

УДК 004: 519.876

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ТЕРМИНАЛОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Д.т.н. В.В. Бескорвайный, А.А. Сеницкий, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Предложены модификации метода направленного перебора локальных экстремумов функции цели для решения задачи структурно-топологической оптимизации централизованных трехуровневых логистических сетей по показателю минимума затрат. Приведены прогнозные оценки точности и сложности предложенных модификаций метода.

Запропоновано модифікації методу спрямованого перебору локальних екстремумів функції мети для розв'язання задачі структурно-топологічної оптимізації централізованих трирівневих логістичних мереж за показником мінімуму витрат. Наведено прогнозні оцінки точності і складності запропонованих модифікацій методу.

A modification of the method of directed inspection of local extrema of the objective function to solve the problem of structural and topological optimization of centralized three-level logistics network in terms of wage costs. Presents forecasts of accuracy and complexity of the proposed of method modification.

Ключевые слова: логистическая сеть, структура, топология, терминал, размещение, оптимизация.

Введение

В условиях глобализации экономических систем возрастает актуальность задач оптимизации, обеспечивающих устойчивое функционирование логистических сетей. Логистические сети включают в себя звенья логистических систем, между которыми установлены взаимосвязи по основным и (или) сопутствующим потокам в рамках анализируемой или проектируемой логистической системы [1, 2].

Целью создания логистических систем является минимизация издержек при доставке продукции (услуг, информации) в нужное место, в определенном количестве и ассортименте, максимально подготовленными к потреблению.

Практически любая логистическая сеть может быть организована на различных наборах элементов, различных схемах и типах связей между элементами. В процессах проектирования, планирования развития или реорганизации таких сетей неизбежно возникает проблема выбора наиболее рационального способа их структурной организации [3]. С учетом того, что с ростом масштабов логистических сетей их стоимостные и функциональные характеристики становятся все более зависимыми от топологии, т.е. пространственной организации, нелинейно возрастает сложность задач их оптимизации. Это требует совместно с традиционными задачами структурного синтеза решать комплексы задач топологической оптимизации систем, что приводит к проблеме структурно-функционально-параметрической и топологической оптимизации [4].

При этом сложности возникают уже на этапе формирования концептуальной модели логистической

системы, в рамках которой необходимо определить [2]:

- где будут проходить «границы системы», что будет являться её входными и выходными потоками;

- какие географические пункты и транспортные каналы должны быть приняты во внимание при описании территориальной структуры системы;

- какие виды транспорта и по каким тарифам должны осуществлять перевозки, кто из участников процесса поставок должен предоставлять транспортные средства;

- каким будет расположение терминалов (мест промежуточного хранения и перевалки грузов), какие будут условия и тарифы для выполнения этих операций;

- какие ограничения следует учесть при выборе средств транспорта, правил их загрузки, маршрутов движения, пунктов отправки грузов, пунктов промежуточного складирования и перевалки;

- каких «стандартных стратегий» управления сетями поставок должны придерживаться участники процесса поставок.

Ответы на вышеприведенные вопросы неявно определяют множество допустимых вариантов построения логистической системы и ее сети. Выбор наилучшего варианта построения логистической сети предполагает решение множества комбинаторных задач ее структурной, топологической, параметрической и технологической оптимизации [3]. С учетом того, что мощности множеств допустимых технологий функционирования, параметров терминалов и видов транспорта, которые могут быть использованы для организации сети, незначительны, основную трудность составляют задачи оптимизации их топологических структур.

Математическая модель и метод решения задачи

Системологический анализ проблемы синтеза логистических сетей, как территориально распределенных объектов, позволил провести ее декомпозицию и определить схему взаимосвязи задач по входным и выходным данным [5, 6]. При этом установлена целесообразность совместного решения задач выбора структуры и топологии сети, основой которой является определение мест размещения терминалов. Задача структурно-топологического синтеза логистической сети состоит в доопределении варианта построения системы с заданными технологией функционирования, параметрами элементов транспорта, количеством терминалов (подсистем, терминалов), связями между ними и их топологией (территориальным размещением).

На практике одним из самых распространенных видов сетей являются сети с радиально-узловыми

структурами. Использование для решения задачи структурно-топологической оптимизации логистической сети с радиально-узловой структурой точных комбинаторных методов, реализующих схемы ветвей и границ или направленного перебора локальных экстремумов функции цели, не позволяет синтезировать сети с количеством элементов более 80–100. Таким образом, актуальной является проблема разработки методов синтеза топологических структур логистических сетей с более низкой временной сложностью и высокой точностью.

Сеть с радиально-узловой структурой связывает каждый из ее элементов с центром через один из терминалов. Во многих случаях считается, что центры и терминалы сети могут размещаться в непосредственной близости от одного из их элементов. Исходя из этого, и с учетом значительной территориальной рассредоточенности логистических систем, в дальнейшем будем предполагать, что центр и терминалы системы размещаются на базе одного из ее элементов.

На основе [7] задача может быть сформулирована следующим образом. Заданы: множество рассредоточенных по территории элементов системы $El=\{el_i\}$, $i = \overline{1, n_E}$ и их характеристики, типы терминалов и видов транспорта, на базе которых создается система, места возможного размещения ее терминалов и основные положения технологии ее функционирования. Предполагается, что в системе используются терминалы и виды транспорта, мощности которых достаточны для обслуживания закрепленных элементов. Необходимо определить: место размещения центра (центрального терминала); оптимальное количество терминалов (подсистем) системы n_U^0 ; места их размещения $Y = \{y_i^g\}$, $i = \overline{1, n_U^0}$, $g \in G$; множества элементов, непосредственно связанных с каждым из терминалов $El_j=\{el_j\}$, $j = \overline{1, n_U^0}$. При этом желательной целью является экстремизация выбранных частных критериев оперативности, эффективности, например, затрат на создание, эксплуатацию или приведенных затрат.

Частными случаями сформулированной задачи являются задачи, когда: задано место размещения центра; задано количество терминалов; места возможного размещения терминалов не совпадают с местами размещения элементов и т.д. В подавляющем большинстве задач синтеза и оптимизации логистической сети в качестве единственного или основного критерия выступают затраты на ее создание и (или) эксплуатацию. Затраты на сеть можно представить состоящими из затрат на ее центр C_C , терминалы C_U , элементы C_E , связи (транспортировку груза) между терминалами и центром C_{UC} , связи между элементами и терминалами C_{EU}

$$C = C_C + C_U + C_{UC} + C_E + C_{EU}. \quad (1)$$

Для формализованного представления топологической структуры сети используем аппарат теории графов: элементы, терминалы и центр будем представлять вершинами графа, а связи между ними – его дугами. Для задания графа используем матрицу смежности $R = [r_{ij}]$, $i, j = \overline{1, n_E}$, где $r_{ij} = 1$, если

вершины i и j связаны дугой, $r_{ij} = 0$ – в противном случае. Для всех вершин $i = \overline{1, n_E}$, отображающих элементы, на базе которых размещаются терминалы $r_{ii} = 1$.

Критерий затрат на сеть может быть представлен в виде

$$C = C_C + \sum_{i=1}^{n_E} (c_U + c'_{iC} + c'_{Ci}) r_{ii} + c_E n_E + \sum_{i=1}^{n_E} \sum_{j=1}^{n_E} c_{ij} r_{ij} \rightarrow \min_{r_{ij}}, \quad (2)$$

где C_C – затраты на центр; n_E – количество элементов, входящих в состав системы; c_U – затраты на терминал; c'_{iC} , c'_{Ci} – затраты на доставку груза между i -м терминалом и центром, центром и i -м терминалом; c_E – затраты на элемент; C_{ij} – затраты на доставку груза между элементами i и j .

Основные ограничения: каждый элемент должен быть связан с одним из терминалов, т.е. $\sum_{i=1}^{n_E} r_{ij} = 1$ для всех $j = \overline{1, n_E}$, для которых $r_{jj} = 0$; к терминалу должно быть подключено не менее одного элемента $\sum_{i=1}^{n_E} r_{ij} \geq 1$ для всех $j = \overline{1, n_E}$, для которых $r_{jj} = 1$; общее количество связей $\sum_i \sum_j r_{ij} = 2 \cdot (n_E - 1) + n_U$, где n_U – количество терминалов в системе, $n_U = \sum_i r_{ii}$; элемент j присоединяется к терминалу i по минимуму стоимости доставки груза $\min_i c_{ij}$; каждый из терминалов $i = \overline{1, n_U}$ связывается с центром, т.е. $r_{ii} = 1 \rightarrow r_{iC} = 1$ и $r_{Ci} = 1$; терминалы не связываются между собой, т.е. $(r_{ii} = 1$ и $r_{jj} = 1) \rightarrow (r_{ij} = 0$ и $r_{ji} = 0)$; количество терминалов n_U может меняться от 0 до n_E , т.е. $0 \leq \sum_{i=1}^{n_E} r_{ii} \leq n_E$.

Предлагаемый подход к решению задачи базируется на идеях направленного перебора вариантов [4, 7]. В результате анализа структурного построения территориально распределенных систем [4, 7] и особенностей логистических систем [1, 2] установлено, что затраты на создание и (или) эксплуатацию центра C_C практически не зависят от количества терминалов сети n_U и могут считаться постоянными. Затраты на создание и (или) эксплуатацию терминалов представляют собой в оговоренных условиях линейную зависимость от их количества $C_U = c_U \cdot n_U$ (где c_U – затраты на один узел). Затраты на элементы системы C_E не зависят от количества ее терминалов n_U . С увеличением количества терминалов в системе затраты на их связи центром C_{UC} увеличиваются, а на связи

между элементами и терминалами C_{EU} снижаются. Анализ зависимости затрат C от количества терминалов в сети показывает, что по аналогии с [4, 7] функции (1) – (2) могут быть представлены одноэкстремальной зависимостью от количества терминалов n_U (рис. 1).

Количество способов группирования n_E элементов при фиксированном количестве терминалов n_U равно количеству сочетаний $C_{n_E}^{n_U}$. С учетом этого областью определения функции (2) есть множество сочетаний $C_{n_E}^{n_U}$ для $n_U = 1, n_U^*$, где n_U^* – предельное значение количества терминалов системы.

Характер функций $C(n_U)$ (1)–(2) позволяет использовать для решения задачи оптимизации топологической структуры логистической сети с радиально-узловой структурой идею направленного перебора *MDR* (*Method of directed recalculation*). Направленный перебор вариантов будем осуществлять по количеству терминалов в системе и местам их размещения. Реализуя различные стратегии перебора по количеству терминалов и местам их размещения, получим множество различных модификаций или методов решения задачи.

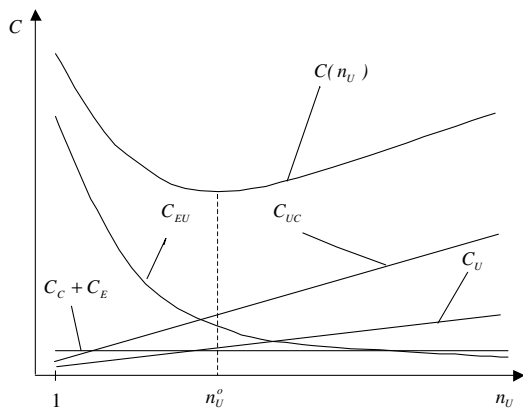


Рис. 1. Зависимость затрат на сеть от количества терминалов в ней

Идею базового метода направленного перебора *MDR* представим в виде последовательности таких шагов [4, 7].

Определить начальное значение допустимого количества терминалов n'_U , необходимых для обслуживания всего множества элементов (в простейшем случае $n'_U = 1$).

1. Для заданного количества терминалов $n_U = n'_U$ по минимуму затрат $\min_i c_{ij}$ (где c_{ij} – затраты на транспортировку груза между элементом j и терминалом i) решить задачу наилучшего размещения терминалов и распределения множества элементов по терминалам $El_k = \{el_{ij}\}$, $k = 1, n_U$. Определить затраты для полученного варианта сети $C(n_U)$.

2. Изменять количество терминалов в системе $n_U := n_U \pm 1$ и решать задачу распределения множества

элементов по терминалам до получения наилучшего решения по критерию затрат $n_U^0 = \arg \min C(n_U)$.

Для решения задачи размещения терминалов и распределения множества элементов по терминалам предлагается использовать метод усеченного перебора *MTR* (*Method of truncated recalculation*) и сравнивать его с методом полного перебора *MCR* (*Method of complete recalculation*).

Метод *MTR* предполагает выбор варианта путем полного перебора сочетаний на сокращенном множестве мест возможного размещения терминалов G^+ . Среди множества мест G можно выделить подмножество G^- , лежащих на границе обслуживаемой области, вдали от других элементов или вдали от путей, связывающих элементы, терминалы и центр. Таким образом, множество G^+ может быть получено из множества G путем исключения из него мест, размещение терминалов в которых нецелесообразно G^- , т.е. $G^+ = G \setminus G^-$.

Как наиболее информативные в качестве показателей эффективности предлагается использовать оценки точности получаемых решений и сложности методов. В качестве показателя точности будем использовать значение относительной погрешности решений $\delta C = |C^o - \tilde{C}^o| / C^o$ (где C^o – оптимальное значение стоимости системы, полученное путем полного перебора вариантов; \tilde{C}^o – оценка оптимального значения стоимости системы, полученная приближенным методом).

Для оценки временной сложности методов решения задачи будем использовать рабочие функции, определяющие количество элементарных операций или время решения задачи в зависимости от ее размерности $O(n_E)$, $O(n_U)$ (где n_E – количество элементов системы; n_U – количество терминалов системы). Основной объем памяти во всех предложенных методах размещения терминалов тратится на хранение матрицы стоимостей связей между элементами, терминалами и центром $[c_{ij}]$, $i, j = 1, n_E$. В связи с этим показатели емкостной сложности для всех рассматриваемых методов примерно равны и составляют величину порядка $o[n^2]$. Это позволяет не учитывать их при оценке эффективности методов.

Метод *MDRCR* предполагает выбор лучшего варианта путем полного перебора всех возможных размещений терминалов для $n_U = 1, n'_U + 1$. Общее количество вариантов при этом равно сумме сочетаний $\sum_{n_U=1}^{n'_U+1} C_{n_E}^{n_U}$. С учетом этого временная сложность метода на основе полного перебора *MDRCR* может быть оценена величиной порядка $o[\sum_{n_U=1}^{n'_U+1} C_{n_E}^{n_U}]$. Метод на основе полного перебора вариантов *MDRCR* является экспоненциальным (неполиномиальным). Он позволяет получать оптимальные решения, однако, в виду его высокой временной сложности он применим для решения задач оптимизации сетей с относительно небольшим количеством элементов.

Метод *MDRTR* предполагает решение задачи путем полного направленного перебора сочетаний на сокращенном множестве мест возможного размещения терминалов $G^+ = G \setminus G^-$. В качестве подмножества G^- предлагается использовать множество висячих вершин минимального стягивающего дерева для графа системы (модификация *MDRTR*₁) и множество вершин, стоящих в конце списков "ближайших соседей" (модификация *MDRTR*₂). Для формирования списка "ближайших соседей" используется идея алгоритма Дысарта-Георганаса (*Dysart-Georganas*) [8]. При решении задачи на существующей коммуникационной сети в качестве G^+ может быть использовано множество транзитных вершин (вершин со степенью больше 1) в графе, полученном объединением кратчайших путей между центром и всеми вершинами исходного графа (модификация *MDRTR*₃).

В процессе реализации модификаций метода *MDRTR* кроме решения задачи перебора вариантов требуется решение одной из дополнительных задач построения кратчайшего стягивающего дерева, формирования списка "ближайших соседей" или определения кратчайших путей между центром и всеми вершинами. Известно, что сложность методов их решения оценивается величиной порядка $O[n_E^2]$. Таким образом, временная сложность всех модификаций этого метода может быть оценена величиной порядка

$O[n_E^2 + \sum_{n_U=1}^{n_U^0+1} C_{n_E^+}^{n_U}]$, где $n_E^+ = |G^+|$ – мощность множества

G^+ . С учетом того, что для практически решаемых задач $\sum_{n_U=1}^{n_U^0+1} C_{n_E^+}^{n_U} \gg n_E^2$, сложность всех модификаций метода

MDRTR может быть оценена величиной порядка

$$O_M \left[\sum_{n_U=1}^{n_U^0+1} C_{n_E^+}^{n_U} \right].$$

Учитывая характер функции $t(n_U) = \sum_{n_U=1}^{n_U^0+1} C_{n_E^+}^{n_U}$

можно утверждать, что основной выигрыш во времени решения задачи будет получен при $n_U = n_U^0 + 1$. С учетом этого в качестве аналитической оценки относительной сложности предложенных модификаций метода можно использовать $\delta_o = C_{n_E^+}^{n_U^0+1} / C_{n_E^+}^{n_U^0}$.

Выводы

Оптимизация логистических сетей предполагает решение множества комбинаторных задач структурной, топологической, параметрической и технологической оптимизации. При этом наиболее сложными считаются задачи оптимизации их топологических структур. Использование для их решения комбинаторных методов не позволяет синтезировать сети с большим количеством элементов.

Для решения задачи структурно-топологической оптимизации предложены эвристические модификации метода направленного перебора, позволяющие определять рациональные значения количества терминалов, места их размещения, подмножества связанных с каждым из них элементов и приведенные

затраты на создание и эксплуатацию логистической сети.

Направлениями дальнейших исследований в этой области могут стать: повышение точности получаемых решений путем формирования множества потенциально выгодных мест размещения терминалов на основе других принципов; снижение временной и емкостной сложности метода путем более жесткого отбора элементов множества потенциально выгодных мест размещения терминалов; развитие метода в направлении возможности учета существующих терминалов [9–12].

Практическое применение разработанных модификаций метода направленного перебора позволит применять их при решении задач большей размерности, повысить их точность по сравнению с известными эвристическими методами и, на этой основе, сократить затраты на создание и эксплуатацию сетей логистических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Мэрфи Пол Р. Современная логистика: пер. с англ. / Пол Р. Мэрфи, Д. Ф. Вуд. – Москва; Санкт-Петербург: Вильямс, 2016. – 720 с.
2. Лычкина Н.Н. Инновационные парадигмы имитационного моделирования и их применение в управленческом консалтинге, логистике и стратегическом менеджменте / Н.Н. Лычкина // Логистика и управление цепями поставок. – 2013. – № 5(58). – С. 28–41.
3. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем. Синтез и планирование развития. – М.: Наука, 1993. – 160 с.
4. Петров Э. Г. Территориально распределенные системы обслуживания / Э.Г. Петров, В.П. Пискалкова, В.В. Бескоровайный – К.: Техника, 1992. – 208 с.
5. Бескоровайный В.В. Системологический анализ проблемы структурного синтеза территориально распределенных систем / В.В. Бескоровайный // Автоматизированные системы управления и приборы автоматизации. – 2002. – Вып. 120. – С. 29–37.
6. Бескоровайный В.В. Синтез логической схемы системного проектирования территориально распределенных объектов / В.В. Бескоровайный // Радиоэлектроника и информатика. – 2002. – №. 3. – С. 94–96.
7. Бескоровайный В.В. Модификация метода направленного перебора для синтеза топологии систем с радиально-узловыми структурами / В.В. Бескоровайный // Автоматизированные системы управления и приборы автоматизации. – 2003. – Вып. 123. – С. 110–116.
8. Optimierung von Telekommunikationsnetzen. Optimale Knoten / Verfasst von L. Schade. – Dresden: ZSf HSFS, 1991. – 64 S.
9. Бескоровайный В. В. Модификации метода направленного перебора для реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга / В.В. Бескоровайный, К.Е. Подолька // Радиоэлектроника и информатика. – 2015. – № 3 (70). – С. 55–62.
10. Криволязюк И.В. Реинжиниринг логистических бизнес-процессов и систем как основа их самосовершенствования и развития / И.В. Криволязюк, Ю.М. Кулик // Экономика: реалии времени. – 2013. – №2 (7). – С. 87–94.
11. Шапиро Дж. Моделирование цепи поставок: пер. с англ.; под ред. В. С. Лукинского / Дж. Шапиро. / – СПб.: Питер, 2006. – 720 с.
12. Маликов О.Б. Перевозки и складирование товаров в цепях поставок: монография / О.Б. Маликов. – М.: Изд-во УМЦ ЖДТ (Маршрут), 2014. – 537 с.