

УДК 654.153

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2024-12-2-16-24>

EDN: MSUPPX

Формализация и автоматизация процессов тестирования сетей связи пост-NGN

Зимин А. В.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи. Развитие и усложнение архитектуры сетей связи, протоколов и сценариев взаимодействия различных сетевых элементов влечет за собой и развитие средств тестирования сетей связи. **Целью работы** является обзор эволюции средств абстрактного представления и математических моделей средств тестирования сетей связи по мере их развития. **Используемыми методами** являются спецификации тестовых сценариев на языке диаграмм последовательности сообщений (MSC) для тестирования сетей третьего и пятого поколений (3G и 5G), а именно сетевых слайсов, новых сетевых элементов. **Результат:** описан подход, позволяющий строить для тестирования глобальные MSC-диаграммы высокого уровня. **Научная новизна** исследования заключается в авторском подходе к применению инструментов MSC и сети Петри для автоматизации процесса тестирования сетей NGN. **Теоретическая / Практическая значимость:** спецификации тестовых сценариев на языке диаграмм последовательности сообщений могут использоваться для тестирования сетей 5G в режимах пусконаладочных работ, сертификационных испытаний, проверки соответствия требованиям QoS, валидации и документирования в системе управления сетью OSS/BSS и др.

Ключевые слова: сети связи NGN, 4G, 5G / 6G, тестирование сетевой инфраструктуры, диаграммы последовательности сообщений, искусственный интеллект, машинное обучение, конечные автоматы поведения

Задачи формализации сценариев тестирования сетей 5G / 6G

С развитием и изменением инфраструктуры сетей нового поколения (NGN, аббр. от англ. Next / New Generation Networks) при переходе к сетям пятого и шестого поколений (5G / 6G) значительно изменились и усложнились процессы тестирования, при этом допустимые сроки столь же быстро сокращаются.

Эта и дальнейшая эволюция сетей связи на пути к B5G (аббр. от англ. Beyond 5G – *прибл.* поколение, следующее за пятым) после 5G рассматривается в целом ряде работ, например, в [1]. Здесь же рассмотрим более узкую проблематику этапов эволюции средств абстрактного представления и математических моделей средств тестирования сетей связи по мере их развития и усложнения.

Библиографическая ссылка на статью:

Зимин А. В. Формализация и автоматизация процессов тестирования сетей связи пост-NGN // Информационные технологии и телекоммуникации. 2024. Т. 12. № 2. С. 16–24. DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-2-16-24. EDN: MSUPPX

Reference for citation:

Zimin A. Formalization and Automation of Post-NGN Communication Network Testing Processes. *Telecom IT*. 2024. Vol. 12. Iss. 2. PP. 16–24 (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-2-16-24. EDN: MSUPPX



Рис. 1. Эволюция сетей связи на пути к B5G/6G

На ранних этапах – 3G/4G – тестирование сети фокусировалось на проверке основных функций протоколов (передача данных, голосовые вызовы, поддержка роуминга). Такой подход определял и *методы*: лабораторное тестирование, эмуляция сетевой нагрузки, тестирование на основе стандартизированных сценариев, в частности сценариев 3GPP (*аббр. от англ. 3rd Generation Partnership Project* – букв. «Партнерский проект третьего поколения», название консорциума, занимающегося разработкой спецификаций для мобильной связи). Соответствовали этому и *инструменты*: симуляторы и тестовые стенды для имитации отдельных сетевых элементов и телекоммуникационных протоколов.

Переход к B5G сместил фокус тестирования, а с появлением новых задач тестирования изменились и методы, и инструменты.

Во-первых, осуществляется тестирование новых сценариев использования – eMBB (*аббр. от англ. Enhanced Mobile Broadband* – сверхширокополосная мобильная связь), URLLC (*аббр. от англ. Ultra-Reliable Low Latency Communication* – сверхнадежная связь с низкими задержками), mMTC (*аббр. от англ. Massive Machine-Type Communications* – массовая межмашинная связь) – и поддержка сетей с высокой плотностью устройств.

Во-вторых, появились новые *методы*: тестирование виртуализированных сетевых функций (NFV, *аббр. от англ. Network Functions Virtualization*), использование реальных условий (Field Trials).

В-третьих, используются новые *инструменты*: интеграция лабораторных решений с облачными платформами, тестирование в распределенных средах, цифровые двойники и др.

Ключевыми вызовами тестирования сетей и протоколов B5G/6G являются: – усложнение архитектуры сетей: переход к распределенным системам (Edge Computing – периферийные вычисления; MEC, *аббр. от англ. Multi-access Edge Computing* – периферийные вычисления с множественным доступом); интеграция гетерогенных сетей (земные, спутниковые, воздушные);

– искусственный интеллект и машинное обучение (AI/ML, *аббр. от англ. Artificial Intelligence / Machine Learning*) в сетевых протоколах: протоколы, использующие предсказательные модели на основе AI/ML, требуют динамических подходов к тестированию, включая проверку их адаптивности и корректности принятия решений;

– кибербезопасность: обеспечение безопасности межпротокольного взаимодействия в условиях растущих атак, связанных с Интернетом вещей (IoT, *аббр. от англ. Internet of Things*) и квантовыми вычислениями;

– тестирование качества пользовательского опыта (QoE, *аббр. от англ. Quality of Experience* – качество обслуживания) [2], а также тактильный Интернет, голографическая связь, XR / AR (*аббр. от англ. Extended Reality / Augmented Reality* – расширенная / дополненная реальность) для новых сервисов [3].

На всех этапах эволюции сетевого тестирования совершенно необходима формализация процессов тестирования – ключевой фактор обеспечения эффективности, надежности и воспроизводимости результатов. Для этого используются математические модели, стандартизированные методики, автоматизация и строгие алгоритмы тестирования, о чем автор уже писал в [4].

В данной статье рассмотрим роль математических абстракций и базирующиеся на конечных автоматах поведения (КАП) средства языка диаграмм последовательности сообщений (MSC, *аббр. от англ. Message Sequence Chart*), поддерживающие визуализацию сценариев взаимодействия и формализованный анализ состояния системы.

Конечные автоматы поведения

В контексте рассматриваемой проблематики средства КАП используются для моделирования:

– состояний сетевых элементов (например, состояния подключения, передачи данных, переключения между базовыми станциями и т. п.);

– условий перехода, согласно которым каждый переход между состояниями определяется тем или иным условием – поступлением определенного сообщения или выполнением определенных действий.

Также средства КАП применяются для верификации логики протоколов [5], например, правильности переходов в протоколах сигнализации 5G, в частности RRC (*аббр. от англ. Radio Resource Control*, протокол управления радиоресурсами).

Математическое представление КАП рассматривалось в [4]. Здесь же сосредоточимся на сценариях MSC.

Спецификации MSC

Фактически язык MSC – это графический формализм, который используется для визуализации коммуникационного поведения (последовательности сообщений), стандартизированный ITU-T (Сектором стандартизации телекоммуникаций Международного союза электросвязи) в рекомендации Z.120 (ITU-T

Z.120 Formal Description Techniques (FDT) – Message Sequence Chart (MSC) 02/2011. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Z.120-201102-I> [6]. Каждый компонент системы, участвующий в коммуникации, называется экземпляром (instance); он представлен вертикальной временной линией. Все события во времени располагаются от вершины диаграммы до ее основания, т. е. все события вдоль каждой оси экземпляра полностью упорядочены.

Событие – это либо отправляющее или принимающее сообщение, либо условие (возможно, включающее более одного экземпляра). Единственное ограничение порядка, отличное от наложенного осью экземпляра, выводится из сообщений: сообщение должно быть отправлено до его получения.

Таким образом, полный MSC определяет частичный порядок по событиям, которые содержит. Графически сообщения представлены стрелками, указывающими в направлении потока сообщений, а условия – шестиугольниками. Такой пример тестовых сценариев bMSC (basic MSC) показан на рисунке 2а.

Заметим, что для тестовых сценариев (как на рисунке 2) диаграммы последовательностей – MSC и UML (*аббр. от англ. Unified Modeling Language Sequence Diagrams* – диаграммы последовательностей унифицированного языка моделирования) – отвечают одним и тем же потребностям и во многом схожи, однако между ними есть различия. В MSC вертикальные линии представляют объекты автономного выполнения, в то время как в UML они обычно представляют объект. В MSC стрелка является асинхронным сообщением, в то время как в UML это обычно синхронный вызов операции над объектом.

Из приведенного на рисунке 2 примера видно важнейшее (по крайней мере, для рассматриваемой в данной статье проблематики) использование MSC – создание тестовых сценариев обмена сигналами между различными узлами, процессами или объектами сети пост-NGN.

Формализуем этот подход по аналогии с [3, 4], т. е. более строго общая структура спецификации на MSC описывается кортежем:

$$MSC_s = (S, s_0, \Sigma^R, n_r, S_r),$$

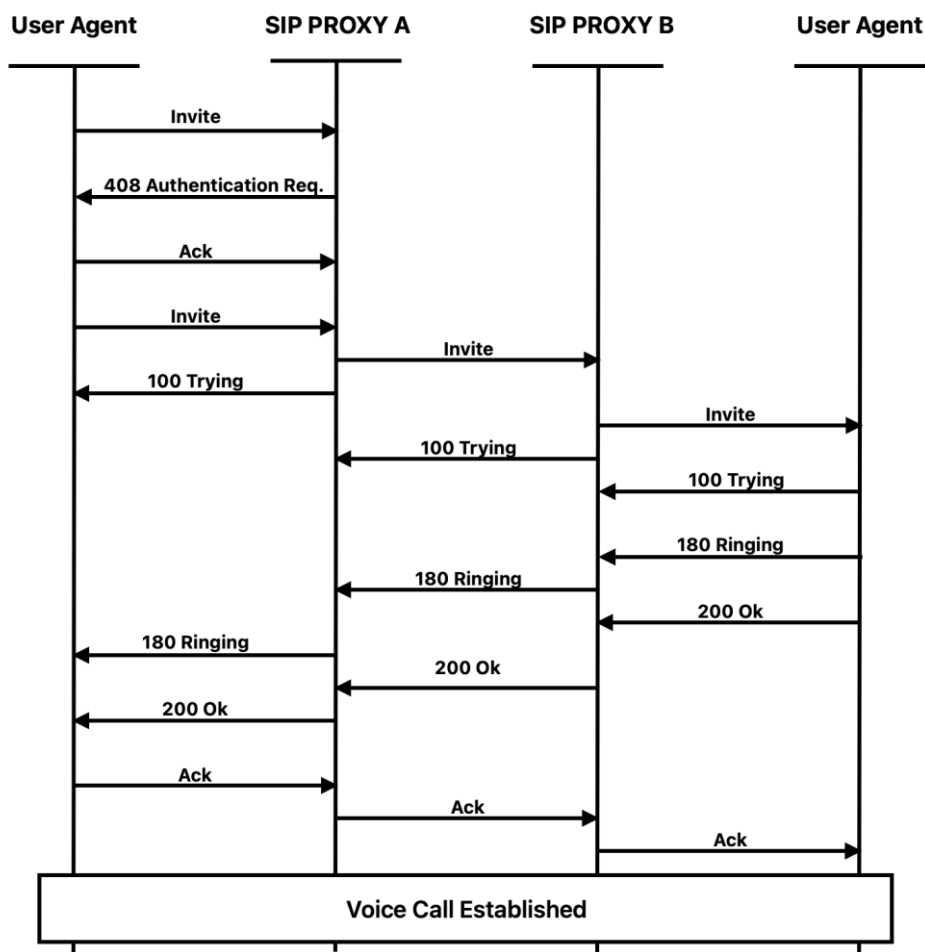
где S – конечное множество сценариев bMSC; $s_0 \in S$ – сценарий верхнего уровня; Σ^R – множество имен; $n_r: S \rightarrow \Sigma^R$ – функция сопоставления имен bMSC с каждым bMSC; $S_r = \{(s_1, s_2) \mid s_1, s_2 \in S\}$ – ссылочное отношение между сценариями bMSC.

Соответственно, согласно [3] каждый сценарий bMSC из множества возможных сценариев $S_p \in S$ описывается кортежем:

$$S_p = (P_s, E_s, \Sigma_s, p_s, l_s, \langle_s),$$

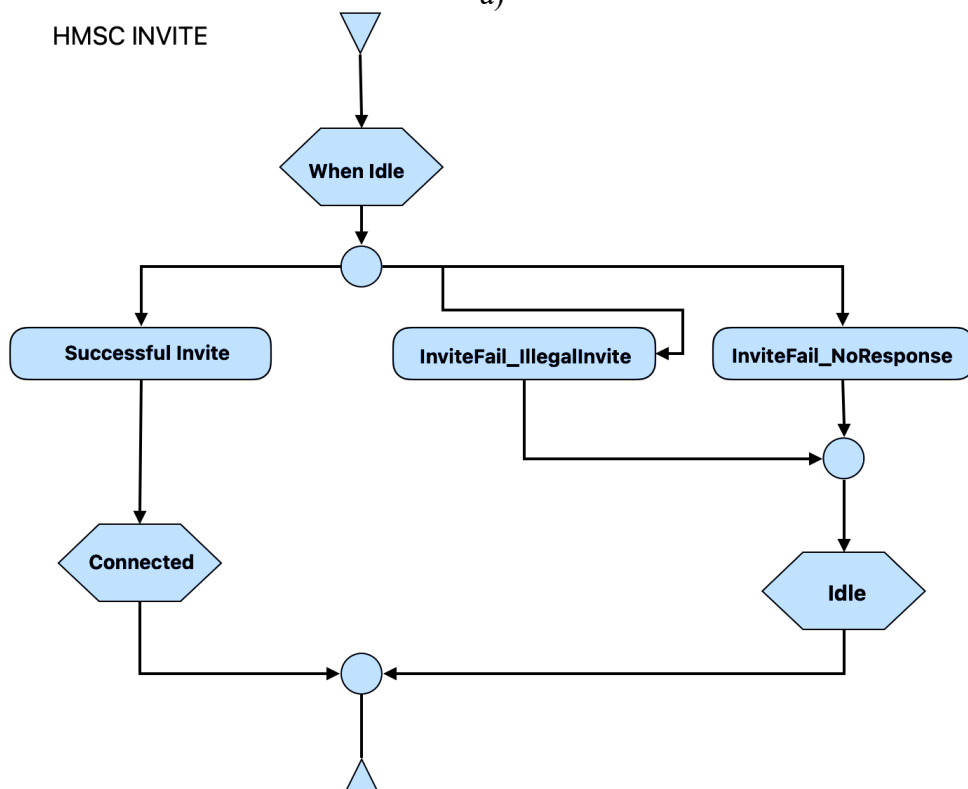
где $P_s \subseteq P$ – конечное множество экземпляров (instances); $E_s \subseteq E$ – конечное множество событий (events); $\Sigma_s \subseteq \Sigma$ – конечное множество меток (labels); $p_s: E_s \rightarrow 2^{P_s}$ – функция отображения каждого события в одном или нескольких экземплярах; $l_s: (P_s \cup E_s) \rightarrow \Sigma_s$ – функция маркировки для каждого экземпляра и события.

bMSC INVITE



a)

HMSC INVITE



б)

Рис. 2. Тестовые сценарии bMSC

Отношение порядка между событиями описывается выражением:

$$\langle_s: \cup \langle_{P_s} \cup \{(m_s, f(m_s)) | m_s \in E_s^M\},$$

где $\langle_{P_s} = \{(e_1, e_2) | e_1, e_2 \in E^s\}$ описывает отношение порядка между экземплярами, а f ставит получаемое событие в соответствие отправляемому событию.

Отличие этих конструкций от SDL-спецификаций (*аббр. от англ. Specification and Description Language* – *букв. язык спецификаций и описаний* – стандартизированный язык, используемый для описания архитектуры системы и поведения ее компонентов), построенных на обычных формах Бэкуса – Нуара (BNF), состоит в дополнительных логических и геометрических соотношениях между фрагментами. Язык MSC описывает взаимодействие между каким-либо числом компонентов системы и между этими компонентами и окружающей средой.

Для каждого компонента системы, охватываемой MSC, существует ось требований. Взаимодействия между компонентами системы представлены линиями сообщений. Посылка и прием сообщения – это два асинхронных события. Последнее предполагает, что в MSC окружающая среда способна принимать и посылать сообщения независимо. При этом поведение окружающей среды подчинено законам MSC. Для каждого события MSC предполагается глобальная ось времени. Вдоль каждой оси отсчет времени идет сверху вниз, однако собственная шкала времени не определена.

Синтаксис MSC в таких тестовых сценариях определяется следующим образом. Набор «экземпляров (instances)», «событий (events)» и «меток (labels)» обозначен P , E и Σ , соответственно. *Событие* состоит из конструкций «сообщения (message)», «условия (condition)» и «действия (action)», названных E^m , E^c и E^A , соответственно.

К достоинствам такого описания процессов при помощи MSC относятся исключительная наглядность и легкость, с которой могут быть проверены протоколы, специфицированные этим методом. Достаточно сказать, что тестовые сценарии получаются путем слияния MSC-спецификаций разрабатываемого процесса и имитатора протокола.

Итак, MSC-сценарий является эффективным инструментом для описания тестовых сценариев. Именно по набору такого рода сценариев проводится проверка правильности отработки протоколов сигнализации, что может активно применяться в сетях 5G.

Среди ряда достоинств предложенного в статье базирующегося на MSC подхода выделим два:

- *визуализация взаимодействий*: MSC описывает последовательность сообщений между компонентами (например, пользовательским оборудованием (UE, *аббр. от англ. User Equipment*), базовой станцией (gNB), ядром сети);

- *сценарное тестирование*: используется для моделирования взаимодействий, например, регистрации UE, установления соединений, передачи данных, переключения (Handover).

Так, например, для процедуры Handover в 5G КАП, в котором определяются состояния UE, можно также описать по аналогии с приведенным выше примером. MSC-спецификацию процедуры Handover можно определить следующими объектами: UE, Source gNB (базовая станция – источник, откуда был получен запрос на хэндовер), Target gNB (целевая базовая станция) и Core Network (базовая сеть). В процессе тестирования проверяется корректность переходов между состояниями, анализируются тайминги сообщений и производится обработка ошибок.

MSC и сети Петри

Некоторые аспекты описанного подхода могут быть расширены методами сетей Петри, рассмотрение которых выходит за рамки настоящей статьи. Здесь же подчеркнем, что речь идет о двух различных инструментах для тестирования сетей, но в рамках предлагаемого подхода они могут успешно дополнять друг друга и обеспечивать наибольшую эффективность тестовых сценариев в условиях экспоненциально возрастающей сложности сетей поколений B5G.

Как следует из вышеизложенного, MSC моделирует обмен сообщениями между сетевыми элементами, представляя их как последовательности событий. Это средство удобно для визуализации потока сообщений и упрощает проверку правильности взаимодействий на уровне высокоуровневых сценариев.

Сети Петри являются эффективным инструментом для тестирования и анализа сети, включающего параллельные процессы и асинхронные взаимодействия. Они отображают состояния системы в виде узлов и переходов, что позволяет, в том числе, моделировать и анализировать блокировки и недоступные состояния.

С помощью MSC можно задать высокоуровневую последовательность взаимодействий, а затем применить сети Петри для детального анализа этих взаимодействий, что позволяет выявлять состояния гонок, блокировки и иные ошибки параллельности. При этом MSC и сети Петри могут использоваться вместе для описания поведения системы на двух уровнях. MSC может описывать поток сообщений, а сети Петри – модель состояния компонентов. Сценарии из MSC могут быть преобразованы в сети Петри, что позволяет тестировать такие свойства сетевых элементов, как согласованность между ними и завершенность сценариев взаимодействия.

Заключение

Спецификации тестовых сценариев на языке MSC могут использоваться для тестирования сетей 5G (сетевых слайсов, новых сетевых элементов и т. п.) в режимах пусконаладочных работ, сертификационных испытаний, проверки соответствия требованиям QoS, валидации и документирования в системе управления сетью OSS / BSS (*аббр. от англ. Operation Support System / Business Support System – букв. система поддержки операций / система поддержки бизнеса*) и др.

Предложенный в статье подход позволяет также строить глобальные диаграммы (MSC) высокого уровня для тестирования более сложных потоков мультимедийных данных.

тисервисного трафика, включающие ссылки на отдельные bMSC. Эти высокоуровневые диаграммы MSC определяют состав тестовых коммуникационных сценариев, в то время как отдельные диаграммы bMSC, на которые они ссылаются, специфицируют сценарии в терминах последовательностей сообщений по аналогии с рисунком 2. В этом случае требуется более глубокое исследование взаимодействия между компонентами глобальной диаграммы MSC и развитие инструментария коннекторов MSC, что заслуживает рассмотрения в отдельной статье.

Литература

1. Гольдштейн Б. С. Инфокоммуникационные сети и системы. СПб.: БХВ-Петербург, 2024.
2. Акишин В., Гольдштейн А. Возможные подходы к построению модели сущностей для эксплуатации IoT в OSS/BSS // Технологии и средства связи. 2017. № 1. С. 20–22. EDN: ZHJXMN
3. Кучерявый А. Е., Гольдштейн Б. С. Сети пост-NGN. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. EDN: SKBXHF
4. Зимин А. В., Ревенко Ю. П. Декомпозиция в испытаниях сетевых элементов NGN / пост-NGN // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022): Сборник научных статей XI Международной научно-технической и научно-методической конференции (Санкт-Петербург, 5–16 февраля 2022 г.). СПб.: СПбГУТ, 2022. Т. 1. С. 493–498. EDN: EVRJUD
5. Lee D., Yannakakis M. Principles and Methods of Testing Finite State Machines – A Survey // Proceedings of the IEEE. 1996. Vol. 84. Iss. 8. PP. 1090–1123. DOI: 10.1109/5.533956
6. Lee N. H., Cha S. D. Generating Test Sequences from a Set of MSCs // Computer Networks. 2003. Vol. 42. Iss. 3. PP. 405–417. DOI: 10.1016/S1389-1286(03)00250-0

Статья поступила 18 октября 2024 г.
Одобрена после рецензирования 29 ноября 2024 г.
Принята к публикации 23 декабря 2024 г.

Информация об авторе

Зимин Андрей Владимирович – начальник Испытательного центра в области связи, старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: zimin@sut.ru

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2024-12-2-16-24>
EDN: MSUPPX

Formalization and Automation of Post-NGN Communication Network Testing Processes

Zimin A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Problem statement. The development and complication of the architecture of communication networks, protocols and scenarios for the interaction of various network elements, as a result, entails the development of means for testing communication networks. **The aim of the work** is to review the evolution of abstract tools and mathematical models of communication network testing tools as these networks evolve. **The method** used is the specifications of test scenarios in the language of MSC message sequence diagrams for testing 3G networks and 5G networks (network slices, new network elements). **The scientific novelty** of the study lies in the author's approach to the application of MSC and Petri net tools for automating the process of testing NGN networks. **Theoretical / Practical relevance:** Message Sequence Diagram test case specifications can be used for 5G network testing in commissioning modes, certification testing, QoS verification, validation, and documentation in the OSS/BSS network management system, etc.

Key words: NGN, 4G, 5G/6G, network infrastructure testing, message sequence diagrams, artificial intelligence, machine learning, finite behavior automata

Information about Author

Zimin Andrey – Head of the Communications Testing Center, Senior Lecturer at the Department of Infocommunication Systems (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: zimin@sut.ru