

УДК 621.398

## Применение алгоритмов поиска кратчайших путей при формировании маршрута полета беспилотного летательного аппарата

Михайлов Р. Л.<sup>✉</sup>, Цулун Д. В.Военный ордена Жукова университет радиоэлектроники  
Череповец, 162622, Российская Федерация

**Постановка задачи:** Беспилотные летательные аппараты активно применяются в всех сферах деятельности, в частности, для ведения мониторинга (разведки). Однако современные способы управления ими не позволяют осуществлять автоматизированное формирование маршрута полета с учетом важности объектов мониторинга с позиции эффективного применения целевой нагрузки. Для устранения данного недостатка предложено использовать алгоритмы поиска кратчайших путей, лежащие в основе протоколов маршрутизации в телекоммуникационных сетях. **Используемые методы:** были применены элементы научно-методического аппарата теории графов, теории эффективности целенаправленных процессов и теории вероятности. **Новизна:** элементами новизны представленного решения в процедуре маршрутизации беспилотного летательного аппарата являются учет воздействия на него деструктивных факторов в сочетании с вероятностью выполнения полезной нагрузкой целевой функции с требуемой эффективностью. Также к элементам новизны стоит отнести разработку топологической модели зоны полетов с учетом реальных условий применения целевой нагрузки по объектам. **Результат:** показаны направления модификации алгоритма Дейкстры в области его применения при маршрутизации беспилотного летательного аппарата. **Практическая значимость:** полученные результаты позволят повысить эффективность использования целевой нагрузки беспилотного летательного аппарата при выполнении им различного класса задач

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, маршрутизация, мониторинг

### Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) предназначены для решения широкого спектра задач [1–3]:

- ведение наблюдения, в том числе и в режиме реального времени;
- нанесение ударов по наземным/надводным целям, самостоятельно или носимыми средствами поражения;
- постановка радиоэлектронных помех;
- целеуказания для других средств поражения, а также корректировка их применения;
- транспортировка и доставка грузов и средств в заданный район;
- ретрансляция данных между удаленными абонентами сетей связи;
- отвлечение внимания или использование их в качестве ложных воздушных целей.

---

#### Библиографическая ссылка на статью:

Михайлов Р. Л., Цулун Д. В. Применение алгоритмов поиска кратчайших путей при формировании маршрута полета беспилотного летательного аппарата // Информационные технологии и телекоммуникации. 2023. Т. 11. № 1. С. 26–38. DOI: 10.31854/2307-1303-2023-11-1-26-38

#### Reference for citation:

Mikhailov R., Tsulun D. Application of Shortest Path Algorithms in Forming the Flight Route of an Unmanned Aerial Vehicle. *Telecom IT*. 2023;11(1):26–38. DOI: 10.31854/2307-1303-2023-11-1-26-38

По способу управления БПЛА разделяются на [1] дистанционно пилотируемые, автономные и аппараты с комбинированной системой управления.

Дистанционно пилотируемые БПЛА на всем протяжении полета находятся под контролем оператора, который осуществляет управление как самим летательным аппаратом, так и его бортовой нагрузкой. В этом случае необходима организация непрерывного канала связи между ними. Автономные БПЛА способны осуществлять полет и выполнять поставленную задачу самостоятельно, что устраняет необходимость поддержания непрерывной связи с оператором, однако в данном случае предъявляются повышенные требования к системе навигации и управления полезной нагрузкой. БПЛА с комбинированной системой управления выполняют ряд задач под руководством оператора (например, взлет и посадка), а на остальном участке полета действуют по заложенному в них алгоритму.

Следует отметить, что в процессе организации управления БПЛА при реализации любого из приведенных выше способов, важную роль играет заблаговременное формирование маршрутов его полета, которое должно осуществляться с учетом различных факторов. К негативным факторам, влияющим на живучесть БПЛА, относятся противодействие со стороны систем противовоздушной обороны (ПВО) и радиоэлектронного подавления (РЭП) противоборствующей стороны, неблагоприятные погодные условия, опасные участки местности (линии электропередач, высотные здания) и т. п. Кроме того, важно учесть вероятность выполнения полезной нагрузкой БПЛА своей целевой функции (сбор информации, поражение противника, доставка груза и т. д.) с требуемой эффективностью, что сопряжено с необходимостью включения в маршрут полета БПЛА тех точек (участков местности), где собственно эта нагрузка и будет применяться. Вместе с тем, в настоящее время формирование маршрутов БПЛА на практике осуществляется либо в административном порядке, либо операторами БПЛА самостоятельно без учета вышеизложенных факторов.

### **Анализ известных работ в исследуемой области**

Общим проблемам управления беспилотной авиацией посвящены работы научных школ академика РАН Е. А. Федосова [4], члена-корреспондента РАН В. С. Вербы [5, 6]. Основам организации радиоуправления БПЛА посвящены работы научной школы В.И. Меркулова [7, 8].

Особенности реального управления и применения БПЛА, в том числе и в условиях боевых действий, а также противодействия ПВО и РЭП подробно рассмотрены в работах С. И. Макаренко [9, 10], М. К. Казамбаева, Б. Ж. Куатова [11], Б. И. Казарьяна [12], В. В. Ростопчина [13]. Опыт реального боевого применения БПЛА, а также мнение ведущих специалистов по радиоуправлению ими – В. С. Вербы и В. И. Меркулова [5–8], показывает, что для управления БПЛА первостепенное значение имеет обеспечение непрерывной устойчивой связи с ними, а также обход управляемыми аппаратами районов тактического преимущества противника – зон ПВО и РЭП.

Разработке подходов к маршрутному управлению БЛА с обходом опасных зон и препятствий посвящены работы И. А. Батраевой и Д. П. Тетерина [14], Н. П. Зубова [15], А. Н. Козуба и Д. П. Кучерова [16], Г. Н. Лебедева и А. В. Румакина [17], А. Н. Попова [18], К. С. Яковлева и соавторов [19], а также А. С. Васильченко и соавторов [20–21].

В работах [14–19] рассматриваются вопросы формирования маршрутов полета БПЛА, в том числе с облетом препятствий, а также с учетом различного рода дестабилизирующих факторов: неровностей поверхности Земли, бокового ветра, условий городской застройки. Однако во всех вышеуказанных работах, за исключением работы [16], в качестве препятствий не рассматривались зоны противодействия полету БПЛА со стороны противника, которые могут меняться со временем и угрозы которых носят ярко выраженный целенаправленный характер. Данный вопрос достаточно подробно описывается в [20–21], при этом предлагается для формализованного формирования зон ПВО и РЭП использовать методы теории кластеризации.

В качестве общего недостатка указанных работ можно отметить отсутствие оценки при формировании маршрутов БПЛА полноты выполнения им поставленной задачи с требуемой эффективностью, что является критически важным в процессе реального применения БПЛА. Так, например, ценность полученной с помощью БПЛА информации об особо важном объекте мониторинга в ходе вооруженного конфликта или очаге лесного пожара при организации его тушения может оправдать его потерю в результате воздействия сопутствующих неблагоприятных факторов (противодействие систем ПВО и РЭП, задымление от пожара и т. п.). Кроме того, в данных работах недостаточно исследован вопрос оперативного внесения корректировок в маршрут полета БПЛА на любом из его этапов с учетом динамично меняющейся обстановки, что характерно для задействования беспилотной авиации в экстремальных (чрезвычайных) ситуациях.

Наиболее полно вопросы формирования маршрутов БПЛА в условиях активного воздействия негативных факторов было рассмотрено в работах [20–21]. Вместе с тем, приведенные в них подходы к решению данной задачи, по мнению авторов, не учитывают ряд важных факторов, к которым относятся следующие:

- при прокладывании маршрута БПЛА рассматривается только одна цель и не учитывается путь для его возвращения в точку вылета, что расходится с практикой;

- использование геотопологической модели зоны полетов с шагом дискретизации линий сетки 5 или 10 км для формирования маршрутов БПЛА нерационально, ввиду слишком большого линейного расстояния между узлами, что приводит к искусственному увеличению расстояния, которое необходимо преодолеть БПЛА;

- не осуществляется расчет соотношения оценки угрозы к выигрышу, получаемому в результате выполнения поставленной задачи.

Таким образом, в современных условиях разработанные ранее элементами научно-методического аппарата, используемым в процессе формирования маршрутов полета БПЛА, свойственны указанные ниже недостатки:

- недостаточно полно описаны все негативные факторы, влияющие на формирование рациональных маршрутов полета БПЛА;
- при формировании маршрута полета БПЛА не учитывается вероятность выполнения его полезной нагрузки целевой функции с требуемой эффективностью;
- отсутствует оценка и учет времени нахождения БПЛА в определенном районе, требуемого для выполнения им поставленной задачи;
- отсутствует возможность автоматизированного внесения корректировок в маршрут полета БПЛА с учетом изменения обстановки;
- не осуществляется расчет эффективности использования БПЛА при выполнении поставленной задачи.

Необходимость устранения данных недостатков обуславливает актуальность данной статьи. Следует отметить, что разработка алгоритмов внесения корректировок в маршрут полета БПЛА с учетом изменения обстановки позволит перейти от формирования маршрута полета БПЛА к полноценной его маршрутизации. При этом в качестве перспективного направления исследований авторы рассматривают возможность использования при формировании маршрутов полета БПЛА алгоритмов поиска кратчайших путей, лежащих в основе протоколов маршрутизации информационных потоков в телекоммуникационных сетях (ТКС).

### **Анализ алгоритмов маршрутизации и возможности их использования при формировании маршрутов БПЛА**

К протоколам маршрутизации в ТКС относят протоколы обмена служебной информацией, обеспечивающие построение сетевыми устройствами таблиц маршрутизации, которые в дальнейшем используются для поиска кратчайших путей передачи трафика между узлами сети.

В настоящее время в ТКС наиболее широко используются протоколы динамической маршрутизации [22], которые функционально разделяются на протоколы «внутреннего шлюза» (IGP, *аббр. от англ.* Interior Getaway Protocol) и «наружного» (EGP, *аббр. от англ.* Exterior Getaway Protocols).

Протоколы IGP используются внутри отдельных ТКС, которые с точки зрения сетевого уровня являются автономными системами (областями) маршрутизации в составе ТКС. Основная задача протоколов IGP – автоматическое объединение маршрутизаторов, принадлежащих одной области и связанных каналами связи в единую сеть. Маршрутизаторы рассылают и используют полученную служебную информацию для построения таблиц маршрутизации с заданным критерием эффективности. Протоколы IGP характеризуются полным представлением структуры сети, принадлежащей конкретной ТКС.

К протоколам группы IGP [22, 23] относятся протоколы на основе оценки состояния каналов (OSPF, IS-IS и др.) и дистанционно-векторные протоколы (RIP, RIPng, IGRP, EIGRP и др.).

В ТКС на основе IP наибольшее распространение получили протоколы RIP, RIPng (для IPv6) и OSPF. В составе ТКС, которые построены на оборудовании компании Cisco, могут использоваться протоколы IGRP или EIGRP. В ТКС на основе технологии IP/MPLS используется протокол установления и поддержания соединений PNNI, в котором поиск кратчайших путей реализован через протокол OSPF. В дальнейшем, после установления соединений, передача IP-трафика в них производится путем назначения меток и быстрой коммутации по ним на основе протокола MPLS. При этом в качестве алгоритмов поиска кратчайших путей в большинстве протоколов используются:

- алгоритм Дейкстры [24];
- алгоритм Беллмана – Форда.

Ключевым отличием алгоритма Беллмана – Форда от алгоритма Дейкстры является возможность поиска кратчайших путей с циклами с отрицательным весом [25], что в практике определения маршрута полета БПЛА не имеет физического смысла. Таким образом, в качестве основы для маршрутизации БПЛА предлагается взять алгоритм поиска кратчайших путей Дейкстры.

### Формализация алгоритмов маршрутизации БПЛА

Для формализации задачи маршрутизации БПЛА в первую очередь приведем топологическую модель зоны его полетов с учетом реальных условий применения целевой нагрузки по объектам (рисунок 1).

Отметим следующие особенности представленной модели.

Во-первых, в отличие от телекоммуникационной сферы, БПЛА должен находиться в зоне доступности объекта для его целевой нагрузки в течение отрезка времени, достаточного для сбора информации.

Во-вторых, каждый источник поражения (повреждения) БПЛА характеризуется вероятностью реализации его деструктивного воздействия при прохождении маршрута полета через соответствующие зоны вблизи него. При этом вероятность поражения (повреждения) БПЛА на направлении полета, проходящем через несколько таких зон, будет характеризоваться максимальным значением данной вероятности.

В-третьих, имеется одна точка запуска и посадки БПЛА и несколько точек посадки (на рисунке 1 представлен вариант с одной точкой запуска и посадки, а также – с двумя точками посадки).

Необходимо учесть следующие особенности применения алгоритмов поиска кратчайших путей при маршрутизации БПЛА.

1) В отличие от большинства ТКС граф, отображающий возможные направления полетов БПЛА между вершинами, будет полносвязным.

2) При поиске кратчайших маршрутов в ТКС их вес определяется суммой весов ребер, при этом наличие в его составе конкретных вершин графа и их общее количество не учитывается. Маршрут полета БПЛА, в свою очередь, должен проходить через конкретные вершины графа, которые представляют интерес с позиции целевого предназначения этого аппарата.

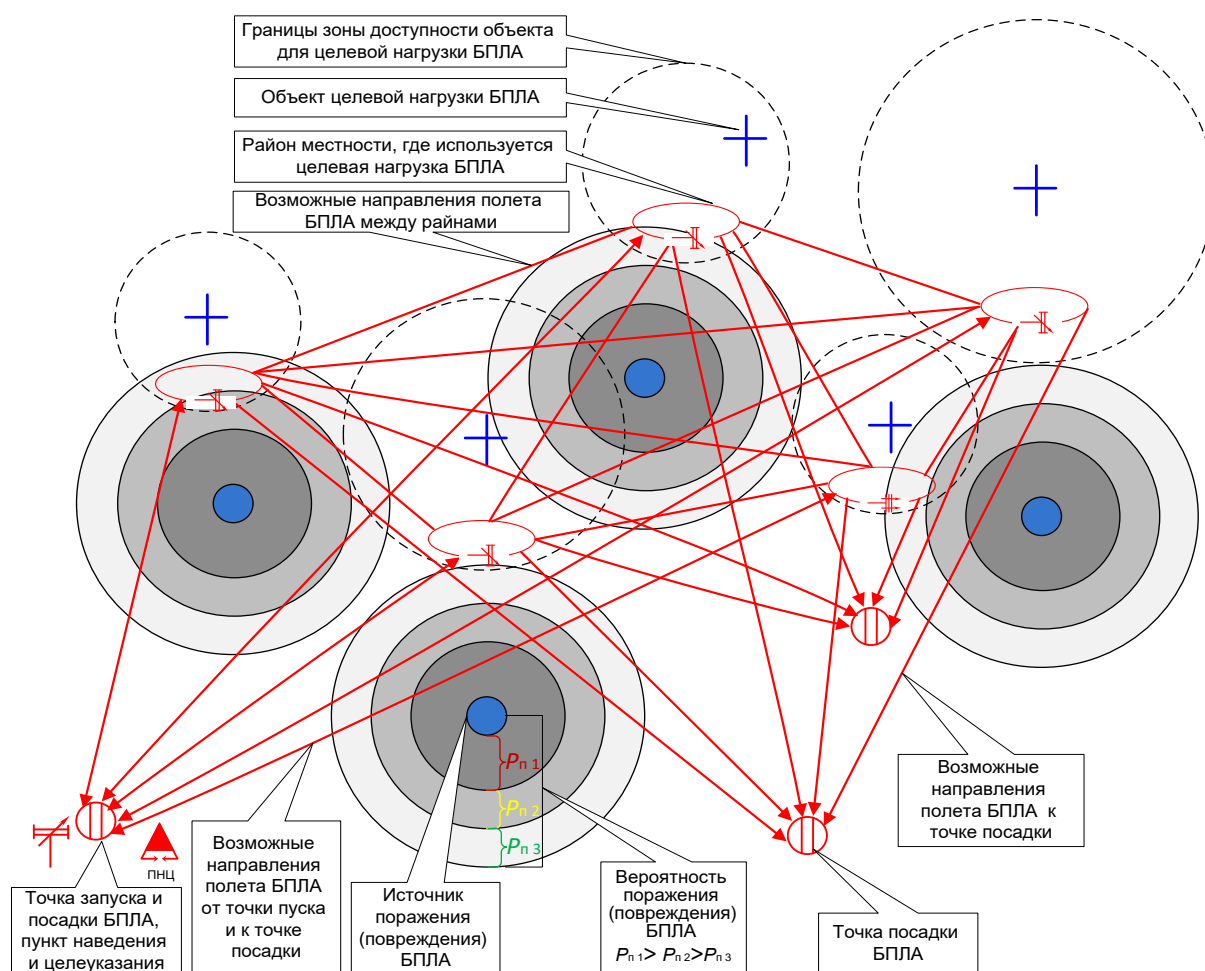


Рис. 1. Топологическая модель зоны полетов БПЛА

3) Маршрут полета БПЛА должен включать в себя вершины, суммарный вес которых с позиции результативности использования его целевой нагрузки должен удовлетворять требованию достаточности собранной в ходе полета информации, что при маршрутизации в ТКС не реализуется. Важно отметить, что вес вершин является априорно неизвестным и устанавливается только при нахождении БПЛА в районе местности, где используется его целевая нагрузка по определенному объекту.

4) Маршрут полета БПЛА может быть и замкнутым (начинаться и заканчиваться из одной вершины – точки запуска и посадки БПЛА), и разомкнутым (начинаться из точки запуска и посадки БПЛА, а заканчиваться в одной из точек посадки, см. рисунок 1), при этом необходимо учитывать преимущества и недостатки обоих вариантов.

5) Веса ребер графа могут отображать как вероятности поражения (для специальной сферы применения БПЛА) или повреждения (для гражданской сферы) БПЛА, так и дальность между вершинами этого ребра, соответственно маршрут полета аппарата может иметь минимальный вес и с позиции сохранения его живучести, и с позиции общего расстояния, но удовлетворять требованиям п. 3.

6) Исходные данные для формирования маршрутов полета БПЛА могут меняться в ходе самого полета. При этом устанавливается вес достигнутых вершин, могут появляться новые вершины и меняться веса ребер графа. Поэтому

необходимо обеспечить возможность прокладки резервных маршрутов и переход на них из любой точки на ребре графа, а не только в вершинах. Иными словами, граф должен быть мерцающим, при этом возможность заблаговременного определения всех его возможных вершин и ребер должна быть дополнительно исследована. Построенные резервные маршруты также должны соответствовать требованиям п. 3.

Формализуем представленную топологическую модель зоны полетов БПЛА в виде графа (рисунок 2), который будет включать в себя:

- 1) вершины графа:
  - совокупность районов местности, где возможно использование целевой нагрузки БПЛА для сбора информации о находящихся в этом районе объекте (объектах);
  - точка запуска и возможные точки посадки БПЛА;
- 2) ребра графа, представляющие собой возможные пути полета между вершинами графа.

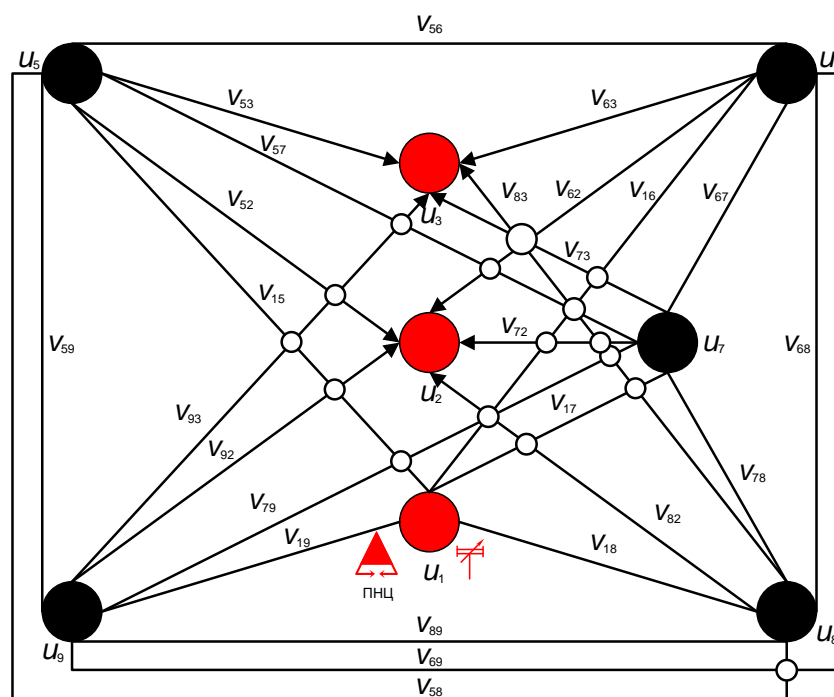


Рис. 2. Граф, формализующий топологическую модель зоны полетов БПЛА

Используем следующие обозначения:

$G(U, V)$  – ориентированный граф топологической модели зоны полетов БПЛА;

$U = \{U_i\}, i = 1, \dots, n$  – множество вершин графа  $G$ ;

$U_1$  – точка запуска;

$U_{it}$  – вершина графа  $U_i$  с указанием ее порядкового номера  $t$  в кратчайшем маршруте;

$M_i$  – исходный вес вершины с позиции использования целевой нагрузкой БПЛА в  $i$ -м районе местности;

$\{M_i\}, i = 1, \dots, n$  – множество исходных весов вершин;

$M_{it}$  – вес вершины  $U_{it}$  с позиции использования целевой нагрузкой БПЛА в  $i$ -м районе местности, заметим, что для графа, представленного на рисунке 2,  $M_{1t} = M_{2t} = M_{3t} = 0$ , а также  $M_{iT} = 0$ ;

$\{M_{it}\}$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $t = 1, \dots, T$  – множество весов вершин;

$t$  – порядковый номер вершины в кратчайшем пути,  $t = 1, \dots, T$ ,  $T \leq n$ ;

$n$  – общее количество вершин в графе  $G(U, V)$ ;

$V_{ij}$  – вес ребра, соединяющего  $i$ -ю и  $j$ -ю вершины;

$V_{ijt}$  – вес ребра, соединяющего  $i$ -ю вершину, имеющую  $(t-1)$  порядковый номер в кратчайшем маршруте, и  $j$ -ю вершину, имеющую  $t$  порядковый номер в кратчайшем маршруте;

$i = 1, \dots, n$ ;  $j = 1, \dots, n$  – переменные, счетчики вершин;

$D = \{U_{it}\}$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $t = 1, \dots, n$  – кортеж вершин кратчайшего маршрута;

$L$  – вес кратчайшего маршрута,  $L = \sum_{t=1}^T V_{ijt}$ .

$M$  – сумма весов вершин, входящих в кратчайший маршрут,  $M = \sum_{t=1}^T M_{it}$ ;

$M_{\text{тр}}$  – требуемое значение результативности использования целевой нагрузки БПЛА.

Алгоритм маршрутизации БПЛА на основе алгоритма Дейкстры представлен на рисунке 3.

В соответствии с подходами авторов к маршрутизации БПЛА во главу угла может быть положена максимизация одной из функции результативности применения его целевой нагрузки.

1) Оперативность сбора информации – в этом случае вес кратчайшего маршрута определяется общим расстоянием, пройденным БПЛА при условии выполнения требований  $M \geq M_{\text{тр}}$ , но без учета необходимости обеспечения живучести БПЛА. Тогда значение веса ребра ( $V_{ij}$ ), соединяющего  $i$ -ю и  $j$ -ю вершины, определяется расстоянием между вершинами  $i$  и  $j$ , а суммарный вес кратчайшего маршрута ( $L$ ) – суммой этих расстояний.

2) Полнота сбора информации – в этом случае маршрут полета БПЛА также должен отвечать требованиям  $M \geq M_{\text{тр}}$ , однако значение общего расстояния, которое он должен преодолеть, не учитывается, а вес кратчайшего маршрута определяется минимальной вероятностью его поражения (повреждения). В этом случае значение веса ребра ( $V_{ij}$ ), соединяющего  $i$ -ю и  $j$ -ю вершины, определяется вероятностью поражения (повреждения) БПЛА при полете между вершинами  $i$  и  $j$ , а – суммарный вес кратчайшего маршрута ( $L$ ) – общей вероятностью поражения (повреждения) БПЛА от точки запуска до точки посадки.

3) Полнота охвата объектов целевой нагрузки БПЛА – в этом случае маршрут полета БПЛА должен проходить через все вершины графа, формализующие районы сбора информации об интересующих объектах ( $U_{it} \in D$ ) при всех  $i = 1, \dots, n$ ) с учетом необходимости обеспечения минимизации как пройденного расстояния, так и вероятности его поражения (повреждения). Тогда значение веса ребра ( $V_{ij}$ ), соединяющего  $i$ -ю и  $j$ -ю вершины, определяется произведением расстояния между вершинами  $i$  и  $j$  и вероятностью поражения (повреждения) БПЛА при полете между этими вершинами, а – суммарный вес кратчайшего



маршрута ( $L$ ) – общей суммой значений этих произведений для всех ребер, входящих в маршрут полета. При этом задача поиска кратчайшего маршрута сводится к известной задаче о коммивояжере [24].

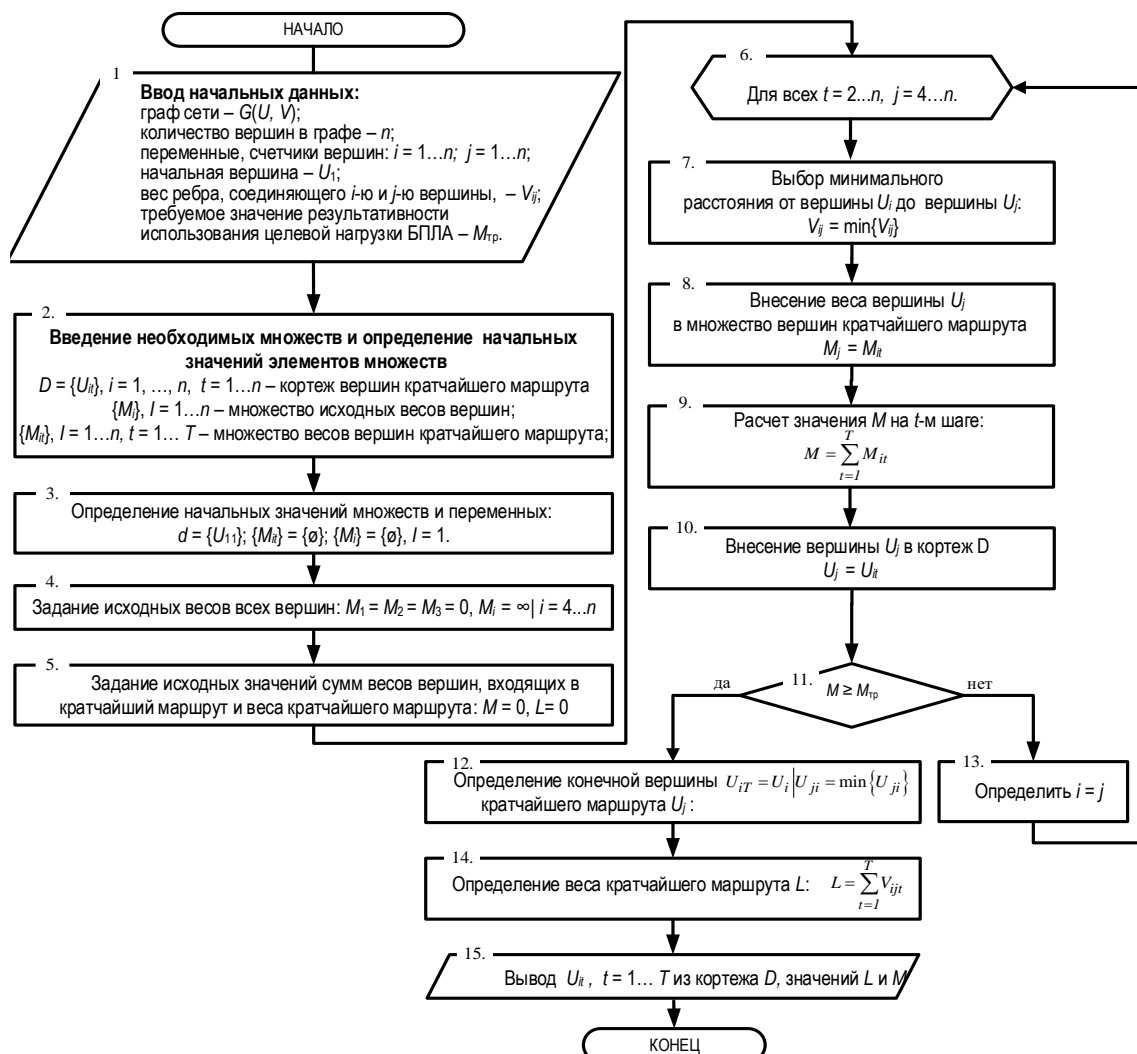


Рис. 3. Алгоритм маршрутизации БПЛА

Рассмотрим результаты работы разработанного алгоритма применительно к максимизации оперативности и полноты собранной информации об объектах. Для этого используем граф, формализующий топологическую модель зоны полетов БПЛА, представленный на рисунке 2, а также введем количественные параметры для весов ребер (рисунок 4). Условно определим, что применения с позиции использования целевой нагрузкой БПЛА в  $i$ -м районе местности дало следующие значения  $M_{it}$  – веса вершины  $U_{it}$ :  $M_{92} = 10$ ;  $M_{53} = 8$ ;  $M_{74} = 11$  и  $M_{65} = 7$ , при значении  $M_{Tr} = 35$ . В блоках 1–5 осуществляется введение необходимых для работы алгоритма множеств и переменных, также определение начальных значений их элементов. На первом шаге работы в блоках 6–10 алгоритм определяет вершину  $U_9$  как ближайшую к вершине  $U_1$  (точки запуска БПЛА) и вносит значение ее веса ( $M_{92} = 10$ ) в множество вершин кратчайшего маршрута, а саму вершину  $U_9$ . – в кортеж  $D$  ( $U_{92}$ ). В ходе дальнейших шагов алгоритм итерационно (блоки 6 и 13) опре-

деляет кратчайших путь от текущей вершины до следующей из вершин, за исключением вершин  $U_2$  и  $U_3$  (точек посадки). При выполнении в блоке 11 условия  $M \geq M_{\text{тр}}$  (в рассмотренном примере при достижении вершины  $U_5$ ), осуществляется поиск ближайшей точки посадки БПЛА (в рассмотренном примере  $U_3 = U_{65}$ ).

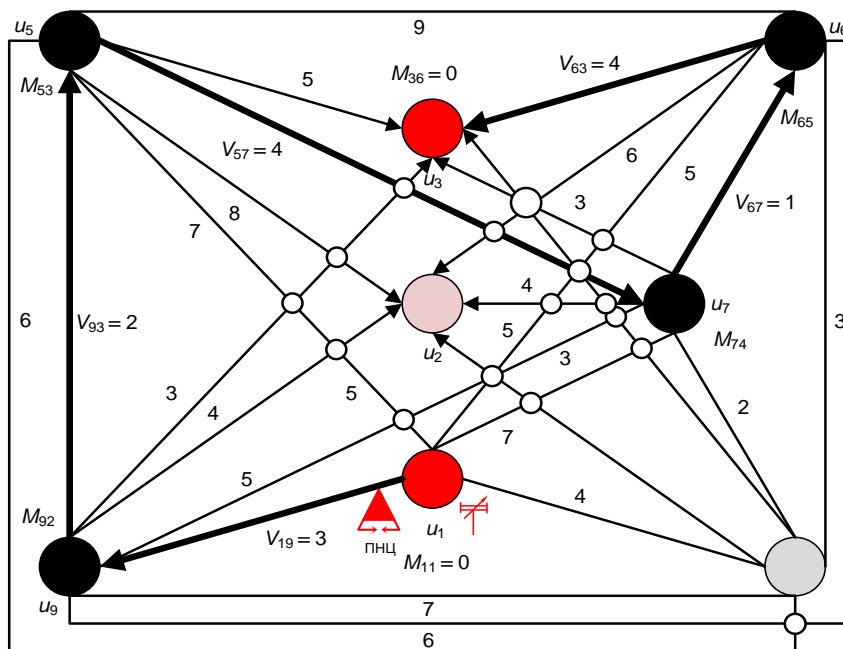


Рис. 4. Результат работы разработанного алгоритма маршрутизации БПЛА

В результате работы алгоритма в блоке 15 выводятся вершины, образующий кратчайший маршрут, его вес и общее значение целевой функции использования нагрузки БПЛА. В рассмотренном примере получим:

$$D = \{U_{92}, U_{53}, U_{74}, U_{92}, U_{65}, U_{36}, \};$$

$$L = 15; M = 36.$$

В рамках направления дальнейших исследований планируется осуществить модификацию представленного алгоритма в направлении поиска резервных маршрутов из всех точек на ребрах графа. Подобной тематике применительно к маршрутизации пакетов в ТКС посвящены работы [25–28]. Однако в аспекте маршрутизации БПЛА переход на них должен осуществляться не в одной из вершин графа, а в той точке на ребре, в момент нахождения в которой стало известно об изменении исходных данных для формирования маршрутов его полета.

### Заключение

В работе проведен анализ алгоритмов поиска кратчайших путей в ТКС применительно к их использованию при формировании маршрута полета БПЛА и его корректировке при изменении исходных данных. Предложен алгоритм маршрутизации БПЛА и описан порядок его работы на примере графа, формализующего топологическую модель зоны полетов БПЛА с учетом присущих им особенностей. Показаны направления дальнейших исследований в выбранной предметной области.

## Литература

1. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. СПб.: Научные технологии, 2020. 204 с.
2. Аниськов Р. В., Архипова Е. В., Гордеев А. А., Пугачев А. Н. К вопросу борьбы с незаконным использованием беспилотных летательных аппаратов коммерческого типа // Вопросы обороны техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 9-10 (111-112). С. 71–75.
3. Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Отвага. № 6(14). URL: <http://otvaga2004.ru/armia-i-vpk/armia-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-bespilotniki/> (дата обращения 11.04.2023)
4. Бабиц В. К., Баханов Л. Е., Герасимов Г. П., Гиндранков В. В., Гришин В. К., Горощенко Л. Б и др. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра. М.: Дрофа, 2004. 816 с.
5. Верба В. С., Меркулов В. И. Теоретические и прикладные проблемы разработки систем радиопередачи нового поколения // Радиотехника. 2014. № 5. С. 39–44.
6. Верба В. С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. М.: Радиотехника, 2014. 528 с.
7. Меркулов В. И., Харьков В. П. Оптимизация иерархического управления группой БЛА // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 8. С. 61–67.
8. Меркулов В. И., Дрогалов В. В., Канащенков А. Н., Лепин В. Н., Самарин О. Ф., Соловьев А. А. Авиационные системы радиопередачи. Т. 1. Принципы построения систем радиопередачи. Основы синтеза и анализа. М.: Радиотехника, 2003. 192 с.
9. Макаренко С. И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетевых войнах начала XXI века. СПб.: Научные технологии, 2017. 546 с.
10. Макаренко С. И., Иванов М. С. Сетевая война – принципы, технологии, примеры и перспективы. СПб.: Научные технологии, 2018. 898 с.
11. Казамбаев М. К., Куатов Б. Ж. Некоторые вопросы использования беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 4(20). С. 97–100. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-4-13
12. Казарьян Б. И. Беспилотные аппараты. Способы применения в составе боевых систем // Военная мысль. 2012. № 3. С. 21–26.
13. Ростопчин В. В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация. 2019. URL: [https://www.researchgate.net/publication/331772628\\_Udarnye\\_bespilotnye\\_letatelnye\\_apparaty\\_i\\_protivovozdusnaa\\_oborona\\_problemy\\_i\\_perspektivy\\_protivostoania](https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_problemy_i_perspektivy_protivostoania) (дата обращения 20.04.2023)
14. Батраева И. А., Тетерин Д. П. Алгоритм планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата при выполнении поисково-спасательных операций // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 6. С. 210–214.
15. Зубов Н. П. Проблемные вопросы навигации и наведения роботизированных летательных аппаратов // Новости навигации. 2011. № 2. С. 29–33.
16. Козуб А. Н., Кучеров Д. П. Интеграционный подход к задаче выбора маршрута группы БПЛА // Системы и средства искусственного интеллекта. 2013. № 4. С. 333–343.

17. Лебедев Г. Н., Румакина А. В. Система логического управления обхода препятствий беспилотным летательным аппаратом при маршрутном полете // Труды МАИ. 2015. № 83. С. 5.
18. Попов А. Н., Тетерин Д. П. Методы планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата с учетом противодействия противника // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 1-2. С. 371–376.
19. Яковлев К. С., Баскин Е. С., Андрейчук А. А. Метод автоматического планирования совокупности траекторий для навигации беспилотных транспортных средств // Управление большими системами. 2015. № 58. С. 306–342.
20. 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.
21. Васильченко А. С., Иванов М. С., Малышев В. А. Формирование полетных зон беспилотных летательных аппаратов по степени устойчивости управления ими в условиях применения средств противовоздушной обороны и радио-электронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 262–279.
22. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: Питер, 2010. 945 с.
23. Макаренко С. И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки. СПб.: Научно-технологические, 2020. 337 с.
24. Свами М., Тхуласираман К. Графы, сети и алгоритмы. М.: Мир, 1984. 454 с.
25. Макаренко С. И., Квасов М. Н. Модифицированный алгоритм Беллмана–Форда с формированием кратчайших и резервных путей и его применение для повышения устойчивости телекоммуникационных систем // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Т. 14. № 3. С. 264–274.
26. Цветков К. Ю., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Формирование резервных путей на основе алгоритма Дейкстры в целях повышения устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2. С. 71–78.
27. Михайлов Р. Л. Модели и алгоритмы маршрутизации в транспортной наземно-космической сети связи военного назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 3. С. 52–82.
28. Михайлов Р. Л. Помехозащищенность транспортных сетей связи специального назначения. Череповец: ЧВВИУРЭ, 2016. 128 с.

**Статья поступила 10 мая 2023 г.**

**Одобрена после рецензирования 01 июня 2023 г.**

**Принята к публикации 08 июля 2023 г.**

### **Информация об авторах**

*Михайлов Роман Леонидович* – доктор технических наук, научно-педагогический работник Военного университета радиоэлектроники.

E-mail: [mikhailov-rom2012@yandex.ru](mailto:mikhailov-rom2012@yandex.ru)

*Цулун Дмитрий Владимирович* – доктор технических наук, научно-педагогический работник Военного университета радиоэлектроники. E-mail: [vure@mil.ru](mailto:vure@mil.ru)

## Application of Shortest Path Algorithms in Forming the Flight Route of an Unmanned Aerial Vehicle

R. Mikhailov✉, D. Tsulun

Cherepovets Higher Military Engineering School of Radio Electronics,  
Cherepovets, 162622, Russian Federation

**Problem definition.** Unmanned aerial vehicles are used in all fields of activity, in particular for monitoring (reconnaissance). However, modern methods of controlling them do not allow for automated formation of the flight route, taking into account the importance of monitoring objects from the position of effective application of the target load. To eliminate this disadvantage, it is proposed to use algorithms for finding shortest paths underlying routing protocols in telecommunication networks. **The aim of the work** is research on the routing of an unmanned aerial vehicle under enemy countermeasures (adverse conditions), as well as the development of an automated formation of the flight route. **Methods used** The elements of the scientific and methodological apparatus of graph theory, the theory of the effectiveness of purposeful processes and the theory of probability were used. **Novelty:** the elements of the novelty of the presented solution in the routing procedure of an unmanned aerial vehicle are taking into account the impact of destructive factors on it in combination with the probability of the payload performing the target function with the required efficiency. Also, the elements of novelty should include the development of a topological model of the flight zone, taking into account the actual conditions of application of the target load on objects. **Result:** The directions of modification of Dijkstra and Bellman-Ford algorithms in the direction of their application in the routing of an unmanned aerial vehicle are shown. **Practical significance:** The results obtained will increase the efficiency of using the target load of an unmanned aerial vehicle when performing various classes of tasks/

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, routing, monitoring

### Information about Authors

*Roman Mikhailov* – Ph.D. of Engineering Sciences. Scientific and pedagogical worker (Cherepovets Higher Military Engineering School of Radio Electronics)  
E-mail: mikhailov-rom2012@yandex.ru

*Dmitry Tsulun* – Scientific and pedagogical worker. Military University of Radio Electronics (Cherepovets Higher Military Engineering School of Radio Electronics).  
E-mail: vure @mil.ru