многокритериальной задачи поиска оптимальных путей в корпоративной компьютерной сети. Проанализирована вычислительная сложность генетического алгоритма поиска оптимальных путей на графе.

Ключевые слова: маршрутизация, генетический алгоритм, многокритериальная оптимизация, Парето-оптимальность, метод рангов Голдберга, гибридный генетический алгоритм HAG, поиск оптимального пути на графе, хромосомы, кроссовер, мутация, отбор.

Presented existing approaches and methods for applying genetic algorithms to solve multi-objective optimization problems. The possibility of formalizing multiobjective optimal paths in the corporate computer network. Computational complexity analysis of the genetic algorithm search for the best ways to graph.

Keywords: routing, genetic algorithm, multicriteria optimization, Pareto-optimality, the method ranks Goldberg, a hybrid genetic algorithm HAG, find the optimal path on the graph, chromosomes, crossover, mutation, selection.

УДК 004.73

К. В. КОЛЕСНИКОВ, канд. техн. наук, доц.,ЧГТУ, Черкассы;
А. Р. КАРАПЕТЯН, аспирант, ЧГТУ, Черкассы;
О. Г. НИКУЛИН, студент, ЧГТУ, Черкассы

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА В СЕТЯХ С АДАПТИВНОЙ МАРШРУТИЗАЦИЕЙ ПАКЕТОВ ДАННЫХ

Представлены существующие методы применения моделей, построенных на основе нейронной сети Хопфилда, для определения оптимального маршрута. Рассмотрена возможность использования нейронных сетей Хопфилда в сетях с адаптивной маршрутизацией. Проанализирована вычислительная сложность при использовании функции энергии для активации нейронной сети.

Ключевые слова: маршрутизация, нейронные сети, сети Хопфилда, адаптивная маршрутизация, функция энергии

Введение. В телекоммуникационных системах искусственные нейросети находят применение при решении следующих задач [1]: управление коммутацией, адаптивная маршрутизация, управление трафиком, оптимальное распределение загрузки каналов сети.

Адаптивная маршрутизация является одной из важнейших задач для телекоммуникационных сетей различного назначения. Задачи, связанные с выбором маршрута и с планированием работы маршрутизаторов, относятся к классу комбинаторно-оптимизационных задач, не имеющих простых аналитических решений. Для решения таких задач можно использовать модели, построенные на основе нейронной сети Хопфилда; большинство существующих работ в этой области базируются на таких моделях [2].

Постановка задачи. Применительно к классической задаче коммивояжера, проблема формулируется следующим образом [3]: для некоторой группы городов, с известными расстояниями между ними, требуется найти кратчайший маршрут разового посещения каждого города с возвратом в исходную точку.

Обозначим города, которые необходимо посетить, буквами A, B, C…, а расстояния – d_{AB}, d_{AC},…d_{BC}… Решением является упорядоченное множество из n

городов. Последовательность, в которой совершается посещения города, удобно представлять матрицей *n* x *n*, строки которой соответствуют городам, а столбцы – номерам городов в последовательности. Например, имеется пять городов A, B, C, D, E, а последовательность обхода этих городов задана матрицей.

$$\begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline A & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ B & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ C & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ E & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array} \quad (1)$$

Таким образом, город C посещается первым, город A – вторым, и т. д. Длина маршрута равна d_{CA+} $d_{AE}+\ldots+d_{DC}$. В каждом столбце и в каждой строке этой матрицы может быть только одна единица, так как в каждый момент посещается только один город и каждый город посещается только один раз. Матрицу вида (1) можно воспринимать как состояние нейронной сети (НС) из $N = n^2$ нейронов. Задача состоит в том, чтобы из n!/2n маршрутов выбрать один с наименьшей длиной. Состояние каждого нейрона описывается двумя индексами, которые соответствуют городу и порядковому номеру его посещения в маршруте. Например, $Y_{xj} = 1$ показывает, что город x был j-м по порядку городом маршрута.

Для решения данной задачи составляется функция энергии для нейронной сети, предназначенной для решения задачи коммивояжера. Пусть состояние с наименьшей энергией соответствует самому короткому маршруту. В общем виде, такая функция для рассматриваемой нейронной сети может иметь следующий вид [2]:

$$E = -\frac{1}{2}\sum_i\sum_j w_{ij}Y_iY_j - \sum_j I_jY_j - \sum_j T_jY_j, \quad (2)$$

где E – искусственная энергия сети, w_{ij} – вес от входа нейрона i к входу нейрона j,

Y_j - выход нейрона j, I_j – внешний вход нейрона j, T_j – порог нейрона j.

Изменение энергии, вызванное изменением состояния j-нейрона, можно вычислить следующим образом,[2]:

$$\delta E = \left(\sum\left(w_{ij}Y_i\right) + I_j - T_j\right)\delta Y_j \quad (3)$$

где δY_j - изменение выхода j-го нейрона.

Устойчивое состояние имеет меньшую энергию, чем неустойчивое. Развитие системы во времени – нахождение из множества состояний такого, в котором энергия достигнет минимального значения.

Однако, для рассматриваемой системы функция энергии должна удовлетворять следующим требованиям [4]. Во-первых, она должна поддерживать устойчивые состояния в форме матрицы (1). Во-вторых, из всех возможных решений функция энергии должна поддерживать те, которые соответствуют коротким маршрутам.

Этим требованиям удовлетворяет функция энергии вида (при этом, $Y_{xj} = 0{,}1$)

$$E = \frac{A}{2}\sum_x\sum_i\sum_{j\neq 1}Y_{xi}Y_{xj} + \frac{B}{2}\sum_i\sum_x\sum_{k\neq 1}Y_{xi}Y_{ki} + \frac{C}{2}\left(\sum_x\sum_i Y_{xi} - n\right)^2 + \frac{D}{2}\sum_x\sum_{k\neq x}\sum_i d_{xk}Y_{xi}\left(Y_{k,i+1} + Y_{k,i-1}\right) \quad (4)$$

Первые три члена выражения (4) поддерживают первое требование, четвертый член – второе; A, B, C, D – положительные множители. Первый член равен нулю, если каждая строка *x* содержит не больше одной единицы. Второй член равен нулю, если каждый столбец содержит не более одной единицы. Третий член равен нулю, если в матрице вида (1) *n* единиц. Таким образом, без учета четвертого члена функция энергии имеет минимумы (E = 0) во всех состояниях, представленных матрицей с одной единицей в каждом столбце и каждой строке. Все другие состояния имеют большее значение энергии. Короткие маршруты поддерживает четвертый член. В нем индексы *i* берутся по mod *n*, для того чтобы показать, что *i* -й город соседствует в маршруте с (n – 1) -м и первым, т. е. $Y_{k,n+j} = Y_{kj}$. Четвертый член численно равен длине маршрута.

Раскрывая скобки в (4) и приравнивая коэффициенты при квадратичных и линейных членах в полученном выражении и общей формуле энергии, определим матрицу связей и внешние взаимодействия:

$$w_{xi,kj} = -A\delta_{xk}(1-\delta_{ij}) - B\delta_{ij}(1-\delta_{xk}) - C - Dd_{xk}(\delta_{j,i+1}+\delta_{j,i-1}) , \qquad (5)$$

где, $\delta_{ij} = 1$, если $i = j$, в противном случае $\delta_{ij} = 0$. Кроме того, каждый нейрон имеет смешанный вес $I_{xi} = Cn$.

Первый член в (5) задает связи нейронов в каждой строке, второй – внутри каждого столбца, третий и четвертый задают глобальные связи. И в (4), и в (5), три первых члена отвечают за общие ограничения для любой задачи коммивояжера и приводят нейронную сеть в устойчивое состояние. Четвертый член управляет тем, какое из $n!/2n$ возможных различных финальных состояний соответствует самому короткому маршруту.

Рассмотрим вариант совместного решения задачи маршрутизации. Важность взаимосвязи между маршрутизацией и планированием последовательности выбора направления для передачи по используемым каналам связи показана в [5]. При этом выбор маршрутов, увеличивающих до максимального степень узла в сети, позволяет спланировать работу так, чтобы время ее выполнения было минимальным. Степень узла для этого случая определяется как сумма всех потоков, поступающих и исходящих от узла. При этом, критерий качества работы, выбираемый для задачи маршрутизации, должен отражать цели, связанные с соответствующей задачей составления плана работы каналов связи.

Пусть заданы: граф связности сети, ряд пар N_{sd} – исходная точка – пункт назначения (SD) и ряд каналов связи, соединяющих каждую пару SD, которая состоит из нескольких узлов и каналов связи, соединяющих эти узлы. Полагаем, что интенсивность трафика в такой сети равна одному пакету на цикл передачи. При приближении к ЧНН (часу наибольшей нагрузки) нагрузка на узлы извне резко возрастает, а внутри сети имеются маршруты, по которым может быть распределен входящий трафик. Требуется выбрать маршрут между парой источник – приемник с таким расчетом, чтобы минимизировать критерий качества работы.

Показатель качества работы должен согласовываться со структурой нейронной сети Хопфилда. По аналогии с вышерассмотренной моделью, показатель, называемый “энергией перегрузки” задается формулой, [5]:

$$E_b = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N_{SD}}\sum_{k=1,k\neq i}^{N_{SD}}\sum_{j=1}^{N_{p(i)}}\sum_{k=1}^{N_{p(k)}}\left|P_{ij}\cap P_{kl}\right|V_{ij}V_{kl} \qquad (6)$$

где P_{ij} – *j*-ый маршрут между *i*-ой парой источник – приемник,

$\left|P_{ij} \cap P_{kl}\right|$ - число узлов, которые совместно используют маршруты P_{ij} и P_{kl},

V – выходное напряжение нейронов;

Np(i) – число вариантов маршрутов, определенных между *i* –ой парой источник – приемник (ИП).

$$V_{ij} = \begin{cases} \dfrac{1, \ \textit{если выбирается } P_{ij}}{0, \ \textit{если не выбирается } P_{ij}} \end{cases}$$

Цель состоит в минимизации E_b с учетом того, что для каждой пары SD выбирается только один маршрут (т. е., $V_{ij} = 1$ для единственного значения *j* для каждого значения *i*). В этом случае энергия перегрузки соответствует сумме числа общих узлов всех выбранных маршрутов (по одной для каждой SD пары), взятых попарно.

Рассмотрим модель НС Хопфилда, используемую в этом случае для выбора маршрута между несколькими SD парами в сети. Выходные напряжения нейронов (которые и определяют их состояния) такой НС приближаются к двоичным значениям по мере перехода сети к состоянию устойчивого равновесия с минимальной "энергией". Соединения между нейронами *i* и *j* описываются весом T_{ij}, который положителен при возбуждающем соединении и отрицателен при запрещающем соединении. В рассматриваемой модели НС для каждого маршрута между каждой SD парой определяется один нейрон.

НС эволюционирует от некоего начального состояния до состояния равновесия, которое отображает минимум функции энергии Ляпунова, которая по аналогии с (2) может быть записана через веса соединений, токи смещения и напряжения на выходах нейронов следующим образом [6]:

$$E_{total} = -\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N_{ИП}}\sum_{k=1}^{N_{ИП}}\sum_{j=1}^{N_p(l)}\sum_{i=1}^{N_p(l)} T_{ij,kl}V_{ij}V_{kl} - \sum_{i=1}^{N_{ИП}}\sum_{j=1}^{N_p(l)} V_{ij}I_{ij} \qquad (7)$$

В выражении (7), целевая функция, моделируемая с помощью НС Хопфилда, включает взвешенные суммы произведений пар выходных напряжений нейронов и выходных напряжений, взятых по отдельности. $T_{ij,kl}$ – вес соединения между нейронами *ij* и *kl,* – ток смещения, прикладываемый к нейрону *ij,* $N_p(i)$ – число маршрутов SD. В рассматриваемой модели веса соединений являются симметричными, (т.е. $T_{ij,kl} = T_{kl,ij}$). Эта симметрия гарантирует сходимость к устойчивому состоянию [6]. Общее число нейронов *N* задается как $N = \sum_{i=1}^{N_{SD}} N_p(i)$. Следовательно, веса соединений $T_{ij,kl}$ являются элементами матрицы размерности *N*N.*

При выборе E_b вида (6) предполагалось, что оценивается энергия перегрузки сети в допустимом состоянии, т. е. активируется только один маршрут для каждой SD пары (т. е. $V_{ij} = 1$ для единственного значения *j* для каждого значения *i*, а остальные значения $V_{ij} = 0$). Однако до достижения сходимости величины V_{ij} принимают значения в континууме [0, 1] и выражение для энергии перегрузки, определяемое с помощью выражения (6), которое применимо в полной мере только для аналоговой реализации системы.[6]

Рассматриваемая задача оптимизации с целым рядом ограничений может быть сведена к задаче без ограничений посредством использования множителей Лагранжа [6]. Функция энергии перегрузки при этом приобретает следующий вид:

$$E_{total} = bE_b + \sum_{c=1}^{3} \lambda_c E_c - I \sum_{i=1}^{N_{SD}} \sum_{j=1}^{N_{p(i)}} V_{ij} \tag{8}$$

Ограничения для задачи являются соответствующими членами уравнения энергии перегрузки E_C (равны нулю, если ограничение выполняется) и формулируются так:

- на SD пару активизируется не более одного маршрута;
- в сети выбираются строго NSD маршрутов;
- на SD пару выбирается строго один маршрут.

Хотя последнее ограничение представляется избыточным (выполнение первых двух гарантирует удовлетворение последнего), его включение в уравнение энергии способствует более быстрой сходимости.

Подстановка выражений для Eb и Ec в (8) дает:

$$E_b = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N_{SD}} \sum_{k=1,k\neq i}^{N_{SD}} \sum_{j=1}^{N_p(i)} \sum_{k=1}^{N_p(k)} \left|P_{ij} \cap P_{kl}\right| V_{ij} V_{kl} + \frac{\lambda_1}{2} \sum_{i=1}^{N_{SD}} \sum_{j=1}^{N_p(i)} \sum_{i=1,i\neq j}^{N_p(i)} V_{ij} V_{il} + \frac{\lambda_2}{2} \left(\sum_{i=1}^{N_{SD}} \sum_{j=1}^{N_p(i)} V_{ij} - N_{SD} \right)^2 +$$
$$+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_{SD}} \left(\sum_{i=1}^{N_p(i)} V_{ij} - 1 \right)^2 + \frac{\lambda_3}{2} \sum_{i=1}^{N_{SD}} \left(\sum_{i=1}^{N_p(i)} V_{ij} - 1 \right)^2 - 1 \sum_{i=1}^{N_{SD}} \sum_{j=1}^{N_p(i)} V_{ij}. \tag{9}$$

Одним из самых важных вопросов при разработке модели НС Хопфилда и дальнейшем моделировании работы системы является вопрос выбора коэффициентов λc. Фактически, любые значения λc приведут к получению справедливых выражений для Etotal. Однако, при эволюции системы может быть гарантирован только локальный минимум, то есть конечное состояние зависит от исходного состояния, с которого начинается эволюция системы. В большинстве исследований, посвященных использованию НС Хопфилда, величины коэффициентов полагаются постоянными, лучшие значения которых обычно определяются в ходе испытаний при программном моделировании. Однако, существует ряд подходов, позволяющих во всей полноте использовать метод множителей Лагранжа. В этом случае величины λc изменяются по мере изменения состояния системы [6].

Оценить качество решения задачи обычно не представляется возможным, так как число возможных решений для больших сетей очень велико. Например, для 100-узловой сети существует приблизительно 5*1035 различных решений. Поскольку исчерпывающий поиск для такой сети исключен, то при моделировании выполнялся случайный поиск 2*106 выборок решений для получения опорного уровня качества для оценки работы НС [5]. Наилучшее решение, полученное с помощью случайного поиска, имело энергию перегрузки. Тот факт, что глобальный минимум находится не всегда, нивелируется тем обстоятельством, что возможно осуществить несколько испытаний с различными начальными условиями.

Выводы. В работе предложено использование нейронных сетей для поиска оптимального маршрута в сетях с адаптивной маршрутизацией. На основе выполненных исследований сделан вывод, что нейронные сети являются достаточно мощным математическим инструментом и могут с успехом применяться для решения подобных задач, включая те, которые трудно или невозможно решить другими методами. Время сходимости такого алгоритма может изменяться в зависимости от требуемой точности и динамики изменения сети. Описанные концепции могут быть использованы для создания современных протоколов маршрутизации, которые учитывают, как характеристики сетевых соединений, так и оборудования. Сформированные подходы позволяют значительно упростить решения задачи маршрутизации в сложных компьютерных телекоммуникационных системах.

Многочисленные работы, посвященные использованию НС при решении задачи маршрутизации, и близость получаемых результатов к оптимальным, свидетельствуют о робастности таких моделей.

Список литературы: **1.** *Галушкин, А. И.* Нейрокомпьютеры в разработке военной техники США – Зарубежная радиоэлектроника, 1995. №6, стр. 4-21.**2.** *Комашинский В. И., Смирнов Д. А.* Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. М.: Горячая линия – Телеком, 2003.**3.** *Уоссерман Ф.* Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. - М.: Мир, 1990.**4.** *Hajek B., Sasaki G.* Sceduling in Polynomial Time IEEE Trans. Inform. Teory. Sept. 1998. vol. 34, pp. 910-917. **5.** *Wieselthier J. E., Barnhart C. M., Ephermides A.* A Neural Networks Approach to Routing Without Interference in Multihop Networks IEEE Transactions on Comm., 1994, vol.42, no.1, pp166-1777. **6.** *Колесніков К. В., Карапетян А. Р., Кравченко О. В.* Застосування нейронних мереж Хопфілда до задач адаптивної маршрутизації даних в телекомунікаціях // "Автоматика-2010", Том 2, Харків: ХНУРЕ, с.168-169.

Поступила в редколлегию 03.09.2013

УДК 004.73

Використання нейромережевих моделей для визначення оптимального маршруту в мережах з адаптивною маршрутизацією пакетів даних / Колесніков К. В., Карапетян А. Р., Нікулін О. Г. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2013. - № 56 (1029). – С.50-55 . – Бібліогр.: 6 назв.

Представлені існуючі методи застосування моделей, побудованих на основі нейронної мережі Хопфілда, для визначення оптимального маршруту. Розглянуто можливість використання нейронних мереж Хопфілда в мережах з адаптивною маршрутизацією. Проаналізовано обчислювальна складність при використанні функції енергії для активації нейронної мережі.

Ключові слова: маршрутизація, нейронні мережі, мережі Хопфілда, адаптивна маршрутизація, функція енергії, пошук оптимального шляху на графі. Бібліогр

Existing methods of application models based on Hopfield neural network are presented in the paper. The possibility of using Hopfield neural networks in networks with adaptive routing is examined. The computational complexity when using the activation energy for the neural network is analyzed.

Keywords: routing, neural networks, Hopfield networks, adaptive routing, a function of energy, the search for an optimal path in the graph.

УДК 656.11

П. Ф. ГОРБАЧЕВ, д-р техн. наук, проф., ХНАДУ, Харьков;
А. С. КОЛИЙ, аспирант, ХНАДУ, Харьков

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЕМКОСТЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ РАЙОНОВ ПРИБЫТИЯ И ОТПРАВЛЕНИЕ АВТОМОБИЛЕЙ ДЛЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ГОРОДА ХАРЬКОВА

Представлена методика определения сбалансированной емкости транспортных районов центральной части города по прибытию и отправлению автомобилей за счет включения в расчет количества автомобилей которые осуществляют движение по транспортной сети.

Ключевые слова: транспортные районы, матрица корреспонденций, емкости, центр города, транспортные потоки, транспортная сеть.