

УДК 004:3:004.7

Анализ функциональных и нефункциональных признаков телекоммуникационной системы

К.В. Новиковский✉

Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Россия

В данной статье рассмотрено применение теории дискретных автоматов в телекоммуникационных системах. Смоделирован конечный автомат для функциональных и нефункциональных признаков телекоммуникационной системы. Проведён анализ смоделированного автомата с использованием таких инструментов, как теория графов, теория множеств, теория чисел и логика предикатов. Приведены примеры применения теории автоматов в телекоммуникационных системах.

Ключевые слова: конечный автомат, телекоммуникационная система, теория графов, теория множеств, теория чисел, логика предикатов.

Analysis of functional and non-functional attributes of a telecommunication system

K.V. Novikovskiy✉

Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russia

This article discusses the application of the theory of discrete automata in telecommunication systems. A finite state machine is modeled for functional and non-functional attributes of a telecommunication system. The analysis of the simulated automaton using tools such as graph theory, set theory, number theory and predicate logic is carried out. Examples of the application of automata theory in telecommunication systems are given.

Keywords: finite state machine, telecommunication system, graph theory, set theory, number theory, predicate logic.

Введение

Телекоммуникационные системы являются важной частью современного цифрового общества. Функционирование этих систем позволяет пользователям обмениваться информацией без географических ограничений. Для них предусмотрены определенные функциональные и нефункциональные признаки.

В данной статье под функциональным признаком разбирается маршрутизация, а под нефункциональным признаком – производительность.

Целью является анализ функциональных и нефункциональных признаков системы.

Важность анализа данных признаков заключается в том, что они обеспечивают бесперебойную работу телекоммуникационной системы. Также следует отметить, что правильно настроенная маршрутизация и высокие показатели производительности являются ключевыми факторами на рынке телекоммуникаций.

Для решения задачи анализа элементов телекоммуникационной системы воспользуемся дискретной математикой, а именно теорией дискретных автоматов. Выбор этого инструмента для анализа функционального признака обоснован тем, что в процессе маршрутизации производится передача пакетов между узлами сети, а каждый

переход можно считать дискретным процессом, который возможно смоделировать с помощью классического автомата [1]. Также стоит отметить, что маршрутизация по своей природе является детерминированным процессом, что позволяет сделать вывод о том, что для каждого входного сигнала предусмотрен только один выход [2, 3]. Данное утверждение верно и для состояния маршрутизатора, для которого существует лишь один переход в новое состояние. Для анализа нефункционального признака выбор данного инструмента можно обосновать тем, что появляется возможность классифицировать производительность как дискретное событие.

Для проведения анализа целесообразно использовать следующие инструменты дискретной математики: для функционального признака – применение теории графов и чисел, для нефункционального – логика предикатов и теория множеств.

Анализ функционального признака телекоммуникационной системы

Смоделируем ситуацию, при которой происходит установка соединения между двумя роутерами, которую можно наглядно представить в качестве конечного автомата. В этом контексте важно обратить внимание на входные и выходные параметры, которые поступают на данный конечный автомат.

Входными сигналами в рассматриваемой системе являются события, происходящие в процессе установления соединения. Эти события автоматически идентифицируются и приводят к изменению состояния автомата. К основным входным сигналам конечного автомата можно отнести пакеты: SYN (запрос на установление соединения), SYN-ACK (подтверждение установки соединения), FIN (запрос на разрыв соединения) и DATA (передаваемые данные) [4]. В свою очередь, выходными сигналами автомата считаются действия, выполняемые в ответ на входящие сигналы. Среди них также выделяются пакеты SYN, SYN-ACK, FIN и DATA.

Далее воспользуемся теорией графов и представим, что состояние автомата – это вершина графа, и такими состояниями являются: CLOSED, LISTEN, SYN_SENT и ESTABLISHED. Ребра графа показывают переходы автомата между различными состояниями, а приписка на ребре указывает входной сигнал, который инициирует переход в новое состояние.

Теперь, чтобы лучше понять, как функционирует этот автомат, рассмотрим ключевые переходы. Переход из исходного состояния CLOSED в состояние SYN_SENT происходит, когда на вход подаётся пакет SYN. Далее, переход из SYN_SENT в ESTABLISHED осуществляется при получении пакета SYN-ACK. Необходимо также обратить внимание, что переход из состояния ESTABLISHED в FIN_WAIT_1 происходит при отправке пакета FIN, который является выходным сигналом автомата. Важно также упомянуть ситуацию, когда возникает таймаут, обозначаемый как TIMEOUT. В данном случае TIMEOUT подразумевает, что время, отведённое для ответа, истекло, и автомат возвращается в исходное состояние CLOSED.

Кроме того, состояние TIME_WAIT используется для предотвращения дублирования пакетов данных после завершения соединения, тем самым обеспечивая корректное завершение обмена. Переход между состояниями CLOSE_WAIT и LAST_ACK осуществляется при отправке выходного сигнала FIN, а переход из состояния LAST_ACK в CLOSED происходит при получении пакета ACK. Подводя итог, можно утверждать, что данная модель наглядно иллюстрирует процесс установки и завершения соединения между роутерами, включая ключевые состояния, переходы и механизмы управления временными параметрами. Вид автомата с точки зрения теории графов представлен на рисунке 1.

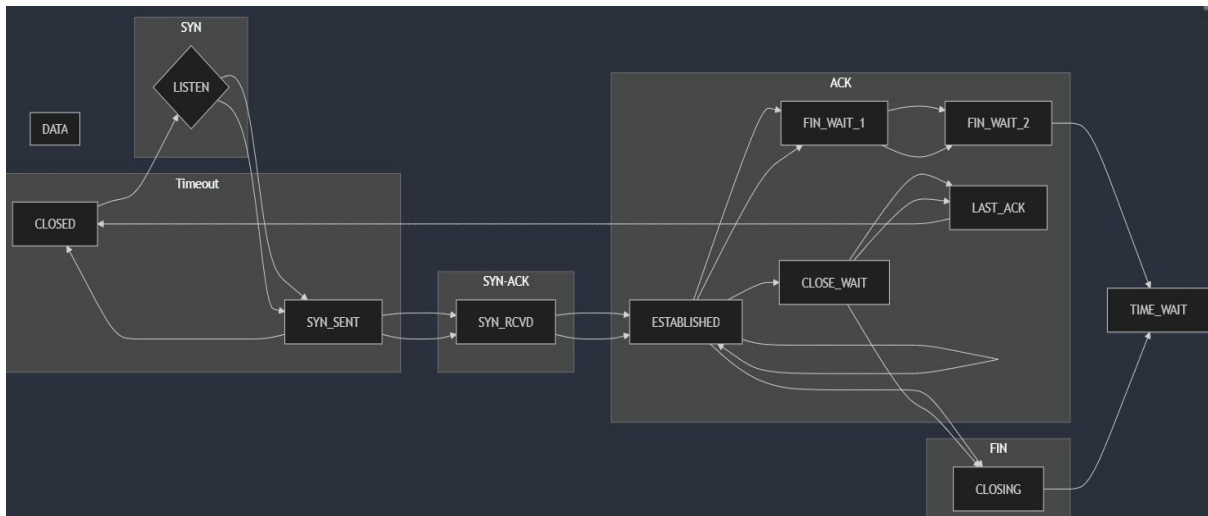


Рисунок 1. Конечный автомат в виде графа

Используем теорию чисел. Рассмотрим переходы и допустим, что каждый переход возможно описать числом, которое характеризует количество переходов или время, которое было затрачено на этот переход. Запишем примеры переходов $S_0 \rightarrow S_1$ (1) – происходит отправка SYN пакета, $S_1 \rightarrow S_2$ (1) – получен пакет SYN-ACK и $S_2 \rightarrow S_3$ (1) – соединение разорвано или завершено. Все эти переходы можно описать как последовательность состояний $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3$. Используем эту последовательность для анализа вероятностей.

Допустим, что вероятность установки успешного соединения составляет 70%, соответственно возможно смоделировать несколько попыток установки соединения, запишем их в виде 0 и 1 где 0 это неудачная попытка, а 1 – успешное соединение. Например, [0, 1, 0, 1, 1] в представленном примере означает, что первый и третий переход неудачные, а второй и четвёртый – успешные. Чтобы оценить время установки соединения при наличии повторных попыток можно записать функцию времени для n -количества попыток учитывая, что каждая попытка требует времени t :

$$T(n) = t_1 + t_2 + \dots + t_n. \quad (1)$$

Данная формула также может использоваться не только для оценки времени установки соединения, но и для определения самого эффективного маршрута, а такие параметры как задержки, недоступные узлы и время повторных попыток создают более полное представление о состоянии сети.

Практическое применение данного анализа используется в процессе разработки и оптимизации протокола TCP, где используются конечные автоматы для определения состояния соединений, что позволяет модернизировать алгоритмы установления и завершения соединения, тем самым уменьшив время задержки при передаче данных.

Анализ нефункционального признака телекоммуникационной системы

Проанализируем с помощью теории автоматов нефункциональные признаки.

Анализ конечного автомата с точки зрения теории множеств позволяет рассмотреть состояние переходов. А использование формального моделирования состояний автомата позволит охарактеризовать время задержки и время отклика при обработке запроса, а также проанализировать пропускную способность [5].

Для примера используем автомат, который отображает процесс функционирования веб сервера.

Представим состояние автомата «сервера» как множество. Множеством «S» обозначим Idle, Low, Medium, High. Название данных множеств обозначает загруженность веб сервера от состояния бездействия «Idle» до состояния высокой нагрузки «High». В данном автомате входами «I» будут являться Request и Timeout. Вход Request показывает процесс получения сервером запроса HTTP, который направляет клиент, и в процессе обработки сервер может перейти в новое состояние, а вход Timeout отображает ситуации, когда предельное время ожидания ответа истекло и сервер не смог обработать запрос, происходит событие таймаута, которое позволяет серверу вернуться в своё исходное состояние. Выходами в рассматриваемом автомате будут Response и Error. Выходу Response соответствует оплавка HTTP ответа на запрос пользователя и также данный выход показывает, что запрос успешно обработан и автомат перешёл в новое состояние, а выход Error показывает, что запрос не обработан из-за того, что сервер перегружен или находится в неисправном состоянии.

Переходная функция (δ) показывает зависимость исходного состоянии от входящего сигнала и как состояние может измениться. На примере веб сервера она позволяет определить, как изменяться состояние веб-сервер при обработке запросов.

Примеры переходной функции: $\delta(\text{Idle}, \text{Request}) = \text{Low}$ и $\delta(\text{High}, \text{Timeout}) = \text{Idle}$.

В данном примере исходное состояние автомата «Idle» – «сервер находится в состоянии бездействия», но поступает запрос HTTP «Request», соответственно сервер переходит в новое состояние, которое соответствует низкой нагрузке «Low». В следующем примере автомат находится в высокой нагрузке «High», но так он находится в состоянии высокой нагрузки, когда получает входной сигнал, то время запроса истекло «Timeout» и тогда, соответственно, он перейдёт в новое состояние, а именно в состояние бездействия «Idle».

Выходная функция показывает какой сигнал поступит на выход автомата и его зависимость от текущего состояния автомата и входного сигнала. Например $\lambda(\text{Low}, \text{Request}) = \text{выход Response} = \lambda(\text{Medium})$; $\lambda(\text{High}, \text{Request}) = \text{Error}$.

Исходное состояние «Low» подаётся входной сигнал «Request» автомат успешно обработал запрос и образуется выход «Response» а состояние автомата изменится на новое, а именно на $\lambda \text{ Medium}$. Исходное состояние «High» поступает сигнал «Request» но состояние автомата остаётся High и соответственно образуется выход «Error». Множество переходов показано на рисунке 2.

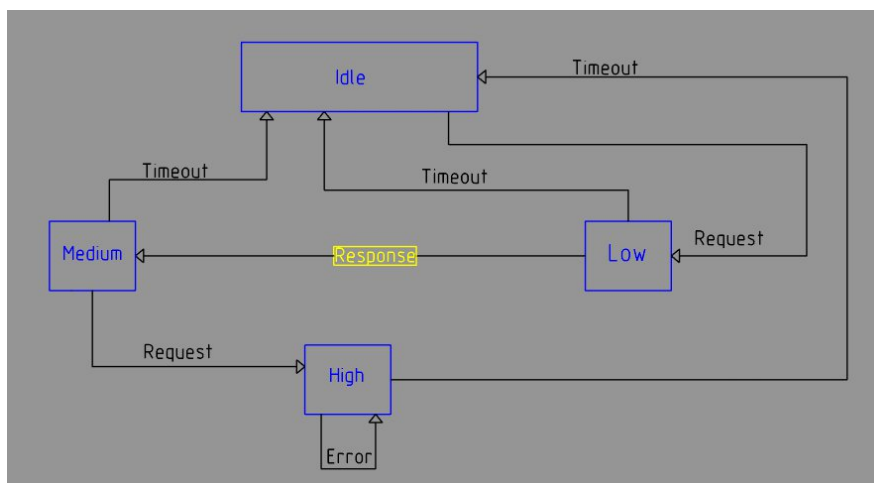


Рисунок 2. Множество переходов

Рассмотрим автомат с точки зрения логики предикатов. Предикат в данном анализе будет использоваться, как и в предыдущем методе для формального описания алгоритма работы веб-сервера что позволит рассмотреть в каком состоянии находится система и как она взаимодействует с входными и выходными сигналами.

Запишем предикаты для автомата:

– State описывает, в каком состоянии (S) находится система, соответственно это состояние от «Idle» до «High»;

– Input показывает, что на систему подали входной сигнал (I), в данном случае это сигналы Request и Timeout;

– Next_state описывает переход системы из состояния (S) в следующее (Sⁱ). Переход в другое состояние является реакцией автомата на входной сигнал (I). Данный предикат важен тем, что подтверждает динамическое поведение системы;

– Output показывает что когда на автомат подаётся входной сигнал (I), реакцией автомата является не только переход в новое состояние (Sⁱ), но и выходной сигнал (O).

Запишем переходную функцию для данного автомата forall S, I, Sⁱ (state(S) \land input(I) \rightarrow next_state(S, I, Sⁱ)). Данную функцию возможно охарактеризовать тем, что когда система находится в своём исходном состоянии (S) и на вход поступает входной сигнал (I), то предусмотрен переход в новое состояние (Sⁱ), а детерминированность перехода заключается в том, что будет только одно новое состояние (Sⁱ). Рассмотрим выходную функцию forall S, I, O, (state(S) \land input(I) \rightarrow output(S, I, O)). Описание функции заключается в том, что при нахождении автомата в состоянии (S) и поступления входного сигнала (I) на выходе будет сигнал (O).

Рассмотрим пример ограничений $\neg(\text{state}(\text{High}) \wedge \text{input}(\text{Request}) \rightarrow \text{output}(\text{High}, \text{Request}, \text{Response}))$. Суть данного выражения заключается в том, что когда автомат находится в состоянии High и на вход поступает входной сигнал Request, то образуется выход Error и так как сервер находится в высокой нагрузке и из этого можно сделать вывод что будет ошибка «503 Service Unavailable».

Заключение

Эффективное использование теории графов, теории множеств, логики предикатов и теории чисел позволяет сформировать мощный методологический инструментарий для многогранного анализа конечных автоматов в телекоммуникационных системах. Применение графов способствует визуализации и структурированию данных, а теория множеств обеспечивает формализацию концептуальных категорий. Логика предикатов предоставляет возможности для точного описания условий, а теория чисел позволяет произвести количественный анализ, необходимый для глубокого понимания системных свойств автоматов в телекоммуникационной системе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гилл А. Введение в теорию конечных автоматов / А. Гилл. – Москва: Наука, 1966. – 272 с.
2. The Unknown Component Problem: Theory and Applications / T. Villa, N. Yevtushenko, R.K. Brayton [et al.]. – New York: Springer, 2012. – 312 p.
3. Твардовский А.С. О возможностях автоматного описания параллельной композиции временных автоматов / А.С. Твардовский, А.В. Лапутенко // Труды Института системного программирования РАН. – 2018. – Т. 30, № 1. – С. 25–40.

4. Твардовский А.С. Синтез установочных последовательностей для автоматов с временными ограничениями / А.С. Твардовский, Н.В. Евтушенко // Моделирование и анализ информационных систем. – 2020. – Т. 27, № 4. – С. 376–395.

5. Kushik N. Preset and Adaptive Homing Experiments for Nondeterministic Finite State Machines / N. Kushik, K. El-Fakih, N. Yevtushenko // Implementation and Application of Automata: 16th International Conference, CIAA 2011, Blois, France, July 13–16, 2011, Revised Selected Papers. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. – P. 215–224.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Новиковский Константин Викторович, студент, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Россия.

e-mail: kostya0361@yandex.ru