

УДК 004.056.5:519.17

О.П. Мартынова<sup>1</sup>, А.А.Засядько<sup>2</sup>, В.Л. Баранов<sup>3</sup><sup>1</sup>Национальный авиационный университет, Киев<sup>2</sup>Государственный университет информационно-коммуникационных технологий, Киев<sup>3</sup>Черкасский институт банковского дела Университета банковского дела НБУ

## ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ МЕТОДАМИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ И МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ

*Предложенный метод многопутевой многокритериальной маршрутизации, который имеет два уровня повышения информационной безопасности пользователей компьютерной сети.*

**Ключевые слова:** информационная безопасность, многокритериальная и многопутевая оптимизация, компьютерные сети.

### Введение

**Постановка проблемы.** Развитие компьютерных сетей и информационных технологий требует комплексного решения задачи повышения эффективности передачи информации, совместно с решением задачи защиты передаваемой информации. Необходимость обеспечения информационной безопасности пользователей компьютерных сетей вызвана широким использованием их в государственных и финансовых организациях, в промышленных предприятиях и в организациях оборонного комплекса. Перспективным является направление повышения уровня защищенности компьютерных сетей, которое связано с совершенствованием методов маршрутизации передачи информации в сетях с учетом рисков потери информации, ее модификации и воздействий внешних факторов на каналы передачи информации.

**Анализ публикаций.** Анализ последних исследований и публикаций [1] позволяет сделать вывод о том, что повышение уровня защищенности компьютерных сетей можно достичь методом многокритериальной маршрутизации, который позволяет учесть качество обслуживания и информационную безопасность пользователей компьютерных сетей. Недостаток предложенного в работе [1] метода многокритериальной маршрутизации заключается в выборе единственного маршрута, который соответствует Парето-оптимальному решению по нескольким критериям качества.

**Цель работы** заключается в разработке метода многопутевой многокритериальной маршрутизации компьютерных сетей.

### Изложение основного материала

Реализация многокритериальной маршрутизации совместно с поиском нескольких независимых

альтернативных маршрутов позволяет увеличить допустимую нагрузку в сети, увеличить надежность передачи данных и снизить риски потери информации или ее модификации. Снижение рисков потери информации или ее модификации связано с распространением ограниченных ресурсов несанкционированного доступа по нескольким каналам передачи информации при реализации многопутевой маршрутизации.

Основная идея метода многопутевой многокритериальной маршрутизации заключается в двухэтапном решении задачи повышения уровня защищенности пользователей компьютерной сети. На первом этапе информационная безопасность повышается методом многокритериальной маршрутизации, который учитывает критерии качества передачи информации совместно с критериями защищенности передаваемой информации от несанкционированного доступа. На втором этапе реализуется многопутевая маршрутизация среди всех многокритериальных маршрутов, имеющих наиболее близкие оценки по величине скалярной свертки нескольких критериев качества передачи информации и уровня ее защищенности.

Реализацию метода многопутевой многокритериальной маршрутизации опишем на математической модели компьютерной сети в виде графа, вершины которого моделируют узлы-источники и узлы-приемники информации, а ветви графа соответствуют каналам передачи информации.

На первом этапе сформулируем задачу многокритериальной маршрутизации на графе между узлом-источником и узлом-приемником информации.

Введем систему частных критериев качества, которая, с одной стороны, характеризует качество передачи информации от узла-источника к узлу-приемнику, а с другой стороны, характеризуют уро-

вень защищенности передаваемой информации от несанкционированного доступа. Предположим, что скорость передачи данных оценивается частным критерием качества  $I_1^*$ , время задержки передачи данных задается частным критерием качества  $I_2^*$ , надежность передачи информации учитывается частным критерием качества  $I_3^*$ , риск потери информации или ее модификации оценим частным критерием качества  $I_4^*$  и т.д. В этой системе частных критериев качества  $I_1^*$  и  $I_2^*$  оценивают технические характеристики канала передачи информации. Частный критерий качества  $I_3^*$  оценивает надежность передачи информации в условиях действия внутренних и внешних помех. Уровень защищенности канала передачи данных характеризуется риском  $I_4^*$  потери информации или ее модификации в процессе передачи данных. В рассматриваемой системе частных критериев качества частные критерии качества  $I_1^*$ ,  $I_2^*$ ,  $I_4^*$  необходимо минимизировать, а частный критерий качества  $I_3^*$  следует максимизировать. Приведем все частные критерии качества к случаю их минимизации. С этой целью максимизируемый частный критерий качества  $I_3^*$  заменим на минимизируемый частный критерий качества  $I_3 = I_{3m} - I_3^*$ , где  $I_{3m}^*$  – максимально-возможное значение надежности, которое задается техническими характеристиками канала передачи данных.

В общем случае считаем, что качество обслуживания и уровень информационной безопасности пользователя оценивается  $n$  минимизируемыми критериями качества  $I_1, I_2, \dots, I_n$ . На основании технических характеристик каналов передачи информации, требований к качеству обслуживания и уровню информационной безопасности задаются предельно-допустимые значения частных критериев качества  $I_{1m}, I_{2m}, \dots, I_{nm}$ . Затем переходим к системе относительных частных критериев качества  $I_1/I_{1m}, I_2/I_{2m}, \dots, I_n/I_{nm}$ , диапазон изменения которых задаются ограничениями:

$$0 \leq \frac{I_i}{I_{im}} \leq 1, \quad i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Известно, что задача многокритериальной оптимизации является некорректной, так как частные критерии качества конфликтуют между собой. Улучшение одного частного критерия качества ухудшает один или несколько других частных критериев качества. Регуляризация некорректной задачи многокритериальной оптимизации выполним скалярной сверткой частных критериев качества по

нелинейной схеме компромиссов [2]:

$$J = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{1 - \frac{I_i}{I_{im}}}, \quad \alpha_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1, \quad (2)$$

где  $I_i$  –  $i$ -й частный критерий качества;  $\alpha_i$  – весовые коэффициенты;  $I_{im}$  – предельно-допустимое значение частного критерия качества  $I_i$ .

Предлагается присваивать ветвям графа вес (длину) пропорциональный скалярной величине  $J$ , которая определяется по нелинейной схеме компромиссов (2).

Математическая модель компьютерной сети в виде графа, веса (длина) ветвей которого рассчитываются по выражению (2) позволяет реализовать многокритериальную оптимизацию маршрутов передачи информации от узла-источника к узлу-приемнику путем минимизации критерия качества:

$$\min_j L = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_{ij}}{1 - \frac{I_{ij}}{I_{ijm}}}, \quad \alpha_{ij} \geq 0, \quad \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} = 1, \quad (3)$$

где  $I_{ij}$  –  $i$ -й частный критерий качества в  $j$ -й ветви графа;  $I_{ijm}$  – предельно-допустимое значение  $i$ -го частного критерия качества в  $j$ -й ветви графа;  $\alpha_{ij}$  – весовые коэффициенты;  $n$  – количество частных критериев качества;  $r$  – количество ветвей графа вдоль маршрута от узла-источника к узлу-приемнику.

Весовые коэффициенты  $\alpha_{ij}$  в (3) позволяют задать приоритет тех каналов передачи информации, которые имеют больший уровень защищенности информации, чем другие. Весовые коэффициенты  $\alpha_{ij}$  также дают возможность повысить уровень информационной безопасности за счет уступок в качестве обслуживания компьютерной сети.

Задача минимизации критерия качества (3) известна как задача о кратчайшем пути между узлом-источником и узлом-приемником. Следовательно, применение для расчета весов графа математической модели компьютерной сети свертки по нелинейной схеме компромиссов (3) сводит задачу многокритериальной маршрутизации к известной задаче о кратчайшем пути, которая может быть решена алгоритмом Дейкстры либо параллельными средствами маршрутизации [3].

Рассмотрим положительные качества маршрутизации согласно выражению (3), которое можно интерпретировать как многокритериальную оптимизацию  $g \times n$  частных критериев качества по нелинейной схеме компромиссов [2]. Маршруты передачи информации, выбранные согласно выражению (3), обладают свойством оптимальности по Парето,

так как оптимизация свертки по нелинейной схеме компромиссов дает оптимальное по Парето решение [2]. Поэтому попытка улучшить маршрутизацию по одним частным критериям неизбежно приведет к ухудшению оценок по другим частным критериям качества. Кроме того, нелинейная схема компромиссов (3) обладает свойством адаптации к изменению значений частных критериев качества  $I_{ij}$ . Если один из частных критериев  $I_{ij}$  приближается к своему предельно-допустимому значению  $I_{ijm}$ , то согласно выражению (5) вес  $j$ -й ветви графа стремится к бесконечности. Следовательно, в процессе маршрутизации путем решения задачи о кратчайшем пути эта ветвь графа и соответствующий ей канал передачи данных исключается из кратчайших маршрутов до тех пор пока значение частного критерия качества  $I_{ij}$  будет находиться вблизи предельно-допустимого значения  $I_{ijm}$ . Когда ситуация в компьютерной сети изменится, что приведет к удалению частного критерия качества  $I_{ij}$  от своего предельно-допустимого значения  $I_{ijm}$ , то значение веса этой ветви графа станет соразмеримым с весами других ветвей графа и данная ветвь вновь будет участвовать в процессе маршрутизации совместно с другими ветвями графа.

Свойство адаптации нелинейной схемы компромиссов (3) к изменению ситуации в компьютерной сети позволяет повысить информационную безопасность средствами маршрутизации следующим образом. Предположим риск  $I_{4j}$  потери информации или ее модификации в  $j$ -й ветви графа или в соответствующем канале передачи информации увеличивается и приближается к своему предельно-допустимому значению  $I_{4jm}$ . Это значит, что сторона, противодействующая пользователям компьютерной сети, направляет определенные ресурсы несанкционированного доступа в направлении передачи информации, которая моделируется  $j$ -й ветвью графа. В этом случае вес  $j$ -й ветви начинает резко возрастать (теоретически стремится к бесконечности), что приведет к исключению  $j$ -й ветви в процессе маршрутизации из кратчайших маршрутов, по которым передается информация в компьютерной сети. Таким образом, многокритериальная маршрутизация учитывает риск потери информации или ее модификации и повышает информационную безопасность пользователей компьютерной сети. Следует отметить, что исключение  $j$ -й ветви графа из маршрутизации на время несанкционированного доступа не приводит к отключению пользователя от источника информации, так как поступление информации продолжается по другим каналам передачи информации, которые

характеризуются меньшими рисками несанкционированного доступа.

Рассмотрим режим работы компьютерной сети в случае отсутствия рисков несанкционированного доступа  $I_{4j} = 0$ ,  $j = \overline{1, r}$ . В этом случае составляющие весов ветвей графа по частному критерию качества  $I_{4j}$  дают постоянную величину  $\alpha_{4j}$ .

Как известно добавление постоянной величины к оптимизируемому критерию (3) не изменяет результат оптимизации. Следовательно, оптимизация маршрутов в этом случае осуществляется по другим частным критериям качества, которые характеризуют скорость передачи информации, задержку передачи сообщений и надежность работы каналов передачи информации. Тогда многокритериальная маршрутизация по остальным частным критериям обеспечивает требуемое качество обслуживания пользователей в пределах ограничений (1) и выбирает маршруты передачи информации, которые характеризуются наименьшими значениями остальных частных критериев качества согласно оптимальности по Парето [2].

Метод многокритериальной маршрутизации может быть усовершенствован, если его сочетать с многопутевой маршрутизацией, которая позволяет найти несколько независимых параллельных маршрутов передачи информации с близкими оценками по выражению (3). В этом случае увеличивается надежность передачи данных и снижаются риски потери информации или ее модификации. Поэтому предлагается на втором этапе решения задачи повышения информационной безопасности перейти к решению задачи многопутевой маршрутизации по оценкам (3). В задаче многопутевой маршрутизации требуется найти несколько параллельных и независимых маршрутов передачи данных между узлом-источником и узлом-приемником информации, имеющие наименьшие характеристики длины маршрутов по оценкам (3). Известно, что время решения задачи о кратчайшем пути при однопутевой маршрутизации алгоритмом Дейкстры растет пропорционально  $O(N^2)$ , где  $N$  – количество узлов компьютерной сети. В случае многопутевой маршрутизации время решения задачи маршрутизации увеличивается пропорционально количеству искомым путей. В сложных компьютерных сетях существует проблема реализации многопутевой маршрутизации из-за существенного увеличения времени маршрутизации, которое пропорционально оценке  $K O(N^2)$ , где  $K$  – количество искомым маршрутов. Решим эту проблему на основе параллельного алгоритма однопутевой маршрутизации и последовательного поиска альтернативных маршрутов в компьютерной сети. Параллельные алгоритмы однопутевой маршрутизации имеют оценку

времени решения задачи о кратчайшем пути  $O(N)$  [3]. Последовательный поиск альтернативных маршрутов параллельными алгоритмами маршрутизации хотя и увеличивают время поиска  $K$  маршрутов в  $K$  раз, но сохраняет линейный характер зависимости времени маршрутизации  $K O(N)$  от сложности компьютерной сети, оцениваемой количеством узлов  $N$  компьютерной сети. Предлагается использовать для многопутевой многокритериальной маршрутизации параллельный алгоритм однопутевой маршрутизации, который основан на принципе системоаналогового моделирования. Согласно этому принципу математическая модель компьютерной сети в виде графа разбивается на систему фрагментов графа, каждый из которых содержит вершину графа совместно с несколькими ветвями, входящими в эту вершину [3]. Если соединение фрагментов графа соответствует топологии компьютерной сети, то такая система аналогов-фрагментов графа моделирует компьютерную сеть. На системе фрагментов графа можно задать начальную и конечную вершины, которые соответствуют узлу-источнику и узлу-приемнику компьютерной сети. Среди всевозможных путей между начальной и конечной вершинами графа, которые проходят через ветви каждого фрагмента графа, может находиться элемент кратчайшего пути. Необходимым условием принадлежности ветви фрагмента графа кратчайшему пути является минимизация длины всех маршрутов, которые входят в вершину фрагмента графа. Поэтому во всех фрагментах графа необходимо выделять из всех маршрутов, которые приходят в вершины фрагментов графа, маршруты минимальной длины. Параллельный алгоритм однопутевой маршрутизации основан на параллельном выделении в вершинах каждого фрагмента графа маршрутов минимальной длины после увеличения характеристики длины маршрутов на величину (2) весов (длины) ветвей фрагмента графа и в выдаче согласно топологии соединения фрагментов графа новой характеристики длины кратчайшего пути. Как показано в работе [3] параллельное выполнение таких операций во всех вершинах графа за  $R$  шагов устанавливает во всех вершинах графа стационарные значения длин кратчайших маршрутов из начальной вершины графа во все вершины фрагментов графа, где  $R$  – количество вершин вдоль кратчайшего маршрута с максимальным количеством ветвей. Таким образом, параллельный алгоритм осуществляет построение дерева кратчайших путей из узла-источника во все остальные узлы-приемники графа компьютерной сети. С целью выделения из дерева кратчайших маршрутов маршрута, который соединяет узел-источник с данным узлом-приемником, во всех фрагментах графа запоминают номер ветви

фрагмента, из которой в вершину фрагмента графа поступила характеристика (3) кратчайшего пути. Методом считывания номеров ветвей фрагментов графа принадлежащих кратчайшим маршрутам в обратном порядке из узла-приемника в узел-источник информации определяют кратчайший маршрут между начальной и конечной вершинами графа.

Особенность многопутевой маршрутизации заключается в том, что необходимо найти  $K > 1$  параллельных маршрутов, которые имеют наиболее близкие характеристики по длине к кратчайшему маршруту, но не имеют общих ветвей графа.

Предлагается решить такую задачу многопутевой маршрутизации последовательным способом согласно следующей методике.

1. Однопутевая маршрутизация параллельным алгоритмом поиска кратчайших путей на фрагментах графа.

2. Исключение найденного кратчайшего пути между узлом-источником и узлом-приемником информации из топологии графа, моделирующего компьютерную сеть.

3. Переход к пункту 1, если количество кратчайших маршрутов меньше требуемого количества.

Сочетание параллельного алгоритма однопутевой маршрутизации [3] совместно с последовательным способом многопутевой маршрутизации дают оценку времени решения задачи многопутевой многокритериальной маршрутизации  $K O(N)$ , где  $K$  – количество параллельных маршрутов,  $N$  – количество узлов компьютерной сети.

## Выводы

Метод многопутевой многокритериальной маршрутизации имеет линейную зависимость времени маршрутизации от количества альтернативных маршрутов и сложности компьютерной сети.

Предложенный метод имеет два уровня повышения информационной безопасности пользователей компьютерной сети.

Первый уровень обеспечивается путем многокритериальной маршрутизации учитывающей требования к качеству обслуживания и риски потери информации или ее модификации.

Второй уровень повышения информационной безопасности обеспечивается многопутевой маршрутизацией по нескольким параллельным и независимым каналам передачи информации в компьютерной сети.

## Список литературы

1. Мартынова О.П. Применение многокритериальной маршрутизации для повышения информационной безопасности компьютерных сетей / О.П. Мартынова, А.А. Засядько, В.Л. Баранов // Проблемы информатизації

*та управління: зб.наук.пр. – К.: НАУ, 2007. – Вип. 3 (21). – С. 109-113.*

2. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем /А.Н.Воронин. – К.: Наук. думка, 1992. – 160 с.

3. Мартынова О.П. Параллельный алгоритм маршрутизации на графах и сетях / О.П. Мартынова //

*Проблеми інформатизації та управління: зб. наук. пр. – К.: НАУ, 2005. – Вип. 12. – С. 113-119.*

*Поступила в редколлегию 17.02.2009*

**Рецензент:** канд. техн. наук, доцент С.В. Кавун, Харківський національний економічний університет, Харків.

**ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ  
МЕТОДАМИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ТА БАГАТОШЛЯХОВОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ**

О.П.Мартынова, А.А. Засядько, В.Л. Баранов

*Запропонований метод багатокритеріальної багатошляхової маршрутизації має два рівня підвищення інформаційної безпеки користувачів комп'ютерної мережі.*

**Ключові слова:** інформаційна безпека, оптимізація, комп'ютерні мережі.

**RISE OF INFORMATIONAL SAFETY OF COMPUTER NETWORKS BY METHODS  
OF MULTICRITERIA AND MULTITRAVELLING ROUTEING**

O.P. Martinova, A.A. Zasyad'ko, V.L. Baranov

*The offered method of multitravelling multicriteria routeing which has two levels of rise of informational safety of users of a computer network.*

**Keywords:** information safety, computer networks.

---