

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС АНАЛИТИЧЕСКОГО И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ****Т. И. Алиев, Нгуен Дык Тай (Санкт-Петербург)**

Проектирование сети передачи данных (СПД), как и любой сложной системы, начинается с этапа системного проектирования и предполагает создание математической модели сети и исследование этой модели на компьютере. Одной из задач проектирования сети является определение пропускных способностей каналов связи на основе заданных структурно-функциональных и нагрузочных параметров, таких как внешние интенсивности поступления сообщений от пользователей в сеть, алгоритм маршрутизации, вариант размещения прикладных программ и наборов данных по узлам сети, способ взаимодействия пользователей сети и т. д. Задача оптимизации пропускных способностей каналов связи СПД решается с использованием в качестве моделей СПД сетей массового обслуживания (СеМО), в которых узлы, представляющие собой системы массового обслуживания (СМО), отображают задержки при передаче пакетов по каналам связи. При этом точные аналитические результаты могут быть получены в том случае, если СеМО является экспоненциальной, то есть узлы представляют собой СМО типа М/М/1 в символике Кендалла [1]. Задача оценки пропускных способностей каналов связи в СПД с использованием модели в виде разомкнутой экспоненциальной СеМО (РЭСеМО) с однородным потоком заявок решена аналитически на основе метода множителей Лагранжа в [1].

Ниже представлен программный комплекс аналитического и имитационного моделирования СПД с неоднородным потоком сообщений. Аналитическая модель СПД строится в виде РЭСеМО для любой топологии сети, задаваемой аналитически или графически. На основе аналитической модели решается задача определения пропускных способностей каналов связи в распределенных СПД при ограничениях на время доставки пакетов или на стоимость сети, с учетом таких особенностей СПД, как топология сети, алгоритм маршрутизации пакетов, вариант размещения прикладных программ и наборов данных по узлам сети, типы каналов связи, способ взаимодействия пользователей сети и т. д. Программа позволяет рассчитать характеристики СПД, такие, как пропускные способности каналов связи, время задержки пакетов при передаче по каждому каналу и в сети в целом, а также загрузку каждого канала. Кроме того, рассчитываются интенсивности потоков пакетов в каналах связи и вероятности передачи пакетов от пользователей в сеть, между каналами и из сети к пользователям. На основе рассчитанных вероятностей передачи пакетов и характеристик каналов программа генерирует соответствующую имитационную модель СПД на языке GPSS World [2]. Это позволяет исследовать влияние характера случайных процессов трафика в СПД и длительности передачи пакетов в каналах связи на характеристики функционирования спроектированной СПД путем варьирования законов распределения времени: передачи (длительностей обслуживания) пакетов в каждом из каналов связи и интервалов между поступающими в сеть пакетами.

**Постановка задачи**

Для описания исследуемой СПД используются:

- 1) структурные параметры, определяющие топологию СПД, количество узлов  $n$  и каналов связи  $m$  в СПД, тип каналов связи (дуплексный, полудуплексный), стоимостные коэффициенты каналов связи, длины каналов связи;

- 2) функциональные параметры, задающие способ взаимодействия пользователей сети и способ маршрутизации для каждого узла СПД в виде маршрутной таблицы, содержащей основной и альтернативный маршруты;
- 3) нагрузочные параметры:
  - а) интенсивности потоков сообщений разных типов от пользователей, подключенных к узлам СПД;
  - б) длины сообщений разных типов;
  - в) средняя длина одного пакета  $l_{\Pi}^1$  и длина обрамления  $l_o$ .

Эти параметры используются для решения задачи параметризации модели СПД, представляемой в виде РЭСемО, в результате которой задача оценки пропускных способностей каналов связи может быть сведена к задаче оптимизации РЭСемО методом неопределенных множителей Лагранжа.

### Аналитическое моделирование сети передачи данных

В [1] задача оптимизации пропускных способностей каналов связи решается на основе заданных интенсивностей сообщений (или пакетов) в каналах связи. В реальности известны только внешние интенсивности сообщений от узлов пользователей к узлам сети, что приводит к необходимости пересчета интенсивностей потоков пакетов в каналах связи. При этом расчет интенсивностей потоков пакетов в каналах связи реализуется программно на основе заданных внешних интенсивностей потоков сообщений, формируемых пользователями сети, известной топологии и маршрутизации, способов взаимодействия пользователей, а также нагрузочных параметров.

В качестве модели распределенной СПД будем использовать разомкнутую СемО, состоящую из  $m$  СМО, каждая из которых соответствует определенному каналу связи СПД. Принимается традиционное допущение, что поток пакетов, поступающих в каналы СПД, простейший, и время передачи пакетов в каждом из каналов, определяемое как отношение длины передаваемого пакета  $l_{\Pi}$  к пропускной способности канала  $C$ , распределено по экспоненциальному закону.

Метод расчета характеристик РЭСемО можно найти в [1]. При этом среднее время доставки пакетов в сети, состоящей из  $m$  каналов связи, определяется следующим образом:

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i l_{\Pi}}{C_i - \lambda_i l_{\Pi}},$$

где  $C_i$  – пропускная способность канала связи  $i$ ;  $\alpha_i$  – среднее число «обращений» к каналу связи  $i$  в процессе передачи пакетов;  $\lambda_i$  – интенсивность пакетов в канале связи  $i$ ;  $l_{\Pi} = l_{\Pi}^1 + l_o$  – длина пакета в целом (с учетом длины обрамления).

Стоимость  $S$  СПД определяется как:

$$S = \sum_{i=1}^m \beta_i C_i D_i,$$

где  $\beta_i$  – стоимостной коэффициент пропорциональности, отражающий стоимость единицы пропускной способности канала связи  $i$ ;  $D_i$  – длина канала связи  $i$ .

Задача оптимизации пропускных способностей каналов связи с использованием модели РЭСемО может решаться в одной из двух постановок.

1. Минимизировать среднее время задержки пакетов в сети  $T_{cp}$  при ограничении на стоимость сети  $S < S^*$ . В этом случае, с учетом введенных обозначений, пропускная способность канала связи  $i$  вычисляется следующим образом:

$$C_i = \frac{S^* - \sum_{i=1}^m \beta_i \lambda_i l_{\Pi} D_i}{\beta_i D_i} \frac{\sqrt{\beta_i \lambda_i l_{\Pi} D_i}}{\sum_{i=1}^m \sqrt{\beta_i \lambda_i l_{\Pi} D_i}} + \lambda_i l_{\Pi}.$$

2. Минимизировать стоимость СПД  $S$  при ограничении на среднее время задержки пакетов в сети  $T < T_{cp}^*$ . В этом случае пропускная способность канала связи  $i$  вычисляется по формуле:

$$C_i = \frac{1}{T_{cp}^*} \sum_{i=1}^m \sqrt{\beta_i \alpha_i l_{\Pi} D_i} \sqrt{\frac{\alpha_i l_{\Pi}}{\beta_i D_i}} + \lambda_i l_{\Pi}.$$

На основе полученных значений пропускных способностей каналов связи можно рассчитать время задержки пакетов в каналах, загрузки каналов и характеристики СПД в целом – минимальное время доставки пакетов (при ограничении на стоимость), либо минимальную стоимость сети (при ограничении на среднее время доставки пакетов).

### Имитационное моделирование сети передачи данных

Имитационная модель СПД на языке GPSS World генерируется автоматически на основе расчета характеристик аналитической модели в виде экспоненциальной РСМО. Полученные характеристики аналитической модели используются в качестве параметров имитационной модели СПД, представляющей собой РСМО, узлы которой соответствуют каналам связи, а заявки в модели соответствуют пакетам в СПД. Число источников заявок в имитационной модели соответствует числу узлов связи в СПД, при этом интенсивности заявок источников в модель определяются как внешние интенсивности пакетов от пользователей к узлам связи соответственно. Аналитическая модель, реализованная в программе, позволяет рассчитать следующие параметры для имитационной модели.

1. Вероятность передачи пакетов от пользователя  $j$  к каналу  $k$ :  $P_{(j,k)}^{\Pi} = \lambda_{(k,j)}^{\Pi} / \lambda_j^{\Pi}$ , где  $\lambda_{(k,j)}^{\Pi}$  – интенсивность пакетов, поступивших в канал  $k$  от пользователя  $j$ ;  $\lambda_j^{\Pi}$  – интенсивность пакетов от пользователя  $j$  в сети.

2. Вероятность передачи пакетов от канала  $k$  к каналу  $h$ :  $P_{(k,h)}^K = \lambda_{(k|h)}^K / \lambda_k^K$ , где  $\lambda_{(k|h)}^K$  – интенсивность пакетов в канале  $h$ , прошедших через канал  $k$ ;  $\lambda_k^K$  – полная интенсивность пакетов в канале  $k$ .

3. Вероятность передачи пакетов от канала  $k$  к пользователю  $j$ :  $P_{(k,j)}^O = 1 - \sum_{h \in N} P_{(k,h)}^K$ , где  $N$  – множество каналов связи, непосредственно связанных с каналом  $k$ .

4. Средний интервал времени между моментами поступления пакетов от пользователя  $j$  в СПД:  $\bar{\tau}_j = 1 / \lambda_j^{\Pi}$ .

5. Среднее время передачи пакетов в каналах связи  $k$ :  $\bar{b}_k = l_{\Pi} / C_k$ .

Кроме рассчитанных параметров для имитационной модели СПД дополнительно необходимо задать следующие параметры:

а) законы распределений интервалов между моментами поступления пакетов от пользователей в СПД;

б) законы распределений времени передачи пакетов в каналах связи.

В качестве законов распределений могут использоваться:

а) экспоненциальный;

б) детерминированный;

в) равномерный;

г) эрланговский разного порядка;

д) экспоненциальный с ненулевыми смещениями;

е) гиперэкспоненциальный.

Отметим, что имитационная модель СПД предназначена для детального анализа характеристик функционирования сети, спроектированной в процессе аналитического моделирования. При этом, в случае отличия реального характера процессов поступления пакетов в сеть или передачи пакетов по каналам связи от экспоненциального, в имитационной модели предусмотрена возможность варьирования законов распределений времени передачи пакетов в каждом из каналов связи и законов распределения интервалов времени между поступающими в сеть пакетами.

Оценка корректности имитационной модели проводится путем сравнения результатов имитационного моделирования с результатами аналитического моделирования, полученными на экспоненциальной сетевой модели, для которой разработаны точные аналитические методы расчета характеристик обслуживания заявок.

### Программный комплекс

Аналитический метод оценки пропускных способностей каналов связи СПД, использующий в качестве модели сети РЭСМО, и соответствующая имитационная модель на языке GPPS World реализованы в виде программного комплекса, написанного на языке Visual C++ с использованием библиотеки базовых классов MFC с архитектурой Doc/View для удобства разработки и реализации приложений под Windows. Программа работает под ОС Windows 2000/XP с требованием памяти не более 64 Мбайт. Программа имеет наглядный графический интерфейс, элементы которого показаны на рис. 1 и 2, позволяющий достаточно просто задавать структурно-функциональные и нагрузочные параметры исследуемой СПД.

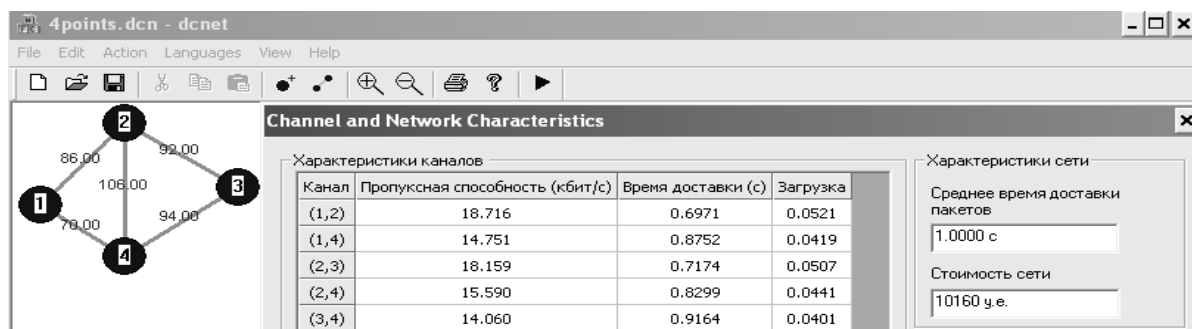


Рис. 1

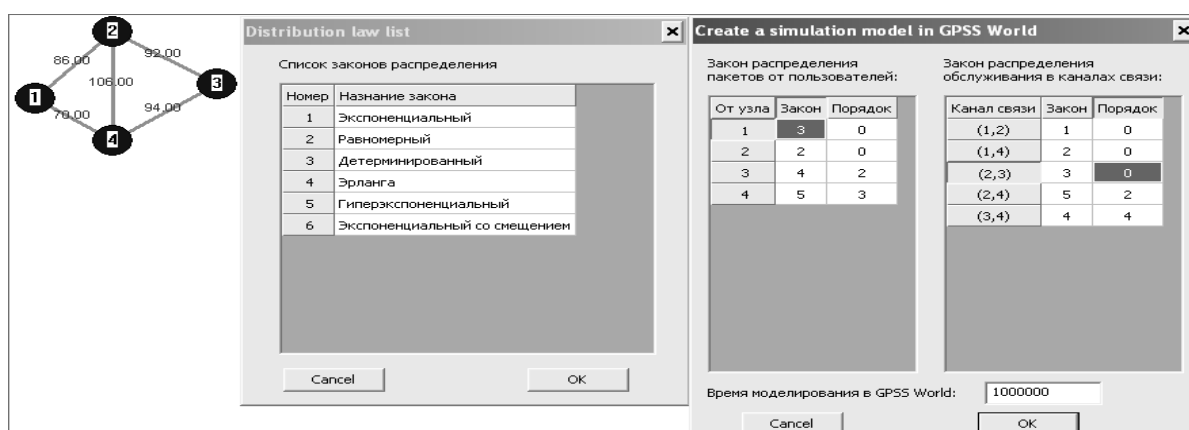


Рис. 2

Программа имеет следующие возможности:

- 1) задать топологию исследуемой СПД одним из способов:
  - графически путем указания мышкой на экране компьютера местоположения узлов и соответствующих каналов связи;
  - аналитически путем указания декартовых координат узлов СПД или расстояний между ними с возможностью автоматического построения топологии путем выбора из перечня типовых топологий («звезда», «кольцо», «дерево», «полносвязная») или построения произвольной топологии путем задания соответствующей матрицы связей;
- 2) добавлять или удалять узлы СПД и любое изменение топологии;
- 3) выбирать варианты распределения прикладных программ и наборов данных по узлам СПД;
- 4) автоматически создавать все таблицы маршрутизации в узлах по критерию «количество хостов» или «взвешенного графа» с возможностью изменения таблиц маршрутизации и вероятности передачи пакетов по основному пути;
- 5) рассчитывать потоки пакетов в каналах связи и параметризация модели СПД;
- 6) рассчитывать вероятности передачи пакетов от пользователей к каналам связи, между соседними каналами и от каналов к пользователям сети;
- 7) рассчитывать пропускные способности, времени передачи и загрузок каналов связи методом множителей Лагранжа с использованием модели РЭСемо (рис. 1);
- 8) исследовать характеристики СПД путем варьирования структурно-функциональных и нагрузочных параметров;
- 9) автоматически создавать имитационную модель СПД на языке GPSS World, соответствующую аналитической модели с возможностью варьирования законов распределения интервалов между моментами поступления в сеть пакетов и законов распределения времени передачи пакетов в каждом из каналов связи (рис. 2).

### Заключение

Разработанный программный комплекс предназначен для проектирования и исследования сетей передачи данных с любой топологией на основе совместного применения аналитического и имитационного моделирования в среде GPSS World. При этом предоставляется возможность решения задачи выбора топологии и распределения пропускных способностей каналов связи при различных алгоритмах маршрутизации и вариантах распределения прикладных программ и наборов данных по узлам сети, а также

способах взаимодействия пользователей сети с учетом ограничений на время доставки пакетов в сети или на ее стоимость. Имитационная модель генерируется автоматически в среде GPSS World и позволяет проводить детальное исследование характеристик функционирования спроектированной СПД при снятии предположений и допущений, использованных в аналитической модели для достижения конечного результата.

#### Литература

1. **Клейнрок Л.** Вычислительные системы с очередями. М.: Мир, 1979. 598 с.
2. **Боев В. Д.** Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World: Учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 368 с.