

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АВИАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ЕГО ПЕРЕБАЗИРОВАНИИ В ЗОНУ ДЕЙСТВИЯ

Максимов Н.А. *, Склеймин Ю.Б. **, Шаронов А.В. *

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

** e-mail: k308@mai.ru*

*** e-mail: skleymin@yandex.ru*

Описывается программный комплекс выбора маршрута следования колонны колесных транспортных средств повышенной проходимости при перебазировании беспилотной авиационной группы от пункта дислокации в зону ее действия. К основным достоинствам такого комплекса относится возможность его использования для решения задачи планирования маршрута передвижения не только по общедоступной дорожной сети, но и по проселочным дорогам и бездорожью; кроме того простой интерфейс делает комплекс доступным для работы операторов с любым уровнем подготовки в области информационных технологий.

Ключевые слова: беспилотный авиационный комплекс, передислокация, выбор маршрута передвижения, программный комплекс, путь на графе, геоинформационная система.

Введение

Одной из наиболее актуальных проблем развития средств огневого поражения является создание разведывательных, ударных и огневых контуров, позволяющих осуществлять эффективное воздействие на подвижные цели вероятного противника, расположенные в тактической и оперативной глубине [1].

Эта проблема может быть решена активным использованием большого количества беспилотных летательных аппаратов (БЛА) различного назначения, при этом возникает задача планирования маршрута перемещения беспилотных авиационных комплексов (БАК) из зоны их дислокации в зоны действия, находящиеся на различных расстояниях.

В известной авторам литературе, за исключением [2], передислокация БАК не рассматривается.

Перебазируемые БАК размещаются на базе автомобильных шасси повышенной проходимости (транспортные средства — ТС) и состоят из типовых наземных компонент [2]:

- мобильных наземных пунктов управления (МНПУ);
- мобильных пусковых установок (МПУ);
- транспортно-заряжающих машин (ТЗМ);
- топливозаправщиков (ТЗ);

— машин ремонта и технического обслуживания (МРТО).

Общее описание задачи исследования

Планирование маршрутов перемещения подвижных средств относится к хорошо известной транспортной задаче, решением которой является оптимальный путь перевозки грузов из одного пункта в другой.

Классические подходы к ее решению позволяют внедрять нетривиальные алгоритмы оптимизации затрат, уменьшающие рутинную нагрузку на человека-оператора; создавать, выравнивать и контролировать планы работы в условиях существования нормальной транспортной сети дорог. Выполнение второго условия становится проблематичным при планировании перемещения БАК из места базирования в место применения, поскольку приходится учитывать не только характеристики транспортных средств (проходимость, массу и т.п.), но и наличие отдельных участков бездорожья, занесенных в электронные карты, изменение которых осуществляется по информации, полученной от геоинформационных систем.

Это означает, что потребности специализированных служб в нахождении оптимального маршрута движения колонны транспортных средств на

основе анализа этих карт не могут быть удовлетворены с использованием традиционных подходов, которые применяются в алгоритмах функционирования автоматизированных систем планирования.

В связи с этим задача разработки алгоритмов функционирования автоматизированной системы поиска оптимального маршрута движения колонны транспортных средств БАК, учитывающих особенности движения по малопроезжимым участкам местности, на основе общедоступных версий электронных карт местности является актуальной.

Автоматизированная система поиска оптимального маршрута при этом должна быть кроссплатформенной, применимой для работы под управлением различных операционных систем, иметь простой и интуитивно понятный пользовательский интерфейс, делающий ее пригодной для работы с малоподготовленными в информационных технологиях пользователей.

Потребности большинства пользователей будут удовлетворены при выполнении следующих требований:

- поддержка работы с системами электронной картографии при использовании как ОС Windows, так и Linux (кроссплатформенность ПО);
- использование высокоэффективных алгоритмов поиска кратчайших маршрутов;
- наличие хорошей технической поддержки при обслуживании программы;
- наличие обширной подсистемы анализа информации, статистического модуля;
- возможность масштабирования самого программного комплекса поиска оптимального маршрута за счет подключения новых программных модулей и плагинов;
- простой и понятный пользовательский интерфейс, отсутствие функциональной избыточности.

Постановка задачи поиска оптимального маршрута движения беспилотного авиационного комплекса

В статье ставится и решается задача разработки специализированного программного комплекса, обеспечивающего, во-первых, построение транспортной сети в виде ориентированного графа на основе электронных топографических карт местности и, во-вторых, поиск на построенной транспортной сети кратчайшего (по времени) маршрута движения колонны ТС.

Основным инструментом анализа транспортной сети выбран язык теории графов, позволяющий детально описывать нагруженную сеть дорог. Алгоритмы поиска кратчайшего пути хорошо известны, имеются оценки их быстродействия, и имен-

но они будут использованы для анализа построенной транспортной сети.

При проектировании программного комплекса поиска оптимального маршрута движения колонны ТС рассматриваются задачи теории графов, связанные с маршрутизацией, и исследуются известные алгоритмы поиска кратчайшего пути на графе.

Задача определения кратчайшего маршрута на поверхности методами теории графов

Рассмотрим задачу нахождения кратчайшего пути между фиксированными вершинами графа $s, t \in V$, в которой $d(s, t)$ — кратчайший путь (расстояние) от s до t .

Если не существует ни одного пути из s в t , то полагаем $d(s, t) = \infty$; если же каждый контур нашего графа имеет положительную длину, то кратчайший путь будет всегда элементарным путем, т.е. в последовательности длин ребер v_1, \dots, v_p не будет повторов [3].

Существуют несколько постановок задачи о кратчайшем пути:

- задача о кратчайшем пути в заданный пункт назначения,
- задача о кратчайшем пути между заданной парой вершин,
- задача о кратчайшем пути между всеми парами вершин.

В этих постановках задачи роль длины ребра могут играть не только сами длины, но и время, стоимость, расходы, объем затрачиваемых ресурсов (материальных, финансовых, топливно-энергетических и т. п.) или другие характеристики, связанные с прохождением каждого ребра.

К наиболее популярным алгоритмам для решения задачи поиска кратчайшего пути на графе относятся:

- алгоритм Дейкстры;
- алгоритм Беллмана—Форда;
- алгоритм поиска A^* ;
- алгоритм Флойда—Уоршелла;
- алгоритм Джонсона.

Будем также предполагать, что если по какому-либо маршруту колонна БАК может двигаться только в одном направлении, то единственным пригодным методом определения кратчайшего маршрута является алгоритм поиска в ширину. Его быстродействие составляет $O(E)$, где E — количество вершин в графе дорог. При этом требуется специальная технология построения графа дорог, при которой все ребра должны иметь единичную длину, что достигается зачастую искусственным дроблением элементарных путей.

Проведенный анализ перечисленных выше алгоритмов показал, что целесообразно включить в программный комплекс самый просто реализуемый алгоритм — алгоритм Дейкстры, а также алгоритмы Флойда—Уоршала и Форда—Беллмана [5].

Модель программного комплекса автоматизированной системы построения маршрута движения БАК

Для моделирования работы программного комплекса использовано программное обеспечение StarUML, предоставляющее наиболее простой и прозрачный механизм построения разнообразных диаграмм моделирования. При этом проектируемый программный комплекс автоматизированной системы построения маршрута движения БАК представляется в виде множества сущностей или акторов, взаимодействующих с помощью так называемых прецедентов [4]. Такое взаимодействие может рассматриваться и во времени, но тогда для представления временных особенностей передачи и приема сообщений между объектами используется диаграмма последовательности.

На рис. 1 представлена диаграмма взаимодействия элементов модели программного комплекса (ПК), а на рис. 2 — диаграмма последовательности программного комплекса.

Работа программного комплекса автоматизированной системы построения маршрута движения БАК и тестовый пример

Работа программного комплекса начинается с открытия основного окна программы. Его скриншот представлен на рис. 3.

Эта форма предоставляет доступ ко всем функциям программы и содержит в соответствии с ТХ два типа меню — выпадающее меню в стиле Windows и интуитивно понятное пиктографическое меню.

Загрузка карты местности позволяет построить нагруженный граф. Пусть рассматривается задача движения БАК, состоящая из пяти транспортных средств с различными параметрами движения по местности и задана относительно сложная сеть дорог с различными параметрами для участков движения колонны.

В качестве графа дорог на местности рассматривается оргграф с десятью вершинами. В табл. 1 представлены параметры участков дорог между различными вершинами графа дорог.

В табл. 2 приведены характеристики ТС, входящих в состав колонны.

Эти данные использовались для расчета нагруженности ребер графа дорог. При этом расчетные

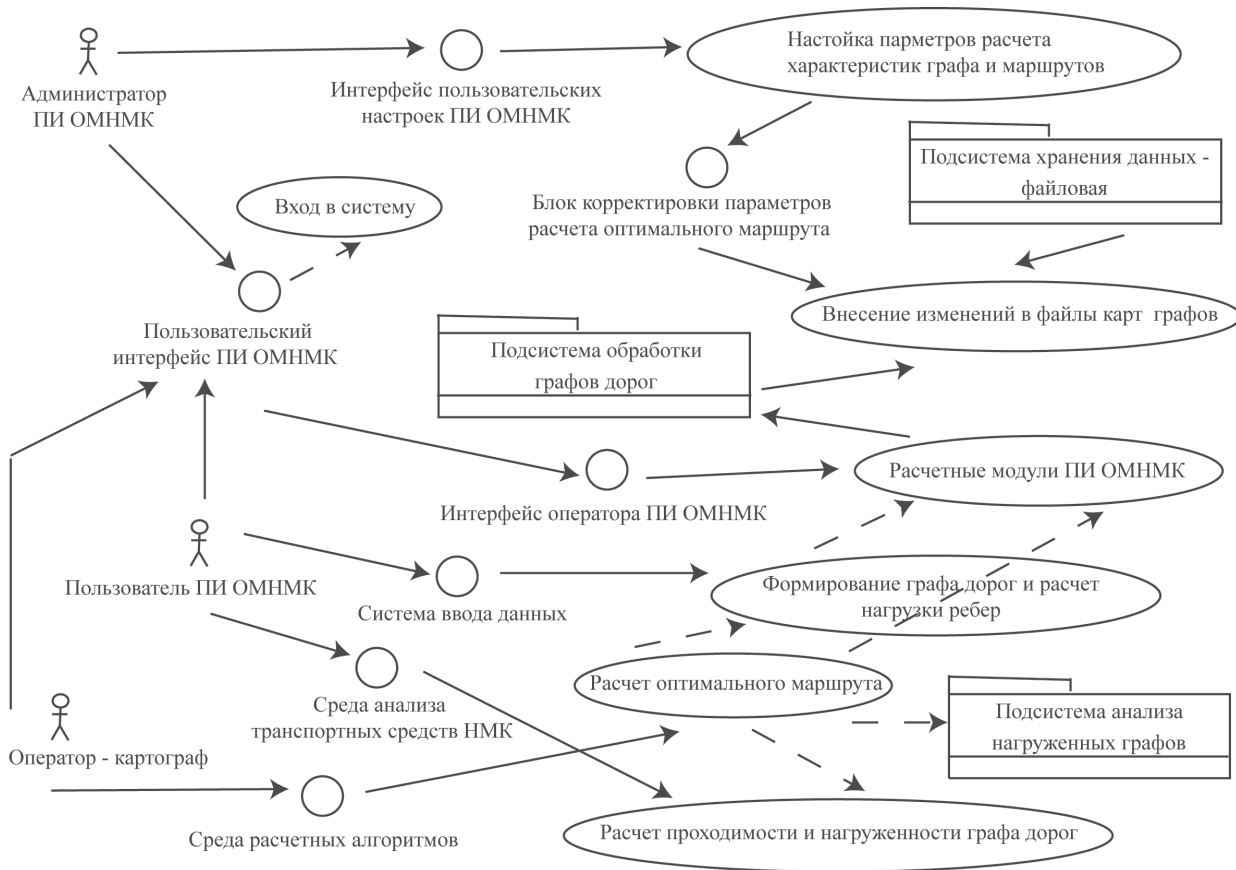


Рис. 1. Диаграмма взаимодействия элементов модели ПК

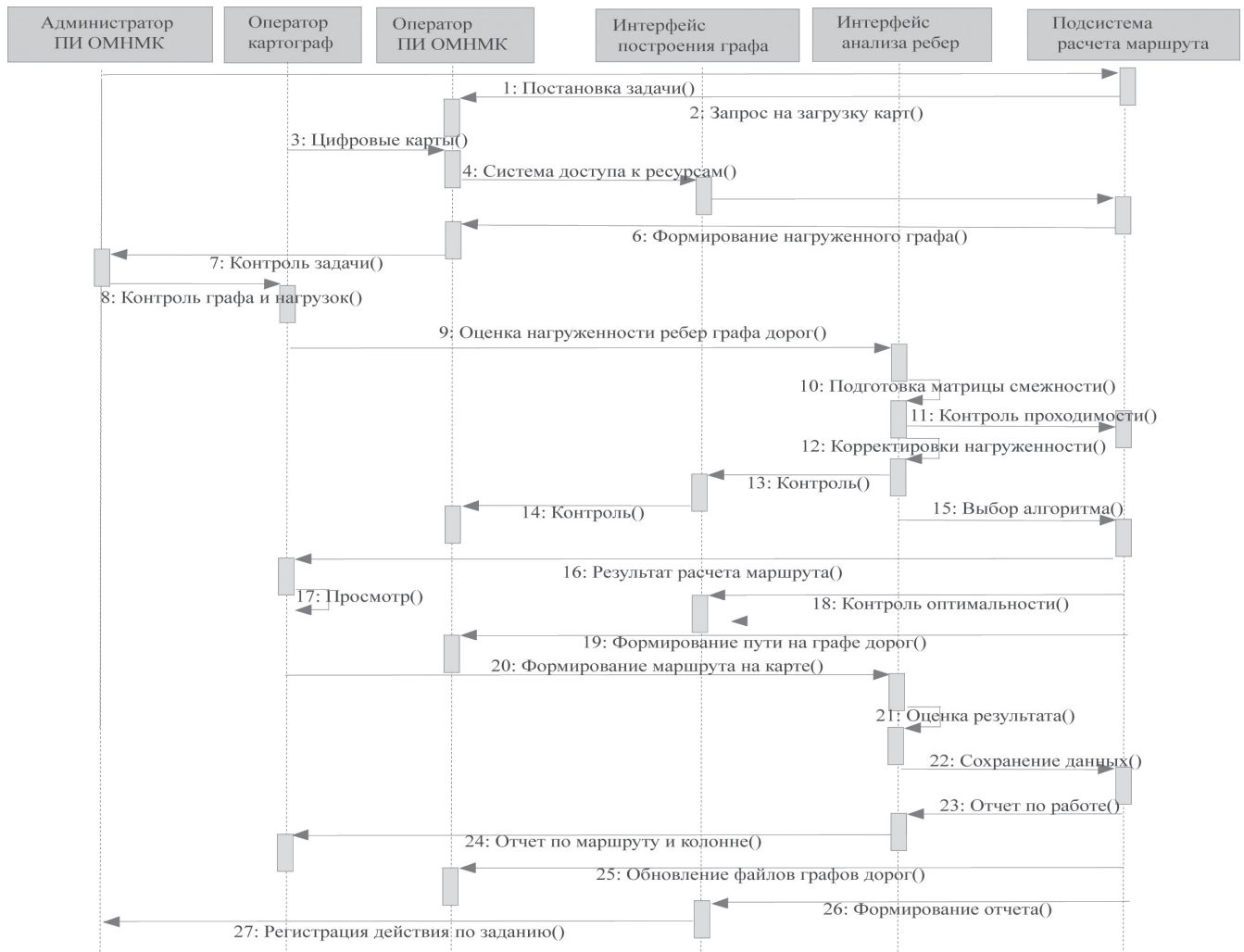


Рис. 2. Диаграмма последовательности ПК

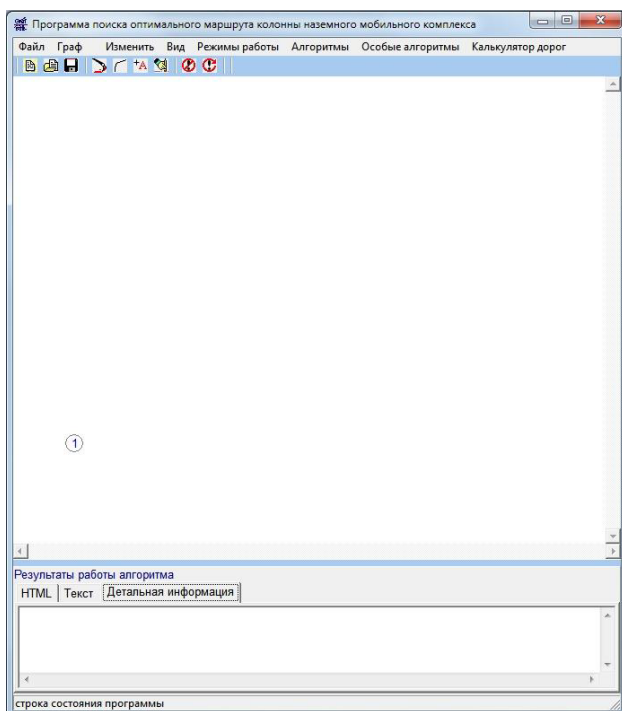


Рис. 3. Основная форма оптимального маршрута наземного мобильного комплекса (ОМНМК)

данные округлялись до минимально возможного целого числа, поскольку при задании орграфа требуется приписывать его дугам целочисленные значения. На рис. 4 представлена иллюстрация нагруженности ребер графа дорог.

Для расчета параметров проходимости участков пути и скорости (времени) их прохождения использовалась упрощенная формула, сформированная в техническом задании на разработку,

$$t = \frac{L}{v\sqrt{\alpha^{4/3}(1 - 1/(\beta^2 + 0,15))}},$$

где L — протяженность маршрута в метрах;
 v — скорость ТС в метрах в ед. времени;
 α — коэффициент проходимости участка пути ($0 < \alpha < 1$);

β — коэффициент проходимости ТС ($\beta \geq 1$).

Пропируемость участков дорог по массе определяется из следующих соображений: участок счита-

Таблица 1

Параметры участков дорог между вершинами

Участок	Протяженность, м	Допустимая масса ТС, т	Коэффициент проходимости	Максимальный угол подъема, град
1-2	800	7	0,87	34
1-3	900	7	0,83	25
1-4	800	7	0,84	24
1-5	600	5	0,88	24
1-6	450	7	0,9	14
1-7	460	6	0,91	12
1-8	540	6	0,95	11
1-9	780	5	0,9	15
1-10	620	6	0,8	22
2-4	330	8	0,76	21
2-5	400	6	0,77	21
2-6	980	4	0,7	22
2-8	1050	5	0,75	10
2-10	1230	6	0,8	10
3-4	1140	8	0,65	15
3-5	1265	7	0,55	16
3-7	930	8	0,5	14
3-8	970	5	0,55	12
3-9	540	5	0,65	11
3-10	750	6	0,66	15
4-8	510	6	0,7	12
5-8	410	6	0,75	12
5-10	690	8	0,76	11
6-8	830	4	0,8	20
6-9	340	6	0,9	24
6-10	400	6	0,7	25
7-8	360	5	0,9	20
7-9	640	5	0,95	26
7-10	800	5	0,8	32
8-9	250	6	0,86	12
8-10	600	8	0,9	30
9-10	820	8	0,75	35

Таблица 2

Характеристики ТС в составе колонны

Номер ТС	Скорость ТС	Коэффициент проходимости	Масса ТС	Удельная мощность ТС
1	34	1,7	6	18
2	24	1,44	5,5	16
3	27	1,57	4,5	20
4	35	1,88	4,7	22

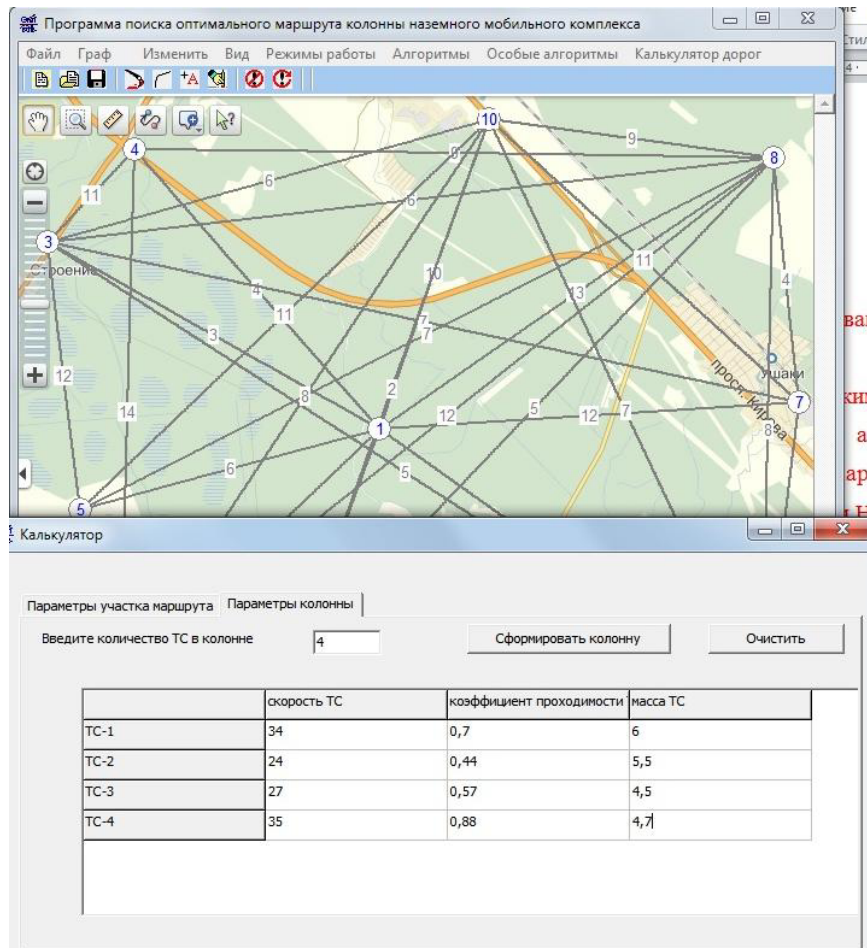


Рис. 4. Иллюстрация нагруженности ребер графа дорог

ется проходимым, если максимальная масса ТС в колонне БАК не превышает допустимой массы движения ТС по участку.

Пройодимость же по углам наклона определяется из условия [6, 7]

$$\alpha = \frac{P\beta}{\cos^2(U)\alpha} / M^{3,5},$$

где P — удельная мощность ТС;

U — максимальный угол наклона на участке пути в градусах;

M — масса ТС.

Расчет выполнялся по каждому ТС в отдельности.

Если невозможен проход одного ТС из состава колонны БАК, то движение на данном участке пути также считается невозможным и для всей колонны.

Результаты анализа по времени и проходимости по всем участкам пути сведены в табл. 3.

Полученные результаты (целочисленные) приписываются каждому ребру графа. При этом непроходимые в принципе некоторые участки пути исключаются из представления графа дорог.

Нагруженный граф схемы дорог, введенный в программу расчета, представлен на рис. 5.

Заметим, что формирование такого графа может быть упрощено построением матрицы смежности, поскольку задать нагруженность ребер графа в матричной форме значительно проще, чем вносить изменения в результаты, представленные на рис. 6.

На сформированном графе дорог задаются начальная и конечная вершины маршрута колонны БАК и выбирается алгоритм поиска минимальной длительности.

В тестовом примере в качестве начальной вершины графа была задана вершина 1, а в качестве цели движения — вершина 7.

Результаты решения задачи планирования маршрута движения колонны ТС алгоритмом Дейкстры приведены на рис. 7.

Результат апробации на тестовой задаче планирования предложенного программного комплекса, основанного на алгоритме Дейкстры, совпал с результатами решения той же задачи алгоритмами Флойда—Уоршала и Форда—Беллмана.

Отметим, что в рассматриваемой реализации программного комплекса все показатели нагружен-

Таблица 3

Результат анализа графа дорог по проходимости и времени пути

Участок	Проходимость по массе	Проходимость по углу наклона	Время прохождения участка ТС				Время движения колонны
			1	2	3	4	
1-2		1,024113	31	49	41	29	
1-3		0,898227 Участок не проходим	-	-	-	-	
1-4		0,873526 Участок не проходим	-	-	-	-	
1-5	Участок не проходим	0,833821 Участок не проходим	-	-	-	-	
1-6		0,722711 Участок не проходим	-	-	-	-	
1-7		0,70334 Участок не проходим	-	-	-	-	
1-8		0,668958 Участок не проходим	-	-	-	-	
1-9	Участок не проходим	0,729265 Участок не проходим	-	-	-	-	
1-10		0,890418 Участок не проходим	-	-	-	-	
2-4		0,924482 Участок не проходим	-	-	-	-	
2-5		0,912476 Участок не проходим	-	-	-	-	
2-6	Участок не проходим	1,017621	-	-	-	-	
2-8	Участок не проходим	0,841882 Участок не проходим	-	-	-	-	
2-10		0,789265 Участок не проходим	-	-	-	-	
3-4		1,009752	54	85	71	50	
3-5		1,204952	67	105	88	63	
3-7		1,30088	53	82	69	49	
3-8	Участок не проходим	1,163708	51	81	68	48	
3-9	Участок не проходим	0,977708 Участок не проходим	-	-	-	-	
3-10		0,994453 Участок не проходим	-	-	-	-	
4-8		0,914342 Участок не проходим	-	-	-	-	
5-8		0,853386 Участок не проходим	-	-	-	-	
5-10		0,836198 Участок не проходим	-	-	-	-	
6-8	Участок не проходим	0,86687 Участок не проходим	-	-	-	-	
6-9		0,815291 Участок не проходим	-	-	-	-	
6-10		1,065041	18	28	23	16	
7-8	Участок не проходим	0,770551 Участок не проходим	-	-	-	-	
7-9	Участок не проходим	0,797943 Участок не проходим	-	-	-	-	
7-10	Участок не проходим	1,064351	-	-	-	-	
8-9		0,744232 Участок не проходим	-	-	-	-	
8-10		0,907218 Участок не проходим	-	-	-	-	
9-10		1,216817	35	55	46	33	

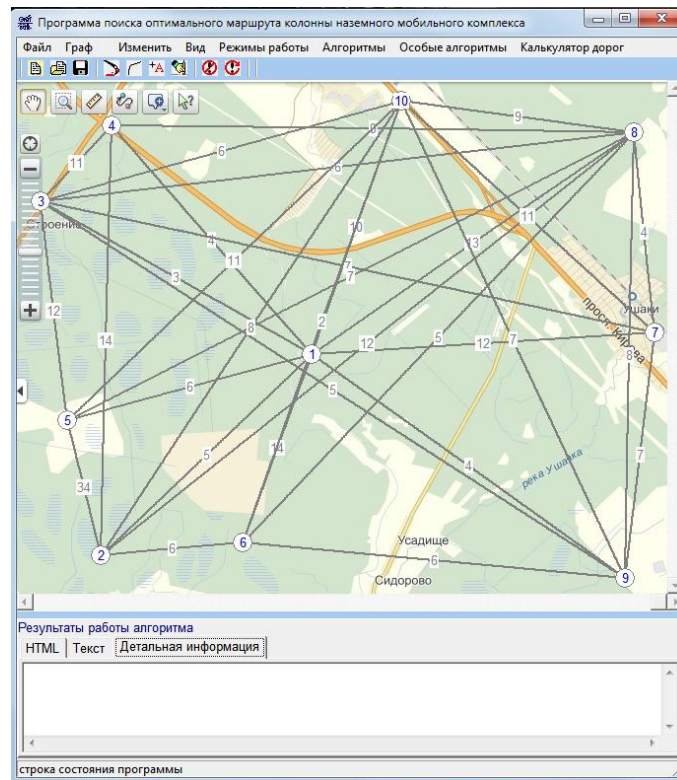


Рис. 5. Нагруженный граф дорог на основе загруженной цифровой карты

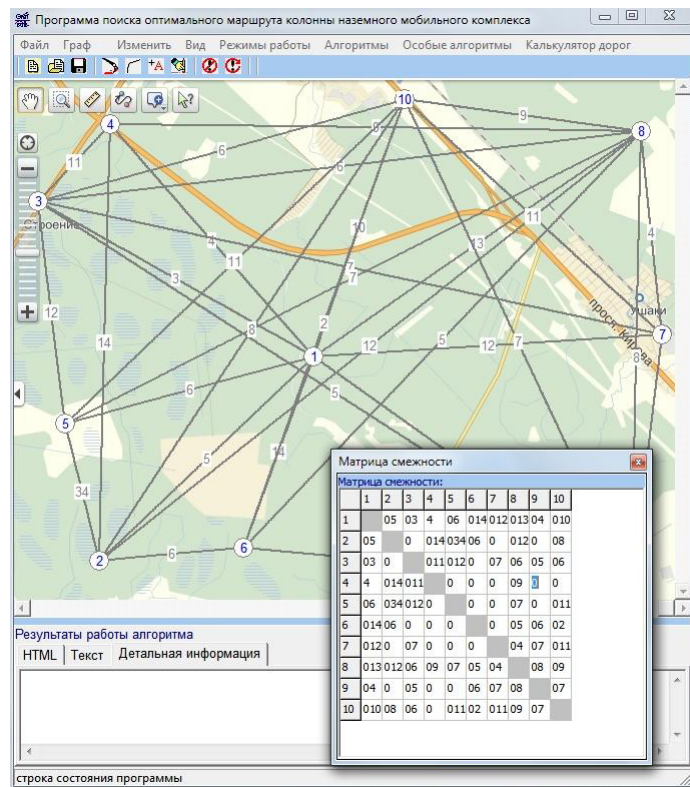


Рис. 6. Формирование графа дорог с использованием матрицы смежности

ности ребер графа дорог должны быть целыми числами. Поэтому целесообразно выбирать расстояния в метрах, а скорость транспортных средств указывать в метрах в секунду (минуту).

Выводы

Разработанный программный комплекс автоматизированной системы планирования позволяет:

- снизить трудоемкость планирования движения ТС в составе колонны БАК по труднодоступ-

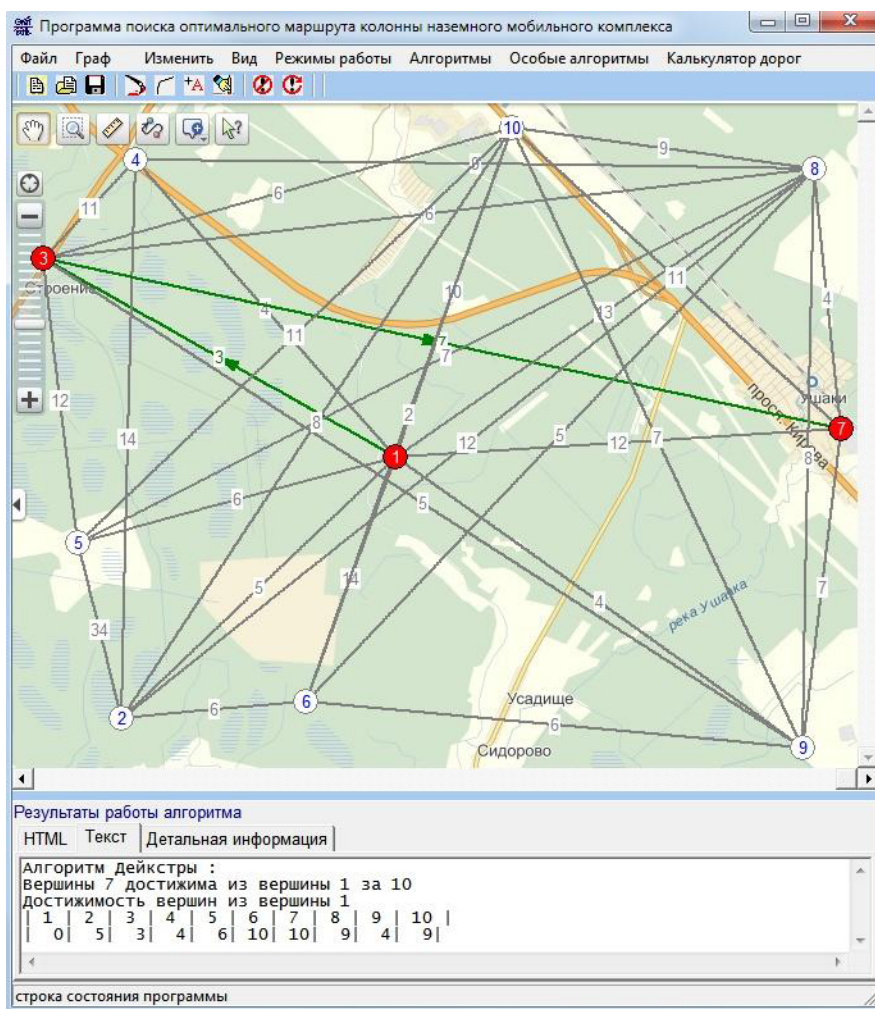


Рис. 7. Результат расчета оптимального маршрута колонны с помощью алгоритма Дейкстры

ной местности за счет автоматизации большинства функций оператора;

- повысить качество и точность выполнения расчетов по анализу графа сети дорог;

- сократить затраты на персонал, необходимый при выполнении работ по планированию движения колонны БАК;

- получать актуальную отчетность по различным показателям эффективности маршрута движения БАК в режиме реального времени для принятия управленческих решений.

Библиографический список

1. Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки (АВИАТОР): Сборник научных статей по материалам докладов II Всероссийской научно-практической конференции (11-13 февраля 2015). — Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. Т.2. — 200 с.
2. Моисеев В.С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами: Монография. Серия «Современная прикладная математика и информатика». — Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования», 2013. — 768 с.
3. Березницкий В.В., Лукьянова Н.В. Исследование и разработка алгоритма нахождения алгоритма кратчайшего пути на графе // Молодежный научно-технический вестник. 2012. №3. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/458059.html>
4. Буч Г., Рамбо Д., Якобсон И. Язык UML: Руководство пользователя (2-е изд.). — М.: ДМК Пресс, 2006. — 496 с.
5. Свами М., Тхуласираман К. Графы, сети и алгоритмы. — М.: Мир, 1984. — 455 с.
6. Ильиных В.А., Колесов В.А. Военная топография: Учебное пособие. — СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2008. — 193 с.
7. Максимов Н.А., Склеймин Ю.Б., Шаронов А.В. Модель для оценки эффективности системы мониторинга с использованием группы беспилотных летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С. 30-39.

BUNDLED SOFTWARE FOR UNMANNED AERIAL SYSTEM FLIGHT TRACKDEVELOPMENT WHILE ITS RE-DEPLOYMENT TO OPERATING ZONE

Maximov N.A.* , Skleymin Yu.B.** , Sharonov A.V.*

Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

* e-mail: k308@mai.ru

** e-mail: skleymin@yandex.ru

Abstract

The paper presents the bundled software meant for wheeled off-road vehicle convoy itinerary selection, while unmanned aerial system (UAS) re-deployment from the deployment site to operating zone. The main feature of this bundled software consists in the possibility of its use not only for road travel, but also in the possibility for travel the part of the route on a country road and off-road.

The performed analysis revealed that it is expedient to select easily realized algorithm as the theoretical basis, such as Dijkstra algorithm, as well as Floyd-Warshall algorithm and Bellman-Ford algorithm.

UML models of the system under development were constructed.

The paper presents the test example of forming characteristics of transport means constituting the convoy. It allowed to determine for each road layout sector its negotiability by the convoy and the convoy travel time along the sector, using the built-in calculator. The authors used simplified computation algorithm to calculate route sectors negotiability parameters and the speed (time) of their passing those sectors. Then the negotiability of a certain sector was determined. Finally, a graph of roads negotiability was plotted. The shortest distance between the UAS location origin and re-deployment destination point is searched on the plotted graph.

The developed automated information system allows:

- Reduce transport means movement constituting a convoy moving off-road route planning labor intensity due to automation of the majority of operator's functions;

- Increase the quality and accuracy of calculations, needed for road layout graph analysis;

- Reduce the personnel, necessary for execution of work on UAS convoy movement planning, costs;

- Obtain up-to-date accounting on various UAS movement route measures of efficiency in real time mode to take managerial solutions.

Keywords: unmanned aerial system, re-deployment, itinerary selection, software system, path on the graph, geographic information system.

References

1. *Aktual'nye voprosy issledovaniy v avionike: teoriya, obsluzhivanie, razrabotki (AVIATOR). Materialy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (11-13 fevralya 2015)*, Voronezh, VUNTs VVS "VVA", 2015, vol. 2, 200 p.
2. Moiseev V.S. *Prikladnaya teoriya upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami* (Unmanned aerial vehicles applied control theory), Kazan', GBU "Respublikanskii tsentr monitoringa kachestva obrazovaniya", 2013, 768 p.
3. Bereznitskii V.V., Luk'yanova N.V. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik*, 2012, no. 3, available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/458059.html>
4. Rumbaugh J., Jacobson I., Booch G. *The Unified Modeling Language Reference Manual*. 2nd Ed. — Boston: Addison-Wesley, 2004. — 742 p.
5. Swamy M.N.S., Thulasiraman K. *Graphs: Theory and Algorithms*, USA, New York: John Wiley & Sons Ltd, 1992, 480 p.
6. Il'inykh V.A., Kolesov V.A. *Voennaya topografiya* (Military topography: a tutorial), Sankt-Peterburg, VKA im. A.F.Mozhaiskogo, 2008, 193 p.
7. Maksimov N.A., Skleymin Yu.B., Sharonov A.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 30-39.