

УДК 004.832.22;656.7

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕЦЕДЕНТОВ ДЛЯ РЕДУЦИРОВАНИЯ ДЕРЕВА РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ПОИСКА ПУТЕЙ НА ГРАФЕ

И.А. Бессмертный<sup>а</sup>, Ю.А. Королёва<sup>а</sup>, Р.Т. Суринов<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>б</sup> ООО «ИНТЕГРАВ», Москва, 125167, Российская Федерация

Адрес для переписки: igor\_bessmertny@hotmail.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 01.09.14, принята к печати 10.12.14

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-1-166-168

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Бессмертный И.А., Королёва Ю.А., Суринов Р.Т. Использование прецедентов для редуцирования дерева решений в задаче поиска путей на графе // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 166–168

**Аннотация.** Рассматривается проблема организации взаиморасчетов между субъектами бизнеса с использованием клиринга, которая решается методом поиска путей на графе. Для сокращения сложности дерева решений в работе предлагается метод прецедентов, заключающийся в том, что в процессе развертывания дерева решений сохраняются промежуточные решения, которые используются при последующих операциях поиска. Приводятся алгоритм и пример, демонстрирующий сложность поиска, приближающуюся к линейной. Проведенные испытания в системе взаиморасчетов на воздушном транспорте демонстрируют сокращение объема реальных платежей приблизительно на 30%. Разработанный алгоритм предполагается внедрить также в других клиринговых организациях Российской Федерации.

**Ключевые слова:** поиск на графе, прецеденты, взаиморасчеты, дерево решений.

## USING PRECEDENTS FOR REDUCTION OF DECISION TREE BY GRAPH SEARCH

I.A. Bessmertny<sup>a</sup>, Yu.A. Koroleva<sup>a</sup>, R.T. Surinov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>b</sup> "Integrav" Ltd., Moscow, 125167, Russian Federation

Corresponding author: igor\_bessmertny@hotmail.com

### Article info

Received 01.09.14, accepted 10.12.14

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-1-166-168

Article in Russian

**Reference for citation:** Bessmertny I.A., Koroleva Yu.A., Surinov R.T. Using precedents for reduction of decision tree by graph search. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 1, pp. 166–168 (in Russian)

**Abstract.** The paper considers the problem of mutual payment organization between business entities by means of clearing that is solved by search of graph paths. To reduce the decision tree complexity a method of precedents is proposed that consists in saving the intermediate solution during the moving along decision tree. An algorithm and example are presented demonstrating solution complexity coming close to a linear one. The tests carried out in civil aviation settlement system demonstrate approximately 30 percent shortage of real money transfer. The proposed algorithm is planned to be implemented also in other clearing organizations of the Russian Federation.

**Keywords:** graph search, precedents, settlements, decision tree.

Формальная постановка задачи взаиморасчетов представлена в [1] и заключается в следующем. Имеется конечный ориентированный граф  $G = (V, E)$ , состоящий из множества вершин  $V$ , которым соответствуют субъекты взаиморасчетов, и множества дуг  $E$ , устанавливающих обязательства совершить платежи. Дуга от вершины  $v_i \in V$  к вершине  $v_j \in V$  обозначается  $e_{i,j} \in E$ . Ее длина  $d_{ij}$  означает денежную сумму, которую требуется перевести от субъекта  $i$  субъекту  $j$ . Объем реальных платежей можно сократить при наличии взаимных обязательств. В самом простом случае, если существуют взаимные обязательства  $d_{ij}$  и  $d_{ji}$ , то на величину  $|d_{ij} - d_{ji}|$  можно сделать взаимозачет. Более интересным является поиск длинных замкнутых цепочек платежей (контуров)  $k$ , поскольку конечной целью является сокращение общей суммы платежей:

$$\sum_{i,j} d_{ij} \rightarrow \min.$$

При этом  $g = \min\{d(e) : e \in k\}$  – максимально возможная сумма взаимозачета в контуре (вес контура) – равна минимальной величине обязательства в цепочке платежей, а сумма весов всех контуров, включающих дугу  $e_{ij}$ , не может превышать  $d_{ij}$ . После того, как все контуры найдены, задача оптимизации взаимозачетов решается методами линейного программирования.

Для поиска кратчайшего пути на графе используются генетические алгоритмы [2], а также алгоритм Дейкстры [3, 4], суть которого состоит в том, что в процессе обхода графа для каждой вершины графа вычисляется длина пути к ней от исходной вершины (вес). Вначале каждой вершине присваивается бесконечно большой вес, который при нахождении пути перевычисляется и в конце работы алгоритма соответствует минимально возможному. Редуцирование дерева решений в алгоритме Дейкстры заключается в том, что из нескольких ветвей дерева, начинающихся с одной и той же вершины, выбирается та, которая имеет минимальный вес. Поскольку при организации взаимозачетов решается противоположная задача поиска путей максимальной длины, причем начальная вершина совпадает с конечной, в работе [1] предложен модифицированный алгоритм Дейкстры для поиска контуров, который состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Установить вес каждой вершины  $g_i := 0, i = (1, s)$ .

Шаг 2. Выбрать стартовую вершину  $v_0, i := 0$ .

Шаг 3. Найти все дуги  $e_{ij}$ .

Шаг 4. Для всех  $j$ , если  $\min(g_i, d_{ij}) > g_j$ , то  $g_j := d_{ij}$ .

Шаг 5. Повторить шаги 3, 4 для всех  $i := j$ .

Шаг 6. Завершить работу при  $j = 0$ . Возвратить контур  $k_0 = (v_0, \dots, v_x \dots, v_0)$ , двигаясь от  $v_0$  и выбирая вершины  $v_x$  с максимальными значениями  $g_x$ .

Максимальная сложность однократного запуска данного алгоритма для некоторой начальной вершины составляет  $O(bs)$ , где  $b = \sqrt{E}/s$  – коэффициент ветвления (среднее число исходящих дуг из каждой вершины),  $s$  – число вершин. Поиск всех контуров имеет сложность  $O(bs^2)$ , поскольку требуется  $s$ -кратный запуск данного алгоритма для каждой вершины, выбираемой в качестве стартовой.

В работах [5, 6] предложен метод сокращения пространства поиска за счет устранения повторяющихся фрагментов дерева решений. Применительно к данной задаче предлагается сохранять в виде прецедентов уже найденные фрагменты возможных цепочек платежей (пути) с максимальными весами. Каждый прецедент идентифицируется последовательностью обхода вершин. Таким образом, предлагается следующая модификация описанного выше алгоритма.

Шаг 1. Установить вес каждой вершины  $g_i := 0, i = (1, s)$ .

Шаг 2. Выбрать стартовую вершину  $v_0, i := 0$ .

Шаг 3. Найти все дуги  $e_{ij}$  и пути  $c_{ij} = (v_i, \dots, v_j)$  с весами  $w_{ij}$ , если такие пути есть.

Шаг 4. Для всех  $j$ , если  $\min(g_i, \max(d_{ij}, w_{ij})) > g_j$ , то  $g_j := d_{ij}$ .

Шаг 5. Для всех  $j$ , если не существует путь  $c_{0j}$ , то создать путь  $c_{0j}$ , а также все пути, входящие в  $c_{0j}$ . Если некоторый путь  $c_{xy}$  существует, но  $w_{xy}$  нового пути больше, чем у существующего, заменить путь новым.

Шаг 6. Повторить шаги 3–5 для всех  $i := j$ .

Шаг 7. Завершить работу при  $j = 0$ . Возвратить контур  $k_0$ , включающий в себя дуги  $e_{ij}$  и пути  $c_{xy}$ .

Для графа, имеющего  $s$  вершин,  $\max(\{c_{xy}\}) = s^2$ , причем в их число входят и искомые замкнутые контуры. В результате будет получено множество прецедентов (путей, соединяющих вершины графа), из которых можно составлять замкнутые контуры. Степень покрытия графа прецедентами при первом запуске поиска зависит от его связности. Можно доказать, что в случае полностью связного графа все прецеденты будут найдены при первом же поиске. При последующих запусках процедуры поиска замкнутый контур составляется всего из двух путей, один из которых соединяет вершины  $v_i$  и  $v_j$ , второй – вершины  $v_j$  и  $v_i$ . Таким образом, предельная сложность поиска одного контура при наличии всех прецедентов составляет  $O(s-1)$ , поскольку из каждой вершины существует не более  $(s-1)$  исходящих и не более одной обратной цепочки.

На рисунке представлен граф обязательств из демонстрационного примера в работе [1], на котором цифрами при дугах обозначены объемы обязательств. Результат работы программы, написанной на языке SWI-Prolog для апробации предложенного алгоритма, представлен в таблице.

Номер стартовой вершины	1	2	3	4	5	6	7	8
Вершины, в цепочке	1, 7, 8, 1	2, 3, 1, 6, 2	3, 1, 6, 2, 3	4, 5, 6, 2, 3, 4	5, 6, 2, 3, 1, 7, 5	6, 2, 3, 1, 6	7, 8, 1, 7	8, 1, 7, 8
Вес	5	4	4	4	4	4	5	5

Таблица. Найденные контуры цепочек платежей

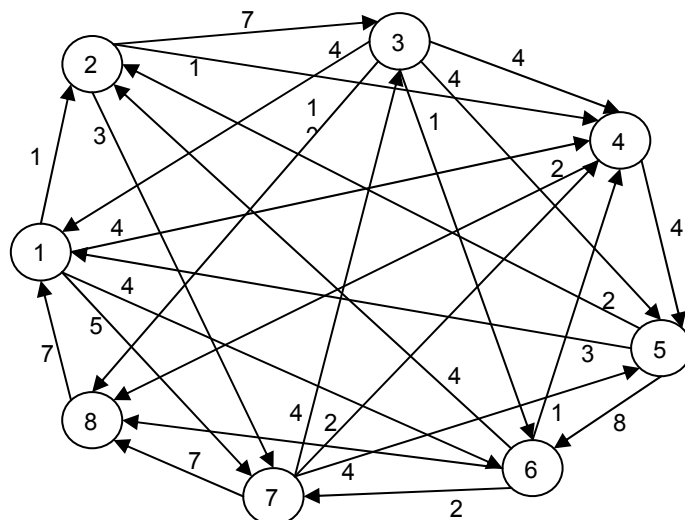


Рисунок. Граф обязательств

В ходе поиска контуров программа породила 63 пути, сохраненные в виде прецедентов, причем 56 путей были созданы уже при первом прогоне программы, который отыскивал контур, начинающийся и оканчивающийся вершиной номер 1. Остальные 7 путей были найдены при втором прогоне программы. Последующие 6 контуров были найдены целиком на основе использования прецедентов, и сложность их поиска составила  $O(s-1)$ .

Таким образом, использование прецедентов при поиске на графе контуров с максимальными весами позволяет приблизиться к линейной сложности решения данной задачи. Разработанный алгоритм в настоящее время реализуется в процессе реинжиниринга информационной системы Транспортно-клиринговой палаты «ИС ТКП» в части контроля и мониторинга взаиморасчетов авиапредприятий в нейтральной среде общепромышленной Системы взаиморасчетов на воздушном транспорте. Предварительные оценки демонстрируют приблизительно 30%-ое сокращение объема реальных платежей в подсистеме «Учет состояния финансовых расчетов» автоматизированной системы «Сакура». Разработанный алгоритм предполагается внедрить также в других клиринговых организациях Российской Федерации.

1. Rebezova M. Repayment problem at a settlement of debts. *Computer Modelling and New Technologies*, 2013, vol. 17, no. 2, pp. 7–14.
2. Yang C., Song M. Access path planning of Mobile Agent in wireless sensor networks. *Journal of Networks*, 2014, vol. 9, no. 2, pp. 507–514. doi: 10.4304/jnw.9.2.507-514
3. Swamy M.N.S., Thulasiraman K. *Graphs, Networks, and Algorithms*. NY, John Wiley & Sons, 1981, 454 p.
4. Takes F.W., Kusters W.A. Adaptive landmark selection strategies for fast shortest path computation in large real-world graphs. *Proc. of IEEE/WIC/ACM International Joint Conf. on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology, WI-IAT2014*, 2014, vol. 1, art. 6927522, pp. 27–34. doi: 10.1109/WI-IAT.2014.13
5. Bessmertny I.A. Metody poiska informatsii s ispol'zovaniem intellektual'nogo agenta [An intellectual agent for semantic web]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2009, vol. 52, no. 12, pp. 26–31.
6. Bessmertny I.A., Bulygin K.A. Mnogoagentnyi podkhod k resheniyu zadach neinformirovannogo poiska [Multi-agent approach to the uninformed search task solution]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 4 (74), pp. 98–101.

<b>Бессмертный Игорь Александрович</b>	—	кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, igor_bessmertny@hotmail.com
<b>Королёва Юлия Александровна</b>	—	аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, julietkoroleva@gmail.com
<b>Суринов Роман Татевосович</b>	—	генеральный директор, ООО «ИНТЕГРАВ», Москва, 125167, Российская Федерация, surinov@integrav.ru
<b>Igor A. Bessmertny</b>	—	PhD, Associate professor, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, igor_bessmertny@hotmail.com
<b>Julia A. Koroleva</b>	—	postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, julietkoroleva@gmail.com
<b>Roman T. Surinov</b>	—	CEO, "Integrav" Ltd., Moscow, 125167, Russian Federation, surinov@integrav.ru