ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ГАРАНТИРОВАННОЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ДОСТАВКИ ДОКУМЕНТОВ КАК ЗАДАЧИ О ПОТОКЕ МИНИМАЛЬНОЙ СТОИМОСТИ

Рашидов Ж.Ж.
Институт развития цифровых технологий и искусственного интеллекта Республики Узбекистан

Аннотация. *В статье рассматривается задача гарантированной параллельной доставки документов от сервера системы электронного документооборота двум различным адресатам по реберно-непересекающимся маршрутам. Задача формализована как задача о потоке минимальной стоимости с использованием фиктивного стока. Предложен алгоритм GPD-BaseMinCost на основе метода последовательных кратчайших путей с потенциалами Джонсона. Экспериментальная проверка на 300 случайных сетевых топологиях показала 100% совпадение результатов с эталонной реализацией min-cost flow.*

Ключевые слова: *гарантированная доставка документов, реберно-непересекающиеся маршруты, поток минимальной стоимости, отказоустойчивая маршрутизация, системы электронного документооборота.*

Актуальность. Эффективность функционирования систем электронного документооборота (СЭД) государственных и корпоративных структур в значительной степени определяется своевременностью и надёжностью доведения управленческих решений до исполнителей. При возникновении технических сбоев внутри корпоративной сети поручения руководства нередко не доходят до назначенных сотрудников своевременно либо теряются безвозвратно, что особенно критично для документооборота, носящего юридически значимый и иерархически обязательный характер. Существующие механизмы отказоустойчивой маршрутизации (MPLS Fast Reroute, OSPF-TE, механизмы восстановления в SDN) обеспечивают связность сети на уровне канала или узла, но не различают получателей передаваемых данных по организационной значимости, а классическая теория реберно-непересекающихся маршрутов (теорема Менгера, алгоритм Суурбалле, 1974) рассчитана на

единственную точку назначения. Задача гарантированной параллельной доставки документа двум различным адресатам (владельцу документа и его руководителю) ранее системно не рассматривалась.

Постановка задачи. Сеть передачи данных представляется ориентированным графом $G = (V, E, w, c)$, где V — множество узлов, E — множество каналов связи, $w: E \to \mathbb{R}^+$ — стоимость канала, $c: E \to \mathbb{Z}^+$ — пропускная способность ($c(e) = 1$). В графе выделены источник s (сервер СЭД) и два получателя: o — владелец документа и m — его руководитель. Пара путей (P_o, P_m) от s до o и от s до m называется допустимой, если $E(P_o) \cap E(P_m) = \emptyset$ — отказ единственного канала не может одновременно нарушить оба маршрута. Требуется среди всех допустимых пар найти пару минимальной суммарной стоимости.

Метод. Доказано (Утверждение 1), что допустимая пара путей существует тогда и только тогда, когда в расширенном графе $G' = (V \cup \{T\}, E \cup \{(o,T), (m,T)\})$ с фиктивным стоком T и рёбрами (o,T), (m,T) единичной пропускной способности максимальный поток из s в T равен 2 — прямое сетевое обобщение теоремы Менгера на случай пары различных, но одновременно достижимых стоков. Задача выбора пары минимальной суммарной стоимости (Утверждение 2) сведена к задаче о потоке минимальной стоимости (min-cost flow) величины 2 в графе G', что позволяет использовать существующие полиномиальные алгоритмы вместо разработки специализированного решения с нуля. На основе этого сведения предложен алгоритм GPD-BaseMinCost, реализующий метод последовательных кратчайших путей (Successive Shortest Path) с потенциалами Джонсона в расширенном графе. Алгоритм выполняет ровно два вызова алгоритма Дейкстры на графе с $|V|+1$ узлами и $|E|+2$ рёбрами, что даёт итоговую вычислительную сложность $O(|E| \cdot \log|V|)$ — асимптотически не хуже классического алгоритма Суурбалле для одной точки назначения, несмотря на дополнительную сложность двух различных получателей.

Результаты. Корректность предложенного алгоритма подтверждена экспериментально: результаты GPD-BaseMinCost сопоставлены с результатами эталонной библиотечной реализации min-cost flow (networkx) на 300 случайных связных топологиях по 25 узлов — во всех случаях получено полное совпадение (100%) как по факту существования допустимой пары, так и по суммарной стоимости найденного решения.

Заключение. Научная новизна предложенного подхода заключается в формализации задачи гарантированной параллельной доставки документа двум

различным адресатам как задачи о потоке минимальной стоимости с использованием фиктивного стока — постановке, отличной от классической формулировки Суурбалле для единой точки назначения. Полученное сведение позволяет решать задачу существующими полиномиальными алгоритмами min-cost flow с доказанной корректностью и вычислительной сложностью, не уступающей классическим аналогам. Дальнейшее развитие работы связано с введением приоритета получателя и вероятностной оценки отказа канала для перехода от статической гарантии к динамическому механизму восстановления маршрута при сбоях сетевой инфраструктуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suurballe J.W. Disjoint paths in a network // Networks. — 1974. — Vol. 4, No. 2. — P. 125–145.

2. Bhandari R. Survivable Networks: Algorithms for Diverse Routing. — Boston: Springer, 1999. — 337 p.

3. Ford L.R., Fulkerson D.R. Flows in Networks. — Princeton: Princeton University Press, 1962. — 194 p.

4. Pan P., Swallow G., Atlas A. Fast Reroute Extensions to RSVP-TE for LSP Tunnels // RFC 4090, IETF, 2005.

5. Hagberg A., Swart P., Chult D.S. Exploring Network Structure, Dynamics, and Function using NetworkX // Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy 2008). — P. 11–15.