

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В СИСТЕМАХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

В.М. Гостев (Казань)

Стремительный рост абонентского трафика в сотовых сетях мобильной связи, непрерывное изменение его характера и структуры требуют значительного увеличения производительности этих сетей [1]. Важной особенностью текущего этапа развития сетевых технологий является активное внедрение сетей, создаваемых на основе стандарта пятого поколения мобильной связи (5G).

Ключевым показателем эффективности сети мобильной связи, о котором обычно заявляют в первую очередь, является скорость передачи данных. Однако это не единственная характеристика. В условиях бурного развития Интернета вещей и, как следствие, увеличения количества подключаемых устройств, а также постоянно возрастающего объема передаваемого трафика, были определены следующие основные требования к сетям 5G [2]:

- пропускная способность сети свыше 1 Гбит/с;
- поддержка одновременного подключения до 100 млн. устройств на 1 кв.км.;
- задержка передачи данных не более 1 мс;
- распределение между услугами необходимого частотного ресурса;
- улучшение радиопокрытия по сравнению с предыдущими поколениями сотовых сетей мобильной связи;
- улучшение спектральной эффективности по сравнению с предыдущими поколениями сотовых сетей мобильной связи.

Одной из основных проблем, возникающих при проектировании и создании сетей 5G, является проблема обеспечения эффективности функционирования опорной сети.

Опорная сеть 5G (ядро, Core Network, 5GC) должна стать основой для работы множества новых бизнес-приложений и при этом обеспечивать предоставление уже имеющихся в мобильных сетях услуг, таких как, например, мобильный Интернет. Помимо этого, ядро сети пятого поколения должно поддерживать совместную работу множества технологий доступа и передачу входящего и исходящего трафика, генерируемого массой устройств различных типов [3]. Это означает, что при проектировании опорной сети необходимо учесть совместное использование ресурсов различными приложениями и предусмотреть различия в потребностях различных отраслей. Гибкой должна быть не только опорная сеть, но и вся система связи в целом.

Как подчеркивается в [3], ядро сети пятого поколения должно иметь модульную высокоэластичную архитектуру и поддерживать виртуализацию сетевых функций NFV, принципы и протоколы программно-конфигурируемых сетей SDN, технологии динамической оркестрации сетевых ресурсов, а также поддерживать взаимодействие со всеми возможными типами доступа: LTE, Wi-Fi и другими. Гибкость сети обеспечивается посредством «расслоения» (слайсинга) сети (Network Slicing), разбивающего одну физическую сеть на несколько слоев, каждый из которых имеет собственные настройки, адаптированные под определенную услугу. Виртуализация сетевых ресурсов как основа Network Slicing полностью изменит подход к проектированию и развертыванию сетей мобильной связи. Группировка сетевых ресурсов претерпит значительные изменения, перейдя от вертикальной модели к размещению в разных слоях сети, в непосредственной близости к месторасположению абонентов. Этот подход обеспечит возможность реализации нескольких слоев сети с определенными требованиями к следующим сетевым параметрам [4]:

– функциональность: безопасность, мобильность, управление правилами обслуживания и тарификации;

– производительность: ширина полосы пропускания, сетевые задержки, степень доступности и надежности;

– специфика абонентов: приоритетные или корпоративные абоненты, абоненты профессиональной мобильной радиосвязи.

Сегментирование реализовано за счет применения технологий NFV и SDN. С целью обеспечения эффективной работы определенного набора услуг конкретный отдельный сегмент сети должен быть привязан к различным элементам инфраструктуры, в том числе VPN, облачным сервисам и технологиям доступа, а также к ресурсам опорной сети (ядра).

Сетевое сегментирование уменьшает бизнес-риски, связанные с запуском новых услуг, поскольку проблемы в одном сегменте не оказывают влияния на предоставление услуг, за которые отвечает другой сегмент [5].

Возможность разделения функций уровня управления и уровня данных абонента играет одну из ключевых ролей в архитектуре опорной сети (ядра) пятого поколения. Это разделение позволяет размещать ресурсы уровней управления и данных абонента на разных сегментах (слайсах) сети и, как следствие, масштабировать ресурсы уровней управления и данных абонента независимо друг от друга.

Таким образом, проектирование ядра сети пятого поколения является сложной многокритериальной проблемой, для которой характерны комплексный характер, противоречивость и плохая формализуемость совокупности требований, при решении которой необходимо учитывать большое количество взаимоувязанных факторов.

Для решения такой проблемы необходимы методы и средства проектирования, которые позволяли бы проводить оптимизацию проекта при учете (максимально возможном в реальных ситуациях) всех важнейших критериев оценки качества проектируемой сети, всех основных особенностей современных компьютерных сетей и требований, предъявляемых к ним (в том числе – многочисленных плохо формализуемых требований), которые давали бы возможность учитывать и использовать все особенности и условия реализации конкретного проекта. Все это неизбежно приводит к необходимости использования в процессе выработки проектных решений человеко-машинных технологий оптимизации проектирования.

Для реализации соответствующих технологий на основе концепции систем поддержки выработки решений разработана архитектура системы оптимизации проектирования (СОПР) 5GC.

СОПР 5GC является естественным развитием ранее разработанной и созданной СОПР СПД, обеспечивающей всестороннюю интеллектуальную поддержку человека-проектировщика в процессе проектирования базовых коммуникационных подсетей (сетей передачи данных) территориальных компьютерных сетей [6].

В рамках разработки и создания СОПР 5GC определены структура и состав математического и программного обеспечения СОПР, включающие методы решения задач анализа и оптимизации проектирования ядра мобильной сети 5GC (5 Core).

Система позволяет решать задачи структурно-топологического и параметрического проектирования 5GC, проводить расчеты и оценки параметров проектируемых сетей на основе использования их моделей, сравнение различных проектных решений и оценку их эффективности, оптимизацию проектных решений по критериям стоимости, надежности, производительности и величин временных задержек. Система обеспечивает проведение многоэтапного человеко-машинного проектирования с возможностью повторного выполнения отдельных этапов и задач с

целью корректировки, уточнения и оптимизации ранее принятых проектных решений, а также реализацию различных по степени сложности методов проектирования.

Применение аналитических моделей позволяет относительно быстро сформировать полный вариант проекта 5GC с использованием алгоритмов оптимизации различного уровня сложности. Однако скорость работы этих алгоритмов достигается, как правило, за счет ряда упрощающих предположений. В частности, предполагаются непрерывное распределение длин передаваемых сообщений (и, следовательно, непрерывное распределение времени обработки сообщений в узлах коммутации и каналах передачи данных), независимость длин сообщений, абсолютная надежность элементов 5GC, независимость задержек пакетов во всех транзитных элементах маршрута [7]. Эти предположения снижают точность характеристик проекта. Оценить, находится ли эта точность в допустимых пределах, очертить границы области применения аналитических моделей, ввиду отсутствия действующей сети можно лишь с помощью имитационного моделирования [8, 9].

Использование имитационных моделей требует существенно больших затрат времени для получения результатов, однако позволяет отказаться от упрощений и получить более точные оценки характеристик 5GC по сравнению с аналитическими моделями. Поэтому для обоснования и верификации разрабатываемых аналитических моделей элементов 5GC, а также для оценки эффективности проектов 5GC, разрабатываемых на основе аналитических моделей, в состав СОПР включена дополнительная функциональная подсистема – подсистема оценки качества и эффективности функционирования (ОКЭФ) 5GC.

Подсистема ОКЭФ позволяет оценить временные характеристики проектируемых 5GC (в частности, средние и максимальные задержки пакетов), выявить «узкие места» того или иного варианта сети.

Выходные характеристики, получаемые в результате экспериментов с имитационной моделью, определяются, во-первых, принятым критерием оценки эффективности 5GC, во-вторых, необходимостью получить достаточно полную информацию об основных характеристиках процессов обмена информацией в сети и о характеристиках основных элементов сети. Поэтому выходными характеристиками, получаемыми в результате имитационного эксперимента, являются среднее время задержки пакетов, стандартное отклонение от среднего времени задержки пакетов, функции распределения времени задержки пакетов, количество пакетов, обработанных каждым узлом, количество пакетов, переданных по каждому каналу, средние длины очередей и средние значения времени ожидания в буферах перед процессорами в каждом узле, характеристики загрузки каналов и процессоров узлов сети.

В СОПР имитационные модели 5GC строятся автоматически с помощью специального генератора, входящего в состав подсистемы ОКЭФ. На вход генератора поступает описание варианта 5GC, созданного проектировщиком на предыдущих этапах (структурно-топологическое проектирование, выбор маршрутов, выбор пропускных способностей узлов и каналов). Отметим, что для работы на этих этапах СОПР обеспечивает проектировщику дружественный интерфейс, отвечающий современным требованиям (графическое отображение проектируемой сети в многооконном режиме, средства работы с вариантами проектируемой сети, средства поддержки технологий автоматического достраивания частичных решений, средства автоматического «улучшения» имеющихся решений и т.д.).

На основе анализа структуры варианта 5GC генератор формирует модель на языке GPSS, которая затем выполняется в среде моделирования GPSS STUDIO [10]. В процессе автоматической генерации используются библиотеки, содержащие модели отдельных функциональных модулей узлов коммутации (процессоры, порты, буферы и

т.д.) и каналов передачи данных. Полученная модель передается на вход интерпретатора GPSS.

По результатам имитационного эксперимента проектировщик может скорректировать вариант проекта 5GC (изменить топологию, маршруты, пропускные способности УК и КПД, размеры пакетов), используя средства соответствующих подсистем, а затем повторить этап имитационного моделирования, используя средства подсистемы ОКЭФ.

Среда моделирования GPSS STUDIO [10] является результатом объединения в рамках единой программной системы: популярного языка моделирования GPSS World, программ улучшающих работу с языком и множества программ автоматизирующих другие этапы имитационных исследований. В части улучшения работы с языком это оперативные подсказки, новый текстовый редактор, усовершенствованный отладчик моделей, русифицированный и интерактивный стандартный отчет. В GPSS STUDIO реализованы самые современные информационные технологии разработки модели и проведения экспериментов с ней. Особое внимание уделяется способам графического конструирования моделей, автоматизированному созданию интерфейсов ввода исходных данных в модель, анимации результатов, интерактивному анализу результатов экспериментов с моделью и документированию результатов исследования.

Отличительной чертой данного инструмента являются не только высокоэффективные средства разработки имитационной модели, а возможность создания на основе отлаженной модели полноценного имитационного приложения, которое «настроено» на язык предметной области исследования и понятно специалистам из этой области. Все это позволяет существенно расширить круг потенциальных пользователей метода имитационного моделирования и сделать новый шаг в направлении создания действительно массового инструмента имитационного моделирования.

Отметим следующие основные особенности среды моделирования GPSS STUDIO:

- для каждой модели весь жизненный цикл имитационных исследований сложной системы объединен в рамках общего проекта, а модели и результаты экспериментов хранятся в единой базе данных;
- все этапы исследования связаны методически и информационно друг с другом в рамках единого комплекса программ, запускаемого с компьютера пользователя;
- используется единый стандарт языка общения исследователя с программой, достигаемый за счет создания унифицированных интерфейсов взаимодействия системы с исследователем при работе с моделью, при проведении экспериментов и представлении результатов моделирования; это значительно упрощает его использование при создании моделей и проведении экспериментов.

Все это предопределило принципиально новые и расширило существующие возможности пользователя в среде моделирования GPSS STUDIO, которые можно сформулировать следующим образом [11]:

- осуществлять общее управление исследованием (моделями, экспериментами и результатами), используя специально созданную структуру данных «Проект» и способы работы с ней. «Проект» состоит из совокупности файлов, логически связанных друг с другом – «Формальное описание системы - модели – формы ввода и вывода - результаты экспериментов – отчеты». Структура данных «Проект» широко используется в информационных технологиях, понятна и удобна пользователю. При необходимости пользователь может добавлять в свой Проект любые файлы, облегчающие работу с Проектом;

– начинать имитационное исследование с самого начала – формулирования проблемы, посредством создания графической структурной схемы модели. Структурная схема модели состоит из элементарных блоков и сложных (состоящих из ряда элементарных блоков). Каждый блок детально описывается (все блоки являются своеобразными строительными «кирпичиками» при построении текущей модели и могут быть помещены с специальные библиотеки типовых блоков);

– использовать библиотеки ранее созданных типовых составных или элементарных блоков. Чаще всего эти библиотеки созданы по функциональному признаку, для конкретной предметной области, с разной степенью детализации (в процессе построения модели пользователь может использовать эти готовые строительные конструкции, или сам создать новые, необходимые для модели блоки);

– последовательно детализировать описание модели, за счет использования возможности построения иерархических схем (т.е. идти от общего представления к более полному описанию, по мере познания системы и доведя в итоге схему до необходимого для исследования уровня детализации);

– ввести необходимые данные и параметры для всех блоков, собранные в процессе исследования и требуемые для полной идентификации и сборки модели (это детерминированные числовые данные, статистические данные, логика работы блока, в том числе и фрагменты текста модели на GPSS, реализующего данный элементарный блок);

– осуществлять автоматическую генерацию и сборку текста модели по созданной структурной схеме модели и заданным исходным данным; при сборке модели осуществляется дополнительный (по сравнению с GPSS World) синтаксический, семантический и логический контроль;

– при нежелании пользователя работать со структурной схемой, имеется возможность создавать модель в новом текстовом редакторе, используя при этом самые современные средства работы с текстами: автовыравнивание, подсветку синтаксиса, контекстную подсказку, обнаружение ошибок в операторах, группировку и множество других средств, упрощающих создание модели и ввод в ее необходимых данных;

– эффективно и быстро отлаживать модели с использованием принципиально нового интерактивного отладчика, позволяющего визуально отслеживать не только продвижение транзактов (сразу в нескольких фрагментах модели), но и контролировать при этом изменение состояния и значений других объектов в модели;

– автоматизировать создание разнообразных диалоговых форм ввода исходных данных на основе текста отлаженной модели. Каждая форма – это совокупность программных диалогов по заданию параметров моделируемой системы с использованием языка предметной области разрабатываемой модели (количество форм ввода, их оформление и наполнение определяет пользователь из предметной области);

– конструировать интерактивные формы анализа результатов моделирования, также используя структурную схему или текст модели. Количество форм вывода, их оформление и наполнение также определяется пользователем, совместно со специалистом из предметной области. В результате можно построить мощный интерактивный инструмент, позволяющий анализировать все необходимые показатели модели в числовом, табличном и графическом виде;

– определить факторы, влияющие на систему и показатели функционирования системы, из списка возможных для данной модели, которые будут участвовать в разработке сценариев исследования, дать им названия, понятные специалисту предметной области и выбрать один из возможных методов планирования для автоматического формирования плана экспериментов;

– выполнить одиночный эксперимент с моделью, либо провести серию экспериментов по сформированному плану (при этом в качестве вычислительной мощности могут быть выбрано одно из моделирующих ядер – либо на компьютере пользователя, либо на сервере, либо в облаке в сети Интернет);

– после завершения моделирования любого одиночного эксперимента, анализировать динамику изменения показателей модели по изменению системных числовых атрибутов, форм динамики, стандартному отчету, в том числе и в анимированном графическом виде;

– осуществить всесторонний интерактивный анализ результатов исполнения серии экспериментов, посредством построения зависимости выбранных значений показателей от изменения факторов в виде таблиц или графиков;

– просматривать из базы данных моделирования, результаты любого эксперимента или серии экспериментов, полученных ранее и выполненных в рамках одного Проекта;

– автоматически формировать в процессе сеанса работы, используя функцию документирования, виртуальный отчет об исследовании. Пользователь может включать в него результаты, полученные на всех этапах исследования и после каждого эксперимента: общее описание, структуру и текст модели, данные и результаты выборочных или всех экспериментов и серий экспериментов; фрагменты анимации;

– сохранить виртуальный отчет в формате MS Word или MS Excel в папке проекта, чтобы затем провести необходимое редактирование автоматически собранного материала и сформулировать авторские замечания и рекомендации по результатам исследования;

– превратить отлаженную модель и созданные для модели формы ввода данных и анализа результатов в независимое имитационное приложение (в виде исполняемого файла). С этим приложением смогут дальше работать специалисты заказчика – непрофессионалы в области имитационного моделирования (при этом профессиональная моделирующая среда не нужна для дальнейшей работы с приложением);

– обеспечить сетевую работу с моделирующим ядром и базой данных. При большем потоке моделей система GPSS World и сервис базы данных могут быть установлена на одном или нескольких компьютерах в локальной сети, и с ней может работать произвольное число пользователей, установивших на своих компьютерах среду моделирования.

Как отмечают разработчики GPSS STUDIO [11], важной особенностью работы в среде моделирования является то, что эта среда никоим образом не изменяет спецификации языка моделирования. Тексты моделей на языке GPSS World, написанные ранее, будут полностью совместимы с GPSS STUDIO.

Литература

1. **Попов В.И., Скуднов В.А.** Основы проектирования сотовых сетей мобильной связи. М.: Горячая линия – Телеком, 2019. 400 с.
2. View on 5G Architecture. 5G PPP Architecture Working Group. Version 3.0, June 2019.
3. **Степунин А.Н., Николаев А.Д.** Мобильная связь на пути к 6G. В 2 Т. – Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2017.
4. **Фелижанко А.** Что нового в последних релизах 3GPP. – <https://www.slideshare.net/CiscoRu/3gpp-75424269>.
5. Опорные сети 5G: гибкость открывает новые возможности для бизнеса. – https://habr.com/ru/company/ericsson_ru/blog/281509/.

6. **Гостев В.М.** Комплексное моделирование сетей передачи данных на базе системы оптимизации проектирования СПД // Системы управления и информационные технологии. 2010. № 3(41). С. 77-81.
7. **Клейнрок Л.** Вычислительные системы с очередями. – М.: Мир, 1979.
8. **Гостев В.М.** Электронный научно-образовательный комплекс «Моделирование информационных процессов» // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2013): Материалы 6-й Всеросс. науч.-практич. конф. (Казань, 16 – 18 октября 2013 г.). Том I. С.327-332.
9. **Девятков В.В.** Методология и технология имитационных исследований сложных систем: современное состояние и перспективы развития. – М.: ИНФРА-М, 2013. – 448 с.
10. **Девятков В.В., Девятков Т.В., Федотов М.В.** Имитационные исследования в среде моделирования GPSS STUDIO. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 283 с.
11. **Девятков В. В., Девятков Т.В., Федотов М.В.** GPSS STUDIO – новые возможности и перспективы развития // Девятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2019). Труды конференции, 16–18 октября 2019 г., Екатеринбург: Урал. гос. пед. ун-т., 2019. С. 340-346.