Pi^* \in \Pi : T_k \rightarrow \min, \quad (4)$$

где:  $\Pi^* = \bigcup_{q=1}^m \Pi_q$ ,  $\Pi_q = \langle P_{q1}, P_{q2}, \dots, P_{qk_q} \rangle$ ;  $\Pi$  – план полета группы БЛА;  $\Pi_q$  – план полета  $q$ -го БЛА;  $k_q$  – количество точек в плане полета  $q$ -го БЛА;  $T_k$  – время выполнения комплексной задачи;  $\tau_p$  – регламентированное время планирования полета группы БЛА, определенное руководящими документами;  $\tau_p^*$  – время планирования полета группы БЛА, при чем  $\tau_p^* \leq \tau_p$ ;  $\tau_f = \max \tau_q$ , где  $\tau_q = S(\Pi_q) \cdot V_{кр}$ ,  $S(\Pi_q)$  длина маршрута  $R_q$ , причем  $S(\Pi_q) \leq S_{\max}$ .

### Решение задачи планирования оптимального маршрута облета неравноценных точек в условиях наличия препятствий

В связи с тем, что данная работа посвящена решению задачи коммивояжера в условиях городского цикла, в ее основе лежит полный ориентированный граф [13]. Это означает, что ребра существуют между каждой парой пунктов и «затраты» на пролет между двумя пунктами не зависят от направления движения. Пролет осуществляется таким образом, что если БЛА пролетел вершину графа один раз, то больше он к ней не возвращается.

Для решения задачи построения оптимального плана полета группой БЛА в работе используется модифицированный алгоритм построения субоптимального маршрута, базирующийся на синтезе генетического алгоритма и метода отжига [4]. В работе [1] проведен анализ следующих эвристических методов и алгоритмов стохастической оптимизации: муравьиный алгоритм, метод ветвей и границ, генетический алгоритм, а также жадный алгоритм и метод отжига. Анализ существующих алгоритмов показал, что наиболее эффективными методами являются генетический, муравьиный алгоритм и метод отжига.



В условиях ограничений, накладываемых на возможности поиска целевых неравнозначных объектов, связанных с наличием препятствий и возможных угроз со стороны вероятного противника в работе проводятся исследования прямой зависимости алгоритма «ветвей и границ» [15] с вновь разработанными в работе алгоритмами.

По сути, метод «ветвей и границ» является усовершенствованным методом «полного перебора» с последовательным отсеком решений, кажущихся невыгодными [9]. Его работа заключается в последовательном разбиении множества допустимых решений. На каждом шаге алгоритма элементы разбиения (подмножества) подвергаются анализу – содержит ли данное подмножество оптимальное решение или нет (анализируется ветвь на возможность ее дальнейшего включения в итоговый оптимальный маршрут). В результате основным недостатком метода является отсутствие гарантий нахождения точного решения задачи и существенного увеличения времени на его поиск [12].

Другой альтернативой алгоритму «полного перебора» является «генетический алгоритм», использующий механизм эволюции, который представляет собой естественный отбор [1]. Его суть состоит в том, что выбирается самая качественная особь (цикл) из всего множества особей, однако результатом использования алгоритма не всегда становится оптимальное решение из-за того, что вершины в цикле меняются случайным образом, и выбираются всегда лучшие решения, что приводит к ложному оптимуму, не всегда близкому к точному.

В процессе нахождения оптимального маршрута, выбранные генетическим алгоритмом особи используются для расчета оптимального маршрута методом отжига. Итоговый наикратчайший маршрут выбирается из всех оптимальных особей и строится одним из наиболее «легких» по своим вычислительным характеристикам, алгоритмом имитации «отжига» – приближенным методом решения задачи поиска минимума.

«Отжиг» – это процесс остывания вещества, при котором молекулы на фоне замедляющегося теплового движения собираются в наиболее энергетически выгодные конфигурации [1].

Каждому маршруту соответствует определенная протяженность между вершинами. Цель «отжига» – привести маршрут в состояние с наименьшей протяженностью. Чем ниже уровень энергии, тем «меньше» протяженность маршрута. Вершины выстраиваются в состояние с наименьшей протяженностью, однако, с определенной вероятностью они могут перейти и в состояние с большей протяженностью. Эта вероятность уменьшается вместе с температурой. Переход в худшее состояние помогает отыскать маршрут с меньшей протяженностью, чем начальная. Процесс завершается, когда температура падает до заранее заданного значения.

Увеличение на ранних этапах поиска вероятности возвращения к более плохому маршруту оптимального пути позволяет значительно приблизиться к максимально точному решению и не попасть в ложный оптимальный маршрут [2].

Альтернативным методом решения задачи коммивояжера является муравьиный алгоритм. Муравьиный алгоритм позволяет находить приближенные

решения задачи коммивояжера. Основной идеей муравьиного алгоритма является имитация поведения муравьиной колонии при поиске еды [1]. Проходя маршрут от одной вершины графа (жилища) до другой вершины графа (источника пищи), муравьи (агенты) оставляют после себя след феромона, то есть повышают значимость ребра, которая со временем уменьшается (испаряется). Значимость ребра на маршруте зависит от длины маршрута и от количества агентов, которые прошли по маршруту. Сложностью реализации муравьиного алгоритма является зависимость поиска от настроечных параметров, которые подбираются только исходя из экспериментов. Отсутствие организации получения экспертных оценок при решении задачи облета целевых объектов противника практически отсутствует, что осложняет получение значений, наиболее приближенных к точным.

Методика построения субоптимального маршрута поиска неравнозначных целевых объектов может быть реализована в виде следующих последовательных этапов.

**Этап 1.** Определяются зоны облета БЛА –  $S_j$  и точки истока (начала маршрута) на земной поверхности. Вычисляется минимальное расстояние от каждого БЛА группы до точки истока.

Расстояние от каждого БЛА (точки истока) до ближайшего ППМ соответственно рассчитывается по следующей формуле:

$$D_{s_j} = \sqrt{(x_{s_j} - x_{R_q})^2 + (y_{s_j} - y_{R_q})^2}, \quad (5)$$

где:  $D_{s_j}$  –наикратчайшее эвклидово расстояние от точки расположения  $q$ -го БЛА до  $j$ -й целевой области  $S_j$ ,  $j = 1..k$ ;  $(x_{s_j}, y_{s_j})$  – координаты исходной точки  $j$ -й целевой области;  $(x_{R_q}, y_{R_q})$  – координаты  $q$ -го БЛА.

Геометрическая интерпретация представленного этапа методики представлена на рис. 1.

Выбираются точки истока, исходя из минимального значения расстояния между координатами расположения  $q$ -го БЛА и точками начала маршрутов. Данные точки назначаются точками истока графов, которые будут построены на разбиении множества всех точек облета.

Выбираются точки истока, исходя из минимального значения расстояния между координатами расположения  $q$ -го БЛА и точками начала маршрутов. Данные точки назначаются точками истока графов, которые будут построены на разбиении множества всех точек облета.

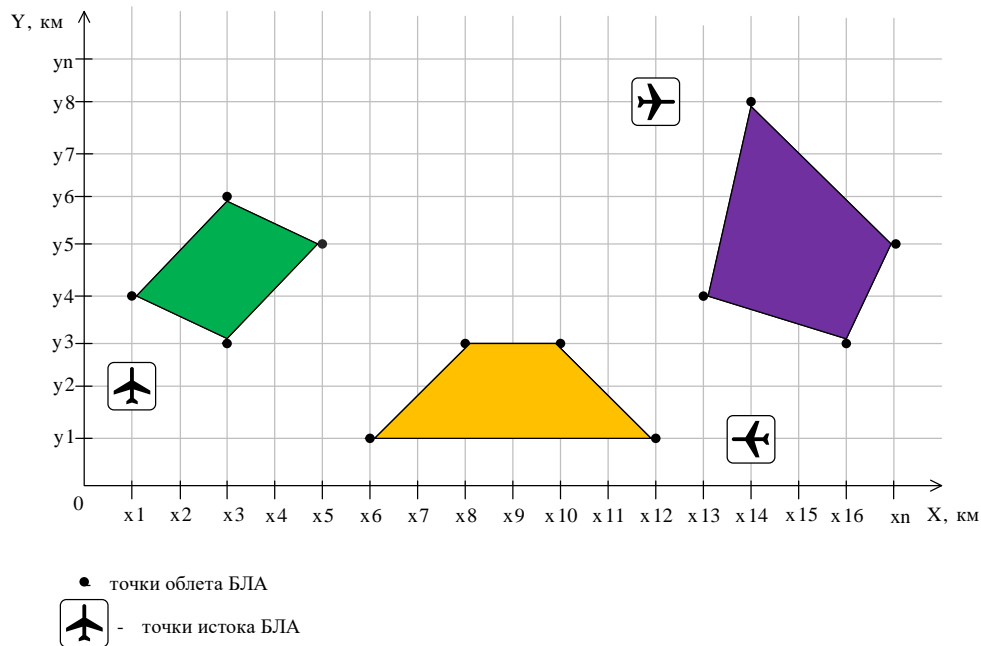


Рис. 1. Геометрическая интерпретация положения группы БЛА и зон облета на земной плоскости

**Этап 2.** Разбивается множество точек плоскости (точек облета) на  $K$  полносвязных графов (по количеству БЛА),  $K=N$ , где  $N$  – количество БЛА в группе с истоками, назначенными в вершинах, так чтобы каждый БЛА мог обойти свои точки, назначенные ему в графе при этом пересечения с соседними БЛА должны быть исключены (рис. 2). Математически, представленный этап методики описывается соотношением:

$$S_j \Rightarrow K_j \{P_1, P_2, \dots, P_l\}, j = 1 \dots N. \quad (6)$$

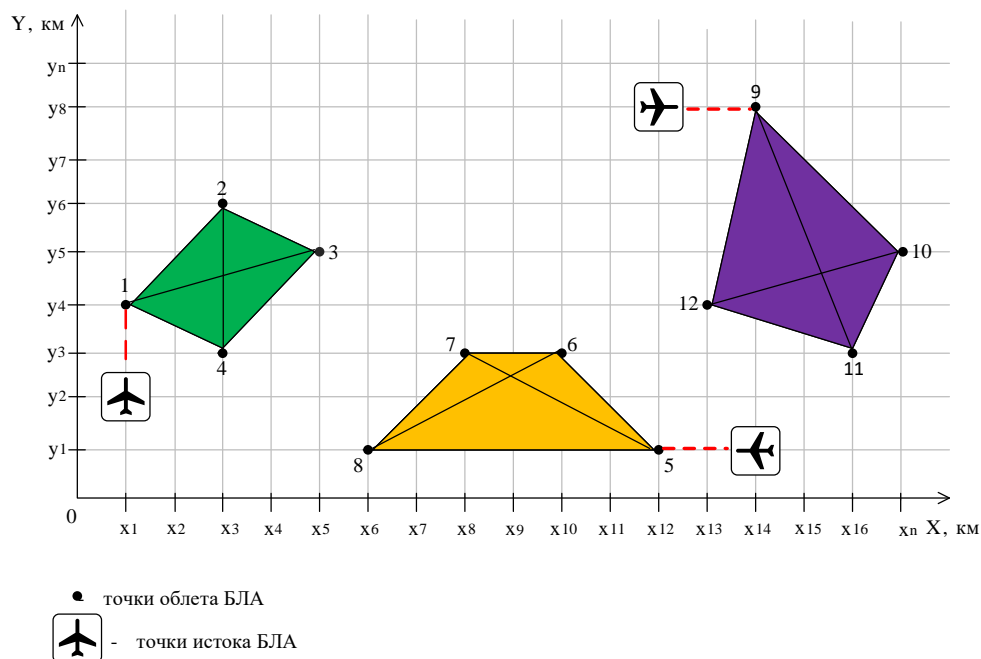


Рис. 2. Разбиение множества точек плоскости на  $K$  полносвязных графов



**Этап 3.** Выбирается кратчайший маршрут облета каждым БЛА группы в соответствии со своим положением в пространстве. БЛА начинает движение по соответствующим (ППМ):

- БЛА 1 – маршрут 1: 1→2→3→4;
- БЛА 2 – маршрут 2: 5→6→7→8;
- БЛА 3 – маршрут 3: 9→10→11→12.

Схема поиска оптимального маршрута группой БЛА без учета процедуры формирования приоритета представлена на рис. 3.

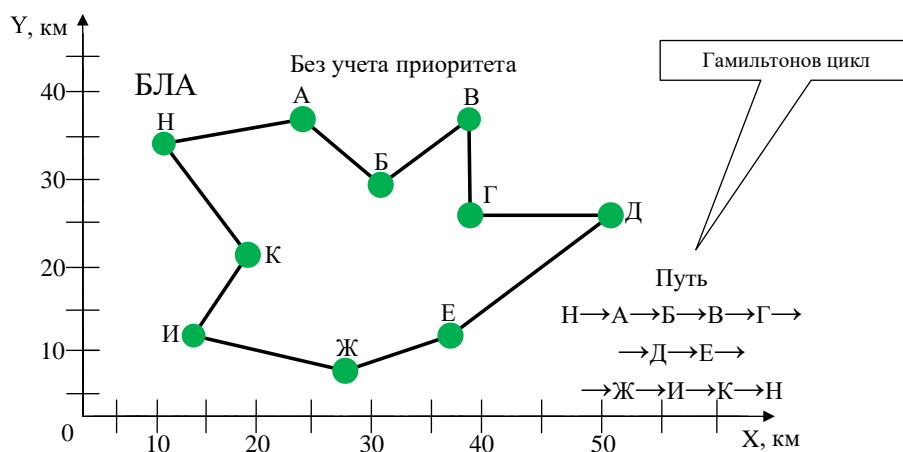


Рис. 3. Схема поиска маршрута без учета формирования приоритета

На рис. 3 изображен циклический субоптимальный маршрут прохождения всех точек без учета процедуры формирования приоритета. Облет всех точек маршрута необходимо осуществить по кругу, начиная с точки *H* и, пройдя все точки маршрута, возвратиться в исходную вершину графа. Процедура облета всех точек маршрута проводится аналогично алгоритму «ветвей и границ» [4]. Наибольшую эффективность с точки зрения достижения глобального максимума за минимальное время показал синтезированный метод, основанный на генетическом и муравьином алгоритмах с целью решения задачи коммивояжера:

$$L_{o,i} \approx L_{\min,i}, i = 1 \dots n, \quad (7)$$

где:  $L_{o,i}$  – субоптимальный маршрут, построенный на основе синтезированных алгоритмов;  $L_{\min,i}$  – кратчайший маршрут, построенный на основе синтезированных алгоритмов;  $n$  – количество особей.

**Этап 4.** Формируется процедура учета препятствий. В условиях решения реальной физической задачи облета максимального количества точек  $P$  за минимальное возможное время  $T$  целесообразно рассмотреть процедуру учета, возникающих на пути препятствий, и построения маршрута их облета  $L_{o,i}$ . [5].

В качестве таких препятствий могут выступать рельеф местности, ветровые возмущения, огневое поражение ПВО противника или радиоэлектронное подавление (РЭП) противника. Процедура учета препятствий геометрически представлена на рис. 4.

На рис. 4 изображены возможные маршруты прохождения БЛА. Основной цикл прохождения  $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow Ж \rightarrow C \rightarrow A$ . Маршрут построен таким образом, что траектория полета БЛА не должна пересекаться с возможными препятствиями или возможной зоной воздействия со стороны станции РЭБ противника, описываемой окружностью радиуса  $R$  [6].

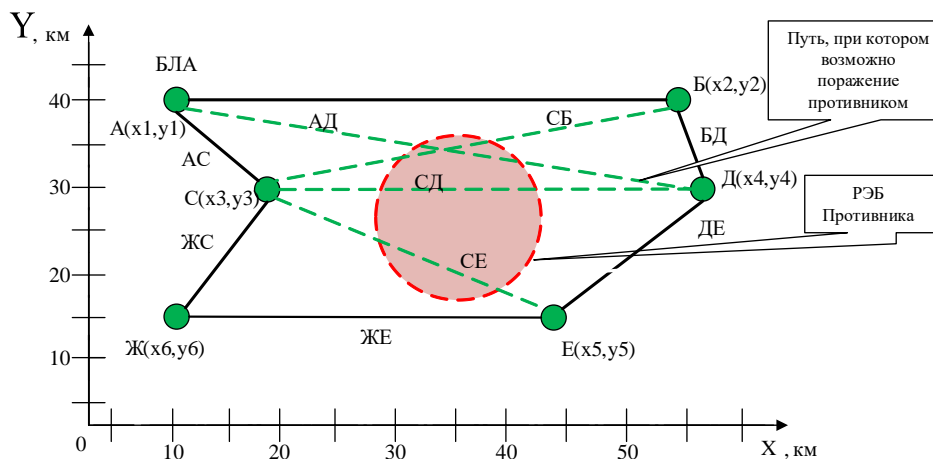


Рис. 4. Процедура учета препятствий

Если есть общие точки между возможной ветвью пролета БЛА, двигаясь от некоторой точки  $C$  в точку  $Ж$ , и препятствием (РЭБ противника), то возникает высокая вероятность поражения противником, в этом случае необходимо строить алгоритмическую процедуру обхода «опасной зоны», в противном случае алгоритм выбирает данную ветвь как возможный маршрут пролета точек  $C$  и  $Ж$ , и описывается условием (8)

$$Ax + By + C \neq (x - a)^2 + (y - b)^2 - R^2, \quad (8)$$

где:  $A, B, C$  – произвольные коэффициенты, причем ( $A$  и  $B$  не должны равняться нулю одновременно);  $a, b$  – координаты центра окружности.

**Этап 5.** Формируется процедура учета приоритета. Ввиду того, что целевые объекты противника являются неравнозначными, необходимо предусмотреть алгоритмическую процедуру учета наиболее приоритетных точек облета.

При появлении приоритета определенной точки или нескольких точек, БЛА осуществляет их облет в первую очередь по кратчайшему пути, используя алгоритм, представленный на рис. 5, а затем проходит все оставшиеся вершины по маршруту, найденному разработанным алгоритмом.

Схема алгоритма построения пути от начальной к приоритетной точке представлена на рис. 6.

При формировании схемы полета, оператором задается приоритет и наискорейший способ достижения приоритетной точки алгоритмом, построенным так, чтобы проложить путь от начальной точки к приоритетной не по кратчайшему пути, а через близкорасположенные к данной прямой точки [7]. Процедура расчёта расстояния от одной до другой, близкорасположенной к ней точки, описывается следующим соотношением:

$$d = \sqrt{(x_k - x_{R_q})^2 + (y_k - y_{R_q})^2}, \quad (9)$$

где:  $d$  – расстояние от исходной точки до точки приоритета;  $(x_k, y_k)$  – координаты приоритетной точки;  $(x_{R_q}, y_{R_q})$  – координаты исходной точки.

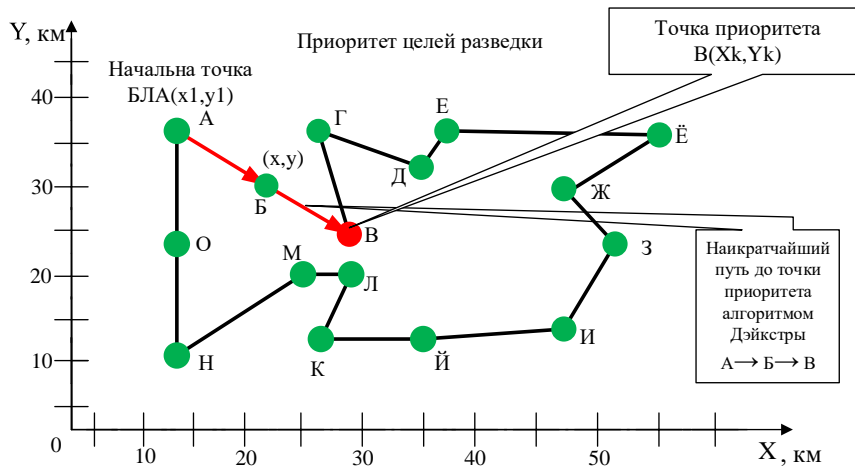


Рис. 5. Задание приоритета при формировании схемы полета

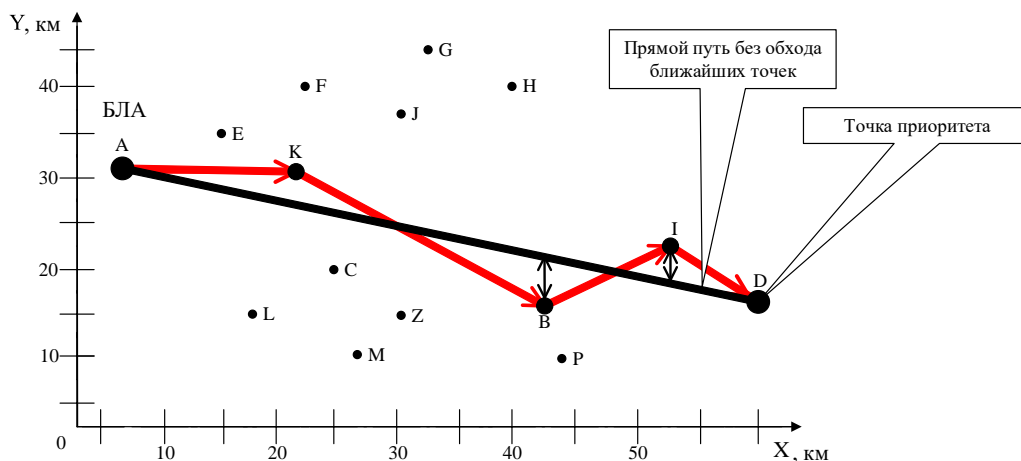


Рис. 6. Алгоритм построения пути от начальной к приоритетной точке

При реализации схемы, представленной на рис. 6, маршрут до точки приоритета не значительно вырастет, как следствие и время, затрачиваемое на прохождение маршрута. Эти изменения в маршруте не вызовут кардинальных последствий, влияющих на эффективность алгоритма. Такой подход позволит обойти большее количество точек, расположенных на пути, и не тратить время на их «обслуживание» в дальнейшем процессе решения задачи.

Исходя из вышесказанного, маршрут, проложенный новым алгоритмом, уменьшится по сравнению с алгоритмом прямого прохождения от начальной точки к приоритетной.

Процедура расчёта оптимального прохождения БЛА от начальной до приоритетной точки состоит в построении маршрута, охватывающего макси-

мальное количество точек. Путь от начальной точки  $A$  к приоритетной точке  $D$  строится таким образом, чтобы рассчитать минимальное расстояние от данной прямой ко всем точкам, лежащим в прямой близости от нее и выбрать минимальное расстояние от рассматриваемых точек до прямой  $AD$ . После этого строится маршрут из точек, наиболее приближенных к данной прямой до точки приоритета. Выбираются наиболее близкие точки к данной прямой (если точка находится далеко от прямой  $AD$ , то данная точка не учитывается и маршрут по ней не прокладывается), обеспечив максимальное приближение к искомой прямой, и одновременное прохождение через точки, которые находятся на расстоянии, удовлетворяющем построенному маршруту. Таким образом, появляется возможность пройти через максимальное количество точек, не потратив дополнительное время для их прохождения. Выражения, описывающие вышеизложенную процедуру, имеют следующий вид:

$$\frac{x - x_{s_j}}{x_k - x_{s_j}} = \frac{y - y_{s_j}}{y_k - y_{s_j}}, \quad (10)$$

$$d = \frac{|Ax_i + By_i + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad i = 1 \dots n, \quad (11)$$

где:  $d$  – расстояние от приоритетной прямой до ближайших к ней точек;  $(x_i, y_i)$  – координаты  $i$ -й точки.

Дальнейший облет всех оставшихся равнозначных точек достигается с помощью методики, описанной в шаге 4.

### Синтезированный алгоритм на основе генетического алгоритма и алгоритма имитации отжига

Пошаговый алгоритм решения задачи коммивояжера синтезированным методом, основанный на генетическом алгоритме и алгоритме имитации отжига можно представить в следующем виде [16].

**Шаг 1.** Вводятся исходные данные  $(P_j(x_i, y_i))$ , где  $P_j$  – количество точек,  $x_i, y_i$  – координаты точек.

**Шаг 2.** Создаются особи (циклы), которые подразумевают собой маршрут прохождения всех точек и возвращение в исходное.

**Шаг 3.** Задаются параметры циклов алгоритма отжига: температура –  $t$ , приращение изменения температуры –  $temp$ .

**Шаг 4.** Формируются исходные маршруты особей случайным способом

$$r_{i+1} = \text{mod}(k \cdot r_i + b, M)$$

где  $r_i$  – начальное значение равно  $0 < r_i < M$ ;  $r_{i+1}$  – последующее значение;  $k$  – множитель ( $0 < k < M$ );  $b$  – приращение ( $0 < b < M$ );  $M$  – модуль ( $M > 0$ ).

**Шаг 5.** Подсчитывается длина исходных маршрутов по формуле нахождения расстояния между последовательными точками маршрута.

**Шаг 6.** Формируются новые маршруты путем замены двух точек в цикле.

**Шаг 7.** Подсчитывается общая протяженность маршрутов особей путем замены точек  $r_i^{L_m} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ .

**Шаг 8.** Сравняются особи в данной итерации с предыдущими исходными маршрутами, путем выполнения условия: если расстояние нового цикла меньше расстояния исходного, то он берется за основной (исходный), иначе существует вероятность выбора не оптимального маршрута при незначительном изменении параметров.

**Шаг 9.** Выводятся субоптимальные особи с минимальным расстоянием по завершению всех итераций цикла алгоритма имитации отжига.

**Шаг 10.** Формируется итоговая выборка самой оптимальной особи, состоящая из 5-ти найденных особей (циклов).

### Синтезированный алгоритм на основе генетического и муравьиного алгоритмов

Пошаговый алгоритм решения задачи коммивояжера синтезированным методом, основанный на генетическом и муравьином алгоритмах можно представить в следующем виде [17].

**Шаг 1.** Вводятся исходные данные  $(P_j(x_i, y_i))$ , где:  $P_j$  – количество точек;  $x_i, y_i$  – координаты точек.

**Шаг 2.** Создаются особи (циклы), которые подразумевают собой маршрут прохождения всех точек и возвращение в исходное.

**Шаг 3.** Задаются параметры муравьиного цикла: создание колонии из  $N$  муравьев, ввод количества итераций муравьиного алгоритма.

**Шаг 4.** Первичное прохождение колонии по маршрутам. Прохождение осуществляется с помощью выбора ветви каждым муравьем. Вероятность перехода из точки  $i$  в  $j$ ,  $k$ -го муравья рассчитывается по формуле:

$$P_{ij,k} = \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{m \in \exists j} \tau_{im}^\alpha \eta_{im}^\beta}, j = 1 \dots n. \quad (12)$$

где:  $\tau_{ij}^\alpha$  – количество феромонов на ветви из точки  $i$  в точку  $j$ ;  $\eta_{ij}^\beta$  – близость  $j$ -го города к вершине  $i$ ;  $\tau_{im}^\alpha$  – количество феромонов на ветви из точки  $i$  в точку  $m$ ;  $\eta_{im}^\beta$  – близость  $j$ -го города к вершине  $m$ .

**Шаг 5.** Подсчет длины каждого маршрута пройденного муравьем по формуле нахождения расстояния между последовательными точками маршрута  $r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ .

**Шаг 6.** Подсчет количества прохождений муравьями по существующим ветвям вычисляется по формуле:

$$\Delta \tau_{ij,k} = \begin{cases} \frac{Q}{r_k}, & \text{если } (i, j) \in L_k; \\ 0, & \text{если } (i, j) \notin L_k; \end{cases} \quad (13)$$



где:  $Q$  – константа определяемая пользователем, чтобы увеличить или уменьшить количество феромонов на рассматриваемой ветви;  $r_k$  – расстояние маршрута пройденного  $k$ -ым муравьем;  $L_k$  – маршрут  $k$ -го муравья.

**Шаг 7.** Обновление феромонов. Обновление будет изменяться на всех существующих ветвях и уменьшаться пропорционально коэффициенту  $\rho$ , количество феромонов на ветвях, по которым муравьи прокладывали свой маршрут, будет увеличиваться по формуле:

$$\tau_{i\varphi(\tau+1)} = \rho\tau_{i\varphi(\tau)} + \sum_{k=1}^v \Delta\tau_{i\varphi,k(\tau)}, \quad (14)$$

где:  $\tau_{ij(t)}$  – количество феромонов до обновления;  $\tau_{ij(t+1)}$  – количество феромонов после обновления.

**Шаг 8.** После прохождения всех итераций муравьиного алгоритма происходит подсчет маршрутов итоговых итераций с заданными уровнями феромонов и вероятностей перехода.

**Шаг 9.** Вывод субоптимальных особей с минимальным расстоянием по завершению всех итераций цикла муравьиного алгоритма.

**Шаг 10.** Итоговая выборка самой оптимальной особи из  $N$  найденных и вывод длины маршрута, пройденного ею.

Функциональные схемы работы двух, вышеописанных алгоритмов, представлены на рис. 7, 8.

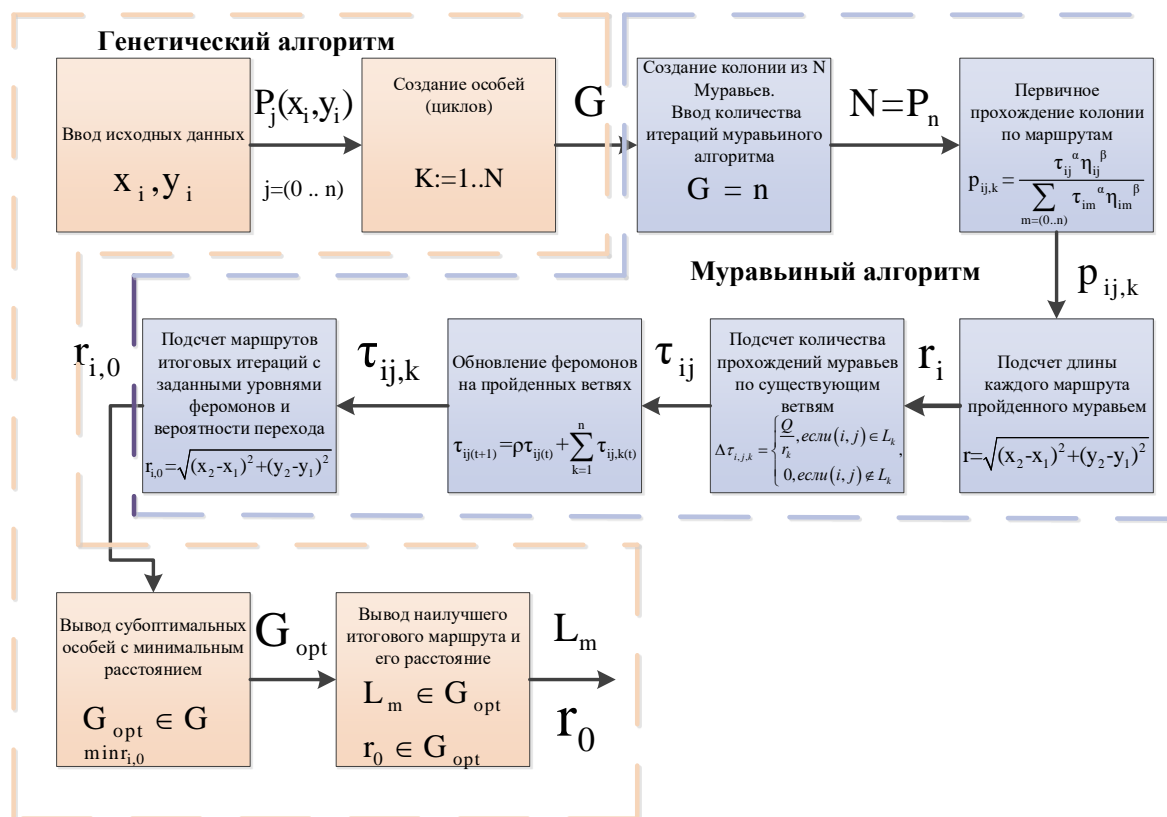


Рис. 7. Функциональная схема синтезированного алгоритма на основе генетического алгоритма и метода имитации отжига

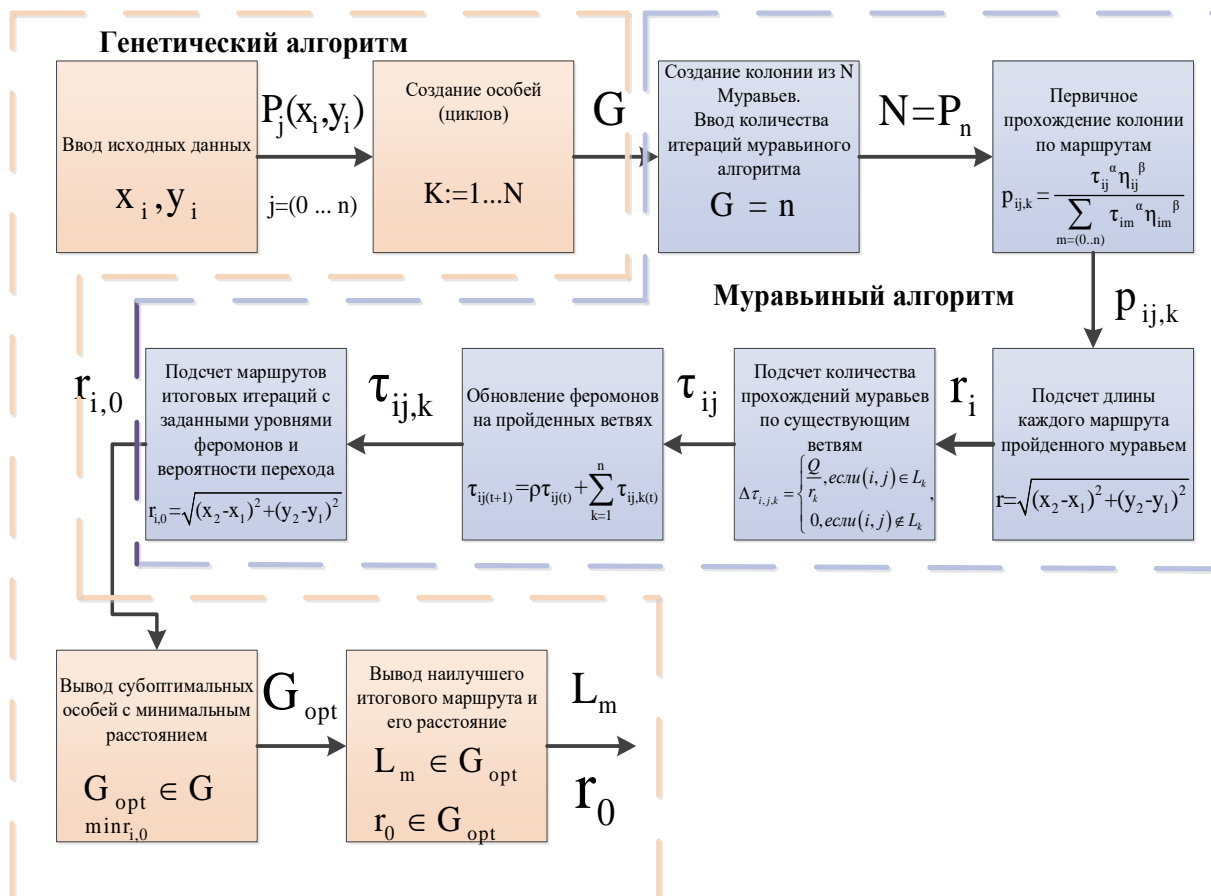


Рис. 8. Функциональная схема синтезированного алгоритма на основе генетического алгоритма и муравьиного алгоритма

Отметим, что соотношения (5-14) были использованы при разработке соответствующих алгоритмов, на основе которых созданы программные модели. Ввиду того, что разработанные алгоритмы решения задачи коммивояжера не расширяют предлагаемую методику, описывающие их блок-схемы в настоящей работе не приводятся.

### Оценка эффективности предложенной методики

С целью оценки работоспособности разработанных алгоритмов и проведения их сравнительной оценки на основе результатов исследования программных кодов, демонстрирующих их работу, проведен численный эксперимент, оценивающий алгоритмы по следующим показателям [18]:

- по скорости их работы;
- по сложности реализации на существующих ЭВМ;
- по величине продолжительности найденного маршрута.

Сравнительные результаты, полученные на основе проведенных исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение алгоритмов решения задачи коммивояжера

Число промежуточных пунктов маршрута	Алгоритмы решения задачи Коммивояжера										
	Программная реализация метода ветвей и границ		Программная реализация синтезированного метода (генетического и отжига)			Программная реализация синтезированного метода (генетического и муравьиного)			Программная реализация муравьиного метода		
$N$	$T, c$	$S, м$	$T, c$	$S, м$	%	$T, c$	$S, м$	%	$T, c$	$S, м$	%
5	0,282	683,151	0,263	94,102	1,58	0,284	693,236	1,45	0,275	691,187	1,16
10	0,723	1412,852	0,413	441,824	2	0,414	1439,152	1,83	0,395	1435,197	1,54
15	6,641	1497,153	0,953	542,699	3,55	1,009	1554,763	4,51	0,998	1559,853	3,35
20	10,784	2867,372	2,432	902,342	4,02	2,512	2908,367	4,34	2,487	2911,512	4,54
30	21,314	3821,62	4,324	873,864	5,02	4,644	3890,543	5,20	4,456	3888,687	5,65
40	41,532	4095,57	8,123	153,532	6,74	7,235	4134,675	5,95	7,832	4147,763	6,32
50	55,541	4455,74	10,514	524,643	6,89	9,141	4495,455	6,13	10,124	4503,112	6,54
100	120,136	10432,96	20,197	0738,53	7,95	19,514	10612,96	8,65	17,531	10576,12	7,11
200	727,531	24564,75	82,741	5448,41	8,87	80,711	25564,11	9,43	74,153	25341,44	8,23
Число промежуточных пунктов маршрута	Программная реализация метода ветвей и границ		Программная реализация синтезированного метода (генетического и отжига)			Программная реализация синтезированного метода (генетического и муравьиного)			Программная реализация муравьиного метода		
Сложность	$O\left(\frac{(N-1)!}{4}\right) = O(N!)$		$O(5N^2 + 5) = O(N^2)$			$O\left(\frac{5N^2}{2} + N\right) = O(N^2)$			$O(N^2 + N) = O(N^2)$		

В результате проведенных исследований были построены следующие зависимости, представленные на рис. 9.

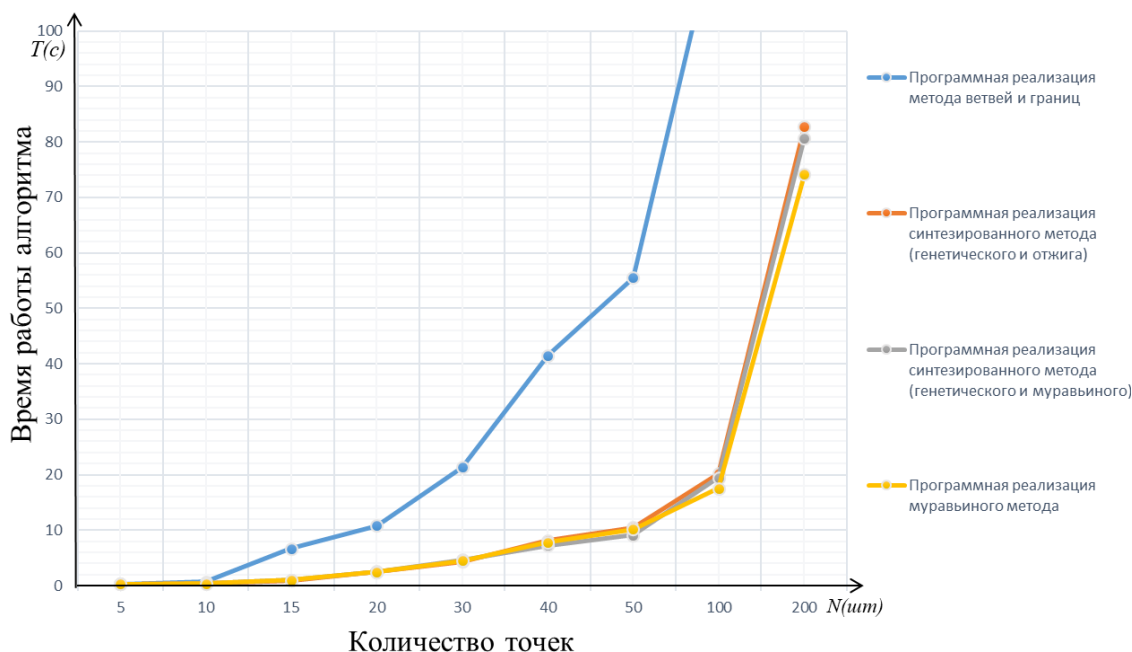


Рис. 9. Сравнительный анализ алгоритмов решения задачи коммивояжера

В результате проведенной работы был разработан визуальный интерфейс программы тестирования, позволяющий проводить исследования с целью нахождения наиболее эффективного алгоритма поиска неравноценных объек-

тов противника. Скриншот визуальной формы, разработанной на языке C++, представлен на рис. 10.

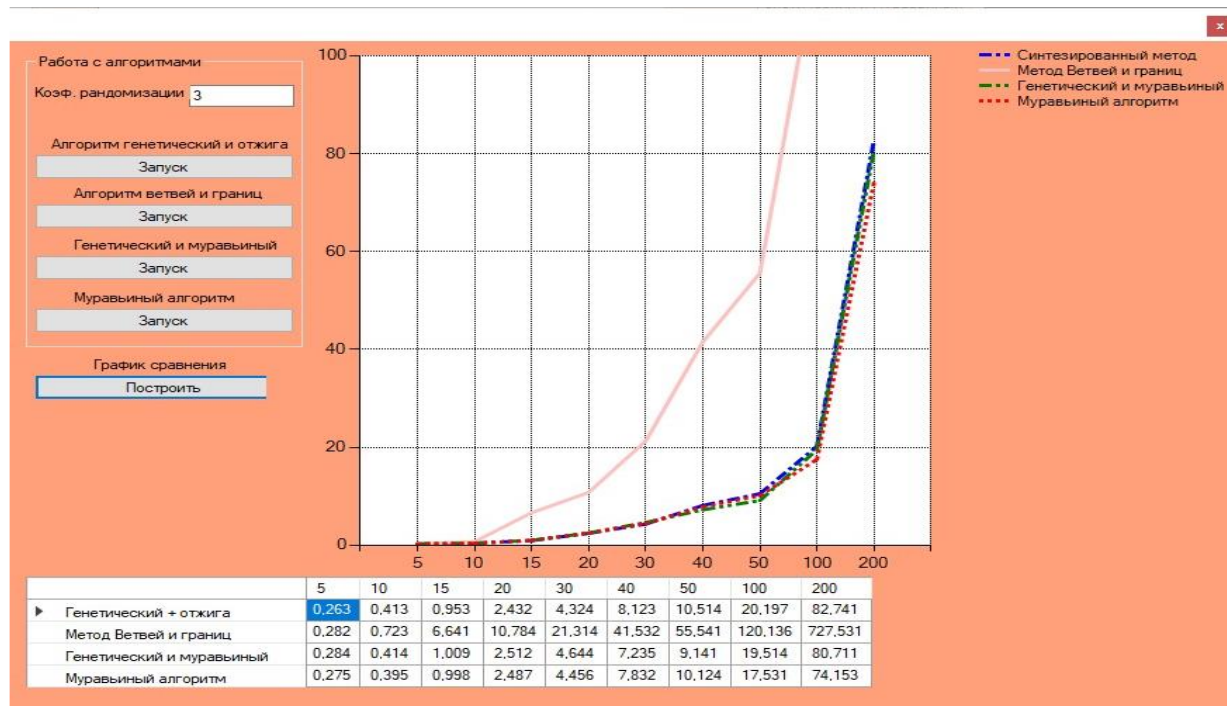


Рис. 10. Визуальный интерфейс программы тестирования

Для решения задачи маршрутизации был использован компьютер с процессором Intel Celeron N3160 CPU 1,60 ГГц и оперативной памятью 4 Гб, подобный тому, который применяется на существующих БЛА разведчиках: 32-битный STM32F427 Cortex M4 corewith FPU. ОЗУ 168 МГц / 256 КБ RAM / 2 МБ Flash. Сопроцессор 32 bitSTM32F103 failsafeco-processor.

Время расчета маршрута для 40 точек составило 7,235 с.

Оптимальный замкнутый маршрут облета имеет вид:

1→26→19→7→2→15→4→23→37→31→29→3→8→30→16→36→33→40→9→38→34→6→28→35→27→10→24→20→13→12→32→5→14→25→11→18→22→21→17→39→1,  $L=4134,675$  м.

### Выводы

Из проведенного анализа полученных результатов следует отметить, что критерии выбора алгоритма для расчета маршрута будут зависеть от количества (ППМ)  $N$ , доступного машинного времени для программной реализации алгоритма и длины маршрута, требуемой для прохождения всего пути.

Как видно из таблицы 1, универсального метода, позволяющего при любых исходных данных, получить глобальный оптимум не существует, поэтому результаты, представленные в таблице, целесообразно интерпретировать, исходя из количества ППМ.

В работе рассматривались 4 диапазона.

1. В диапазоне (от 0 до 10) при небольшом количестве ППМ самым эффективным является метод ветвей и границ, однако, несмотря на то, что метод

ветвей и границ работает значительно медленнее других алгоритмов, на практике, при малом значении  $N$ , существенного влияния на эффективность решения задачи не оказывается. Разница по сравнению с другими алгоритмами решения не значительна и составляет несколько миллисекунд, а разница по расстоянию относительно всех имеющихся методов составила: на 1,58–2 % эффективнее генетического и отжига; 1,45–1,83 % генетического и муравьиного; 1,16–1,54 % муравьиного соответственно.

2. В диапазоне (от 10 до 50) программная реализация синтезированного (генетического и отжига) метода становится эффективней по времени работы алгоритма по сравнению с другими алгоритмами (быстрее метода ветвей и границ на 85,65–79,71 %; синтезированного (генетического и муравьиного) на 5,55–6,89 %; муравьиного 4,51–2,96 % и имеет относительно небольшой проигрыш от метода ветвей и границ по расстоянию прохождения маршрута на 2,95–1,35 %).

3. В диапазоне (от 50 до 100) программная реализация синтезированного алгоритма (генетического и муравьиного) становится эффективней по времени работы алгоритма по сравнению с другими алгоритмами (быстрее метода ветвей и границ на 82,58–83,54 %; синтезированного (генетического и муравьиного) на 10,93–15,06 %; муравьиного 7,62–9,71 % и имеет относительно небольшой проигрыш от метода ветвей и границ по расстоянию прохождения маршрута на 0,95–0,88 %).

4. В диапазоне (от 100 до 200) программная реализации муравьиного метода становится эффективней по времени работы алгоритма по сравнению с другими алгоритмами (быстрее метода ветвей и границ на 85,41–89,81 %; синтезированного (генетического и муравьиного) на 14,2–10,38 %; муравьиного 10,26%–8,13% и имеет относительно небольшой проигрыш от метода ветвей и границ по расстоянию прохождения маршрута на 1,35–3,06 %).

Таким образом, разработанный способ оптимизации действий группировки БЛА, построенный на основе генетического и муравьиного алгоритмов, реализует субоптимальный план полета группы БЛА, существенно сокращая количество вычислительных операций по сравнению с методами полного перебора, ветвей и границ, генетического метода, что позволяет использовать программную реализацию данного метода на процессорах с невысокой вычислительной мощностью.

В качестве дальнейшего развития темы, особый интерес вызывает учет «запретных зон» для пролета БПЛА. Планируется развитие представленной методики за счет описания формы «запретной зоны» кругами Эйлера или триангуляцией Дэлоне, что позволит описать «запретную зону» любой формы.

### Литература

1. Семенов С. С., Педан А. В., Воловиков В. С., Климов И. С. Анализ трудоемкости различных алгоритмических подходов для решения задачи коммивояжера // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 116–131.



2. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физико-математическая литература, 2009. – 280 с.

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

4. Верба В. С., Меркулов В. И. Авиационные системы радиопередачи. Монография. М.: Радиотехника, 2014. – 376 с.

5. Евдокименков В. Н., Красильщиков М. Н., Себряков Г. Г. Распределенная интеллектуальная система управления группой беспилотных летательных аппаратов: архитектура и программно-математическое обеспечение // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1 (174). С. 29-44.

6. Прокопенко Н. Ю. Системы поддержки принятия решений: учеб. пособие / Н. Ю. Прокопенко. – Н. Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2017. – 188 с.

7. Иванов С. В., Белоножко Д. Г., Стадник А. Н., Беседин С. А., Лозовский В. В. Разработка автоматизированной информационной системы поддержки принятия решения группой беспилотных летательных аппаратов на основе самообучающейся нейронной сети // Стратегическая стабильность. 2020. № 3(92). С. 15-21.

8. 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.

9. Подлипыян П. Е., Максимов Н. А. Многоэтапный алгоритм решения задачи планирования полета группы беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2011. № 43. С. 47-58.

10. Моисеев Д. В., Чинь Ван Минь, Мозолев Л. А., Моисеева С. Г., Фам Суан Куен. Маршрутизация полета легкого беспилотного летательного аппарата в поле постоянного ветра на основе решения разновидностей задачи коммивояжера // Труды МАИ. 2015. № 79. С. 16-27.

11. Абросимов В. К. Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической среде. – М.: Издательский дом Наука, 2013. – 168 с.

12. Васильченко А. С., Иванов М. С., Колмыков Г. Н. Формирование маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов с учетом местоположения средств противовоздушной обороны и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 403-420.

13. Иванов С. В., Белоножко Д. Г., Петрова О. В., Стадник А. Н., Лозовский В. В. Методика оптимального поиска неравноценных объектов противника на основе решения задачи коммивояжера // Стратегическая стабильность. 2020. № 4 (93). С. 46-54.

14. 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. 60-67.

15. Иванов С. В., Бычек Д. Г., Божков Д. В. Программа для решения задачи коммивояжера методом ветвей и границ. // Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ. № 2021614781. 2021.

16. Иванов С. В., Бычек Д. Г., Божков Д. В. Программа для решения задачи коммивояжера на основе синтеза генетического алгоритма и метода отжига. // Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ. № 2021662410. 2021.

17. Иванов С. В., Бычек Д. Г., Божков Д. В. Программа для решения задачи коммивояжера на основе синтеза генетического и муравьиного алгоритмов. // Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ. № 2021668954. 2021.

18. Петрова О. В., Иванов С. В., Королев И. Д., Белоножко Д. Г. Математическая модель оценки вероятности безотказной работы системы обработки информации мультиагентного робототехнического комплекса в условиях неопределенности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 3. С. 7-15.

### References

1. Semenov S. S., Pedan A. V., Volovikov V. S., Klimov I. S. Analysis of the Labor Intensity of Various Algorithmic Approaches for Solving the Traveling Salesman Problem. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 1, pp. 116-131 (in Russian).

2. Kalyaev I. A., Gaiduk A. R., Kapustyan S. G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppah robotov* [Models and algorithms of collective control in groups of robots]. Moscow, Physical and mathematical literature Publ, 2009. 280 p (in Russian).

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

4. Verba V. S., Merkulov V. I. *Aviacionnye sistemy radioupravleniya. Monografiya* [Aviation radio control systems. Monography]. Moscow, Radiotekhnika Publ, 2014. 376 p (in Russian).

5. Evdokimenkov V. N., Krasilshchikov M. N., Sebryakov G. G. Raspredelennaya intellektual'naya sistema upravleniya gruppoj bespilotnyh letatel'nyh apparatov: arhitektura i programmno-matematicheskoe obespechenie [Distributed intelligent control system for a group of unmanned aerial vehicles: architecture and software]. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2016, vol. 174, no. 1, pp. 29-44 (in Russian).

6. Prokopenko N. Y. *Sistemy podderzhki prinyatiya reshenij* [Decision support systems]. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 2017, 188 p. (in Russian).

7. Ivanov S. V., Belonozhko D. G., Stadnik A. N., Besedin S. A., Lozovsky V. V. Development of an automated information system to support decision making by a group of unmanned aerial vehicles based on a self-learning neural network. *Strategicheskaya stabilnost [Strategic stability]*, 2020, vol. 92, no. 3, pp. 15-21 (in Russian).

8. Sokolov V. B., Teryaev E. D. Aircrafts without pilots: some questions of the development and use. *Mechatronics, Automation, Control*, 2008, no. 2, pp. 12-23 (in Russian).

9. Podlipyan P. E., Maksimov N. A. Mnogoetapnyj algoritm resheniya zadachi planirovaniya poleta gruppy bespilotnyh letatel'nyh apparatov [Multi-stage algorithm for solving the problem of planning the flight of a group of unmanned aerial vehicles]. *Trudy MAI*, 2011, no. 43, pp. 47-58 (in Russian).

10. Moiseev D. V., Chin Wang Min, Mozolev L. A., Moiseeva S. G., Pham S. K. Marshrutizaciya poleta legkogo bespilotnogo letatel'nogo apparata v pole postoyannogo vetra na osnove resheniya raznovidnostej zadachi kommivoyazhera [Flight routing of a light unmanned aerial vehicle in a constant wind field based on solving varieties of the traveling salesman problem]. *Trudy MAI*, 2015, no. 79, pp. 16-27 (in Russian).

11. Abrosimov V. K. *Gruppovoe dvizhenie intellektual'nyh letatel'nyh apparatov v antagonisticheskoj srede* [Group movement of intelligent flying vehicles in an antagonistic environment]. Moscow, Nauka Publ, 2013, 168 p, (in Russian).

12. Vasilchenko A. S., Ivanov M. S., Kolmykov G. N. Unmanned aerial vehicles flight routes formation, taking into account the location of air defense and electronic warfare means. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 4, pp. 403-420 (in Russian).

13. Ivanov S. V., Belonozhko D. G., Petrova O. V., Stadnik A. N., Lozovsky V. V. Method of optimal search for non-equal objects of the enemy based on the solution of the traveling salesman problem. *Strategicheskaya stabilnost [Strategic stability]*, 2020, vol. 93, no. 4, pp. 46-54 (in Russian).

14. Bozhko N. A., Bakhovchuk A. M., Mytko L. R. Primenenie bespilotnyh letatel'nyh apparatov pri proektirovanii i soderzhanii avtomobil'nyh dorog [The use of unmanned aerial vehicles in the design and maintenance of highways]. *Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike: materialy 13-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii [The use of unmanned aerial vehicles in the design and maintenance of roads. Science – education, production, economy: materials of the 13th International scientific and technical conference]*, 2015, no. 3, pp. 60-67 (in Russian).

15. Ivanov S. V., Bychek D. G., Bozhkov D. V. *Programma dlya resheniya zadachi kommivoyazhera metodom vetvej i granic* [A program for solving the traveling salesman problem using the branch and bound method]. Certificate of state registration of the computer program, No. 2021614781, 2021.

16. Ivanov S. V., Bychek D. G., Bozhkov D. V. *Programma dlya resheniya zadachi kommivoyazhera na osnove sinteza geneticheskogo algoritma i metoda otzhiga* [A program for solving the traveling salesman problem based on the

synthesis of a genetic algorithm and the annealing method]. Certificate of state registration of the computer program, No. 2021662410], 2021.

17. Ivanov S. V., Bychek D. G., Bozhkov D. V. *Programma dlya resheniya zadachi kommivoyazhera na osnove sinteza geneticheskogo i murav'inogo algoritmov* [A program for solving the traveling salesman problem based on the synthesis of genetic and ant colony algorithms]. Certificate of state registration of the computer program, No. 2021668954, 2021.

18. Petrova O. V., Ivanov S. V., Korolev I. D., Belonozhko D. G. Mathematical model of the evaluation of the probability of the unreliable work of the processing system of information of the multi-agent robotic complex in uncertainty conditions. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2019, vol. 15, no. 3, pp. 7-15 (in Russian).

Статья поступила 8 февраля 2022 г.

### Информация об авторе

*Иванов Станислав Валерьевич* – кандидат технических наук, доцент. Старший преподаватель Краснодарского высшего военного училища им. С.М. Штеменко. Область научных интересов: методы оптимального управления в конфликтных задачах; методы оптимизации, биоинспирированные алгоритмы оптимальной маршрутизации. E-mail: sta399@yandex.ru

Адрес: 350090 г. Краснодар, ул. Циолковского д.3/1 кв. 100.

---

## A method for constructing suboptimal routes for a group of unmanned aerial vehicles based on bioinspired algorithms in the presence of obstacles

S. V. Ivanov

**Purpose.** The use of various algorithms for solving the traveling salesman problem, such as the method of branches and boundaries, genetic algorithm, simulated annealing algorithm, greedy algorithm, often do not take into account the real capabilities of computers capable of implementing them. Increased requirements are imposed on on-board computers of unmanned aerial vehicles (UAVs) performing specific tasks in an unfavorable external environment. It is not currently possible to increase the capabilities of the on-board computer to a computer variant that implements the calculation functions on the "Ground" due to the limitations associated with the mass-dimensional characteristics of the device. Therefore, the issues of synthesis of existing optimization algorithms in order to meet the requirements for the hardware and software of an unmanned aerial vehicle remain an independent problem. **The aim of the work** is to build an algorithm for solving the traveling salesman problem based on the combined use of ant and genetic algorithms, which will allow implementing computational procedures for algorithms for solving various special tasks that require large amounts of memory and high information processing speed from the computer. **Methods:** to solve the problem of searching for enemy targets in the conditions of unfavorable actions of the external environment, the most suitable in terms of computational complexity, optimal search time and meeting the requirements of on-board computers are ant and genetic algorithms. As criteria for optimizing the problem being solved, it is proposed to use maximizing the number of points in the route and minimizing the time of their flight by an unmanned aerial vehicle. **Novelty.** The novelty elements of the presented work are, on the one hand, the application of a complex criterion, which includes minimizing the time of solving the problem and maximizing the number of points of flight of the route, and on the other hand, the construction of a procedure for iterative elimination of "subcycles" included in the structure of the algorithm, which al-

allows to solve the NP-complexity of solving this type of problems in polynomial time. **Results.** The use of the presented algorithm for searching for a suboptimal solution to the traveling salesman problem, taking into account the priority of targets, the disparity of flyover points and obstacles arising on the way, under the influence of electronic warfare and enemy air defense, made it possible to provide the required computing capabilities of the onboard computer with maximum coverage of the flyover zone. A procedure is proposed for narrowing the complete set of optimal flyby routes of unequal points to a Pareto-optimal set. The developed program codes in the C++ language, and the built information and computing system. **Practical relevance.** the research carried out in the work has shown that such an algorithm can be implemented in the form of a program recorded in the memory card of an onboard modern special calculator of an unmanned aerial vehicle, which will allow autonomous flight by a group of UAVs over large territories and cover more than 66 points of flight.

**Key words:** UAV group, annealing simulation method, genetic algorithm, traveling salesman problem, ant algorithm, decision support system, computational complexity.

### Information about author

*Stanislav Valeryevich Ivanov* – Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Senior lecturer of the Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko. Research interests: methods of optimal control in conflict problems; optimization methods, bioinspired optimal routing algorithms. Email: sta399@yandex.ru

Address: Russia, 350090, Krasnodar, Tsiolkovsky str., 3/1 sq. 100.