

УДК 681.3.06

А.О. Смагина, инженер*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: kvf@sevgtu.sebastopol.ua***ВЕКТОРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ РЕШЕНИЙ ПО КОНТРОЛЮ ДОСТУПА В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

Рассматривается задача векторной оптимизации структурных решений по контролю доступа в системах передачи данных с учетом стоимостных факторов программно-аппаратных комплексов проверки и времени выполнения такой проверки. Приводится пример структурных решений с использованием методов уступок и минимального отклонения.

Ключевые слова: *система передачи данных, векторная оптимизация, метод уступок, метод минимизации отклонения от идеальной точки.*

В современной инфраструктуре компьютерных сетей важную роль играют факторы обеспечения безопасности передаваемых данных. Это такие факторы как целостность, функциональная безопасность, подтверждение авторства, а также прав доступа к передаваемым данным [1]. Поэтому рассмотрение вопросов, связанных с оптимизацией структурных решений, является актуальным. Рассмотрим подход к решению данной проблемы для специализированной системы передачи данных (СПД). Архитектура СПД может быть представлена в виде слоев, слои образуются из узлов, слои и узлы упорядочены. Дисциплина функционирования СПД предусматривает, что ее узлы упорядочены по слоям, данные могут передаваться только через соседние слои непосредственно от предыдущего к последующему по указанным маршрутам, направление передачи данных значения не имеет, т.е. речь идет о двусторонней передаче данных. В структуре узла СПД в качестве элементов можно выделить следующие компоненты: человек-оператор, техническая часть, программная часть. Функции узла СПД реализуют на основе использования аппаратно-программного комплекса с участием человека-оператора. Принципиально важно, что дополнительно в каждом узле может быть установлено специальное программно-аппаратное устройство контроля прав доступа – точка контроля доступа (ТКД). Для каждого сообщения (пользователя) существует входной и выходной узел в сети, кроме того, должен иметь место строго предписанный маршрут, соответствующий праву доступа для этого сообщения. Администратор сети назначает маршрут передачи сообщения, контролирует право доступа к сообщениям, руководствуясь следующими критериями: наиболее кратчайшим маршрутом от источника к приемнику и равномерной нагрузкой на узлы СПД. Под маршрутом понимается путь передачи данных от узла к узлу в каждом слое и соседних слоях. Для проверки сообщения требуется некоторое количество времени. Состав программно-аппаратных средств неоднороден: чем выше стоимость оборудования, тем быстрее выполняется процесс проверки, и наоборот, чем дешевле программно-аппаратный комплекс, тем процесс проверки сообщения выполняется медленнее. Каждый маршрут должен быть проверен на право доступа, проверка должна осуществляться хотя бы однократно в одном из узлов данного маршрута. Процесс проверки прав доступа является трудоемким и требует достаточно больших ресурсов, что отражается на затратах при проектировании и эксплуатации СПД. Построение оптимальных решений по расстановке ТКД должно основываться на двух моментах: во-первых, ТКД должна устанавливаться в узле, через который проходит несколько маршрутов, во-вторых, число ТКД должна быть минимальной при соблюдении основного требования: каждое передаваемое сообщение должно быть проверено, в-третьих, стоимость такой проверки должна быть минимальной. Именно поэтому, с целью минимизации затрат на установку оборудования ТКД представляет интерес задача векторной оптимизации расстановки ТКД в сети. Функционирование СПД на основе ТКД обеспечивает процесс проверки факторов, отвечающих за работоспособность системы в целом.

Целью данной статьи является рассмотрение подхода к защите передаваемых данных в СПД путем векторной оптимизации структурных решений по контролю доступа с учетом нескольких факторов. Предлагаемый подход основан на постановке решения задачи многокритериальной оптимизации с булевыми переменными при соответствующих ограничениях.

Постановка задачи. Задана структура СПД, которая содержит N узлов, соединенных каналами связи, по которым могут передаваться данные по известным M маршрутам от i -го узла к j -ому и не могут передаваться от i узла к $j+1$, минуя слой j . Каждый узел может быть инициатором сообщения, т.е. автором (с этого узла начинается маршрут передачи данных) и приемником сообщения (пользователем этого узла является получатель сообщения). Максимальное число ТКД в системе равно мощности множества маршрутов $|M|$ в случае, если маршруты не пересекаются, т.е. $K = |M|$, где K – число контрольных точек. Директивный маршрут, заданный администратором сети для i -го сообщения,

обозначим как M_i . $N(M_i)$ – число контрольных точек на маршруте, которое должно быть минимальным, $K(M_i)$ – контрольные точки на i -ом маршруте, также будем использовать для обозначения соответствующей конъюнкции. Если маршруты пересекаются, т.е. имеют один или более общих узлов, тогда максимальное количество маршрутов равно M^0 , $M^0 < |M|$, так как, например, можно установить ТКД в точке пересечения маршрутов. Дизъюнкция совокупности $K(M_i)$ должна быть равна $D(M_i)=1$, т.к. это соответствует требованию наличия хотя бы одной ТКД на маршруте. С целью минимизации затрат требуется установить минимальный объем аппаратуры, контролирующей права доступа, т.е. найти такую расстановку контрольных точек, чтобы, во-первых, $M^0 = \min$ и, во-вторых, каждый маршрут имел хотя бы одну точку контроля. Вариант расстановки является допустимым, если все дизъюнкции конъюнкций для каждого маршрута равны 1. Иными словами, среди всех допустимых вариантов расстановки следует выбрать минимальный. Время проверки одного сообщения в i -ом узле считается заданным и равно τ_i мс, стоимость программно-аппаратного обеспечения ТКД в i -ом узле – C_i , также известно и заданы в условных единицах. Существует множество решений этой задачи R , которые соответствуют M^0 . Среди множества $R(M^0) = R^0$ необходимо выбрать эффективное решение R^* , а ЛПР из R^* выбирает единственное решение. Качество решения задачи можно оценить с помощью функционала $E(S, M, \Sigma, X, C, T)$, где S – структура сети, M – матрица маршрутов, Σ – стратегия расстановки маршрутов, X – вектор расстановки ТКД, C – общая стоимость всех ТКД, T – общее время проверки сообщений. Качество решения – $\min_{X^0 \in X} E(S, M, \Sigma, X, C, T)$.

Фрагмент структуры СПД показан на рисунке 1. Сообщения могут передаваться от любого узла – источника сообщения к любому узлу – приемнику сообщения. Передача осуществляется двусторонним способом, т.е. направление передачи сообщения безразлично. На рисунке 1 S_i – i -ый узел СПД.

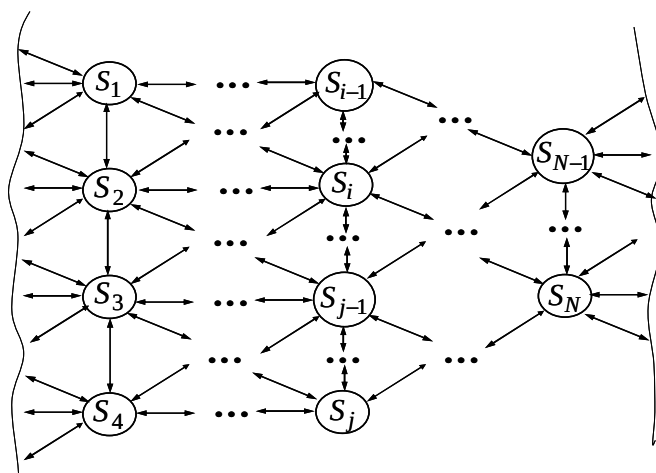


Рисунок 1 – Фрагмент структуры СПД

Маршруты представлены матрицей, в которой строки – узлы, лежащие на одном и том же маршруте. Элемент сети – x_{ij} , где первый индекс определяет номер маршрута, второй индекс – номер узла, в матрице $x_{ij} = 1$, если $x_{ij} \in M_i$, и $x_{ij} = 0$ в противном случае. В общем виде матрица может быть представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Множество маршрутов в СПД

Узлы Маршруты	1	...	j	...	N
M_1	x_{11}	...	x_{1j}	...	x_{1N}
$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	...	$\vdots$
M_i	x_{i1}	...	x_{ij}	...	x_{iN}
$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	...	$\vdots$
M_M	x_{M1}	...	x_{MJ}	...	x_{MN}

Множество вершин – $x: \{x_i, \dots, i = \overline{1, |N|}\}$, Множество маршрутов – $M\{m_i, \dots, i = \overline{1, |M|}\}$. Маршрут M_i может быть описан следующим образом: $M_i: \langle x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i|M_i|} \rangle$. $X: \langle x_1, x_2, \dots, x_N \rangle$ – вектор расстановки ТКД в сети.

Необходимо найти такой вариант расстановки ТКД, который обеспечит $M^0 = \min$, $C(X) = \min$, $T(X) = \min$, за счет изменения компонентов вектора X .

Математическая постановка оптимизационной задачи

Целевые функции

$$\sum_{x \in \Delta\beta} C_i x_i^k \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\sum_{x \in \Delta\beta} \tau_i x_i^k \rightarrow \min, \quad (2)$$

где x_i^k – множество ТКД, $\Delta\beta$ – множество допустимых вариантов их расстановки, задача формируется из следующей системы ограничений:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N x_{ij}^k \geq 1, & i \in M_1, x_i \neq 0, \\ \dots \\ \sum_{j=1}^N x_{ij}^k \geq 1, & i \in M_i, x_i \neq 0, \\ \dots \\ \sum_{j=1}^N x_{ij}^k \geq 1, & i \in M_M, x_i \neq 0, \\ x_{ij}^k \in \{0,1\} & (\forall i \in \{1,2,\dots,N\}). \end{cases} \quad (3)$$

Целевая функция (1) соответствует минимизации общей стоимости расстановки ТКД в выбранных узлах. Целевая функция (2) имеет смысл минимизации общего времени, затрачиваемого на проверку сообщений.

Система ограничений (3) формируется следующим образом: в уравнение входят все узлы маршрута M_i , т.е. переменные $x_{ij} = 1$. Каждому узлу, вошедшему в уравнение, ставится индекс k , отвечающий за то, что в нем устанавливается ТКД x_{ij}^k . Переменная x_{ij}^k может принимать два значения: 0 – аппаратура не устанавливается в i -ом узле, 1 – устанавливается. Изначально все переменные x_{ij}^k равны 1, т.е. в каждом узле маршрута стоит точка контроля. Система (3) обеспечивает выполнение ограничения конъюнкция дизъюнкций равна 1.

Таким образом, возникает задача многокритериальной оптимизации с булевыми переменными. В общем виде она может быть решена на основе двух следующих подходов: метода уступок и метода минимизации отклонения от идеальной точки.

Решение оптимизационной задачи с помощью метода уступок будет состоять из двух основных этапов. На первом этапе решается однокритериальная оптимизационная задача относительно целевой функции (1), в предположении, что она является более предпочтительной, чем (2), целевая функция (2) переводится в ограничения. На втором этапе решается задача оптимизации относительно целевой функции (2), целевая функция (1) переходит в ограничения с найденным на первом этапе значением.

Решение оптимизационной задачи с помощью метода минимизации отклонения от идеальной точки также проводится в два этапа. На первом этапе необходимо решить две однокритериальные оптимизационные задачи, используя в качестве критериальных функций целевые функции (1) и (2). На втором этапе выполняется поиск решения относительно новой целевой функции, представляющей собой минимальное отклонение от найденной идеальной точки, полученной на первом этапе. В качестве меры отклонения может быть использовано расстояние между двумя точками в евклидовой метрике.

Проиллюстрируем особенности предлагаемого подхода на примере.

Пример оптимизации структурных решений в СПД. Для примера рассмотрим СПД из 16 узлов. Структура СПД изображена на рисунке 2. Заданы 6 маршрутов передачи данных, стоимости расстановки ТКД в каждом из узлов сети и время проверки сообщений. Проверяются права доступа для сообщений. В каждом узле может быть установлена единственная ТКД. Необходимо расставить ТКД таким образом, чтобы контролировать все маршруты.

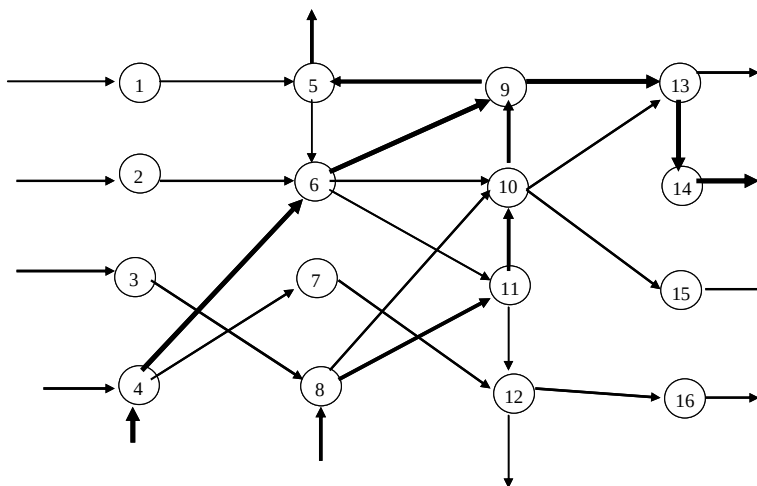


Рисунок 2 – Структура СПД

Выпишем все узлы маршрутов: маршрут № 1 – {1,5,6,11,12}, маршрут № 2 – {2,6,10,15}, маршрут № 3 – {3,8,10,13}, маршрут № 4 – {4,7,12,16}, маршрут № 5 – {4,6,9,13,14}, маршрут № 6 – {8,11,10,9,5}.

Стоимости установки ТКД в узлах и время выполнения проверки сообщений приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Стоимость аппаратно-программных средств и время выполнения ими проверки сообщений для каждого из узлов сети

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}
C_i , у.е.	5	4,5	4	3,5	4,5	3,7	4,2	3	2,8	2,5	3,2	2,2	2	1,8	2,1	1,5
τ_i , мс	30	40	35	25	30	45	50	55	60	65	70	60	65	75	80	90

Переменная x_i ($i = 1, 2, \dots, 16$), $x_i = 1$ – если в данном узле устанавливается ТКД, $x_i = 0$ – если не устанавливается.

Целевые функции (1) – (2):

$$\sum C_i x_i^k \rightarrow \min_{x \in \Delta\beta},$$

$$\sum \tau_i x_i^k \rightarrow \min_{x \in \Delta\beta},$$

где $\Delta\beta$ – множество допустимых вариантов их расстановки, формируется из следующей системы ограничений (3):

$$\begin{cases} x_1 + x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} \geq 1 \\ x_2 + x_6 + x_{10} + x_{15} \geq 1 \\ x_3 + x_8 + x_{10} + x_{13} \geq 1 \\ x_4 + x_7 + x_{12} + x_{16} \geq 1 \\ x_4 + x_6 + x_9 + x_{13} + x_{14} \geq 1 \\ x_8 + x_{11} + x_{10} + x_9 + x_5 \geq 1 \\ x_i \in \{0,1\} \quad (\forall i \in \{1,2,\dots,16\}) \end{cases}.$$

Каждому маршруту соответствует одно ограничение, имеющее следующий смысл: для контроля прав доступа к отправленному сообщению на каждом маршруте достаточно одной ТКД.

Данная задача относится к классу задач многокритериальной оптимизации с булевыми переменными. Максимальная сумма средств, которые могут быть затрачены на расстановку ТКД в СПД составляет 12 у.е., максимально допустимое время проверки доступа составляет 250 мс.

Решение задачи методом уступок. На первом этапе выполняется поиск решения относительно первой целевой функции. В результате решения найдены оптимальные значения для расстановки ТКД в узлах x_{10} , x_{12} , x_{14} , которым соответствует значение целевой функции (1) 6,5 у.е. Исходя из технических

соображений по первой целевой функции уступка составит 0,7 условных единиц. Введем дополнительное ограничение: переведем целевую функцию (1) в ограничения со следующим значением: $\sum C_i x_i^k \leq 7,2$. Решая оптимизационную задачу относительно целевой функции (2) с учетом дополнительного ограничения получим вектор X с расстановкой ТКД в узлах x_{10} , x_{12} , x_{14} , которым соответствует значение целевой функции (1) 6,5 у.е. и значение целевой функции (2) 200 мс. Выполним решение задачи относительно (1) целевой функции с уступкой по второй целевой функции на 20 мс. Получим следующее решение: расстановка ТКД в узлах x_{10} , x_{12} , x_{14} , которым соответствует значение целевой функции (1) 6,5 у.е., значение целевой функции (2) 200 мс. Сделав уступку по первой целевой функции вида $\sum C_i x_i^k \leq 8,5$, и решая задачу относительно второй целевой функции с учетом указанного ограничения, получим следующее: расстановка ТКД в узлах x_{10} , x_{12} , x_{14} , которым соответствует значение целевой функции (1) 6,5 у.е. и значение целевой функции (2) 200 мс.

Для задачи булевого программирования решение типовыми методами численной аппроксимации Парето множеств приводит к следующему решению: расстановка ТКД в узлах x_{10} , x_{12} , x_{14} , которым соответствует значение целевой функции (1) 6,5 у.е. и значение целевой функции (2) 200 мс. Если сделать уступку по целевым функциям более существенной, то получим следующий результат: расстановка ТКД в узлах x_1 , x_4 , x_{10} , которым соответствует значение целевых функций (1) 11 у.е. и (2) 120 мс.

Следовательно, задача сводится к выбору решения по двум следующим точкам:

- 1) $X = \langle 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0 \rangle$, $C(X) = 6,5$ у.е., $T(X) = 200$ мс;
- 2) $X = \langle 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0 \rangle$, $C(X) = 11$ у.е., $T(X) = 120$ мс.

Наиболее приемлемым представляется решение во второй точке, поскольку по сумме затраченных средств не превышает заданный максимальный предел, а по быстродействию проверки получается существенный выигрыш.

Таким образом, если наиболее важным критерием решения является быстродействие, то следует выбирать вторую точку, если более важным критерием является стоимость расстановки ТКД, то следует выбирать первую точку.

Решение задачи методом минимального отклонения. На первом этапе решается однокритериальная задача относительно целевой функции (1). Выполнив решение, получим оптимальное значение целевой функции 6,5 у.е. Запомним это решение. На втором этапе решаем однокритериальную задачу относительно целевой функции (2), в результате получим точку 120 у.е. Данная точка является идеальной, но недостижимой. Для окончательного решения двухкритериальной задачи по расстановке ТКД в СПД введем дополнительные ограничения, которые представляют собой оптимальную точку. Далее задача решается уже по двум критериям по формуле, которая представляет собой минимальное отклонение от найденной идеальной точки. В результате решения получим: расстановка ТКД в узлах x_6 , x_7 , x_8 , которым соответствует значение целевых функций (1) 10,9 у.е. и (2) 150 мс. $X = \langle 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 \rangle$, $C(X) = 10,9$ у.е., $T(X) = 150$ мс.

Таким образом, предлагаемый подход к решению задачи векторной оптимизации структурных решений в СПД позволяет найти эффективное решение, сократить множество вариантов и предоставить ЛПР необходимую информацию для выбора единственного решения.

Направлением дальнейших исследований предполагается разработка специализированных численных методов для аппроксимации кривых Парето в задачах булевого программирования.

Библиографический список

1. Отказобеспечивающие информационно-управляющие системы на программируемой логике / Е.С. Бахмач [и др.] / Под. ред. В.С. Харченко, В.В. Склера. — Изд-во Национального аэрокосмического университета «ХАИ», Научно-производственное предприятие «Радий», 2008. — 380 с.
2. Леоненков А.В. Решение задач оптимизации в среде MS Excel / А.В. Леоненков. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 704 с.

Поступила в редакцию 16.02.2010 г.