УДК 656.022

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-181-188

© А. Ю. Андреев, соискатель

© A. Yu. Andreev, competitor

© В. Д. Егоров, соискатель

© V. D. Egorov, competitor

© А. В. Терентьев, д-р техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

© A. V. Terent'ev, Dr. Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: andreev.a.u@mail.ru, egorovvd81@yandex.ru,
aleksej.terentev.67@bk.ru

E-mail: andreev.a.u@mail.ru, egorovvd81@yandex.ru,
aleksej.terentev.67@bk.ru

АЛГОРИТМЫ МАРШРУТИЗАЦИИ В ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ

ROUTING ALGORITHMS IN THE ROAD TRANSPORT SYSTEM

Проанализированы стандартные алгоритмы и на их основе программное обеспечение для определения оптимальных маршрутов перемещения грузов в дорожно-транспортных системах. Выявлено, что актуальным вопросом маршрутизации является решение задачи оптимизации по нескольким критериям эффективности, один из которых — сокращение объемов вычислительных процедур. Предложено оригинальное решение данной проблемы.

Ключевые слова: маршрутизация, дорожно-транспортная система, алгоритм оптимизации, многокритериальная задача, программное обеспечение.

The article analyzes standard algorithms and the software based on them intended for determining the optimal routes of cargo movement in road transport systems. It is revealed that the current issue of routing is the solution of the optimization problem according to several efficiency criteria, one of which is the reduction of computational procedures. An original solution to this problem is proposed.

Keywords: routing, road transport system, optimization algorithm, multi-criterion task, software.

Несмотря на активное развитие методов маршрутизации в дорожно-транспортных сетях (ДТС) и их реализации в программном обеспечении (ПО), «приложениях» и т. д., до сих пор нет «наилучшего» решения проблемы объективного выбора маршрута из-за постоянного увеличения количества критериев эффективности. Причем в последнее время в качестве доминирующего критерия эффективности алгоритмов маршрутизации в ДТС используется критерий, связанный с необходимым объемом вычислительных процедур. Этот критерий определяет компромиссы в плане времени прохождения «запросов», предварительной обработки данных, использования дискового пространства, частоты запросов, а среди других — устойчивость при внесении изменений в маршруты ДТС. То есть если для более

ранних алгоритмов решение проблемы выбора маршрута определялось фактором «расстояние», то теперь это больше не проблема — современные алгоритмы надежно находят точные решения при определении кратчайших маршрутов в ДТС. Актуальными вопросами в настоящее время являются:

1) насколько можно использовать в качестве объективной функции единственный критерий — затраты: кратчайшее расстояние и проекция этого критерия на комплексный показатель?

2) насколько рациональны применяемые алгоритмы маршрутной оптимизации с позиции объема вычислительных процедур?

Наиболее распространенным стандартным решением задачи маршрутизации является алгоритм Дейкстры, изобретенный нидерландским

ученым Э. Дейкстрой в 1959 году и широко применяемый в ПО для формирования маршрутной транспортной сети [1, 2, 3]. С помощью данного алгоритма можно найти кратчайшее расстояние от одной из вершин графа расстояний до всех остальных. Развитию алгоритма и эффективному применению его на практике посвящено большое количество исследований за рубежом [4–10]. Алгоритм легко реализуется в ПО. Для хранения «весов» исследуемого графа (рис. 1) используется стандартная матрица, в которой в заголовках строк и столбцов находятся вершины графа, а веса дуг графа размещаются во внутренних ячейках таблицы.

Вместе с развитием алгоритма Дейкстры осуществляется поиск альтернативных методов вычисления, один из них — алгоритм Беллмана–Форда [11]. Основное преимущество этого метода заключается в том, что он работает циклами (динамически улучшая текущее состояние ДТС), в каждом из циклов сканируя все связи в системе, параметры которых были улучшены. Алгоритм Беллмана–Форда реализует управление в ДТС (©) пошагово (дискретно) после определения эффективного решения и применения его в качестве одного из конечного числа воз-

можных воздействий. В общем виде дискретная управляемая ДТС для однокритериальной модели определяется как

$$\Omega = \{D; x_0; F; V(x), f(x, v), s(x, v)\},$$

где D — множество возможных состояний ДТС;

F — множество состояний параметров ДТС;

$V(x)$ — множество управлений при выборе направления перемещения (вариантов действий в системе) — $(x \in D|F)$;

$f(x, v)$ — функция переходов из состояния x при управлении v ;

$s(x, v)$ — функция «потерь» на производство процессов перемещения.

Построение маршрута, основанного на принципе Беллмана:

$$B(x) = \min_{v \in V(x)} \{s(x, v) + B(f(x, v))\}, (x \in D|F), \quad (1)$$

где $B(x)$ — функция $B(x)$ в предшествующем дискретном состоянии.

Вычисление значений функции Беллмана по формуле (1) выполняется поэтапно и позволяет определенным образом упорядочить и существенно сократить перебор возможных вариантов маршрутов.

Принципиально разработать алгоритмы и ПО оптимизационной задачи динамического программирования, основанные на принци-

Рис. 1. Условный граф возможных маршрутов в ДТС с дискретными состояниями (Ω)

пе Беллмана, несложно. На рис. 2 и 3 приведены интерфейсы ПО, разработанного в рамках с применением алгоритмического языка C++; на рис. 3 — результаты расчета в разработанном ПО; на рис. 4 — алгоритм решения задачи динамического программирования.

Основным недостатком применения методов динамического программирования для реализации маршрутизации в ДТС является то, что в качестве управляемого параметра принимается только один критерий. Реальная ДТС, как правило, требует вычислений по нескольким критери-

ям эффективности. При этом технология синтеза полных совокупностей эффективных оценок должна обеспечиваться определением частных эффективной оценок «Парето оптимального», что неизбежно приводит к росту количества вычислительных процедур. [12].

В таблице приведены сведения о методах, содержащих поиск решения в ДТС на основе множества Парето: две версии алгоритма Дейкстры, два иерархических метода на основе алгоритма Дейкстры (CRP и CH), три алгоритма, не основанные на графах (TNR, HL, HLC), и два комби-

Введите количество вершин: 10 OK

	Вершина 0	Вершина 1	Вершина 2	Вершина 3	Вершина 4
Вершина 0	0	0	0	0	0
Вершина 1	1	0	0	0	0
Вершина 2	5	6	0	0	0
Вершина 3	4	0	1	0	0
Вершина 4	0	0	0	4	0
Вершина 5	0	0	5	3	2
Вершина 6	0	9	0	0	0
Вершина 7	0	0	0	0	0
Вершина 8	0	0	0	0	3
Вершина 9	0	0	0	0	5

Установите связи между вершинами РАСЧИТАТЬ

Рис. 2. Инициализация задачи и ввод исходных данных

Form1

Введите количество вершин: 10 OK

	Вершина 5	Вершина 6	Вершина 7	Вершина 8	Вершина 9
Вершина 0		0	0	0	0
Вершина 1		0	0	0	0
Вершина 2		0	0	0	0
Вершина 3		0	0	0	0
Вершина 4		0	0	0	0
Вершина 5		0	0	0	0
Вершина 6		0	0	0	0
Вершина 7		1	0	0	0
Вершина 8		0	1	0	0
Вершина 9		0	3	1	0

Установите связи между вершинами РАСЧИТАТЬ

Кратчайший путь
0356789
Значение
11

OK

Рис. 3. Результаты автоматизированного расчета в разработанном ПО для условного графа, представленного на рис. 1

Рис. 4. Алгоритм автоматизированного расчета задачи динамического программирования

нированных (CHASE и TNR+AF). Также в таблицу включены методика (Флаги Дуг) и алгоритм на основе сепараторов (CRP). Данные алгоритмы проверялись в целях определения скорости вычислительных процедур [15]. Также в таблице приведены скорости обработки данных различными методами на ДТС Западной Европы.

Значительно сократить количество вычислительных процедур можно, создав алгоритмы получения множества Парето на математических моделях линейного программирования [19]. На рис. 5 приведен алгоритм оптимизации многокритериальной задачи поиска Парето-оптимальных решений, позволяющих ускорить процесс обработки больших объемов данных.

Рис. 5. Алгоритм оптимизации многокритериальной задачи поиска Парето-оптимальных решений

Интерфейсы получения Парето-эффективных решений в разработанном ПО представлены на рис. 6, 7 и 8.

На данном этапе исследования моделей и алгоритмов маршрутизации в ДТС выполнена разработка оптимизационной аналитической модели объектно-ориентированного управления и алгоритмов на ее основе. Разработаны два основных алгоритма и ПО на их основе.

1. Алгоритм и ПО решения задачи динамического программирования, реализующие принцип Беллмана, позволяющие определять оптимальную траекторию (маршрут) перемещения груза в ДТС.

Скорость обработки данных различными методами на ДТС Западной Европы

Алгоритм	Источник	Структуры данных	
		Объем данных [GiB]	Время [ч:мин]
CRP	[14]	0,9	1:00
Флаги Дуг	[13]	0,6	0:20
CH	[14]	0,4	0:05
CHASE	[13]	0,6	0:30
HLC	[18]	1,8	0:50
TNR	[13]	2,5	0:20
TNR+AF	[17]	5,4	1:45
HL	[18]	18,8	0:37
HL- ∞	[16]	17,7	0:60

Введите количество критериев (N) Введите количество решений (M)

	K0	K1	K2	K3
► D0				
D1				
D2				
min-max				

Рис. 6. Инициализация программы

Введите количество критериев (N) Введите количество решений (M)

	K0	K1	K2	K3
D0	0,416	0,291	0,331	0,346
D1	0,331	0,231	0,301	0,202
D2	0,253	0,478	0,368	0,452
► min-max	max	min	max	min

Рис. 7. Нормирование исходных значений с учетом целеполагания по отдельным критериям эффективности

Введите количество критериев (N) Введите количество решений (M)

	K0	K1	K2	K3
D0	0,416	0,291	0,331	0,346
D1	0,331	0,231	0,301	0,202
D2	0,253	0,478	0,368	0,452
► min-max	max	min	max	min

	Laplace
► 1 P1>P2>P3>P4	D0=0,42; D1=0,33; D2=0,37; 1 D0=0,346
2 P1>P2>P4>P3	D0=0,42; D1=0,33; D2=0,37; 1 D1=0,266
3 P1>P3>P2>P4	D0=0,42; D1=0,33; D2=0,31; 1 D2=0,388
4 P1>P3>P4>P2	D0=0,42; D1=0,33; D2=0,31; 1
5 P1>P4>P3>P2	D0=0,42; D1=0,33; D2=0,35; 1
6 P1>P4>P2>P3	D0=0,42; D1=0,33; D2=0,35; 1
7 P2>P1>P3>P4	D0=0,29; D1=0,23; D2=0,37; 3
8 P2>P1>P4>P3	D0=0,29; D1=0,23; D2=0,37; 3
9 P2>P3>P1>P4	D0=0,29; D1=0,23; D2=0,42; 3
10 P2>P3>P4>P1	D0=0,29; D1=0,23; D2=0,42; 3
11 P2>P4>P3>P1	D0=0,29; D1=0,23; D2=0,47; 3

D0=8
D1=0
D2=16

Рис. 8. Автоматизированное получение оптимального варианта действий в ДТС

2. Алгоритм и ПО решения задачи определения Парето-оптимальных вариантов действий в случае многокритериальности в исследуемой ДТС.

Определены основные задачи дальнейших исследований:

- интеграция разработанных алгоритмов и ПО в единый программный комплекс;
- апробация разработанного программного комплекса на локальной выборке данных перемещения заданного количества партий груза в ДТС при наличии нескольких перегрузочных комплексов и с учетом нескольких критериев эффективности.

Библиографический список

1. Edsger W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1:269–271, 1959.
2. Boris V. Cherkassky, Andrew V. Goldberg, and Tomasz Radzik. Shortest paths algorithms. *Mathematical Programming, Series A*, 73:129–174, 1996.
3. Boris V. Cherkassky, Andrew V. Goldberg, and Craig Silverstein. Buckets, heaps, lists, and monotone priority queues. In *Proceedings of the 8th Annual ACM–SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA'97)*, pages 83–92. IEEE Computer Society Press, 1997.
4. George B. Dantzig. *Linear Programming and Extensions*. Princeton University Press, 1962.
5. Eric V. Denardo and Bennett L. Fox. Shortest-route methods: 1. Reaching, pruning, and buckets. *Operations Research*, 27(1):161–186, 1979.
6. Ittai Abraham, Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, and Renato F. Werneck. Alternative routes in road networks. *ACM Journal of Experimental Algorithmics*, 18(1):1–17, 2013.
7. Michael L. Fredman and Robert E. Tarjan. Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms. *Journal of the ACM*, 34(3):596–615, July 1987.
8. Andrew V. Goldberg. A practical shortest path algorithm with linear expected time. *SIAM Journal on Computing*, 37:1637–1655, 2008.
9. Ulrich Meyer. Single-source shortest-paths on arbitrary directed graphs in linear average-case time. In *Proceedings of the 12th Annual ACM–SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA'01)*, pp. 797–806, 2001.
10. Mikkel Thorup. Integer priority queues with decrease key in constant time and the single source shortest paths problem. In *35th ACM Symposium on Theory of Computing*, pp. 149–158, New York, NY, USA, 2003. ACM.
11. Richard Bellman. On a routing problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, 16:87–90, 1958.
12. Christian Sommer. Shortest-path queries in static networks. *ACM Computing Surveys*, 46(4), 2014.
13. Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, Andreas Nowatzyk, and Renato F. Werneck. PHAST: Hardware-accelerated shortest path trees. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 73(7):940–952, 2013.
14. Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, Thomas Pajor, and Renato F. Werneck. Customizable route planning in road networks. submitted for publication, 2013.
15. Robert Geisberger and Christian Vetter. Efficient routing in road networks with turn costs. In *Proceedings of the 10th International Symposium on Experimental Algorithms (SEA'11)*. Vol. 6630 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 100–111. Springer, 2011.
16. Ittai Abraham, Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, and Renato F. Werneck. Hierarchical hub labelings for shortest paths. In *Proceedings of the 20th Annual European Symposium on Algorithms (ESA'12)*. Vol. 7501 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 24–35. Springer, 2012.
17. Reinhard Bauer, Daniel Delling, Peter Sanders, Dennis Schieferdecker, Dominik Schultes, and Dorothea Wagner. Combining hierarchical and goal-directed speed-up techniques for Dijkstra's algorithm. *ACM Journal of Experimental Algorithmics*, 15(2.3):1–31, January 2010. Special Section devoted to WEA'08.
18. Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, and Renato F. Werneck. Hub label compression. In *Proceedings of the 12th International Symposium on Experimental Algorithms (SEA'13)*, volume 7933 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp.18–29. Springer, 2013.
19. Терентьев А. В., Прудовский Б. Д. Методы принятия решений в условиях неопределенного состояния «внешней среды» // *Транспортное планирование и моделирование: сб. тр. Междунар. науч.-практич. конф. (26–27 мая 2016)*. СПб.: СПбГАСУ, 2016. С. 145–149.

References

1. Edsger W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1:269–271, 1959.
2. Boris V. Cherkassky, Andrew V. Goldberg, and Tomasz Radzik. Shortest paths algorithms. *Mathematical Programming, Series A*, 73:129–174, 1996.
3. Boris V. Cherkassky, Andrew V. Goldberg, and Craig Silverstein. Buckets, heaps, lists, and monotone priority queues. In: *Proceedings of the 8-th Annual ACM–SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA'97)*, pp. 83–92. IEEE Computer Society Press, 1997.
4. George B. Dantzig. *Linear Programming and Extensions*. Princeton University Press, 1962.

5. Eric V. Denardo and Bennett L. Fox. Shortest-route methods: 1. Reaching, pruning, and buckets. *Operations Research*, 27(1):161–186, 1979.
6. Ittai Abraham, Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, and Renato F. Werneck. Alternative routes in road networks. *ACM Journal of Experimental Algorithmics*, 18(1):1–17, 2013.
7. Michael L. Fredman and Robert E. Tarjan. Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms. *Journal of the ACM*, 34(3):596–615, July 1987.
8. Andrew V. Goldberg. A practical shortest path algorithm with linear expected time. *SIAM Journal on Computing*, 37:1637–1655, 2008.
9. Ulrich Meyer. *Single-source shortest-paths on arbitrary directed graphs in linear average-case time*. In: Proceedings of the 12-th Annual ACM–SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA’01), pp. 797–806, 2001.
10. Mikkel Thorup. *Integer priority queues with decrease key in constant time and the single source shortest paths problem*. In: 35th ACM Symposium on Theory of Computing, pp. 149–158, New York, NY, USA, 2003. ACM
11. Richard Bellman. On a routing problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, 16:87–90, 1958.
12. Christian Sommer. Shortest-path queries in static networks. *ACM Computing Surveys*, 46(4), 2014.
13. Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, Andreas Nowatzky, and Renato F. Werneck. PHAST: Hardware-accelerated shortest path trees. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 73(7):940–952, 2013.
14. Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, Thomas Pajor, and Renato F. Werneck. *Customizable route planning in road networks*. Submitted for publication, 2013.
15. Robert Geisberger and Christian Vetter. *Efficient routing in road networks with turn costs*. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Experimental Algorithms (SEA’11). Vol. 6630 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 100–111. Springer, 2011.
16. Ittai Abraham, Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, and Renato F. Werneck. *Hierarchical hub labelings for shortest paths*. In: Proceedings of the 20th Annual European Symposium on Algorithms (ESA’12). Vol. 7501 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 24–35. Springer, 2012.
17. Reinhard Bauer, et al. Combining hierarchical and goal-directed speed-up techniques for Dijkstra’s algorithm. *ACM Journal of Experimental Algorithmics*, 15(2.3):1–31, January 2010. Special Section devoted to WEA’08.
18. Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, and Renato F. Werneck. *Hub label compression*. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Experimental Algorithms (SEA’13), volume 7933 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 18–29. Springer, 2013.
19. Terent’ev A.V., Prudovskiy B. D. *Metody prinyatiya resheniy v usloviyakh neopredelennogo sostoyaniya «vneshney sredy»* [Methods of decision-making in the conditions of an uncertain state of the “external environment”]. Trudy Mezhdunar. nauch.-praktich.konf. «Transportnoe planirovanie i modelirovanie» 26–27 maya 2016 [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Transport planning and Modeling” May 26-27, 2016]. St. Petersburg, SPbGASU, 2016, pp. 145–149.