

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСШИРЕННОГО АППАРАТА СЕТЕЙ ПЕТРИ

При проектировании элементов современных систем связи часто возникает необходимость в оценке характеристик систем, однако особенности алгоритмов функционирования таких систем зачастую затрудняют аналитическую оценку. В этой ситуации целесообразно использовать имитационное моделирование, поскольку исследование путем натуральных экспериментов менее удобно и нередко весьма дорого. Для проведения имитационных экспериментов необходима система поддержки моделирования, т.е. система, позволяющая создать описание модели на некотором формальном языке, провести имитацию функционирования на этой модели, собрать и обработать статистические данные. К такой системе (и к поддерживаемому ею языку описания модели) может быть поставлен ряд требований: 1) гибкость, или возможность углубления описания объекта моделирования в модели; 2) приемлемое время проведения эксперимента, обеспечивающего приемлемую точность описания объекта; 3) способность к созданию и сохранению объединяемых модулей — часто используемых относительно самостоятельных частей моделей.

Основой для создания системы моделирования является язык формального описания модели. Такой язык должен быть достаточно простым, универсальным и наглядным; в то же время он должен описывать алгоритмы процессов, происходящих в системе, с требующейся точностью. Для языка моделирования телекоммуникационных систем, характеризующихся недетерминированным поведением и асинхронно взаимодействующими компонентами, не менее важна возможность имитации параллельных процессов, запускающихся в случайное время. Аппарат расширенных сетей Петри удовлетворяет перечисленным требованиям. Расширение понадобилось для привязки функционирования модели ко времени и введения случайных элементов.

Сети Петри изначально разрабатывались для изучения возможных последовательностей состояний модели в целях оптимизации, а также обнаружения и предотвращения неприемлемых состояний систем. Однако этот аппарат оказался очень удобным для проведения имитации.

Сеть Петри представляется четверкой [1; 2]

$$C = (P, T, I, O).$$

Здесь  $P$  — множество позиций;  $T$  — множество переходов;  $I, O$  — входная и выходная функции перехода. Последние определены следующим образом:

$$I: T \rightarrow P^\infty; \quad O: T \rightarrow P^\infty,$$

где  $P^\infty$  — множество комплектов позиций. Теоретико-графовым представлением сети Петри является двудольный ориентированный мультиграф. Для описания состояния сети вводится функция маркировки, или разметки,  $\mu$ , отображающая множество позиций  $P$  во множество неотрицательных целых чисел:

$$\mu: P \rightarrow N.$$

В маркированной сети Петри переход  $t_k$  считается разрешенным при выполнении условия

$$\bigwedge_{i=1}^{|P|} \mu(p_i) \geq \#(p_i, I(t_k)),$$

а в результате срабатывания перехода образуется новая разметка  $\mu'$ , определяемая соотношением

$$\mu'(p_i) = \mu(p_i) - \#(p_i, I(t_k)) + \#(p_i, O(t_k)).$$

При создании модели [1] в исследуемой системе выделяются элементарные условия, в сумме определяющие состояние модели, и элементарные события, происходящие в зависимости от условий и изменяющие их. Так как при изучении систем связи часто приходится находить характеристики, связанные со временем, то в аппарат сети Петри введено расширение, позволяющее привязать функционирование модели к шкале времени. Для этого вводится функция задержки  $\tau$ , отображающая множество переходов  $T$  во множество неотрицательных чисел  $R_+$ :

$$\tau: T \rightarrow R_+.$$

Данная функция определяет длительность процесса, имитируемого срабатыванием данного перехода. В общем случае эта функция может быть и случайной, с распределением вероятностей, установленным при создании модели. При использовании задержки правила срабатывания переходов остаются прежними — с тем отличием, что фишки передаются в выходные позиции перехода  $t_k$  по истечении  $\tau(t_k)$  единиц модельного времени с момента его запуска, т. е. изъятия фишек из входных позиций. Для примера рассмотрим модель абонента, у которого через случайные промежутки времени появляются запросы

на передачу пакета фиксированной длины по общему каналу. Граф сети Петри этой модели представлен на рис. 1.

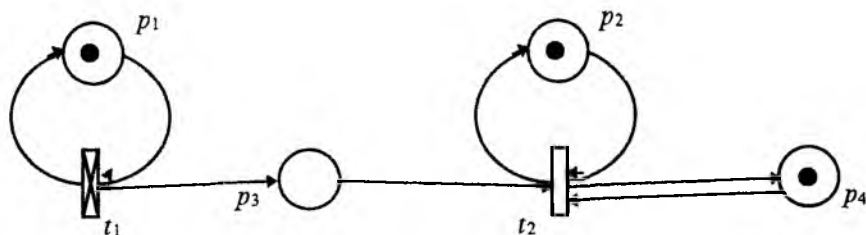


Рис. 1

Здесь переход  $t_1$  имитирует случайные промежутки времени между появлениями запросов,  $t_2$  — постоянное время передачи пакета, позиция  $p_3$  соответствует внутреннему буферу абонента, а  $p_4$  — разделяемому каналу, свободному состоянию которого соответствует наличие фишки. Позиции  $p_1$  и  $p_2$  присутствуют для сдерживания многократного запуска переходов  $t_1$  и  $t_2$ .

Еще одним расширением, позволяющим упростить модель и, значит, повысить скорость имитации, является сдерживающие, или ингибиторные, дуги [1]. Такая дуга по отношению к переходу может быть только входной и допускает срабатывание перехода лишь при отсутствии фишек в соответствующей позиции. Формально данное расширение можно описать переопределением входной функции перехода:

$$I: T \rightarrow P^\infty \times P^\infty.$$

Результат  $I(t_k)$  — пара  $(S, U)$ , где  $S$  — подмножество множества позиций, обозначающее позиции, которые связаны с данным переходом сдерживающей дугой;  $U$  — комплект множества позиций, описывающий обычные входные дуги. Такое определение является верным, но избыточным в том смысле, что наличие  $p_i$  одновременно в  $S$  и в  $U$  равноценно отсутствию данного перехода, поскольку он никогда не сможет сработать. Более узким можно считать определение входной функции как отображения множества пар позиций и переходов во множество, являющееся объединением множества неотрицательных целых чисел и элемента  $\text{ing}$ , означающего одну ингибиторную дугу:

$$I: (P \times T) \rightarrow \{N \cup \text{ing}\}.$$

Условие срабатывания перехода  $t_k$  в этом случае принимает вид

$$\bigwedge_{i=1}^{|P|} \begin{cases} \mu(p_i) \geq I(p_i, t_k) & \text{для } I(p_i, t_k) \in N; \\ \mu(p_i) = 0 & \text{для } I(p_i, t_k) = \text{ing}. \end{cases}$$

Еще одним вопросом, подлежащим рассмотрению при создании системы моделирования на базе языка сетей Петри, является разрешение конфликтов. Аппарат сетей Петри позволяет имитировать параллельные процессы, и, естественно, в такой модели могут возникать конфликты, т. е. ситуации, в которых возможно несколько взаимоисключающих процессов. Решение о том, какой переход будет запущен в первую очередь, может быть принято несколькими способами. Ими являются: непосредственное обращение к исследователю в ходе имитационного эксперимента; случайное разрешение конфликтов; введение приоритета как функции, отображающей множество переходов во множество возможных значений приоритета (обычно ограниченное подмножество целых чисел):

$$\psi : T \rightarrow \Psi \quad (\Psi \subset Z).$$

Следует отметить, что в технических системах случайности чаще всего имеют место на границе с внешней средой, а поведение внутренних элементов отличается детерминированностью. Поэтому наиболее приемлемым путем разрешения конфликтов представляется использование приоритетов. При этом все возможные конфликты разрешаются еще на этапе разработки модели, в то же время давая в руки исследователя еще один описательный инструмент, позволяющий уменьшить громоздкость модели. А в случае необходимости введения случайного поведения можно воспользоваться переходами со случайной задержкой.

Современные технические системы характеризуются усложнением информационных связей между своими элементами, что выражается через возрастание объема передаваемой внутрисистемной информации [3; 4]. Это связано с тем, что функции каждого уровня в многоуровневых системах, являющихся объектом исследования, становятся все сложнее. Задача обычно состоит в оценке характеристик некоторых функций определенного уровня при заданных характеристиках более низких уровней. В этом случае задача моделирования значительно усложняется. Можно выделить три основных подхода к ее решению.

1. Составление модели не только для изучаемого, но и для всех вышних уровней. Такая модель является избыточной в том смысле, что моделируются уровни, характеристики которых уже известны. Например, если речь идет о телекоммуникационной системе, то для моделирования некоторого протокола сетевого уровня исследователь вы-

нужден использовать модели канального и физического уровней, а также параметры среды распространения сигналов вместо характеристик канального уровня. Такая модель очень громоздка и требует значительных вычислительных ресурсов.

2. Создание модели на одном уровне со структурным отображением многообразия информационных связей. В системах связи это приводит к замене блока модели "абонент" на набор блоков "абонент-для-абонента". Такая модель избыточна в том смысле, что вместо одного блока появляется несколько однотипных элементов, соответствующих разным значениям информационной связи. Данный подход также значительно повышает сложность модели и требования к вычислительной системе, на которой проводятся имитационные эксперименты.

3. Введение еще одного расширения аппарата сетей Петри — так называемых раскрашенных сетей [2]. Далее рассмотрен именно этот подход.

Фишки приобретают свойство цвета: множество фишек, существующих в сети в каждый момент времени, отображается во множество возможных значений цвета. В общем случае цвет может быть структурой произвольного типа. Но введение этого расширения заставляет переопределить алгоритм срабатывания перехода, где и обуславливается ветвление в зависимости от информационного содержания фишки. Поэтому удобно использовать в качестве множества возможных значений некоторое ограниченное подмножество целых чисел  $\Omega$ . Тогда маркировка сети переопределится следующим образом:

$$\mu : P \rightarrow V,$$

где  $V$  — множество векторов размерности  $|\Omega|$ . Каждый элемент такого вектора  $v_{ik} \in N$  и указывает количество фишек  $k$ -го цвета в  $i$ -й позиции. Для каждого перехода  $t_j$  надо определить входной вектор  $w_j$  размерностью  $|I(t_j).U|$ , в котором каждый элемент соответствует обычной (не ингибиторной) входной дуге и содержит цвет входной фишки, и выходной вектор  $z_j$  размерностью  $|O(t_j)|$ , каждый элемент которого соответствует выходной дуге и содержит цвет фишки, помещаемой в выходную позицию. Тогда срабатывание перехода  $t_j$  можно определить как функцию  $q_j$ , отображающую множество входных векторов во множество выходных векторов для данного перехода:

$$q_j : W_j \rightarrow Z_j$$

т. е. цвет фишек, возвращаемых в выходные позиции перехода после его срабатывания, будет зависеть от цветов фишек во входных позициях. Условие разрешения перехода  $t_j$  приводится к виду

$$\|P\| \stackrel{\wedge}{=} \begin{cases} \sum_{k=1}^{|\Omega|} \mu(p_i)_k \geq I(p_i, t_j) \text{ для } I(p_i, t_j) \in N; \\ \sum_{k=1}^{|\Omega|} \mu(p_i)_k = 0 \text{ для } I(p_i, t_j) = \text{ing}, \end{cases}$$

а новая маркировка, образовавшаяся в результате его запуска, определится из соотношения

$$\mu'(p_i) = \mu(p_i) - w_j \times X_{ij} + q_j(w_j) \times Y_{ji}.$$

Здесь  $X_{ij}$  — матрица размера  $|I(t_j), U| \times |\Omega|$ , в которой все элементы равны нулю, кроме  $x_{mn} = 1$ , причем  $m$  принимает значения, равные номерам элементов вектора  $w_j$ , а  $n$  — значения этих элементов, т.е. число единиц в матрице равно  $\#(p_i, I(t_j), U)$ , а  $Y_{ji}$  имеет размер  $|O(t_j)| \times |\Omega|$  и формируется аналогично матрице  $X_{ij}$ , но для вектора  $z_j$ .

Ветвление в зависимости от цвета можно организовать следующими двумя способами. Во-первых, введением мнимых фишек, которые передаются в позиции в результате срабатывания перехода, но не сохраняются. Это равноценно существованию выходных позиций, в которые ничего не передается. В таком случае ветвление будет иметь вид, показанный на рис. 2, а. Во-вторых, определением функции срабатывания перехода не для всех возможных значений входного вектора и объявлением тем самым подмножеств цветов фишек, которыми может быть открыт переход. Последний вариант показан на рис. 2, б.

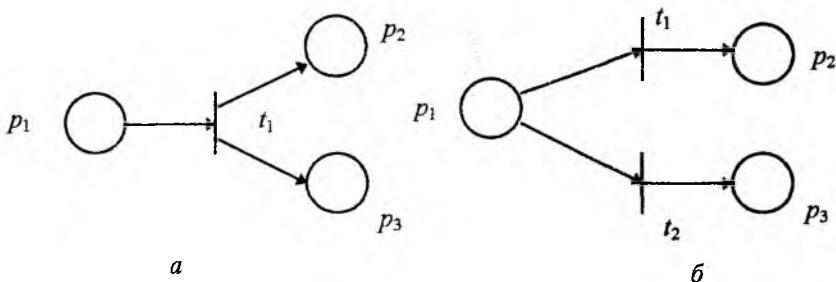


Рис. 2

При использовании описанного расширения вместо перечисленных ранее подходов можно значительно уменьшить сложность модели за счет усложнения алгоритма моделирования. Данный подход представляется более удобным для моделирования сложных многоуровневых систем ввиду значительного упрощения модели и повышения ее

наглядности, а также уменьшения объема вычислений при имитации. Однако использование цветных фишек взамен обычных значительно замедляет процесс имитации, поэтому не следует использовать алгоритм данного расширения для проведения экспериментов на моделях, составленных на языке обычных сетей Петри.

**Список литературы:** 1. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 264 с. 2. Котов В.Е. Сети Петри. М.: Наука, 1984. 158 с. 3. Шварц М. Сети связи: протоколы, моделирование, анализ: В 2 ч.: Пер. с англ. М.: Наука, 1992. Ч. 1. 335 с.; Ч. 2. 272 с. 4. Протоколы информационно-вычислительных сетей: Справ. / Под ред. И.А. Мизина, А.П. Кулешова. М.: Радио и связь, 1990. 502 с.

*Харьковский государственный технический  
университет радиозлектроники*

*Поступила в редколлегию 23.02.98*