

ОБЗОР И АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ СЕТЕВОГО СЛАЙСИНГА

С. Мухизи^{1*}, Р. В. Киричѐк¹

¹ СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

* Адрес для переписки: samno1@yandex.ru

Аннотация

Предмет исследования. Элементы архитектуры сетей связи пятого поколения. Цель работы. Провести обзор и сравнительный анализ существующих моделей и методов сетевого слайсинга.

Метод. Кроме научного подхода, в ходе работы используются системный и институциональный подходы, графовые (сетевые) и алгебраические методы, а также методы комплексного анализа.

Основные результаты. Проанализированы научные публикации из открытых источников по теме сетевого слайсинга, проведен анализ, выявлены особенности и отличия, приведена их сравнительная оценка. Показан и применен общий метод обработки сетевых слайсов, на основе сингулярного разложения (SVD), в целях извлечения статистических данных о трафике, сетевых ресурсах, сетевых функциях, сетевых сервисах, корреляциях, а также в целях классификации, кластеризации, поиска и т. д. **Основные выводы.** Модели и методы сетевого слайсинга играют фундаментальную в проектировании и развертывании современных программно-конфигурируемых сетей связи, в частности 5G/IMT-2020 сетей.

Ключевые слова

5G/IMT-2020, SDN, NFV, модель сетевого слайсинга, метод сетевого слайсинга, сетевой слайс, сетевой слайсинг.

Информация о статье

УДК 004.75

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 31.07.18, принята к печати 03.09.18.

Ссылка для цитирования: Мухизи С., Киричѐк Р. В. Обзор и анализ моделей и методов сетевого слайсинга // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Том 6. № 3. С. 79–97.

COMPARATIVE EVALUATION OF MODELS AND METHODS OF NETWORK SLICING

S. Muhizi^{1*}, R. Kirichek¹

¹ SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

* Corresponding author: samno1@yandex.ru

Abstract—Subject research. The work is devoted to the main models and methods of network slices in modern communication networks. Work objective. The main goal of the work is to identify, analyze and compare current network slicing models and methods. **Method.** In addition to the scientific, systemic and institutional approaches, we used the graph approach and algebraic methods, as well as methods of complex analysis. **Core results.** Are identified and analyzed the main models and methods of network slicing, their functional features and differences and is given their comparative estimation evaluation. **Work relevance.** The importance and relevance of this work is defined by the fact that physical network infrastructures are built inefficiently and expensively when delivering service on customer demand.

Keywords—5G/IMT-2020, SDN, NFV, network slicing model, network slicing method, network slice.

Article info

Article in Russian.

Received 31.07.18, accepted 03.09.18.

For citation: Muhizi S., Kirichek R.: Comparative Evaluation of Models and Methods of Network Slicing // Telecom IT. 2018. Vol. 6. Iss. 3. pp. 79–97 (in Russian).

Введение

Как показывают прогнозы различных рейтинговых агентств число устройств и пользователей в Интернете неуклонно растет. Каждый день появляются новые сетевые сервисы, повышаются требования разработчиков контента к скорости мобильного и фиксированного интернет-доступа, абоненты становятся более требовательнее к качеству обслуживания и восприятия в целом [1, 2]. Разработчики программного и аппаратного обеспечения сетей связи, а также операторы связи, желая удовлетворить новые потребности абонентов, модернизируют архитектуру сетей на основе новых требований, стандартов и рекомендаций [2]. В связи с активным развитием концепции Интернета вещей устройства, подключенные к Интернет генерирует колоссальные объемы сетевого трафика, что делает невозможным дальнейшую эксплуатацию сетей, построенных на маршрутизаторах и коммутаторах. За последние 5 лет активное развитие получили программно-конфигурируемые сети [3, 4] (SDN – *Software Defined Networks*)

и сервисы виртуализация сетевых функций (NFV – *Network Functions Virtualization*)^{1, 2}, которые являются составными элементами концепции сетей пятого поколения (5G/IMT-2020 – *5th Generation Mobile Network* [5]).

В сетях 5G/IMT-2020 важнейшим компонентом является Сетевой слайсинг (*network slicing*)^{3, 4, 5, 6, 7} [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13], призванный для эффективного использования сетевых инфраструктурных ресурсов. В [8] сетевой слайсинг определяется как концепция параллельного развертывания нескольких логических, автономных и независимых сетей на общей инфраструктурной платформе. В принципе сетевой слайсинга лежит специфический способ виртуализации сетевых инфраструктурных ресурсов. Как показывает проведенный обзор сетевой слайсинг – это инструмент для совместного использования сетевых ресурсов и предоставления настраиваемых сетевых архитектур для различных вариантов эксплуатации, которые используют одну и ту же базовую физическую инфраструктуру⁸. Каждая такая виртуальная сеть представляет собой слой (*slice*), имеющий свой тип трафика, в котором может использоваться оригинальная технология передачи данных. Следовательно, в такой сети каждый слайс представляет собой отдельную логическую сеть, настроенную на определенные (минимум один) сервисы⁹ [13, 14]. Сетевой слайсинг относится к управляемым разделам физических и/или виртуальных сетевых ресурсов; к физическим, виртуальным и сервисным сетевым функциям; которые могут выступать в качестве независимого экземпляра сети и/или как сетевое облако^{10, 11} [13, 14]. К сетевым ресурсам относятся ресурсы связи (каналы связи, телекоммуникационное оборудование и т. д.), вычислительные ресурсы и ресурсы хранения.

Стоит отметить, что в русскоязычных публикациях, посвященных научным исследованиям по сетевому слайсингу, встречается термин «сегментация», что не искажает логику, которая заложена в концепции Сетевого слайсинга.

¹ Network Functions Virtualization (NFV). Management and Orchestration v1.1.1. ETSI European Telecommunications Standards Institute. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/NFVMAN/001_099/001/01.01.01_60/gs_NFV-MAN001v010101p.pdf

² ETSI GSNFV-EVE 012 (V3.1.1). Network Functions Virtualisation (NFV) Release 3. Evolution and Ecosystem. Report on Network Slicing Support with ETSI NFV Architecture Framework.

³ Network Functions Virtualization (NFV). Management and Orchestration v1.1.1.

⁴ ETSI GSNFV-EVE 012 (V3.1.1). Network Functions Virtualisation (NFV) Release 3.

⁵ NGMN Network Slicing Framework. URL: https://www.ngmn.org/uploads/media/161010_NGMN_Network_Slicing_framework_v1.0.8.pdf

⁶ 3GPP TS 28.530 v0.5.0. Management of Network Slicing in Mobile Networks. Concepts use Cases and Requirements (Release 15)

⁷ Network Slicing Terms and Systems. ETSI European Telecommunications Standards Institute. Draft V7. URL: <https://datatracker.ietf.org/meeting/99/materials/slides-99-netslicing-alex-galis-netslicing-terms-and-systems-02>

⁸ NGMN Network Slicing Framework.

⁹ 3GPP TR 22.830 V0.3.0 (2018-05). 3rd Generation Partnership Project. Technical Specification Group Services and System Aspects. Feasibility Study on Business Role Models for Network Slicing (Release 16).

¹⁰ Network Slicing Terms and Systems. ETSI European Telecommunications Standards Institute. Draft V7.

¹¹ 3GPP TR 22.830 V0.3.0 (2018-05).

1 Модели и методы сетевого слайсинга

Прежде всего, представим базовую физическую сетевую инфраструктуру как ориентированный мульти-граф $G = (N, L)$, где N – набор узлов сети, а L – набор каналов связи между узлами. Узел $n \in N$ характеризуется вычислительной мощностью p , измеряется в флопс/с (*flops/s*); канал связи $l \in L$ характеризуется пропускной способностью $b > 0$ и измеряется в битах/с (*bits/s*). Узел с положительной вычислительной мощностью $p > 0$ представляет собой облачное местоположение с возможностью выполнять виртуальные сетевые функции, тогда как узел с нулевой вычислительной мощностью $p = 0$ служит только как маршрутизатор ПКС [15].

С точки зрения моделирования сетевые слайсы могут быть представлены как коллекции взаимосвязанных виртуальных сетевых функций. Наиболее распространенным подходом в литературе является рассмотрение виртуальных сетевых функций как единицы вычисления [15].

1.1 Единая эталонная модель

В единой эталонной модели сетевой слайс рассматривается как объединение подмножеств сетевых ресурсов и виртуальных сетевых функций¹² [6]. Сетевой слайсинг в этом случае представляет собой создание и управление такими слайсами поверх физической сетевой инфраструктуры (рис. 1).

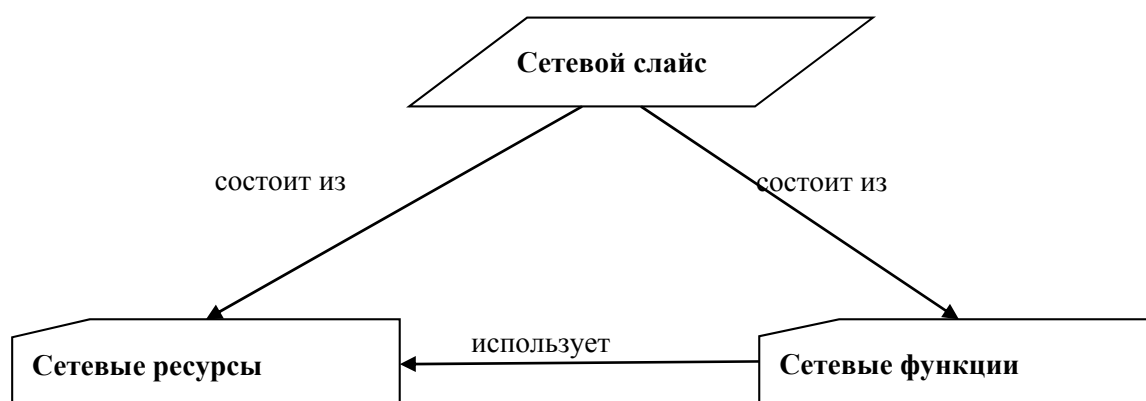


Рис. 1. Эталонная модель сетевого слайса

Математически слайс единой эталонной модели описывается следующим кортежем:

$$s = \langle NR, NF, R \rangle,$$

где s – сетевой слайс, NR – множество сетевых ресурсов, NF – множество сетевых функций, R – множество отношений, связывающих сетевые ресурсы и сетевые функции между собой. В этой модели существует отношение «использует», устанавливающее факт использования сетевой функцией данного сетевого ресурса. Если примем, что ноль соответствует «функция не использует ресурса»,

¹² Network Slicing Terms and Systems. ETSI European Telecommunications Standards Institute. Draft V7.

а единица соответствует «функция использует ресурс», то в математической записи для отношения «использует» получим следующее отображение:

$$\text{«использует»}: NF \times NR \rightarrow \{0,1\}.$$

Для статистического анализа степени вовлеченности сетевого ресурса в работе слайса или учета сетевых ресурсов, связанных с данной сетевой функцией или для чего-то ещё, можно отношение «использует» представить следующей двумерной матрицей. При этом количество сетевых ресурсов и сетевых функций ограничено. В матрице строки соответствуют сетевым функциям, а столбцы сетевым ресурсам. В ячейку (i,j) матрицы записываем 1 или 0 в зависимости от того используется или нет соответственно j -й сетевой ресурс i -й сетевой функцией. Получим матрицу следующего вида:

$$U = \begin{bmatrix} b_{1,1} & \cdots & b_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m,1} & \cdots & b_{m,n} \end{bmatrix},$$

где m – количество сетевых функций, n – количество сетевых ресурсов, а $b_{i,j} \in \{0,1\}, i = \overline{1,m}, j = \overline{1,n}$.

Каждая i -я строка в матрице U – это вектор, соответствующий сетевой функции и отражающий как она использует сетевые ресурсы:

$$R_i^T = [b_{i,1} \quad \cdots \quad b_{i,n}].$$

Аналогично, каждый j -й столбец представляет собой вектор, соответствующий сетевому ресурсу и отражающий как он используется сетевыми функциями:

$$C_j = \begin{bmatrix} b_{1,j} \\ \vdots \\ b_{m,j} \end{bmatrix}.$$

Теперь произведение $R_i^T R_k$ двух векторов двух сетевых функций дает корреляцию этих сетевых функций при работе слайса. Матричное произведение UU^T содержит все такие произведения векторов сетевых функций. Элемент (i,k) (что тоже что элемент (k,i)) содержит произведение $R_i^T R_k (= R_k^T R_i)$. Матрица $U^T U$ содержит все произведения векторов сетевых ресурсов, обеспечивая их корреляцию по сетевым функциям: $C_j^T C_i (= C_i^T C_j)$.

Теперь предположим, что существует сингулярное разложение (SVD) [26] U такой, что W и V являются ортогональными матрицами, и Σ - диагональная матрица. То есть:

$$U = W\Sigma V^T.$$

Тогда матричные произведения будут

$$UU^T = (W\Sigma V^T)(W\Sigma V^T)^T = (W\Sigma V^T)(V^T W^T \Sigma^T) = W\Sigma V^T V W^T \Sigma^T = W\Sigma W^T \Sigma^T,$$

$$U^T U = (W \Sigma V^T)^T (W \Sigma V^T) = (V^T W^T \Sigma^T) (W \Sigma V^T) = V W^T \Sigma^T W \Sigma V^T = V \Sigma^T \Sigma V^T.$$

Так как $\Sigma \Sigma^T$ и $\Sigma^T \Sigma$ являются диагональными, то мы видим, что W должен содержать собственные векторы $U U^T$, в то время как V содержит собственные векторы $U^T U$. Оба произведения имеют те же самые собственные значения отличные от нуля, заданными записями отличными от нуля $\Sigma \Sigma^T$, или равно, записями отличными от нуля $\Sigma^T \Sigma$. Теперь сингулярное разложение станет:

$$(R_i^T) \rightarrow \begin{matrix} U \\ (C_j) \\ \downarrow \\ \begin{bmatrix} b_{1,1} & \dots & b_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m,1} & \dots & b_{m,n} \end{bmatrix} \end{matrix} = (S_i^T) \rightarrow \begin{matrix} W \\ \downarrow \\ \begin{bmatrix} w_1 & \dots & w_l \end{bmatrix} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} \Sigma \\ \downarrow \\ \begin{bmatrix} \delta_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \delta_l \end{bmatrix} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} V^T \\ (D_j) \\ \downarrow \\ \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_l \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Значения $\delta_1, \dots, \delta_l$ называются сингулярными значениями, а w_1, \dots, w_l и v_1, \dots, v_l левые и правые сингулярные векторы соответственно. Стоит отметить единственной частью W , которая вносит вклад в R_i является i -я строка. Пусть эта строка будет S_i . Аналогично, единственной частью V^T , которая вносит вклад в C_j , является j -й столбец D_j . Они не собственные векторы, но *зависят от всех* собственных векторов. Оказывается, что, когда выбираем k наибольших сингулярных значений, и их соответствующие сингулярные векторы от W и V , то получаем ранг k аппроксимацию к U с наименьшей ошибкой (норма *Frobenius*). Эта аппроксимация имеет минимальную ошибку. Можно теперь рассмотреть векторы сетевых функций и векторы сетевых ресурсов как «пространство элементов». Вектор S_i тогда имеет k записей, каждая из которых описывает появление i -й сетевой функции в одном из k элементов. Аналогично, вектор D_j описывает отношение между j -м сетевым ресурсом и каждым элементом. Данная аппроксимация определяется как

$$U_k = W_k \Sigma_k V_k^T.$$

Мы можем теперь:

- рассмотреть, связи между сетевыми ресурсами j и q , сравнивая векторы D_j и D_q . Это обеспечивает автоматическую кластеризацию сетевых ресурсов;
- сравнить сетевые функции i и p , сравнивая векторы S_i и S_p , обеспечивая автоматическую кластеризацию сетевых функций;
- оценить рейтинги и эффективность использования сетевых ресурсов;
- сделать поиск сетевых функций и ресурсов в пространстве элементов;
- и т. д.

1.2 Модифицированная эталонная модель

Данная модель расширяет эталонную модель, вынося сетевые сервисы отдельно. То есть слайс рассматривается как объединение подмножеств сетевых ресурсов, виртуальных сетевых функций и сетевых сервисов на данное

время^{13,14, 15, 16} [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Сетевой слайсинг в этом случае представляет собой процесс создания и управления этими расширенными слайсами поверх физической сетевой инфраструктуры (рис. 2).

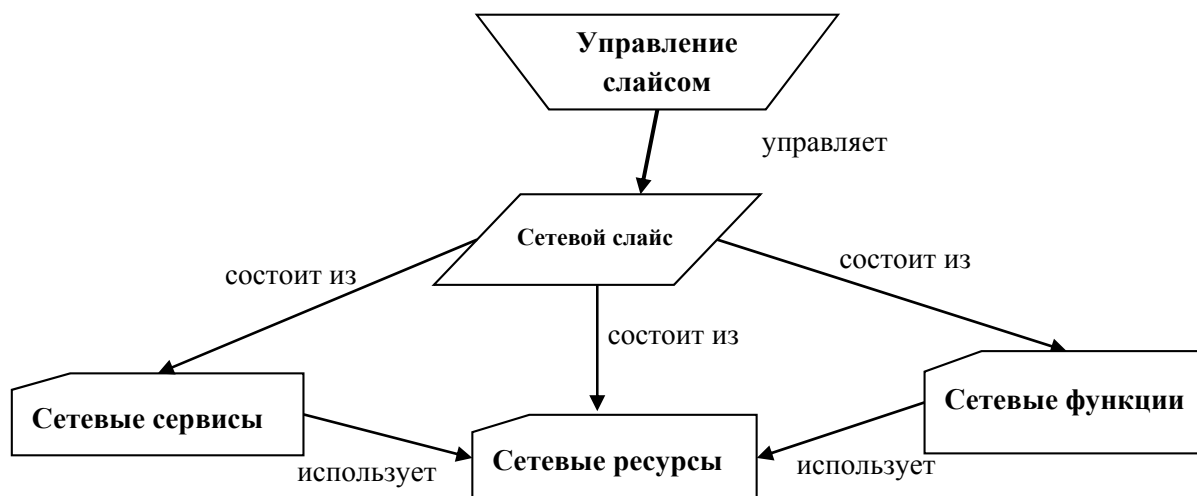


Рис. 2. Модифицированная эталонная модель слайса

Математически слайс модифицированной эталонной модели описывается следующим кортежем:

$$s = \langle MF, NR, NF, NS, R \rangle,$$

где s – сетевой слайс, MF – множество функций управления, NR – множество сетевых ресурсов, NF – множество сетевых функций, NS – множество сетевых сервисов, R – множество отношений, связывающих сетевые ресурсы и сетевые функции, а также сетевые ресурсы и сетевые сервисы.

Далее, как и раньше, можно вводить двумерные матрицы и предполагая, что существуют для них сингулярные разложения (SVD), рассуждать, как это сделано в п. 1.1.

1.3 Модель слайса с одной S/D парой

Предполагается сосуществование на основе одной физической сетевой инфраструктуры нескольких сетевых слайсов [15]. В этой модели каждый слайс обеспечивает сетевой трафик между только одним источником (*Source*) и только одним приемником (*Destination*), т. е. слайс представляется source-destination (S/D) парой.

Определение каждого слайса включает в себя однонаправленный связанный список виртуальных сетевых функций (VNFs), который определяет последовательность выполнения различных VNFs.

¹³ NGMN Network Slicing Framework.

¹⁴ 3GPP TS 28.530 v0.5.0.

¹⁵ Network Slicing Terms and Systems. ETSI European Telecommunications Standards Institute. Draft V7.

¹⁶ 3GPP TR 22.830 V0.3.0 (2018-05).

Сетевой слайсинг в таком случае представляет собой создание и управление такими слайсами поверх физической сетевой инфраструктуры. Схематически данная модель представлена на рис. 3.

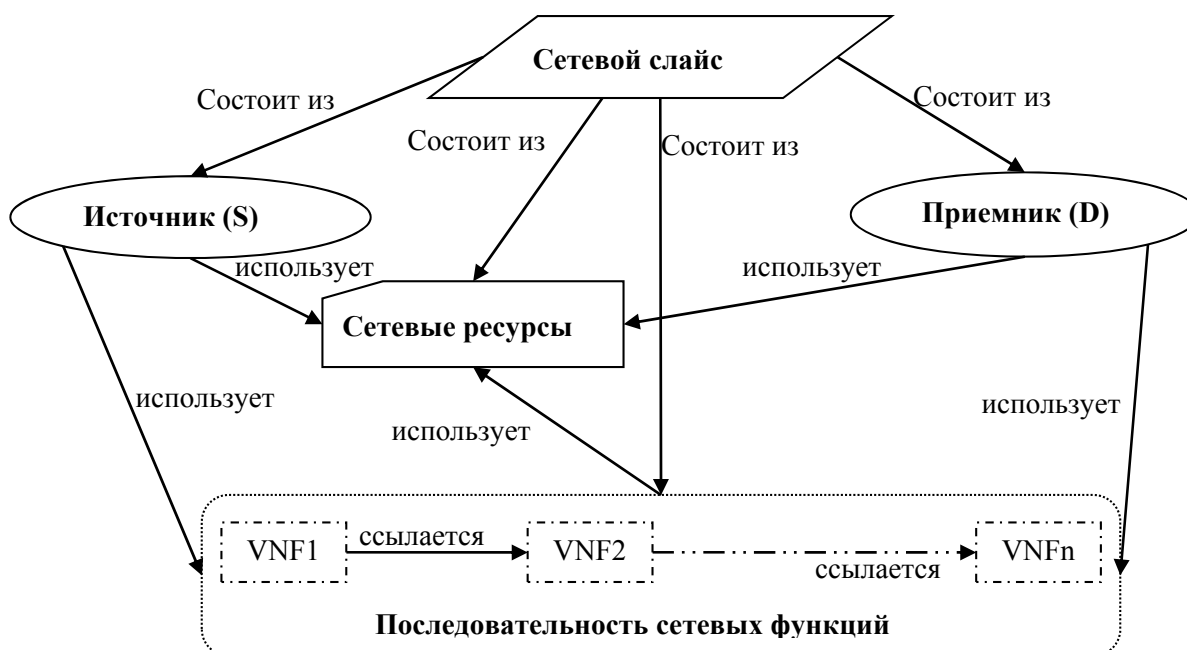


Рис. 3. Модель одиночной S/D пары

Математически слайс этой модели описывается следующим кортежем:

$$s = \langle S, D, NR, NFC, R \rangle,$$

где s – сетевой слайс, S – источник трафика, D – приемник трафика, NR – множество сетевых ресурсов, NFC – последовательность (связанный список) сетевых функций, R – множество отношений, связывающих элементы модели между собой. В этой модели существует отношение «использует», устанавливающее факт использования сетевой функцией данного сетевого ресурса. А также модель содержит отношение «ссылается», устанавливающее факт ссылки одной сетевой функции на другую. Примем, что ноль соответствует «функция не использует ресурса», а единица соответствует «функция использует ресурс»; а также примем, что ноль соответствует «данная функция не ссылается на эту», а единица соответствует «данная функция ссылается на эту», то в математической форме для отношения «использует» получим следующее отображение:

$$\text{«использует»}: NF \times NR \rightarrow \{0,1\},$$

а для отношения «ссылается» получим следующее отображение:

$$\text{«ссылается»}: NF \times NF \rightarrow \{0,1\}.$$

Далее рассуждая как в п. 1.1 составим для этих двух отношений две двумерные матрицы, в одной из которых строки соответствуют сетевым функциям,

а столбцы сетевым ресурсам; а в другой матрице и строки и столбцы соответствуют сетевым функциям. В ячейку (i, j) первой матрицы записываем 1 или 0 в зависимости от того используется или нет соответственно j -й сетевой ресурс i -й сетевой функцией. А в ячейку (i, j) второй матрицы записываем 1 или 0 в зависимости от того ссылается или нет соответственно i -я сетевая функция на j -ю сетевую функцию. Получим матрицы следующего вида:

$$M = \begin{bmatrix} b_{1,1} & \cdots & b_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m,1} & \cdots & b_{m,n} \end{bmatrix},$$

где m – количество сетевых функций, n – количество сетевых ресурсов или сетевых функций в зависимости от отношения модели, а $b_{i,j} \in \{0,1\}, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$. Для матрицы отношения «ссылается» $m = n$, т. е. у нас квадратная матрица.

Далее предполагая, что существует сингулярное разложение (SVD), работаем с этими матрицами аналогично п. 1.1.

Для сетевого слайса s этой модели также можно определить объём генерируемого им трафика и требуемую для обработки этого трафика вычислительную мощность.

Обозначим через V_s объём генерируемого слайсом трафика, а через P_s , требуемую для обработки этого трафика вычислительную мощность. Обозначим также через W_s множество путей, по которым отдельные части трафика слайса s передаются от источника (S) к приемнику (D). Для части объёма трафика, проходящей через путь $w \in W_s$, используем обозначение V_{sw} . Тогда по определению имеем:

$$V_s = \sum_{w \in W_s} V_{sw}.$$

Вычислительная мощность слайса может быть определена через вычислительные мощности составляющих его узлов маршрутизации трафика. Пусть P_{sn} – вычислительная мощность узла n , через который проходит трафик слайса s , тогда по определению имеем:

$$P_s = \sum_{n \in N_s} P_{sn}.$$

1.4 Модель слайса со многими S/D парами

В этой модели каждый слайс обеспечивает сетевой трафик между множеством источников (*Sources*) и множеством приемников (*Destinations*), т. е. слайс представляется набором source-destination (S/D) пар.

Данная модель является развитием предыдущей. Она берет модель одной S/D пары за основу и просто размножает её. Каждый слайс модели со многими S/D парами состоит из слайсов предыдущего типа (см. п. 1.2), т. е. типа одной S/D пары.

Сетевой слайсинг в данном случае представляет собой создание и управление такими слайсами поверх физической сетевой инфраструктуры. Схематически данная модель представлена на рис. 4.

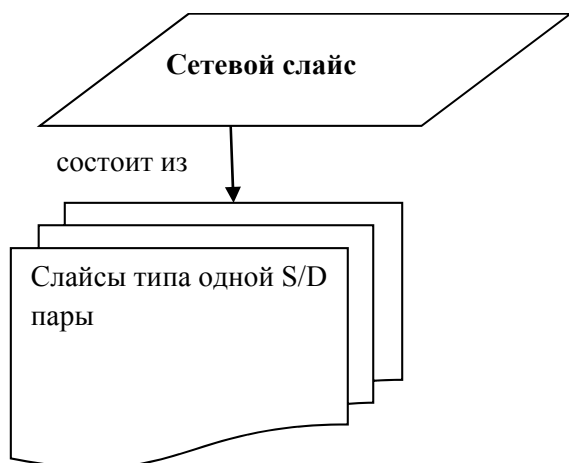


Рис. 4. Модель со многими S/D парами

Математически слайс этой модели описывается множеством слайсов одной S/D пары.

$$s = \{x \mid x \text{ это слайс типа одной S/D пары}\},$$

где s – сетевой слайс этой модели.

В данном случае, для внутренних слайсов справедливо все, что описано выше по отношению к слайсам типа одной S/D пары. Но кроме, можно рассмотреть появление нового отношения «состоит из». Это отношение указывает на состав внутренних слайсов из сетевых ресурсов и сетевых функций,

что позволяет вводить следующие два отображения для данного отношения:

- «состоит из»: $X \times NR \rightarrow \{0,1\}$.
- «состоит из»: $X \times NF \rightarrow \{0,1\}$.

Можно также рассмотреть отношения как между источниками (*sources*), приемниками (*destinations*), так и между источниками и приемниками разных внутренних слайсов.

Далее, как и раньше, можно вводить двумерные матрицы и предполагая, что существуют для них сингулярные разложения (SVD), рассуждать, как это сделано выше (см. п. 1.1 и п. 1.3).

Для сетевого слайса s этой модели также можно определить объем генерируемого им трафика и требуемую для обработки этого трафика вычислительную мощность.

Обозначим через V_s объем генерируемого слайсом трафика, через V_{si} объем генерируемого внутренним слайсом трафика, через P_s требуемую для обработки трафика основного слайса вычислительную мощность, а через P_{si} требуемую для обработки трафика внутреннего слайса вычислительную мощность. Тогда по определению имеем:

$$V_s = \sum V_{si}$$

$$P_s = \sum P_{si}$$

Из п. 1.3 знаем, что объем трафика и требуемая вычислительная мощность внутреннего слайса (слайс одной S/D пары) определяются формулами:

$$V_{si} = \sum_{w \in W_{si}} V_{siw}$$

$$P_{si} = \sum_{n \in N_{si}} P_{sin}$$

поэтому объем трафика и требуемая вычислительная мощность основного слайса (слайс многих S/D пар) определяются формулами:

$$V_s = \sum_{si} \sum_{w \in W_{si}} V_{siw}$$

$$P_s = \sum_{si} \sum_{n \in N_{si}} P_{sin}.$$

1.5 Контент-ориентированная модель

Благодаря разработке интеллектуальных мобильных устройств и различных мобильных приложений контент-ориентированный сервис стал самым популярным сервисом, который занимает сетевые ресурсы и приводит к высокой нагрузке на трафик [16]. Поскольку пользователи обычно интересуются самим контентом, а не местом хранения контента, то в качестве новой парадигмы предлагается информационно-ориентированная сеть (ICN – *information-centric networking*) [17]. В ICN пользователь может загружать свой контент в кеш маршрутизаторов сети и в то же время скачать необходимый контент из этого кеша в режиме реального времени.

В контент-ориентированном (или информационно-ориентированном) сетевом слайсинге сетевые ресурсы выделяются именно контенту. Так появляются контент-ориентированные ресурсы, которые включают ресурсы кеширования и коммуникационные ресурсы, которые используются для передачи контента.

В этой модели каждый сетевой слайс связан только с одним конкретным контентом и состоит из двух внутренних подслайсов: слайс кеширования и слайс коммуникации.

Сетевой слайсинг в этом случае представляет собой процесс создания и управления информационно-ориентированными слайсами для каждого контента поверх физической сетевой инфраструктуры. Схематически данная модель представлена на рис. 5.

В данной модели существуют только один контент-ориентированный сервис, и поэтому сетевые функции тоже только контент-ориентированные.

Математически контент-ориентированный (или информационно-ориентированный) слайс описывается следующим кортежем:

$$s = \langle s1, s2, NR, COCNR, COComNR, COCNF, COComNF, R \rangle,$$

где s – контент-ориентированный сетевой слайс, $s1$ (внутренний слайс сетевого слайса) – контент-ориентированный слайс кеширования, $s2$ (внутренний слайс сетевого слайса) – контент-ориентированный слайс коммуникации, NR – множество всех сетевых ресурсов, $COCNR \subset NR$ – множество контент-ориентированных ресурсов кеширования, $COComNR \subset NR$ – множество контент-ориентированных ресурсов коммуникации, $COCNF$ – множество контент-ориентированных функций кеширования, $COComNF$ – множество контент-ориентированных функций коммуникации, R – множество отношений, связывающих контент-ориентированные сетевые ресурсы и контент-ориентированные сетевые функции, а также внутренние слайсы и контент-ориентированные сетевые ресурсы и функции.

Далее, как везде выше, можно вводить двумерные матрицы и предполагая, что существуют для них сингулярные разложения (SVD), рассуждать, как это сделано ранее.

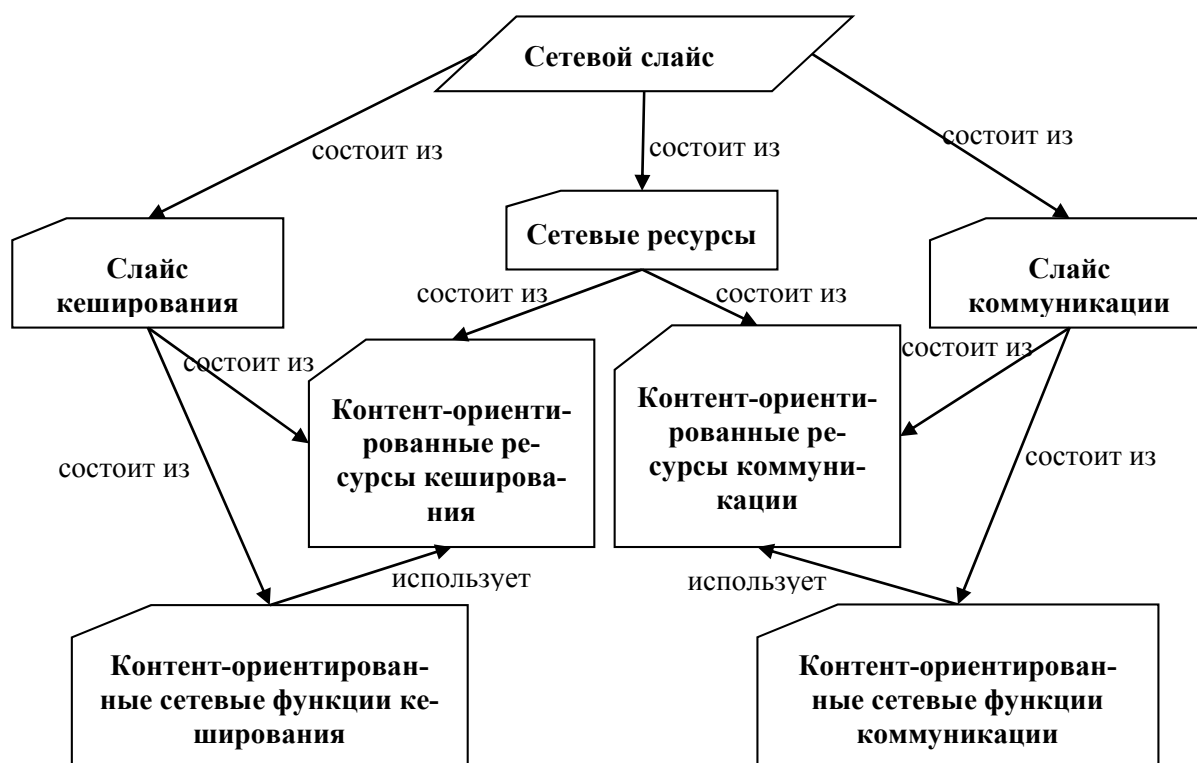


Рис. 5. Контент-ориентированная модель слайса

1.6 Номинальная модель

Рассматривается субстратная (базовая) физическая сетевая инфраструктура как неориентированный граф $G = (N_s, L_s)$, где N_s – набор узлов сети, а L_s – набор связей между узлами [24]. Узел $n_s \in N_s$ характеризуется вычислительной мощностью $c_{n_s} > 0$, измеряется в флอปс/с (flops/s); связь $l_s \in L_s$ характеризуется пропускной способностью $c_{l_s} > 0$ и измеряется в битах/с (bits/s). Пусть p_{n_s} – стоимость полного использования ресурсов субстратного узла n_s , а p_{l_s} – стоимость полного использования ресурсов субстратной связи l_s . Для каждой субстратной линии связи l_s сети, предполагается задержка распространения Δ_{l_s} , пропорциональная ее длине.

Для сетевого слайса, запрос сквозного трафика t обозначаем $d_t \in \mathbb{R}_+$, $t \in T$ должен быть маршрутизирован через набор N_v виртуальных сетевых функций. Эти виртуальные сетевые функции предоставляются субстратными сетевыми узлами. Пусть теперь:

- $\delta_{n_s}^{n_v} \in \{0, 1\}$ – способность субстратного узла n_s размещать соответствующую виртуальную функцию n_v . Аналогичным образом, виртуальные связи $l_v \in L_v$ устанавливаются между виртуальными функциями.
- $x_{n_s}^{t, n_v} \in \{0, 1\}$ – указывает, обрабатывается / маршрутизируется ли запрос трафика d_t через виртуальную функцию n_v , находящуюся на субстратном узле n_s .
- $f_{l_s}^{t, l_v} \in \{0, 1\}$ – указывает, маршрутизируется ли по физической линии связи l_s запрос трафика d_t на виртуальной линии связи l_v между виртуальными функциями $(n_{v1}, n_{v2}) \in L_v$.

Этим определением подразумевается, что трафик маршрутизируется по одному пути между источником и получателем.

Также пусть:

- $y_{n_s}^{n_v} \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ – указывают количество модулей мощности размера k , выделенное под виртуальной функции $n_v \in N_v$, находящейся на субстратном узле $n_s \in N_s$.

- $u_{n_s}, u_{l_s} \in \mathbb{R}_{[0,1]}$ – обозначают использование ресурсов физического субстратного узла и линии связи соответственно.

Тогда математическая формулировка общей задачи проектирования сетевого слайса, следующая [18]:

$$\min \sum_{n_s \in N_s} p_{n_s} u_{n_s} + \sum_{l_s \in L_s} p_{l_s} u_{l_s} \quad (1a)$$

так чтобы:

$$\sum_{n_s \in N_s} \delta_{n_s}^{n_v} x_{n_s}^{t, n_v} = 1 \quad \forall t \in T, n_v \in N_v \quad (1b)$$

$$\sum_{t \in T} d_t x_{n_s}^{t, n_v} \leq k y_{n_s}^{n_v} \quad \forall n_s \in N_s, n_v \in N_v \quad (1c)$$

$$\sum_{n_v \in N_v} k y_{n_s}^{n_v} \leq c_{n_s} u_{n_s} \quad (1d)$$

$$\sum_{(n_s, w) \in L_s} f_{(n_s, w)}^{t, l_v} - f_{(w, n_s)}^{t, l_v} = x_{n_s}^{t, n_{v1}} - x_{n_s}^{t, n_{v2}} \quad (1e)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{l_v \in L_v} d_t f_{l_s}^{t, l_v} \leq c_{l_s} u_{l_s} \quad \forall l_s \in L_s \quad (1f)$$

$$\sum_{l_s \in L_v} \sum_{l_s \in L_s} \Delta_{l_s} f_{l_s}^{t, l_v} \leq b_t \quad \forall t \in T \quad (1g)$$

$$x_{n_s}^{t, n_v}, f_{l_s}^{t, l_v} \in \{0, 1\}; y_{n_s}^{n_v} \in \mathbb{Z}_+; u_{n_s}, u_{l_s} \in \mathbb{R}_{[0,1]} \quad (1h)$$

Целевая функция (1a) минимизирует затраты на настройку сетевого слайса над субстратной сетью.

Ограничение (1e) обеспечивает сохранение потока на каждом субстратном узле $n_s \in N_s$, в то время как ограничение (1g) гарантирует, что потоки трафика не будут превышать время распространения (b_t).

1.7 Г-надежная модель

В Г-надежном подходе неопределенность в отношении требований к трафику представлена подмножеством размера Γ отклоненных требований, в отношении которых решение оптимизации должно быть надежным [18]. Γ представляет уровень защиты, где $\Gamma = 0$ означает отсутствие защиты вообще (то есть номинальное требование к трафику), в то время как наибольшее значение Γ означает, что все требования к трафику находятся на своих пиковых значениях. Здесь авторы предполагают, что требования к трафику могут быть смоделированы случайными значениями $d^t \in [\bar{d}^t - \hat{d}^t, \bar{d}^t + \hat{d}^t]$, где \bar{d}^t – номинальные значения, а \hat{d}^t – максимальное отклонение требования к трафику.

В Г-надежной модели выражение ограничений пропускной способности (1c) следующее [18]:

$$\sum_{t \in T} \bar{d}^t x_{n_s}^{t, n_v} + \max_{\substack{D \subseteq T, \\ |D| \leq \Gamma}} \sum_{t \in D} \hat{d}^t x_{n_s}^{t, n_v} \leq k y_{n_s}^{n_v}.$$

Математически Γ -надежная модель записывается следующим образом [14]:

$$\min \sum_{n_s \in N_s} p_{n_s} u_{n_s} + \sum_{l_s \in L_s} p_{l_s} u_{l_s} \quad (2a)$$

так чтобы:

$$\sum_{n_s \in N_s} \delta_{n_s}^{n_v} x_{n_s}^{t, n_v} = 1 \quad \forall t \in T, n_v \in N_v \quad (2b)$$

$$\sum_{t \in T} \bar{d}^t x_{n_s}^{t, n_v} + \sum_{t \in T} \rho_{n_s}^{t, n_v} + \Gamma \pi_{n_s}^{n_v} \leq k y_{n_s}^{n_v} \quad \forall t \in T, n_s \in N_s, n_v \in N_v \quad (2c')$$

$$\rho_{n_s}^{t, n_v} + \pi_{n_s}^{n_v} \geq \hat{d}^t x_{n_s}^{t, n_v} \quad \forall t \in T, n_s \in N_s, n_v \in N_v \quad (2c'')$$

$$\sum_{n_v \in N_v} k y_{n_s}^{n_v} \leq c_{n_s} u_{n_s} \quad (2d)$$

$$\sum_{(n_s, w) \in L_s} f_{(n_s, w)}^{t, l_v} - f_{(w, n_s)}^{t, l_v} = x_{n_s}^{t, n_{v1}} - x_{n_s}^{t, n_{v2}} \quad (2e)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{l_v \in L_v} \bar{d}^t f_{l_s}^{t, l_v} + \sum_{t \in T} \rho_{l_s}^t + \Gamma \pi_{l_s} \leq c_{l_s} u_{l_s} \quad \forall l_s \in L_s \quad (2f')$$

$$\rho_{l_s}^t + \pi_{l_s} \geq \sum_{l_v \in L_v} \hat{d}^t f_{l_s}^{t, l_v} \quad \forall t \in T, l_s \in L_s \quad (2f'')$$

$$\sum_{l_v \in L_v} \sum_{l_s \in L_s} \Delta_{l_s} f_{l_s}^{t, l_v} \leq b_t \quad \forall t \in T \quad (2g)$$

$$x_{n_s}^{t, n_v}, f_{l_s}^{t, l_v} \in \{0, 1\}; y_{n_s}^{n_v} \in \mathbb{Z}_+; u_{n_s}, u_{l_s} \in \mathbb{R}_{[0,1]} \quad (2h)$$

Ограничениями (2c'), (2c'') и (2f'), (2f'') номинальная модель преобразуется в Γ -надежную модель. Последняя модель обеспечивает высокую надежность [14], но обычно приводит к довольно консервативному и, следовательно, дорогостоящему решению. Поэтому авторы предлагают легкий надежный (по их мнению) подход в качестве альтернативы Γ -надежной модели. Рассмотрим его.

1.8 Легкая надежная модель

Когда количество требований, которые можно отклонять одновременно, увеличивается, нарушаются ограничения ресурсов [18]. Целевая функция модели заключается в минимизации этих нарушений ограничений пропускной способности.

В отличие от Γ -надежной модели, где цена на надежность была подвергнута оптимизации, легкий надежный подход учитывает верхнюю границу цены на надежность в составе модели, что позволяет проектировать сетевые слайсы с учетом затрат. Математическая формулировка данной модели, следующая:

$$\min \sum_{n_v \in N_v} \sum_{n_s \in N_s} \gamma_{n_s}^{n_v} + \sum_{l_s \in L_s} \gamma_{l_s} \quad (3a)$$

где $\gamma_{n_s}^{n_v}, \gamma_{l_s}$ используются в качестве параметров требования к трафику для балансировки задействованного ограничения.

Оптимизация выполняется так чтобы:

$$\sum_{n_s \in N_s} \delta_{n_s}^{n_v} x_{n_s}^{t, n_v} = 1 \quad \forall t \in T, n_v \in N_v \quad (3b)$$

$$\sum_{t \in T} \bar{d}^t x_{n_s}^{t, n_v} + \sum_{t \in T} \rho_{n_s}^{t, n_v} + \Gamma \pi_{n_s}^{n_v} - \gamma_{n_s}^{n_v} \leq k y_{n_s}^{n_v} \quad \forall n_s \in N_s, n_v \in N_v \quad (3c')$$

$$\rho_{n_s}^{t, n_v} + \pi_{n_s}^{n_v} \geq \hat{d}^t x_{n_s}^{t, n_v} \quad \forall t \in T, n_s \in N_s, n_v \in N_v \quad (3c'')$$

$$\sum_{n_v \in N_v} k y_{n_s}^{n_v} \leq c_{n_s} u_{n_s} \quad (3d)$$

$$\sum_{(n_s, w) \in L_s} f_{(n_s, w)}^{t, l_v} - f_{(w, n_s)}^{t, l_v} = x_{n_s}^{t, n_{v1}} - x_{n_s}^{t, n_{v2}} \quad (3e)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{l_v \in L_v} \bar{d}^t f_{l_s}^{t, l_v} + \sum_{t \in T} \rho_{l_s}^t + \Gamma \pi_{l_s} - \gamma_{l_s} \leq c_{l_s} u_{l_s} \quad \forall l_s \in L_s \quad (3f')$$

$$\rho_{l_s}^t + \pi_{l_s} \geq \sum_{l_v \in L_v} \hat{d}^t f_{l_s}^{t, l_v} \quad \forall t \in T, l_s \in L_s \quad (3f'')$$

$$\sum_{l_v \in L_v} \sum_{l_s \in L_s} \Delta_{l_s} f_{l_s}^{t, l_v} \leq b_t \quad \forall t \in T \quad (3g)$$

$$\sum_{n_s \in N_s} p_{n_s} u_{n_s} + \sum_{l_s \in L_s} p_{l_s} u_{l_s} \leq (1 + \sigma) z^* \quad (3h)$$

В этом подходе вводятся переменные $\gamma_{n_s}^{n_v}$ и γ_{l_s} (в ограничениях (3c') и (3f')), чтобы допускать нарушения ограничений пропускной способности. Кроме того, предоставляется новое ограничение (3h), которое дает верхнюю границу для ухудшения целевой функции.

В (3h) параметр z^* относится к оптимальному решению номинальной задачи (ограничения (1a) до (1h) см. п. 1.6), а σ относится к дополнительной цене, которую мы готовы заплатить за устойчивость к неопределенностям трафика.

Целевая функция (3a) минимизирует нарушение пропускной способности узла и ограничений пропускной способности канала ((3c'), (3c'') и (3f'), (3g)).

2 Сравнительный анализ моделей сетевого слайсинга

В таблице ниже приведены основные недостатки и достоинства рассмотренных выше моделей и подходов. Наше сравнение основывается на сопоставлении недостатков и преимуществ моделей и подходов между собой.

Таблица.

Недостатки и достоинства основных моделей и методов сетевого слайсинга.

Она составлена автором на основе материалов^{17, 18, 19, 20, 21}

[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]

Основные модели сетевых слайсов	Основные недостатки модели	Основные достоинства модели
Эталонная модель	<ul style="list-style-type: none"> – не представлен явно слой сетевых сервисов, – нет четкого разделения плоскостей управления и трафика, – не указаны четкие методы оптимизации большинства параметров. 	<ul style="list-style-type: none"> – модель проста в изучении, – простота реализации и развертывания. – универсальность, – возможно большое количество различных предоставляемых сервисов, – возможно большое количество участников трафика, – множество путей связи между участниками трафика, – поддерживает любой вид трафика, – высокая гибкость, – высокая масштабируемость,

¹⁷ Network Functions Virtualization (NFV). Management and Orchestration v1.1.1.

¹⁸ ETSI SIGNFV-EVE 012 (V3.1.1).

¹⁹ NGMN Network Slicing Framework.

²⁰ Network Slicing Terms and Systems. ETSI European Telecommunications Standards Institute. Draft V7.

²¹ 3GPP TR 22.830 V0.3.0 (2018-05).

Основные модели сетевых слайсов	Основные недостатки модели	Основные достоинства модели
		<ul style="list-style-type: none"> – модель устойчива к неопределенностям требований к трафику. – модель имеет и семантическое и математическое представление, – возможно введение в модель разных отношений между компонентами для разностороннего контроля и мониторинга слайсов.
Модифицированная эталонная модель	<ul style="list-style-type: none"> – не указаны четкие методы оптимизации большинства параметров. 	<ul style="list-style-type: none"> – все достоинства эталонной модели, – представлен явно слой сетевых сервисов, – явное и четкое разделение плоскостей управления и трафика, – легко преобразуется в онтологическую модель слайса.
Модель одной S/D пары	<ul style="list-style-type: none"> – в процессе обмена сообщениями участвуют только две стороны, – ограниченное количество сервисов, – жестко задана последовательность выполнения виртуальных сетевых функций. 	<ul style="list-style-type: none"> – простота реализации и развертывания, – высокая скорость, – допускает естественное разделение по отношению к различным заинтересованным сторонам, – модель устойчива к неопределенностям требований трафика, – модель имеет и семантическое и математическое представление, – возможно введение в модель разных отношений между компонентами для разностороннего контроля и мониторинга слайсов.
Модель многих S/D пар	<ul style="list-style-type: none"> – жестко задана последовательность выполнения виртуальных сетевых функций во внутренних слайсах, – не очень хорошая гибкость. 	<ul style="list-style-type: none"> – все достоинства модели одной S/D пары, – много S/D пар могут быть ассоциированы к одному слайсу, – хорошая изоляция трафика, – есть алгоритм автомасштабирования слайсов в реальном масштабе времени.
Контент-ориентированная модель	<ul style="list-style-type: none"> – модель ориентирована только на контент, т. е. обеспечивает только один сервис, – требует дополнительных ресурсов для кеширования. 	<ul style="list-style-type: none"> – модель очень надежна в информационно-ориентированных сетях, – высокая скорость, – модель имеет и семантическое и математическое представление, – возможно введение в модель разных отношений между компонентами для разностороннего контроля и мониторинга слайсов.
Номинальная модель	<ul style="list-style-type: none"> – не учитывает отклонения требований к трафику, которые могут привести к перегрузке ресурса в субстратной сети. – модель не пригодна для практической реализации, – не достаточная надежность, – требует много вычислений, – нет семантического представления. 	<ul style="list-style-type: none"> – наглядный пример постановки задачи проектирования сетевых слайсов как оптимизационная задача, – хорошая модель для обучения.

Основные модели сетевых слайсов	Основные недостатки модели	Основные достоинства модели
Г-надежная модель	<ul style="list-style-type: none"> – консервативное и дорогостоящее решение, – не учитывает затрат на надежность, – требует много вычислений, – модель не пригодна для практической реализации, – нет семантического представления. 	<ul style="list-style-type: none"> – все достоинства номинальной модели, – высокая надежность, – модель устойчива к неопределенностям требований к трафику.
Легкая надежная модель	<ul style="list-style-type: none"> – модель не пригодна для практической реализации, – требует много вычислений, – нет семантического представления. 	<ul style="list-style-type: none"> – все достоинства Г-надежной модели, – учитываются затраты на надежность в составе модели.

Выводы

В работе приводится обоснование важности и актуальности выбранной темы, проведен обзор существующих на данный момент моделей и методов сетевого слайсинга, проанализированы их особенности и отличия, приведены их преимущества и недостатки, приведена их сравнительная оценка. Показан и применен общий метод обработки сетевых слайсов на основе сингулярного разложения (SVD) в целях извлечения статистических данных о трафике, сетевых ресурсах, сетевых функциях, сетевых сервисах, корреляциях, а также в целях классификации, кластеризации, поиска и т. д. сетевых слайсов и их компонентов. Сформулированы основные предложения и рекомендации по выбору модели слайсов в зависимости от целей сетевого слайсинга.

Модели и методы сетевого слайсинга играют фундаментальную роль в проектировании и развертывании современных программно-конфигурируемых сетей связи, в частности 5G/IMT-2020 сетей. От правильного выбора той или иной модели зависит функционирование сети связи в целом. Авторы предлагают гибридизацию сетевого слайсинга, т. е. для сложных проектов современных программно-конфигурируемых сетей связи нужен не слайсинг с однотипными (одно-модельными) слайсами, а гетерогенный сетевой слайсинг, где слайсы могут быть от разных моделей. Это позволит сочетать их преимущества и исключить недостатки тем самым удовлетворяя требованиям новых приложений Интернета вещей и Тактильного Интернета.

Литература

1. Бородин А. С., Кучерявый А. Е. Сети пятого поколения как Основа цифровой экономики // Электросвязь. 2017. № 5. С. 47–51.
2. Боронин П. Н., Кучерявый А. Е. Интернет Вещей как новая концепция развития Сетей Связи // Информационные технологии и телекоммуникации. 2014. Т. 2. № 3. С. 7–30.
3. Muhizi, S., Shamshin, G. Muthanna, A., Kirichek, R., Vladyko, A., Koucheryavy, A. Analysis and Performance Evaluation of SDN Queue Model // Lecture Notes in Computer Science. 2017. Vol. 10372. pp 26–37.
4. Vladyko, A., Muthanna, A., Kirichek, R. Comprehensive SDN Testing based on Model Network // Lecture Notes in Computer Science. 2016. Vol. 9870. pp. 539–549.

5. Мухизи С., Киричек Р. В. Анализ технологии слайсинга в сетях связи пятого поколения // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Т. 5. № 4. С. 57–63.
6. Galis, A., I, Ch.-L. Towards 5G Network Slicing – Motivations and Challenges // IEEE 5G Tech Focus. 2017. Vol. 1. No. 1.
7. Rost, P. et al. Network Slicing to Enable Scalability and Flexibility in 5G Mobile Networks // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55. No. 5. pp. 72-79.
8. Ksentini, A., Nikaiein, N. Toward Enforcing Network Slicing on RAN: Flexibility and Resources Abstraction // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55. No. 6. Pp. 102–108.
9. Ferrús, R., Sallent, O., Pérez-Romero, J., Agustí, R. On 5G Radio Access Network Slicing: Radio Interface Protocol Features and Configuration // IEEE Communications Magazine. 2018. Vol. 56. Iss. 5. pp. 184–192.
10. Foukas, X., Patounas, G., Elmokashfi, A. et al. Network Slicing in 5G: Survey and Challenges // IEEE Communications Magazine. 2018. Vol. 55. Iss. 5. Pp. 94–100.
11. Sallent, O., Perez-Romero, J., Ferrus, R., Agusti, R. On Radio Access Network Slicing from a Radio Resource Management Perspective // IEEE Wireless Communications. 2017. Vol. 24. Iss. 5. pp. 166–174.
12. Ordóñez-Lucena, J., Ameigeiras, P., Lopez, D., Ramos-Munoz, J. J., Lorca, J., Figueira, J. Network Slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, Architectures, and Challenges // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55. Iss. 5. pp. 80–87.
13. Afolabi, I., Taleb, T., Samdanis, K., Ksentini, A., Flinck, H. Network Slicing and Softwarization: A Survey on Principles, Enabling Technologies, and Solutions // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. Vol. 20. Iss. 3. pp. 2429–2453.
14. Kotulski, Z., et al. Towards Constructive Approach to End-to-End Slice Isolation in 5G Networks // EURASIP Journal on Information Security. 2018.
15. Leconte, M., Paschos, G. S., Mertikopoulos, P., Kozat. U. C. A Resource Allocation Framework for Network Slicing. URL: <http://mescal.imag.fr/membres/panayotis.mertikopoulos/files/NetworkSlicing-INFOCOM.pdf>
16. Jin, H., Lu, H, Zhao, C. J. Content-Oriented Network Slicing Optimization based on Cache-Enabled Hybrid Radio Access Network // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2018.
17. Jin, H., Xu, D., Zhao, C., et al. Information-Centric Mobile Caching Network Frameworks and Caching Optimization: A Survey // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2017. Vol. 1. pp. 1–33.
18. Baumgartner, B., et al. Network Slice Embedding under Traffic Uncertainties – A Light Robust Approach. URL: <http://dl.ifip.org/db/conf/cnsm/cnsm2017/1570382829.pdf>

References

1. Borodin, A., Koucheryavy, A. Fifth Generation Networks as a Base to the Digital Economy // *Elektrosvyaz*. 2017. No 5. Pp. 47–51.
2. Boronin, P., Koucheryavy, A.: Internet of Things as a New Concept of the Telecommunication Networks Development // *Telecom IT*. 2014. Vol. 2. Iss. 3. Pp. 7–30 (in Russian).
3. Muhizi, S., Shamshin, G. Muthanna, A., Kirichek, R., Vladyko, A., Koucheryavy, A. Analysis and Performance Evaluation of SDN Queue Model // *Lecture Notes in Computer Science*. 2017. Vol. 10372. pp 26–37.
4. Vladyko, A., Muthanna, A., Kirichek, R. Comprehensive SDN Testing based on Model Network // *Lecture Notes in Computer Science*. 2016. Vol. 9870. pp. 539–549.
5. Muhizi, S., Kirichek, R.: Analysis of Network Slicing Technology for 5G Networks // *Telecom IT*. 2017. Vol. 5. Iss. 4. pp. 57–63 (in Russian).
6. Galis, A., I, Ch.-L. Towards 5G Network Slicing – Motivations and Challenges // *IEEE 5G Tech Focus*. 2017. Vol. 1. No. 1.
7. Rost, P. et al. Network Slicing to Enable Scalability and Flexibility in 5G Mobile Networks // *IEEE Communications Magazine*. 2017. Vol. 55. No. 5. pp. 72-79.
8. Ksentini, A., Nikaiein, N. Toward Enforcing Network Slicing on RAN: Flexibility and Resources Abstraction // *IEEE Communications Magazine*. 2017. Vol. 55. No. 6. pp. 102–108.

9. Ferrús, R., Sallent, O., Pérez-Romero, J., Agustí, R. On 5G Radio Access Network Slicing: Radio Interface Protocol Features and Configuration // IEEE Communications Magazine. 2018. Vol. 56. Iss. 5. pp. 184–192.
10. Foukas, X., Patounas, G., Elmokashfi, A. et al. Network Slicing in 5G: Survey and Challenges // IEEE Communications Magazine. 2018. Vol. 55. Iss. 5. pp. 94–100.
11. Sallent, O., Perez-Romero, J., Ferrus, R., Agusti, R. On Radio Access Network Slicing from a Radio Resource Management Perspective // IEEE Wireless Communications. 2017. Vol. 24. Iss. 5. pp. 166–174.
12. Ordonez-Lucena, J., Ameigeiras, P., Lopez, D., Ramos-Munoz, J. J., Lorca, J., Folgueira, J. Network Slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, Architectures, and Challenges // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55. Iss. 5. pp. 80–87.
13. Afolabi, I., Taleb, T., Samdanis, K., Ksentini, A., Flinck, H. Network Slicing and Softwarization: A Survey on Principles, Enabling Technologies, and Solutions // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. Vol. 20. Iss. 3. pp. 2429–2453.
14. Kotulski, Z., et al. Towards Constructive Approach to End-to-End Slice Isolation in 5G Networks // EURASIP Journal on Information Security. 2018.
15. Leconte, M., Paschos, G. S., Mertikopoulos, P., Kozat. U. C. A Resource Allocation Framework for Network Slicing. URL: <http://mescal.imag.fr/membres/panayotis.mertikopoulos/files/NetworkSlicing-INFOCOM.pdf>
16. Jin, H., Lu, H, Zhao, C. J. Content-Oriented Network Slicing Optimization based on Cache-Enabled Hybrid Radio Access Network // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2018.
17. Jin, H., Xu, D., Zhao, C., et al. Information-Centric Mobile Caching Network Frameworks and Caching Optimization: A Survey // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2017. Vol. 1. pp. 1–33.
18. Baumgartner, B., et al. Network Slice Embedding under Traffic Uncertainties – A Light Robust Approach. URL: <http://dl.ifip.org/db/conf/cnsm/cnsm2017/1570382829.pdf>

Мухизи Самуэль

– аспирант, СПбГУТ, Санкт-Петербург,
193232, Российская Федерация,
samno1@yandex.ru

Киричек Руслан Валентинович

– доктор технических наук, доцент, СПбГУТ,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация,
kirichek@sut.ru

Muhizi Samuel

– Postgraduate student, SPbSUT, St. Petersburg,
193232, Russian Federation, samno1@yandex.ru

Kirichek Ruslan

– Doctor of Engineering Sciences, Associate
Professor, SPbSUT, St. Petersburg, 193232,
Russian Federation, kirichek@sut.ru