

УДК 621.394

## ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАНАЛЬНОГО РЕСУРСА В ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЯХ

Г.А. Лаврентьев, аспирант МТУСИ; georgy.lavrentyev@gmail.com

**Ключевые слова:** отказоустойчивая сеть, генетический алгоритм, каналный ресурс, линии связи.

**Постановка задачи.** Современная транспортная сеть – это сеть, состоящая из набора сетевых элементов, соединенных с помощью линий связи (ЛС), способная обеспечивать функции транспорта, мультиплексирования, маршрутизации, управления и контроля. Применение технологии плотного спектрального уплотнения каналов (DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing) позволяет в десятки раз повысить пропускную способность такой сети. При этом в качестве величины каналного ресурса ЛС используется количество длин волн оптических несущих  $\lambda_{\text{нес}}$ .

При передаче трафика на скоростях порядка десятков Гбит/с на каждой длине волны  $\lambda_{\text{нес}}$  современные транспортные сети становятся зависимы от аварий на ЛС. При этом возникают потери больших объемов передаваемой информации (что недопустимо), а отсюда потребность в применении отказоустойчивых сетей.

Под *отказоустойчивой сетью* следует понимать транспортную сеть, сохраняющую способность правильно функционировать после отказа какой-либо ЛС. Задача проектирования отказоустойчивой транспортной сети сводится к выбору типа защиты трафика. При этом для использования алгоритмов защиты от негативного влияния отказов ЛС необходимо увеличить каналный ресурс сети с помощью дополнительных трактов с другими значениями оптической несущей. Все это ведет к удорожанию сети, поскольку требует большего числа каналообразующей аппаратуры.

Возникает необходимость в оптимизации количества  $\lambda_{\text{нес}}$  путем решения двух разных, но взаимосвязанных задач: выбора типа защиты трафика и его оптимальной маршрутизации.

**Разработка модели решения задачи.** Для ячеистой структуры современной транспортной сети, несмотря на ее достаточно широкое распространение, нет четких механизмов сетевого резервирования. Применяют резервирование однородных участков методом 1+1 или разбивают сеть на сегменты связанных кольцевых структур и резервируют методами самовосстанавливающихся колец, что не является оптимальным. Такие методы приводят как к дополнительным затратам из-за неоправданного увеличения пропускной способности сети, так и к неэффективному использованию сетевого резерва. В то же время ячеистые сети структурно более живучи, поэтому в настоящее время стали появляться новые подходы к резервированию и восстановлению в таких сетях [1].

Обзор существующих методов резервирования показывает, что с точки зрения использования каналного ресурса сети наиболее эффективен метод восстановления трактов, преимуществами которого являются:

- совместное использование резервного ресурса ЛС соединениями с непересекающимися рабочими трактами;
- равномерное распределение резервного ресурса по всем ЛС сети.

Транспортную телекоммуникационную сеть можно представить с помощью двух графов [3]. Первый  $G_1 = (V, E, \Lambda)$  описывает физическую структуру сети. Здесь  $V = \{v_i\}_{i=1}^n$  – множество сетевых узлов;  $E = \{e_{ij}\}_{i,j=1}^n | e_{ij} = \{0,1\}$  – множество ЛС;  $\Lambda = \{\lambda_{\text{нес}i}\}_{i=1}^k$  – множество оптических несущих. Множество  $\Lambda$  – это весовой коэффициент, присваиваемый каждому элементу множества  $E$  при определении каналного ресурса ЛС сети.

Второй граф  $G_2 = (V, L, D)$  описывает логическую структуру сети. Под логической структурой транспортной сети следует понимать структуру связей между клиентскими сетями, подключенными к транспортной сети. Здесь  $V = \{v_i\}_{i=1}^n$  – множество точек подсоединения клиентских сетей (совпадают с сетевыми узлами при наложении графов друг на друга);  $L = \{l_{ij}\}_{i,j=1}^n | l_{ij} = \{0,1\}$  – множество сетевых соединений между узлами сети;  $D = \{d_{ij}\}_{i,j=1}^n | d_{ij} = m\lambda_{\text{нес}}, m = \{0,1,2,\dots\}$  – матрица потребностей в трафике между сетевыми узлами, определяющая необходимый каналный ресурс для организации сетевого соединения.

Задача оптимального распределения трафика в транспортных сетях – это задача оптимизации по критерию минимально требуемого каналного ресурса наиболее загруженной ЛС ( $LinkLoad_{\text{max}}$ ), которая в общем виде может быть представлена следующим образом:

$$LinkLoad_{\text{max}} \rightarrow \min; \quad LinkLoad_{\text{max}} = \max_{\forall e_k \in E} \left( \sum_k d_{jk} \right),$$

где  $d_{jk}$  – требуемый каналный ресурс для организации сетевого соединения между узлами  $i$  и  $j$ , проходящего по  $k$ -й ЛС;  $e_k$  –  $k$ -й элемент множества  $E$ .

Решение данной задачи даст возможность уменьшить требуемый каналный ресурс, позволив операторам связи экономить средства при построении современных транспортных сетей. В противном случае недостаток каналного ресурса ведет к существенному увеличению стоимости сети и прикладываемых ресурсных затрат.

Задача относится к NP-трудным решениям [2] с огромным пространством поиска. Сегодня для решения такого рода задач используют эвристические алгоритмы оптимизации. Они не дают строго оптимального решения, но позволяют найти решение, приемлемое для построения сети. Часто оно оказывается близким к оптимальному. В основе эвристических методов лежат алгоритмы поиска решений, основанные на эмпирических соображениях.

Для решения описываемой задачи предлагается применять генетический алгоритм. Задачу генетического алгоритма можно также определить как задачу нахождения наибольшего значения функции  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , называемой функцией приспособленности (целевой функцией). В случае прикладных задач данная функция показывает, насколько найденное с ее помощью решение близко к оптимальному.

Вычисление целевой функции основывается на использовании так называемых *хромосом*. Каждая хромосома представляет собой набор переменных, определяющих решение задачи. Поиск оптимального решения основывается на преобразовании данных переменных с помощью процедур,

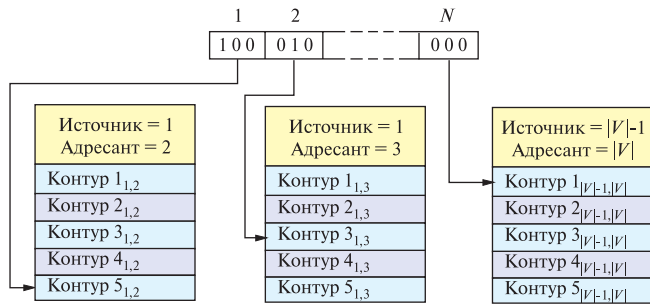


Рис. 1. Множество переменных в двоичном виде

аналогичных процедурам живой природы: скрещивание и мутация. Возможны разные подходы использования данного алгоритма для решения поставленной задачи. Их отличия заключаются в способе кодирования множества переменных, а также в составлении целевой функции.

Предлагается следующая методика использования генетического алгоритма применительно к поставленной задаче: для каждой пары узлов определяется список из  $K$ -наикратчайших замкнутых контуров, содержащих данные узлы. Каждый контур определяет пару непересекающихся трактов между парой узлов. Один из трактов (обычно более короткий) выступает в роли основного, а второй – резервного. Набор этих контуров является таблицей маршрутизации трафика между соответствующей парой узлов.

Каждая переменная представляет собой указатель на запись в соответствующей таблице маршрутов, т.е. полное множество переменных определяет маршрутизацию трафика между каждой парой узлов. Исходя из того, что количество узлов в сети равно  $|V|$ , полное множество составит  $\frac{|V|(|V|-1)}{2}$  переменных в натуральном исчислении или  $\frac{|V|(|V|-1)}{2} \log_2 K$  переменных в двоичном коде. Применение двоичного кода целесообразно при машинном решении задачи.

Множество переменных в двоичном виде представлено на рис. 1. В верхней части рисунка показана последовательность из переменных, а в нижней – таблицы маршрутизации трафика для соответствующих пар узлов.

Из рисунка видно, что таблицы маршрутизации для каждой пары узлов состоят из пяти записей, т.е. пространство поиска каждой переменной ограничено пятью разными контурами. Первая переменная, определяющая рабочий и резервный тракты между сетевыми узлами 1 и 2, представлена кодом  $P_{12}=100$ . Эта переменная в натуральном исчислении равна пяти, что означает выбор пятого контура для организации сетевого соединения.

Запишем множество переменных в виде:

$$CH = [P_{12}, P_{13}, \dots, P_{|V|}, P_{23}, P_{24}, \dots, P_{|V|-1,|V|}] = \{P_{ij}\}.$$

Пусть  $E(P_{ij})$  – множество ЛС, образующих контур  $P_{ij}$ . Тогда, зная все значения  $P_{ij}$ , можно простым суммированием определить степень загруженности каждой ЛС.

Постановка задачи подразумевает оптимальное распределение трафика по критерию оптимизации использования канального ресурса ЛС. Функция использования ресурса определена выше и имеет вид:

$$LinkLoad(e_k) = \sum_k d_{jk}.$$

Однако с учетом того, что в сети предусматривается организация защиты трафика по принципу восстановления трактов, функцию необходимо скорректировать. Представим ее в

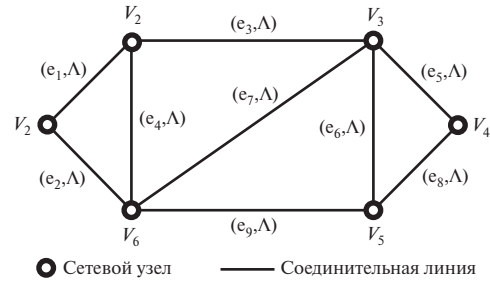


Рис. 2. Топология простой сети

виде суммы канальных ресурсов рабочих  $dw_{ij}$  и резервных  $ds_{ij}$  трактов, проходящих по данной линии:

$$LinkLoad(e_k) = \sum_k dw_{jk} + \sum_k ds_{jk}.$$

Восстановление трактов подразумевает совместное использование защитной емкости линий соединения с полностью непересекающимися рабочими трактами. Исходя из этого, необходимо уменьшить правый член функции  $LinkLoad(e_k)$  на величину  $\Delta ds_{jk}$ , определяемую как сумма емкостей данных соединений за исключением наибольшей из них:

$$LinkLoad(e_k) = \sum_k dw_{jk} + \sum_k ds_{jk} - \Delta ds_{jk}.$$

Целевая функция определяет загрузку всех ЛС. Для учета неравномерности загрузки представим функцию в экспоненциальном виде:

$$Obj = \sum_k |V|^{LinkLoad(e_k)}.$$

Решением задачи будет минимизация функции  $Obj \rightarrow \min$ .

Алгоритм работы модели можно представить в виде, приведенном ниже.

1. Определение  $K$  наикратчайших замкнутых контуров  $R$  для каждой пары узлов сети:  $\forall i, j | i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n; i \neq j; R_{ij} = \{R_{jk}\}_{k=1}^K$ .
2. Генерация случайным образом заданного количества  $z$  множеств переменных:

$$Chrom = \begin{bmatrix} Chrom_1 \\ Chrom_2 \\ \dots \\ Chrom_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{12}, P_{13}, \dots, P_{|V|}, P_{23}, P_{24}, \dots, P_{|V|-1,|V|} \\ P_{12}, P_{13}, \dots, P_{|V|}, P_{23}, P_{24}, \dots, P_{|V|-1,|V|} \\ \dots \\ P_{12}, P_{13}, \dots, P_{|V|}, P_{23}, P_{24}, \dots, P_{|V|-1,|V|} \end{bmatrix}.$$

3. Проверка условий завершения работы алгоритма по критерию максимального числа итераций и/или времени работы.

Если условие выполнено:

- вычислить целевую функцию по каждому множеству переменных  $Obj = \{Obj_i\}_{i=1}^z$ ;
- выбрать наилучшее значение  $Obj = \min_i (Obj_i)$ ;
- для выбранного варианта определить требуемое количество оптических несущих  $\Lambda$ .

Если условие не выполнено:

- вычислить целевую функцию по каждому множеству переменных  $Obj = \{Obj_i\}_{i=1}^z$ ;
- выбрать наилучшее значение  $Obj = \min_i (Obj_i)$ ;
- применить операции преобразования к остальным множествам переменных;
- перейти к следующей итерации (проверке условий завершения работы).

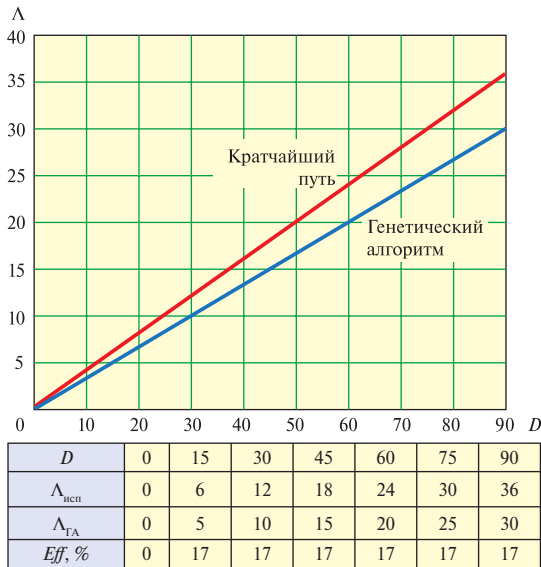


Рис. 3. Зависимость требуемого количества оптических несущих от суммы величин всех потребностей в трафике с равномерным распределением

Таким образом, полученная модель может простым образом быть интегрирована в работу генетического алгоритма. Для этого необходимо задать соответствующие параметры основных операторов преобразования.

**Результаты работы.** Введем параметр эффективности *Eff*, показывающий на сколько процентов снижается требуемый канальный ресурс сети при использовании рассматриваемой модели:

$$Eff = \frac{\Lambda_{исп} - \Lambda_{ГА}}{\Lambda_{исп}} 100 \%,$$

где  $\Lambda_{ГА}$  и  $\Lambda_{исп}$  – требуемое количество оптических несущих при распределении трафика с помощью разработанного и используемого методов соответственно.

Оценка эффективности разработанного метода проведена на примере простой топологической структуры, состоящей из шести узлов (рис. 2).

Для сравнения был выбран повсеместно используемый в реальных сетях алгоритм маршрутизации по наикратчайшему пути. Кроме того, проведено исследование зависимости необходимого количества оптических несущих  $\Lambda$  от суммы величин всех потребностей в трафике  $D$  и определена эффективность *Eff*. Расчет проводился для трех случаев распределения трафика: равномерное распределение между всеми узлами; преимущественное стремление трафика к узлам с наибольшей и наименьшей связностью. Результаты расчета при различных величинах потребностей сетевых соединений для каждого типа представлены на рис. 3–5.

Из приведенных результатов видно, что для сети простой топологии более эффективное распределение трафика имеет место при использовании предлагаемой модели, что выражается в снижении требуемого количества оптических несущих. Показатель эффективности превышает 10%. Это объясняется использованием альтернативных маршрутов при распределении сетевого трафика. Его величина также зависит от суммы емкостей сетевых соединений и остается постоянной при равенстве потребностей всех соединений вне зависимости от общей суммы. Однако придание неравномерности матрице потребностей изменяет показатель эффективности, рост или снижение которого определяется степенью неравномерности, а также связностью узлов наибольшего стремления.

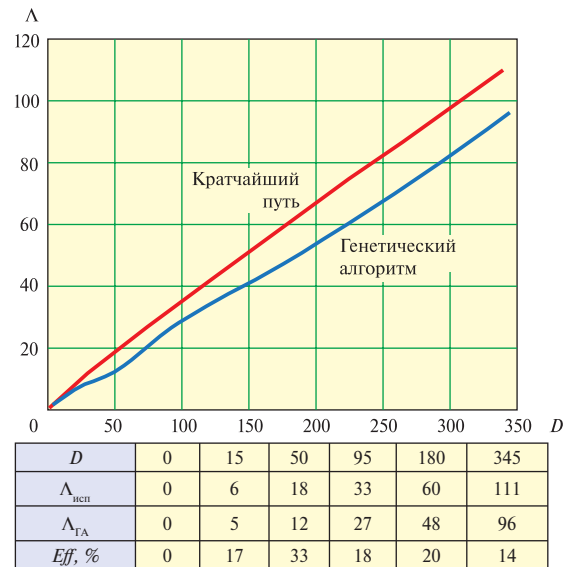


Рис. 4. Зависимость требуемого количества оптических несущих от суммы величин всех потребностей в трафике, стремящемся к узлам с наибольшей связностью

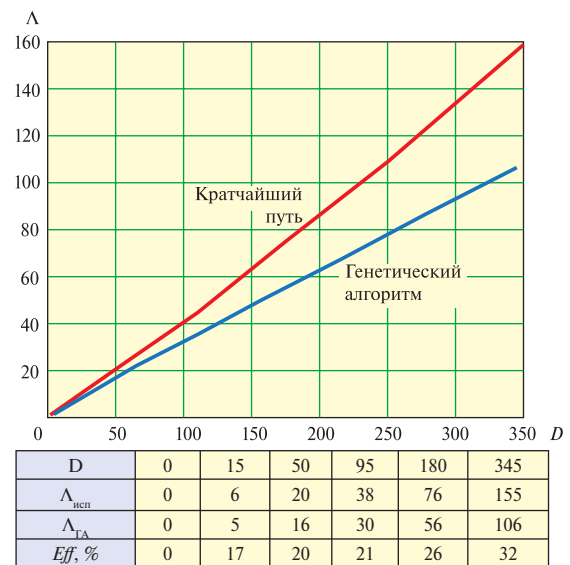


Рис. 5. Зависимость требуемого количества оптических несущих от суммы величин всех потребностей в трафике, стремящемся к узлам с наименьшей связностью

**Заключение.** В статье рассмотрен новый подход к решению задачи оптимального распределения трафика в отказоустойчивой транспортной сети. Преимущества данного метода заключаются в повышении эффективности использования канального ресурса сети по сравнению с методом распределения трафика по наикратчайшему маршруту. Также стоит отметить, что предложенную модель можно применить для расчета сетей любой топологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Groover W.D. Mesh-based survivable networks: Options and strategies for optical, MPLS, SONET and ATM networking / Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ. – 2003.
2. Chlamtac I., Ganz A., Karmi G. Lightpath communications: an approach to high bandwidth optical WAN's // IEEE Transactions on Communications. – July 1992. – Vol. 40, №7. – P. 1171–1182.
3. Малащенко Ю.Е., Новикова Н.М. Модели неопределенности в многопользовательских сетях. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 160 с.