

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК 656.022

DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_53

*Д. В. Кузьмин***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ПУТИ В ГРАФАХ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ
ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Аннотация. Рассмотрен вопрос применимости алгоритмов Дейкстры, A^* и поиска в ширину для решения задач поиска пути в средах с препятствиями. Данные алгоритмы могут быть использованы при решении задач пространственного развития линейных объектов наземной транспортной инфраструктуры.

С алгоритмами проведена серия простых экспериментов с целью определения количественных показателей их асимптотической сложности, т. е. количества выполняемых операций и времени выполнения алгоритма в условиях поиска пути в средах с препятствиями. Серия экспериментов имеет различную конфигурацию, определяемую направленностью поиска (однонаправленный и двунаправленный), способом прохода ячеек (прямой и смешанный) и вариантом алгоритма поиска. При рассмотрении алгоритма A^* в качестве дополнительного параметра, конфигурирующего работу алгоритма, были использованы различные метрики – расстояния Чебышева, манхэттенское, евклидово.

Ключевые слова: алгоритмы поиска пути, алгоритм Дейкстры, алгоритм A^* , алгоритм поиска в ширину, трассирование, пространственное развитие транспортной инфраструктуры, транспортные системы, теория графов.

Для цитирования: Кузьмин, Д. В. Использование различных алгоритмов поиска пути в графах для решения задач пространственного развития транспортной инфраструктуры / Д. В. Кузьмин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 53–63. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_53.

Введение

Пространственное развитие транспортной инфраструктуры является фундаментальной задачей организации работы и функционирования транспортных систем. Значительная часть подходов к решению данной задачи сводится к декомпозиции рассматриваемого полигона на отдельные территориальные единицы, совокупность которых в дальнейшем рассматривается как граф. Совокупность рассматриваемых отдельных территориальных единиц, не имеющая разрывов и наложений, представляет собой растровую пространственную модель.

Под растровым моделированием пространственных данных понимают способ цифрового описания пространственных объектов и топологических отношений между ними. Описание выполняется с помощью регулярных и нерегулярных сеток, покрывающих рассматриваемый полигон. Сетка делит рассматриваемый полигон на дискретные ячейки – отдельные территориальные единицы (ОТЕ). При решении геоинформационных задач чаще используются регулярные (постоянные) сетки, в которых все ОТЕ имеют одинаковый размер, форму и т. д. Все ОТЕ содержат одинаковый набор параметров, характеризующих их пространственные свойства, т. н. атрибутивные данные, которые могут содержать информацию о топологических, гидрографических, антропогеографических и других свойствах пространства. Соединение центроидов ОТЕ образует граф.

Основная часть

Растровые сетки широко используются для решения геоинформационных задач поиска пути, например для трассировок трубопроводов [1, 2], автомобильных дорог [3, 4], железных дорог [3, 5], линий электропередач [6, 7]. Логика использования растровых сеток в этом случае заключается в присвоении всем ОТЕ одинакового набора пространственных данных – т. н. атрибутов. Анализируя различными методами распределение значений атрибутов ОТЕ, исследователь может определить наилучший маршрут в рамках существующей инфраструктуры или оптимальное пространственное развитие трассы.

Растровые модели поиска имеют слабые стороны. По причине графового представления пространства (абстракция узлов и связей) возникают неизбежные искажения трассировки: например, трасса может оказаться избыточно длинной или содержать множество геометрических несовершенств.

Это приводит к получению нереалистичных результатов определения пространственного развития трассы. Подробно данная проблематика рассмотрена в работе [8]. В частности, отмечается, что одномерный граф является приближением к бесконечному числу трассировок в рамках рассматриваемой области пространства, поэтому неизбежны фактические расхождения между расчетной и реальной трассой. Путь, прокладываемый в растровом пространстве, имеет дискретный шаг, определяемый в том числе геометрическими свойствами формы ОТЕ. Это приводит к неизбежным удлиннениям и геометрическим несовершенствам трассы. Особенно явно эти негативные эффекты проявляются в неоднородных растровых пространствах. По причине существенной разницы количественных показателей атрибутивных данных путь подвержен частым изменениям направления, тогда как в условиях однородности растра данные искажения менее выражены [9].

Использование алгоритмов поиска в пространствах, содержащих препятствия

При формировании дискретного пространства часть отдельных территориальных единиц может потенциально не подходить для трассирования, а следовательно, должна быть исключена из рассмотрения. Причины для такого исключения могут быть самыми разнообразными. Например, отдельная территориальная единица может принадлежать природоохранной зоне, покрывать сложный гидрографический объект, содержать военные объекты и прочее.

Процесс исключения неперспективных ячеек может быть выполнен двумя путями: явно, т. е. через удаление непригодных ячеек (соответствующих вершин и ребер графа), или через функцию стоимости. Опишем формально процесс исключения неперспективных для трассирования ячеек из рассмотрения.

Представим дискретное пространство рассматриваемого полигона в виде графа $G = (V, E)$, где V – множество вершин, E – множество ребер. Каждая ячейка v пространства является отдельной территориальной единицей $v \in V$, находящейся в окружении множества соседних ячеек $A(v)$. Данное множество напрямую зависит от типа связности, т. е. может содержать 4 или 8 ячеек (возможны и иные варианты связности). Каждая ячейка v имеет числовой рейтинг $R(v)$, отражающий ее пригодность для трассирования. Часть ячеек (вершин графа), непригодных для трассирования, представляет множество $U \subset V$. Стартовая и целевая ячейки – соответственно S и T .

Множество исключенных из рассмотрения ячеек U определяется заранее на основе анализа исследуемого пространства, например, с помощью анализа ГИС данных:

$$U = \{v \in V \mid \text{ячейка } v \text{ непригодна для посещения}\}$$

После формирования множества U возможны несколько вариантов исключения.

Неявное исключение заключается в модификации функции стоимости перехода между ячейками. Для того чтобы алгоритм избегал посещения таких ячеек, стоимость их посещения должна быть принципиально большой.

$$c(u, v) = \begin{cases} \infty, & \text{если } v \in U, \\ f(R(u), R(v), d(u, v)), & \text{если } v \notin U, \end{cases}$$

где $d(u, v)$ – расстояние между ячейками u и v , определенное какой-либо метрикой, например евклидовой; $f(R(u), R(v), d(u, v))$ – функция, определяющая стоимость перехода в зависимости от рейтингов ячеек и расстояния между ними.

Если специфика задачи предполагает работу с графом, взвешенным по вершинам, то необходимо определение функции $p: V \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$, назначающей штраф каждой вершине, принадлежащей множеству исключенных вершин U .

$$p(v) = \begin{cases} M, & \text{если } v \in U, \\ 0, & \text{если } v \notin U, \end{cases}$$

где M – большое положительное число, явно превышающее суммарную стоимость любого разумного пути. Если специфика задачи требует градации степени запрета на посещение ячейки, то размер штрафа может быть различным. Например, размеры штрафа для природоохранных зон и зон со сложными геологическими условиями могут существенно отличаться. Поскольку природные заповедники, национальные парки, природные парки и памятники природы относятся к особо охраняемым природным территориям федерального значения, на использование земельных участков и водных объектов в границах их охранных зон [10], в том числе строительство наземной транспортной инфраструктуры, существуют строгие ограничения. Следовательно, отдельные территориальные единицы, содержащие

такие объекты, должны иметь полный запрет на рассмотрение алгоритмом. В случае сложных геологических условий величина штрафа может быть ниже, так как трассирование в рамках такой отдельной территориальной единицы возможно, но требует дополнительных затрат, например, связанных с осушением болот, объемными подготовительными работами и проч.

В случае если решение задачи требует использования различных штрафов к посещению ячейки при работе алгоритма, то необходимо использовать различные значения M для соответствующих подмножеств U .

Теперь функция веса вершины должна помимо рейтинга самой вершины содержать штраф:

$$w'(v) = w(v) + p(v),$$

где $w'(v)$ – модифицированный вес вершины v .

Стоимость перехода между вершинами u и v определяется функцией $c(u, v)$ и зависит от весов соответствующих вершин и расстояния между ними:

$$c(u, v) = g(w'(u), w'(v), d(u, v)),$$

где $d(u, v)$ – расстояние между ячейками u и v . В случае если граф взвешен по вершинам и не имеет весов ребер данное расстояние принимается равным единице $d(u, v) = 1$ для всех существующих ребер пары u и v . В противном случае $d(u, v) = \infty$. Если же ребра взвешены, то расстояние $d(u, v)$ принимается равным весу соответствующего ребра пары u и v ;

g – функция, определяющая стоимость перехода, которая может быть представлена в виде суммы модифицированных весов вершин:

$$g(w'(u), w'(v), d(u, v)) = w'(u) + w'(v).$$

С учетом расстояния:

$$g(w'(u), w'(v), d(u, v)) = w'(u) + w'(v) + d(u, v).$$

Важно, чтобы g не была отрицательной. После модификации функции стоимости алгоритм поиска пути может быть запущен на соответствующем графе.

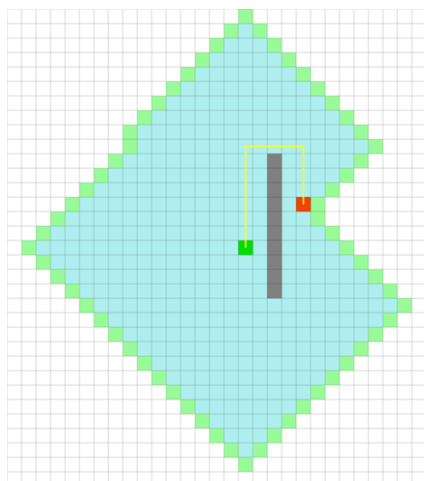
Таким образом, неявное исключение ячеек заключается в добавлении штрафа к весу (рейтингу) вершины. Так как величина штрафа может существенно превышать суммарную стоимость любого возможного пути в рамках рассматриваемого графа, алгоритм поиска вынужден избегать посещения данных ячеек при наличии соответствующих альтернатив.

Поведение различных алгоритмов для поиска пути в рамках пространств, содержащих препятствия, имеет отличия. Проведем серию экспериментов для сравнения различных алгоритмов на предмет пространственной и временной сложности выполнения.

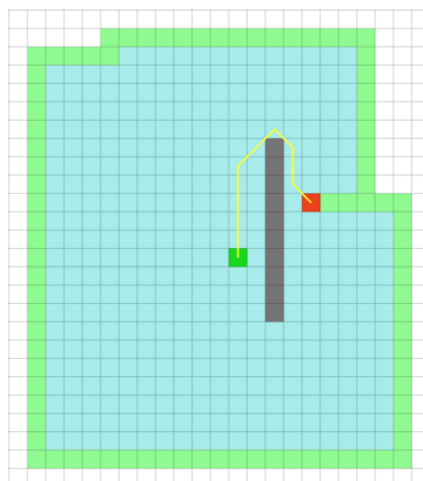
На рассматриваемое ранее поле добавим линейное препятствие между вершинами старта и финиша. Конфигурация эксперимента определяется вариантами реализации поиска (однаправленный, двунаправленный) и возможностью пересечения ячейки (прямое, смешанное). Визуализация результатов экспериментов с алгоритмом поиска в ширину представлена на рис. 1.

Очевидно, что появление единственного препятствия потребовало от алгоритма выполнения значительно большего числа операций. Сравним результаты проведенных экспериментов с результатами, полученными ранее при использовании алгоритма в условиях среды, не имеющей препятствий. Для удобства восприятия обобщим результаты в виде столбиковой диаграммы, представленной на рис. 2.

Наличие препятствий напрямую определяет количество выполняемых операций, а следовательно, и потребляемых вычислительных мощностей. Связано это в первую очередь с тем, что, обходя препятствие, находящееся на пути к целевой ячейке, алгоритм выполняет множество избыточных вычислений. Это обусловлено в первую очередь отсутствием эвристики. Каждая итерация основного цикла увеличивает радиус фронта поиска на ячейку. Таким образом, пока поиск уперся в препятствие и фактически фронт поиска не двигается в сторону целевой вершины, алгоритм вынужден с каждым шагом перебирать значительное количество бесперспективных для итогового пути ячеек. Более наглядно данный эффект проявляется на конфигурациях с однонаправленной реализацией поиска. В данных вариантах центр пространственного развития поискового фронта имеет явное смещение от стартового узла в сторону противоположную вершине поиска, так как между исходным узлом и узлом назначения имеется препятствие. Данный эффект прослеживается и при использовании алгоритма Дейкстры (рис. 3).

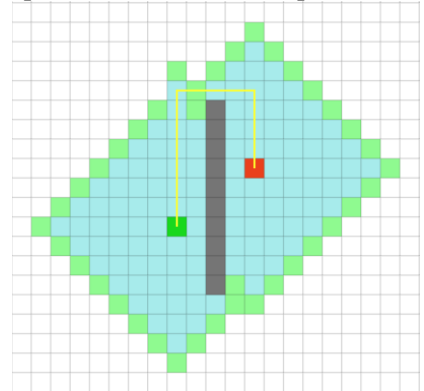
 a

Длина пути – 15 ед., количество операций:
812, время выполнения алгоритма: 0,6 мс



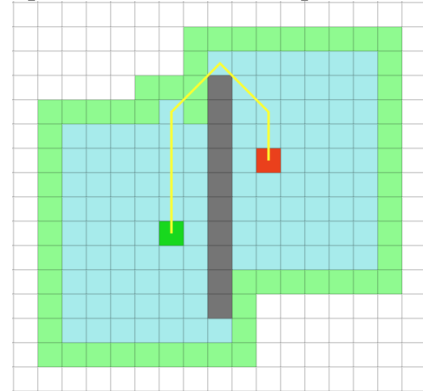
6

Длина пути – 12,66 ед., количество операций:
856, время выполнения алгоритма: 1,4 мс



6

Длина пути – 15 ед., количество операций:
284, время выполнения алгоритма: 0,2 мс



2

Длина пути – 12,66 ед., количество операций:
277, время выполнения алгоритма: 0,4 мс

Рис. 1. Визуализация результатов экспериментов по использованию алгоритма поиска в ширину в средах с препятствиями:

a – однонаправленный поиск, прямой проход ячеек; b – однонаправленный поиск, смешанный проход ячеек; v – двунаправленный поиск, прямой проход ячеек; z – двунаправленный поиск, смешанный проход ячеек

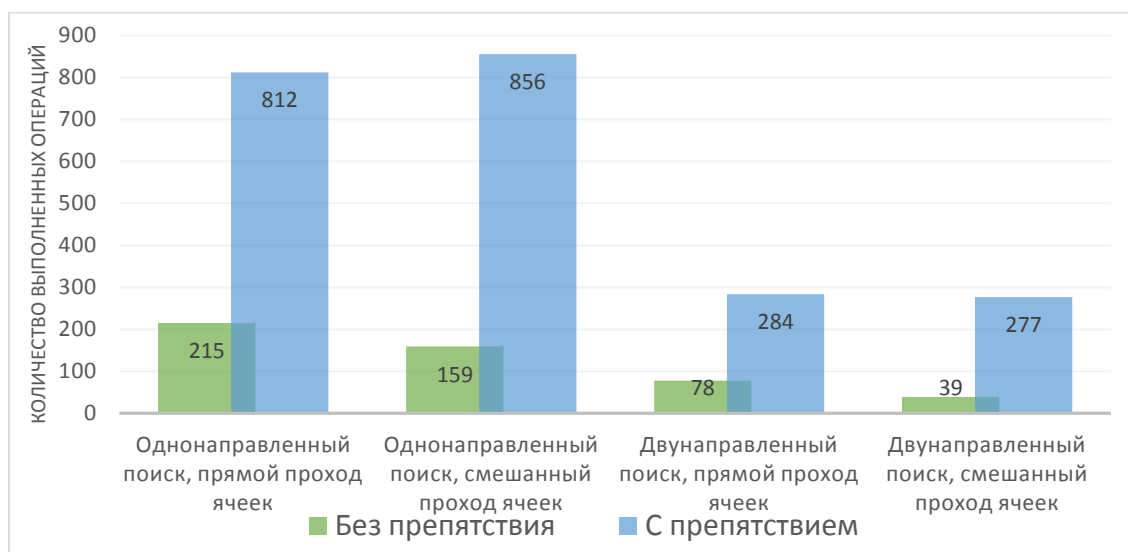
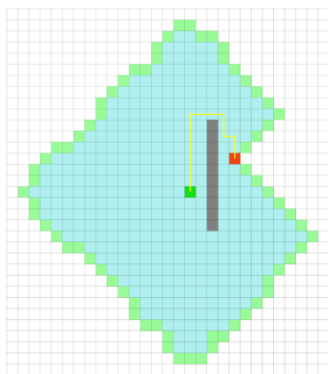
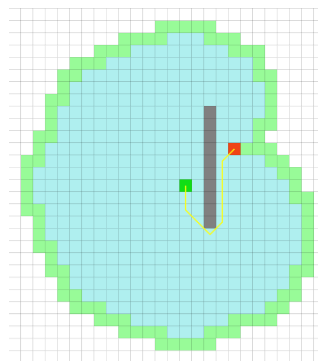


Рис. 2. Результаты экспериментов по использованию алгоритма поиска в ширину в различных средах с наличием и отсутствием препятствий



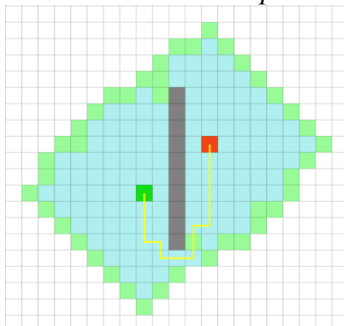
а

Длина пути – 15 ед., количество операций: 816, время выполнения алгоритма: 0,6 мс



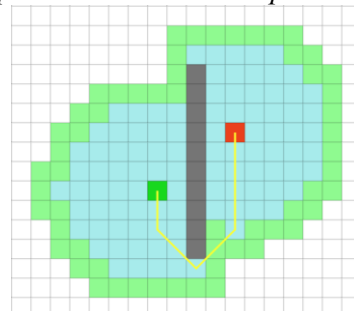
б

Длина пути – 12,66 ед., количество операций: 867, время выполнения алгоритма: 1,1 мс



в

Длина пути – 15 ед., количество операций: 300, время выполнения алгоритма: 0,4 мс



г

Длина пути – 12,66 ед., количество операций: 257, время выполнения алгоритма: 0,3 мс

Рис. 3. Визуализация результатов экспериментов по использованию алгоритма Дейкстры в средах с препятствиями:

а – односторонний поиск, прямой проход ячеек; б – односторонний поиск, смешанный проход ячеек; в – двусторонний поиск, прямой проход ячеек; г – двусторонний поиск, смешанный проход ячеек

По аналогии с поиском в ширину обобщим полученные результаты в виде диаграммы, сравним беспрепятственный поиск и поиск с наличием препятствий двух алгоритмов (рис. 4, табл. 1).



Рис. 4. Сравнение результатов экспериментов с алгоритмами в различной конфигурации поиска по показателю «Количество выполняемых операций»

Таблица 1

Сравнение асимптотической сложности алгоритмов поиска в ширину и Дейкстры по результатам проведенных экспериментов, показатель «Количество выполняемых операций»

Конфигурация поиска	Алгоритм поиска в ширину		Алгоритм Дейкстры		Сравнительный результат использования алгоритма Дейкстры относительно поиска в ширину		Увеличение количества операций при появлении препятствий, кратность	
	без препятствий	с препятствиями	без препятствий	с препятствиями	без препятствий	с препятствиями	Поиск в ширину	Дейкстры
Однонаправленный прямой	215	812	232	816	+7,9 %	+0,5 %	3,78	3,52
Однонаправленный смешанный	159	856	205	867	+28,9 %	+1,3 %	5,38	4,23
Двунаправленный прямой	78	284	86	300	+10,3 %	+5,6 %	3,64	3,49
Двунаправленный смешанный	57	277	59	257	+3,5 %	-7,2 %	7,1	4,36

Наиболее контрастная разница наблюдается именно в сравнении условий поиска, а не используемых алгоритмов. Можно уверенно заключить, что препятствия значительно увеличивают вычислительную сложность поиска для всех конфигураций, особенно в случае двунаправленного поиска со смешанным проходом ячеек.

Оба алгоритма показывают практически одинаковое покрытие исследуемой области в рамках соответствующих конфигураций эксперимента, однако в условиях наличия препятствий алгоритм Дейкстры требует выполнения немного большего количества операций, особенно в конфигурации с однонаправленным поиском. В условиях с наличием препятствий, напротив, алгоритм Дейкстры немного более эффективен, особенно для двунаправленного поиска со смешанным проходом ячеек. Тем не менее очевидно, что разница между используемыми алгоритмами в данном контексте минимальна.

В первую очередь это обусловлено отсутствием эвристики при выполнении поиска. Фактически поиск данными алгоритмами осуществляется вслепую, что вынуждает в обоих случаях проводить исследование областей, явно не имеющих потенциала для трассирования наиболее благоприятного пути (см. рис. 1, 3, 4).

Для определения степени влияния эвристики на поиск пути в средах с препятствиями проведем серию экспериментов с алгоритмом поиска A*. Результаты экспериментов представлены на рис. 5.

Сравним полученные результаты, обобщив данные в рамках диаграммы, представленной на рис. 6 и в табл. 2.

Сравнение различных эвристик поиска позволяет заключить, что при смешанном проходе ячеек без препятствий эвристики манхэттенского и евклидова расстояния показывают примерно одинаковые результаты по количеству выполняемых операций и имеют небольшое преимущество перед расстоянием Чебышева. При смешанном проходе ячеек евклидово расстояние показывает наилучшие результаты и является наиболее предпочтительной функцией. Наличие препятствий немного меняет картину предпочтений эвристической функции. В этом случае при смешанном и прямом проходах наилучшим вариантом функции является манхэттенское расстояние. Таким образом, наименее эффективной метрикой является расстояние Чебышева.

СМЕШАННЫЙ (ДИАГОНАЛЬНО-ПРЯМОЙ) ПРОХОД ЯЧЕЕК

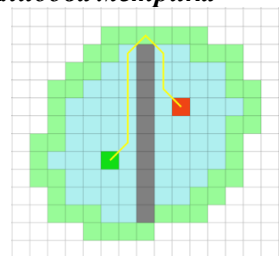
Евклидова метрика

Манхэттенское расстояние

Расстояние Чебышева

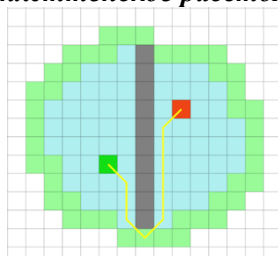
Двухнаправленный поиск

а



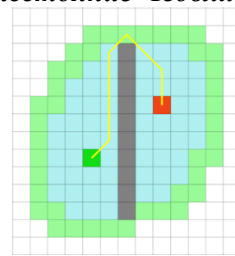
Длина пути – 12,66 ед.,
количество операций:
175, время выполнения
алгоритма: 0,5 мс

б



Длина пути – 12,66 ед.,
количество операций:
182, время выполнения
алгоритма: 0,4 мс

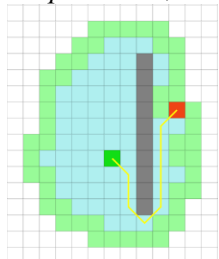
в



Длина пути – 12,66 ед.,
количество операций:
167, время выполнения
алгоритма: 0,5 мс

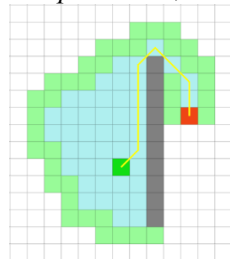
Однонаправленный поиск

г



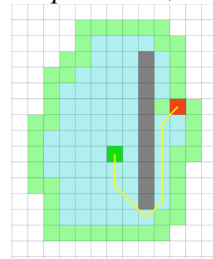
Длина пути – 12,66 ед.,
количество операций:
177, время выполнения
алгоритма: 0,5 мс

д



Длина пути – 12,66 ед.,
количество операций:
132, время выполнения
алгоритма: 0,3 мс

е



Длина пути – 12,66 ед.,
количество операций:
190, время выполнения
алгоритма: 2,4 мс

ПРЯМОЙ ПРОХОД ЯЧЕЕК

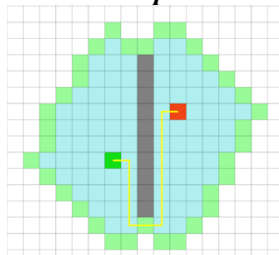
Евклидова метрика

Манхэттенское расстояние

Расстояние Чебышева

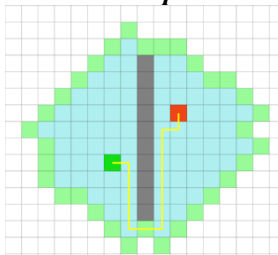
Двухнаправленный поиск

ж



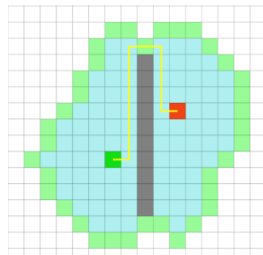
Длина пути – 15 ед., ко-
личество операций: 218,
время выполнения алго-
ритма: 0,5 мс

з



Длина пути – 15 ед., ко-
личество операций: 200,
время выполнения алго-
ритма: 0,4 мс

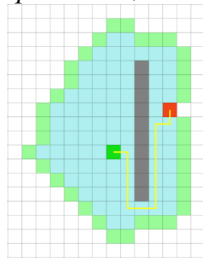
и



Длина пути – 15 ед., ко-
личество операций: 222,
время выполнения алго-
ритма: 0,5 мс

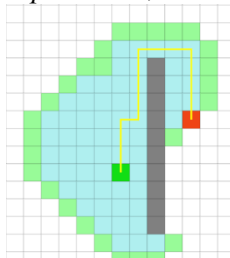
Однонаправленный поиск

к



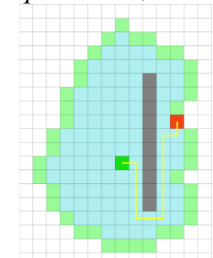
Длина пути – 15 ед., ко-
личество операций: 213,
время выполнения алго-
ритма: 0,6 мс

л



Длина пути – 15 ед., ко-
личество операций: 153,
время выполнения алго-
ритма: 0,3 мс

м



Длина пути – 15 ед., ко-
личество операций: 236,
время выполнения алго-
ритма: 0,4 мс

Рис. 5. Визуализация результата поиска пути алгоритмом А* в средах с препятствиями: зеленая и красная ячейки – соответственно стартовый и целевой узлы; ячейки светло-зеленого цвета – рассматриваемые в рамках текущей итерации; ячейки голубого цвета – множество посещенных вершин; ячейки серого цвета – препятствия.

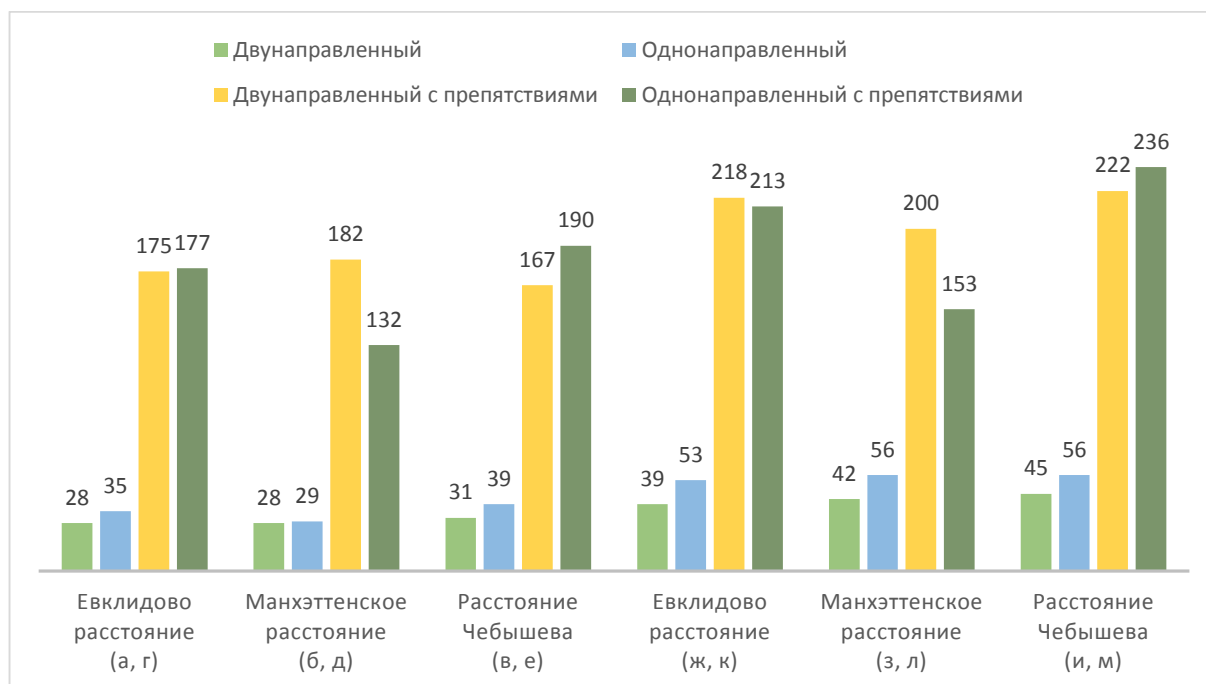


Рис. 6. Сравнение результатов экспериментов с алгоритмом А* в различной конфигурации поиска, в условиях отсутствия и наличия препятствий, по показателю «Количество выполняемых операций»:

а–е – смешанный проход ячеек; *ж–м* – прямой проход ячеек

Таблица 2

Сравнение асимптотической сложности алгоритмов А* по результатам проведенных экспериментов, показатель «Количество выполняемых операций»

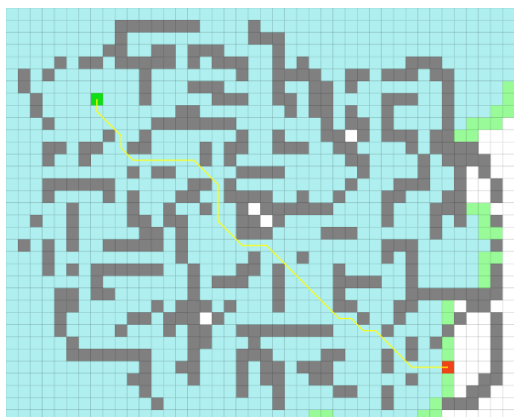
Эвристика (Е – евклидово расстояние, М – манхэттенское рас- стояние, Ч – расстояние Чебышева)	Проход ячеек (С – смешанный, П – прямой)	Направленность поиска (О – однонаправленный, Д – двунаправленный)	Наличие препятствий в среде поиска		Влияние препятствий (увеличение количества выполняемых операций в среде с наличием препятствий относительно свободной среды, кратность)
			без препят- ствий	с препятстви- ями	
Е	С	Д	28	175	6,25
М	С	Д	28	182	6,5
Ч	С	Д	31	167	5,39
Е	С	О	35	177	5,06
М	С	О	29	132	4,55
Ч	С	О	39	190	4,87
Е	П	Д	39	218	5,59
М	П	Д	42	200	4,76
Ч	П	Д	45	222	4,93
Е	П	О	53	213	4,02
М	П	О	56	153	2,73
Ч	П	О	56	236	4,21

Результаты эксперимента выявили большую эффективность смешанного прохода ячеек в сравнении с прямым, так как всегда первый требует меньшего количества выполняемых операций независимо от используемой метрики, направленности поиска, наличия или отсутствия препятствий в среде поиска. Аналогичный вывод можно сделать и в отношении двунаправленного поиска, который показал значительно большую эффективность при всех конфигурациях эксперимента.

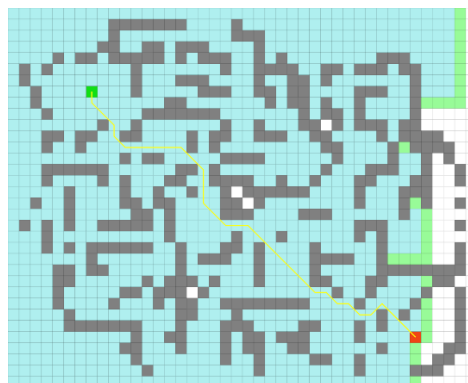
Выводы

В качестве общего вывода можно заключить, что наличие препятствий значительно усложняет поиск пути, кратно увеличивая количество выполняемых операций.

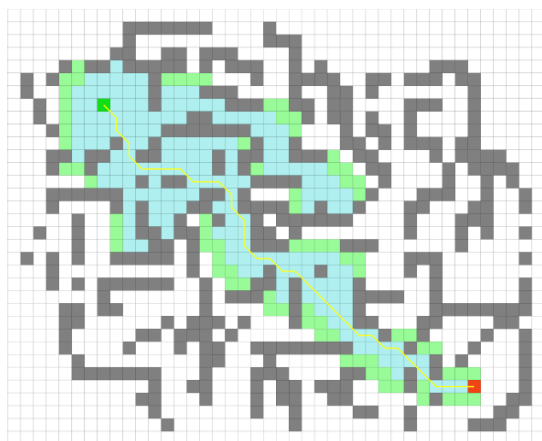
Стоит отметить, что при рассмотрении больших сред со сложной структурой препятствий получаемые результаты могут иметь более контрастные отличия и значительно нагляднее отражать эффективность того или иного алгоритма или метрики в рамках различных условий поиска (рис. 7).



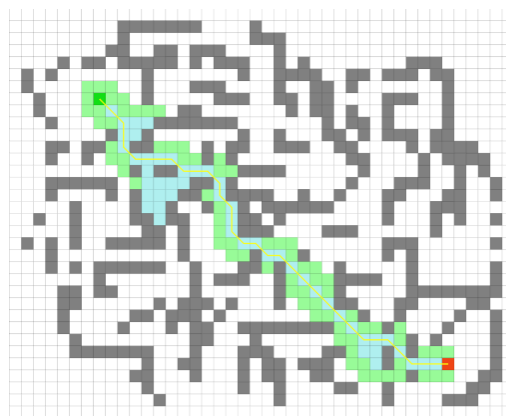
Алгоритм Дейкстры. Однонаправленный поиск, диагональный проход ячеек. Длина пути – 41,04 ед., количество операций: 2140, время выполнения алгоритма: 3,3 мс



Поиск в ширину. Однонаправленный поиск, диагональный проход ячеек. Длина пути – 41,87 ед., количество операций: 2028, время выполнения алгоритма: 1,7 мс



Алгоритм A*. Евклидово расстояние, однонаправленный поиск, диагональный проход ячеек. Длина пути – 41,04 ед., количество операций: 440, время выполнения алгоритма: 1,2 мс



Алгоритм A*. Манхэттенское расстояние, однонаправленный поиск, диагональный проход ячеек. Длина пути – 41,04 ед., количество операций: 178, время выполнения алгоритма: 1,5 мс

Рис. 7. Визуализация результата поиска различными алгоритмами в средах с препятствиями: зеленая и красная ячейки – соответственно, стартовый и целевой узлы; ячейки светло-зеленого цвета – рассматриваемые в рамках текущей итерации; ячейки голубого цвета – множество посещенных вершин; ячейки серого цвета – препятствия

Таким образом, алгоритм A* показывает себя лучше, чем алгоритм Дейкстры и поиск в ширину, поскольку требует значительно меньше операций и выполняется быстрее. В контексте проведенных экспериментов алгоритм A* с евклидовым расстоянием является самым быстрым, а A* с манхэттенским расстоянием требует наименьшего количества операций.

Список литературы

- 1 **Erdoğan, A. İ.** Automatic Pipeline Route Design with Multi-Criteria Evaluation Based on Least-Cost Path Analysis and Line-Based Cartographic Simplification: A Case Study of the Mus Project in Turkey / Ali İhsan Erdoğan Örsan Ünal, Cevdet Coşkun Aydın // International Journal of Geo-Information (IJGI). – 2019. – Vol. 8 (4), No. 173. – DOI 10.3390/ijgi8040173.
- 2 **Kang, J. Y.** Optimisation of pipeline route in the presence of obstacles based on a least cost path algorithm and Laplacian smoothing / J. Y. Kang, B. Lee // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2017. – Vol. 9. – DOI 10.3390/ijgi8040173.
- 3 **Scaparra, M. P.** Corridor location: the multi-gateway shortest path / M. P. Scaparra, R. L. Church, F. A. Medrano // Journal of Geographical Systems. – 2014. – Vol. 16, No. 3. – P. 287–309. – DOI 10.1007/s10109-014-0197-8.
- 4 **Yu, C.** Extensions to least-cost path algorithms for roadway planning / C. Yu, J. Lee, M. Munro-Stasiuk // International Journal of Geographical Information Science. – 2003. – Vol. 17. – DOI 10.1080/1365881031000072645.
- 5 Path selection by topographic analysis: vector re-classification versus raster fuzzification as spatial multi-criteria using cost-path / A. A. Jamali, A. Esmailian, S. Mokhtarisabet, S. He // Spatial Information Research. – 2023. – Vol. 31. – DOI 10.1007/s41324-023-00539-9.
- 6 **Stefano, B.** Routing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts / B. Stefano, G. Davide, O. Francesco // Environmental Impact Assessment Review. – 2011. – Vol. 31, No. 3. – P. 234–239. – DOI 10.1016/j.eiar.2010.10.003.
- 7 GIS Spatial Analysis Applied to Electric Line Routing Optimization / C. Monteiro, I. Ramírez-Rosado, V. Miranda [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – Vol. 20. – P. 934–942. – DOI 10.1109/TPWRD.2004.839724.
- 8 **Antikainen, H.** Comparison of different strategies for determining raster-based least-cost paths with a minimum amount of distortion / H. Antikainen // Transactions in GIS. – 2013. – Vol. 17. – DOI 10.1111/j.1467-9671.2012.01355.x.
- 9 **Tomlin, D. C.** Propagating radial waves of travel cost in a grid / Dana C. Tomlin // International Journal of Geographical Information Science. – 2010. – Vol. 24, Iss. 9. – P. 1391–1413.

References

- 1 **Erdoğan, A. İ.** Automatic Pipeline Route Design with Multi-Criteria Evaluation Based on Least-Cost Path Analysis and Line-Based Cartographic Simplification : A Case Study of the Mus Project in Turkey / Ali İhsan Erdoğan Örsan Ünal, Cevdet Coşkun Aydın // International Journal of Geo-Information (IJGI). – 2019. – Vol. 8 (4), No. 173. – DOI 10.3390/ijgi8040173.
- 2 **Kang, J. Y.** Optimisation of pipeline route in the presence of obstacles based on a least cost path algorithm and Laplacian smoothing / J. Y. Kang, B. Lee // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2017. – Vol. 9. – DOI 10.3390/ijgi8040173.
- 3 **Scaparra, M. P.** Corridor location: the multi-gateway shortest path / M. P. Scaparra, R. L. Church, F. A. Medrano // Journal of Geographical Systems. – 2014. – Vol. 16, No. 3. – P. 287–309. – DOI 10.1007/s10109-014-0197-8.
- 4 **Yu, C.** Extensions to least-cost path algorithms for roadway planning / C. Yu, J. Lee, M. Munro-Stasiuk // International Journal of Geographical Information Science. – 2003. – Vol. 17. – DOI 10.1080/1365881031000072645.
- 5 Path selection by topographic analysis: vector re-classification versus raster fuzzification as spatial multi-criteria using cost-path / A. A. Jamali, A. Esmailian, S. Mokhtarisabet, S. He // Spatial Information Research. – 2023. – Vol. 31. – DOI 10.1007/s41324-023-00539-9.
- 6 **Stefano, B.** Routing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts / B. Stefano, G. Davide, O. Francesco // Environmental Impact Assessment Review. – 2011. – Vol. 31, No. 3. – P. 234–239. – DOI 10.1016/j.eiar.2010.10.003.
- 7 GIS Spatial Analysis Applied to Electric Line Routing Optimization / C. Monteiro, I. Ramírez-Rosado, V. Miranda [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – Vol. 20. – P. 934–942. – DOI 10.1109/TPWRD.2004.839724.
- 8 **Antikainen, H.** Comparison of different strategies for determining raster-based least-cost paths with a minimum amount of distortion / H. Antikainen // Transactions in GIS. – 2013. – Vol. 17. – DOI 10.1111/j.1467-9671.2012.01355.x.
- 9 **Tomlin, D. C.** Propagating radial waves of travel cost in a grid / Dana C. Tomlin // International Journal of Geographical Information Science. – 2010. – Vol. 24, Iss. 9. – P. 1391–1413.

– DOI 10.1080/13658811003779152.

10 Федеральный закон от 14.03.1995 № 33-ФЗ (ред. от 08.08.2024) «Об особо охраняемых природных территориях» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2025). Статья 2. Категории особо охраняемых природных территорий, особенности их создания и развития // КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_6072/ce98ed9bc2fc35acee2232585948a2b4bc927850 (дата обращения: 26.03.2025).

– DOI 10.1080/13658811003779152.

10 Federal Law No. 33-FZ of 03/14/1995 (as amended on 08/08/2024) “On Specially Protected Natural Territories” (as amended and supplemented, effective from 03/01/2025). Article 2. Categories of specially protected natural territories, peculiarities of their creation and development // ConsultantPlus. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_6072/ce98ed9bc2fc35acee2232585948a2b4bc927850 (date of access: 03/26/2025).

D. V. Kuzmin

THE USE OF VARIOUS ALGORITHMS FOR FINDING PATHS IN GRAPHS TO SOLVE PROBLEMS OF SPATIAL DEVELOPMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE

Abstract. The question of the applicability of the Dijkstra algorithm, A* and Breadth-first search for solving pathfinding problems in environments with obstacles is considered. These algorithms can be used to solve problems of spatial development of linear objects of land transport infrastructure.

A series of simple experiments were conducted with the algorithms in order to quantify their asymptotic complexity, i.e. the number of operations performed and the execution time of the algorithm in conditions of pathfinding in environments with obstacles. The series of experiments has a different configuration, determined by the direction of the search (unidirectional and bidirectional) and the method of cell passage (direct and mixed) and a variant of the search algorithm. When considering the A* algorithm, various metrics such as Chebyshev, Manhattan, and Euclidean distances were used as an additional parameter configuring the algorithm's operation.

Keywords: pathfinding algorithms, Dijkstra's algorithm, A* algorithm, Breadth-first search algorithm, tracing, spatial development of transport infrastructure, transport systems, graph theory.

For citation: Kuzmin, D. V. The use of various algorithms for finding paths in graphs to solve problems of spatial development of transport infrastructure / D. V. Kuzmin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 53–63. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_53.

Сведения об авторах

Кузьмин Дмитрий Владимирович
Российский университет транспорта
(РУТ МИИТ),
кафедра «Логистика и управление
транспортными системами»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: kuzminmiit@yandex.ru

Information about the authors

Kuzmin Dmitry Vladimirovich
The Russian University of Transport (RUT MIIT),
Chair “Logistics and Management
of Transport Systems”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: kuzminmiit@yandex.ru