

СИСТЕМОАНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ГРАФАХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МАРШРУТОВ В СЕТЯХ

Институт информатики Национального авиационного университета

Выполнен сравнительный анализ системоналогового метода моделирования на графах с параллельными вычислительными структурами, основанными на временной аналогии. Показано, что системоналоговый метод моделирования обеспечивает повышение быстродействия решения задачи нахождения параллельных маршрутов в сетях.

Постановка проблемы

В связи с интенсивным развитием компьютерных сетей и широким внедрением их в различные области науки и техники актуальна задача многопутевой маршрутизации для определения возможных маршрутов передачи данных в сети [1-5].

В случае однопутевой маршрутизации и небольшой размерности компьютерной сети задача маршрутизации, при отсутствии перегрузки в компьютерной сети, решается на вычислительных машинах или специализированными вычислительными устройствами – маршрутизаторами. Как показывает практика, применение компьютерных сетей для решения задач продажи билетов, организации связи в телекоммуникационных системах и в процессе передачи больших объемов аудио- и видеoinформации возникает перегрузка компьютерной сети [1-4]. Одним из наиболее эффективных методов устранения перегрузки компьютерной и телекоммуникационной сети является распределение потоков информации по нескольким параллельным маршрутам. В связи с этим возникает задача многопутевой и в общем случае альтернативной маршрутизации в компьютерной сети. Математическая модель компьютерной или телекоммуникационной сети может быть представлена в виде графа, вершины которого моделируют узлы-источники и узлы-приемники информации, а ветви графа соответствуют возможным каналам передачи данных. Поскольку каналы передачи данных имеют ограниченную пропуск-

ную способность, то ветвям графа приписывают вес пропорциональный пропускной способности канала передачи данных, либо пропорциональный временной задержке в процессе передачи данных по этому каналу. В дальнейшем будем полагать, что вес ветви графа пропорционален временной задержке при передаче данных. Следовательно, задачу многопутевой маршрутизации можно рассматривать на графе, моделирующем компьютерную или телекоммуникационную сеть.

Анализ последних исследований и публикаций [1-4] позволяет сделать вывод о том, что задача однопутевой маршрутизации решается на вычислительных машинах с оценкой вычислительной сложности алгоритмов однопутевой маршрутизации $O(N^2)$, где N – размерность моделирующего графа, и на параллельных вычислительных структурах поиска кратчайшего пути на графах [7]. Основным недостатком известных алгоритмов решения задач маршрутизации на вычислительных машинах является резкое возрастание времени решения для сложных компьютерных сетей, содержащих сотни-тысячи узлов графа. Время решения задачи однопутевой маршрутизации для графа с несколькими десятком узлов для современных компьютерных сетей составляет десятки минут [1].

Данную проблему можно решить путем использования параллельных вычислительных структур поиска кратчайшего пути на графах, которые имеют ли-

нейную оценку времени решения $O(N)$ [9]. Однако, известные параллельные вычислительные структуры ориентированы на решение задач однопутевой маршрутизации и не позволяют решать задачи многопутевой маршрутизации.

Цель работы – разработка метода многопутевой маршрутизации на графах, основанного на применении системоаналогового принципа поиска альтернативных маршрутов.

Принцип системоаналогового моделирования [10] расширяет степень различия математического описания модели и объекта до границы исчезновения какого-либо сходства между ними. Модель, допускающую существенное изменение ее морфологического и функционального описания по отношению к оригиналу, принято называть системоаналогом. В отличие от традиционной цели моделирования, заключающейся в упрощении математического описания объекта, системоаналоги строятся в классе сложных систем. Существенным признаком системоаналоговой модели является ее целенаправленное поведение, формируемое посредством управления. Под воздействием управления класс сходства системоаналога и объекта изменяется от отношения толерантности к эквивалентности или идентичности. Класс сходства системоаналога и объекта может изменяться в процессе адаптации или самоорганизации системоаналога.

Примем в качестве объекта моделирования множество параллельных маршрутов между узлом-источником и узлом-приемником данных. Из всего множества параллельных маршрутов выделим K – путей, которые характеризуются наименьшей задержкой передачи данных. При $K=1$ имеем случай однопутевой маршрутизации.

Построим системоаналог для однопутевой маршрутизации. Учитывая, что концепция системоаналогового моделирования допускает расширение степени различия математического описания модели и объекта, в качестве системоаналога примем математическую модель графа передачи данных в компьютерной сети. Все возможные пути между узлом-

источником и узлом-приемником информации содержат в себе искомым кратчайший путь, который является объектом моделирования. Системоаналог в виде графа обладает всеми существенными признаками системоаналоговой модели. Во-первых, граф, содержащий множество узлов и ветвей, представляет сложную систему по отношению к кратчайшему пути. Во-вторых, граф, содержащий все всевозможные пути между источником данных и их приемником, имеет очень отдаленную степень сходства с кратчайшим путем на нем. В-третьих, граф может быть построен на основе принципа адаптации, реализация которого позволит изменить степень различия системоаналога от отношения толерантности до идентичности с кратчайшим путем.

Математическая модель графа отображает топологию конкретной компьютерной сети и может быть использована только для решения задачи маршрутизации на графе заданной структуры. С целью расширения моделирующих возможностей построим модель графа в виде системы аналогов – фрагментов графа. В качестве фрагмента графа может быть выбрана вершина графа с несколькими входящими в нее ветвями (рис. 1). Соединение фрагментов графа согласно топологии структуры компьютерной сети позволяет построить системоаналог графа, моделирующего сеть произвольной структуры.

Таким образом, первый этап системоаналогового метода заключается в моделировании компьютерной сети в виде системы фрагментов графа. Один фрагмент графа способен отобразить всевозможные пути, проходящие через его ветви и вершину. На системе фрагментов графа можно задать начальную и конечную вершины и поставить задачу нахождения кратчайшего пути между ними.

Среди всех путей между начальной и конечной вершинами графа, которые проходят через ветви каждого фрагмента графа, может содержаться элемент кратчайшего пути. Необходимым условием принадлежности ветви фрагмента графа кратчайшему пути является минимизация длины всех путей, входящих в вершину фрагмента графа.

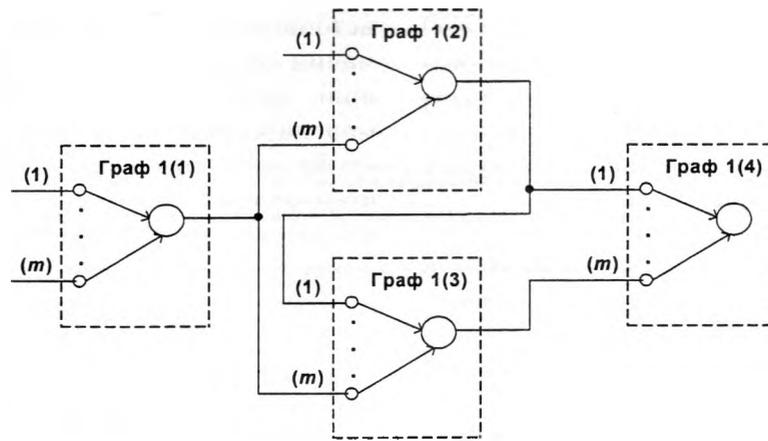


Рис. 1. Система фрагментов графа

Поэтому локальное управление моделью фрагмента графа должно выделять из всех путей, приходящих в вершину фрагмента графа, путь минимальной длины. Каждая ветвь фрагмента графа имеет определенную длину, задаваемую, например, временем задержки передачи данных по каналу, моделируемому данной ветвью. Поэтому каждый путь, входящий в данный фрагмент графа, должен увеличиваться каждой ветвью фрагмента на их длину. Модель вершины фрагмента графа должна выбрать из всех путей, входящих в нее, кратчайший и выдать его согласно топологии графа на остальные модели фрагментов графа. Модель фрагмента графа, реализующая локальное управление с целью выделения кратчайшего пути, изображена на рис. 2.

Каждая ветвь фрагмента графа моделируется регистром RG и сумматором

SM . В регистре RG хранится вес или длина ветви фрагмента графа. Путь некоторой длины, приходящий на вход модели ветви, увеличивается сумматором на величину длины ветви, хранящейся в регистре. Модель вершины фрагмента графа реализуется в виде устройства выделения минимальной величины из множества величин, поступающих по ветвям фрагмента графа. Из всех путей, приходящих в модель вершины фрагмента графа, на выход модели фрагмента графа проходит только один текущий путь минимальной длины, который далее распространяется согласно топологии соединений фрагментов модели графа. Таким образом, на втором этапе системного аналогового метода модели фрагментов графа реализуются в виде локального аналога кратчайшего пути (рис. 2).

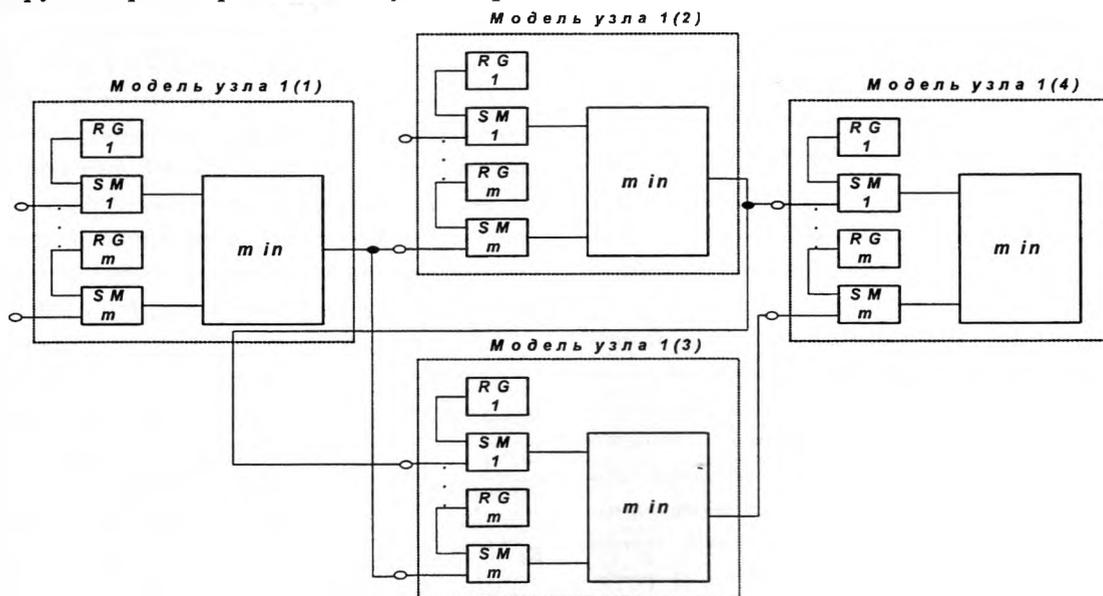


Рис. 2. Модель фрагмента графа для реализации локального управления

Третий этап системоаналогового метода состоит в реализации процесса системоаналогового моделирования на системе фрагментов графа, моделирующих процесс передачи данных в компьютерной сети.

Рассмотрим концепцию процесса системоаналогового моделирования, конкретизация которых позволит реализовать системоаналоговый метод поиска кратчайшего пути между начальной и конечной вершинами моделируемого графа. Системоаналоговое моделирование использует системную аналогию для переноса информации о модели в виде сложной системы на объект моделирования. Системная аналогия, реализующая отношение толерантности, позволяет получить информацию об объекте моделирования (кратчайшем пути) из исследования поведения всевозможных путей в сложной системе аналогов, выполненных в виде фрагментов графа и соединенных между собой согласно конфигурации компьютерной сети. Процесс системоаналогового моделирования заключается в целенаправленном управлении поведением системоаналогов, обеспечивая выделение из расширенного множества сложных функций системоаналогов более узкого класса функций моделируемого объекта. Локальное управление системоаналогом реализуется в каждой модели фрагмента графа, изображенной на рис. 2. Селекция из всех возможных путей пути минимальной длины выполняется моделью вершины фрагмента графа, обеспечивая выделение из расширенного класса всех допустимых путей кратчайшего пути, проходящего через данную вершину.

Распределенное управление системоаналогами, моделирующими фрагменты графа, обеспечивает гомеостаз функционального поведения сложной системы моделей фрагментов графа. После достижения гомеостаза функционального пове-

дения системоаналоговой модели между моделью и объектом устанавливается системная аналогия, позволяющая перенести информацию о поведении системоаналогов на объект моделирования. Системоаналоговая модель находится в отношении эквивалентности к объекту в той области значений переменных, при которых система устойчива и функциональное поведение системоаналогов соответствует функциональному назначению объекта моделирования.

Рассмотрим процесс системоаналогового моделирования в сложной системе, состоящей из фрагментов графа, соединенных согласно топологии компьютерной сети. Генерируем из начальной вершины сигнал, несущий информацию о пути нулевой длины. Этот сигнал, назовем его начальным, начнет распространяться по системе фрагментов графа, соединенной согласно топологии графа. Поступая на вход модели ветви фрагмента графа, начальный сигнал в сумматоре SM увеличит характеристику своей длины на величину длины ветви, хранящейся в регистре RG . Если начальный сигнал поступает на другие ветви фрагментов графа, то на входы модели вершины графа поступят по параллельным каналам несколько сигналов с разными характеристиками длины моделируемых путей. Модель вершины фрагмента графа выделит из всех входных сигналов один сигнал, имеющий характеристику пути наименьшей длины. Процесс распространения сигналов по системе моделей фрагментов графа завершится после достижения стационарного состояния во всех моделях фрагментов графа. Действительно, если между начальной вершиной графа и следующей вершиной, лежащей на кратчайшем пути, установится путь минимальной длины, то все сигналы, приходящие по другим моделям ветвей фрагмента графа,

не изменяют состояние модели вершины фрагмента графа, так как на выходе фрагмента графа будет действовать сигнал с характеристикой минимальной длины между начальной вершиной и данной вершиной графа. Таким же образом установится кратчайший путь между начальной вершиной и следующими вершинами фрагментов графа, принадлежащими кратчайшему пути. После достижения стационарного состояния во всех моделях фрагментов графа завершается процесс построения дерева кратчайших путей из заданной начальной вершины графа во все остальные вершины графа. Стационарное состояние всех моделей фрагментов графа свидетельствует о достижении гомеостаза функционального поведения системоаналоговой модели, состоящей из сложной системы моделей фрагментов графа. Устойчивое стационарное состояние системоаналога позволяет из дерева кратчайших путей выделить путь наименьшей длины между начальной и конечной вершинами графа. С целью выделения из дерева кратчайших путей пути, соединяющего начальную и конечную вершины, в модель фрагмента графа вводят запоминающий элемент, который запоминает номер ветви по которой пришел сигнал наименьшего пути. Запоминающие элементы позволяют выделить из дерева всех кратчайших путей искомым кратчайший путь между начальной и конечной вершинами моделируемого графа.

Таким образом, после завершения процесса системоаналогового моделирования на системе фрагментов графа, моделирующих процесс передачи данных в компьютерной сети, определяется кратчайший маршрут между узлом-источником и узлом-приемником информации. В общем случае кратчайших маршрутов между узлом-источником и узлом-прием-

ником информации может быть несколько. Если количество кратчайших маршрутов достигает или превышает требуемое количество маршрутов, то задача многопутевой маршрутизации решена.

В случае, когда в результате первого цикла системоаналогового моделирования получено количество маршрутов меньше требуемого, в моделях фрагментов графа блокируются ветви, принадлежащие кратчайшим путям, и процесс системоаналогового моделирования повторяется на системе моделей фрагментов графа.

Если требуется решить задачу K – путевой маршрутизации, то максимальное количество циклов системоаналогового моделирования не превышает числа K .

Системоаналоговый метод многопутевой маршрутизации имеет такую же оценку временной сложности $O(N)$, где N – количество ветвей графа вдоль кратчайшего пути, как и метод временной аналогии, на основании которого строятся параллельные вычислительные структуры. Однако, сигнал, распространяющийся в системоаналоговой модели, использует для представления длины пути n – разрядный двоичный код. Даже в случае последовательного способа обработки информации в моделях ветвей фрагментов графа, время задержки в ветви графа не превышает n тактов. В случае временной аналогии обработка длины ветви, представленной n – разрядным двоичным кодом, требует $2^n \cdot n$ тактов. Следовательно, по сравнению с методом временной аналогии системоаналоговый метод обеспечивает повышение быстродействия решения задачи многопутевой маршрутизации в S раз, где

$$S=2^n.$$

Например, при $n=16$ разрядов эффект повышения быстродействия превышает величину $6 \cdot 10^4$.

Выводы

Рассмотренный системоаналоговый метод многопутевой маршрутизации на графах существенно сокращает время поиска маршрутов передачи данных в компьютерных сетях. По сравнению с алгоритмами решения задачи многопутевой маршрутизации на вычислительных машинах, имеющим полиномиальную оценку временной сложности $O(N^3)$ [1], системоаналоговый метод имеет линейную оценку временной сложности $O(N)$, где N – количество ветвей вдоль кратчайшего пути.

По сравнению с известными параллельными вычислительными структурами [9], основанными на методе временной аналогии, системоаналоговый метод обеспечивает повышение быстродействия решения задачи многопутевой маршрутизации в 2^n раз, где n – количество двоичных разрядов для представления веса ветви.

Перспективы дальнейших разработок связаны со схемотехническими способами реализации системоаналогового метода.

Список литературы

1. Вишневецкий В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
2. Таненбаум Э. Компьютерные сети. – С.Пб.: Питер, 2002. – 848 с.

3. Бройдо В. Л. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации. – С.Пб.: Питер, 2002. – 683 с.

4. Спортак М., Паллас Ф. Компьютерные сети и сетевые технологии. – М.: «Диа Софт», 2002. – 711 с.

5. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях. – М.: Мир, 1974. – 519 с.

6. А. с. 1837314 СССР, МКИ G 06 F 15/20. Устройство для решения задач на графах / А. Г. Додонов, В. П. Приймачук, А. В. Самков, В. А. Чадюк, А. М. Щетинин. – № 4844779/24; заявлено 27.06.90; опубл. 30.08.93. Бюл. № 32. – 10 с.

7. А. с. 1817102 СССР, МКИ G 06 F 15/20. Устройство для определения кратчайшего пути на графе / Д. О. Дробахин, Ю. Е. Кудрявцев, А. Г. Шевчик. – № 4787521/24; заявлено 30.01.90; опубл. 23.05.93. Бюл. № 19. – 6 с.

8. А. с. 1832310 СССР, МКИ G 06 F 15/419, 15/20. Устройство для решения задач на графах / С. В. Листровой, В. Я. Певнев, С. А. Ильин, М. Л. Дикий, Я. В. Боровик. – № 4786697/24; заявлено 30.01.90; опубл. 07.08.93. Бюл. № 29. – 8 с.

9. Васильев В. В., Баранов В. Л. Моделирование задач оптимизации и дифференциальных игр. – К.: Наукова думка, 1989. – 296 с.

10. Баранов В. Л., Баранов Г. Л. Системоаналоговое и квазианалоговое моделирование // Электронное моделирование. – 1994. – № 4. – С. 9 – 16.