

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра системного анализа и  
автоматического управления

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ОБЛАЧНОЙ СЕТИ  
РАДИОДОСТУПА**

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 2 курса 271 группы  
направления 09.04.01 — Информатика и вычислительная техника  
факультета КНиИТ  
Сербина Владислава Андреевича

Научный руководитель  
доцент, к. ф.-м. н.

\_\_\_\_\_

Е. П. Станкевич

Заведующий кафедрой  
к. ф.-м. н., доцент

\_\_\_\_\_

И. Е. Тананко

Саратов 2024

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Традиционные архитектуры сетей сотовой связи сталкиваются с огромными проблемами из-за увеличения трафика мобильной передачи данных, ограниченной доступности спектра частот и высокого энергопотребления. В свете этого, отрасли, а также исследовательские сообщества находятся в постоянном поиске фундаментальных достижений в разработке новых сетевых архитектур для поддержки растущего пользовательского спроса при одновременном снижении капитальных и эксплуатационных расходов для сетевых операторов. Архитектура облачной сети радиодоступа (C-RAN) – это такая концепция смены парадигмы для сотовых сетей, которая активно рассматривается в качестве основного кандидата для будущих сотовых систем 5G.

В качестве инструмента для анализа реальных объектов в работе используется теория массового обслуживания. Данное направление получило интенсивное развитие благодаря эффективности его применения для моделирования сложных дискретных стохастических систем.

Широкое практическое применение систем массового обслуживания обусловлено удобством и простотой отображения структуры систем, которые они моделируют. В настоящее время системы массового обслуживания обширно используются в качестве моделей реальных систем при решении задач исследования, проектирования и оптимизации вычислительных систем и сетей передачи данных, производственных и транспортных систем. Также на основе аналитических моделей, для исследования систем создаются имитационные модели. Имитационное моделирование позволяет описывать модели систем через процессы или события, которые в них происходят.

**Цель магистерской работы** — исследование модели облачной сети радиодоступа.

Поставленная цель определила **следующий задачи**:

1. подобрать, изучить и проанализировать литературу по основам построения и принципам функционирования облачной сети радиодоступа,
2. изучить математические модели облачной сети радиодоступа,
3. разработать имитационную модель облачной сети радиодоступа,
4. с помощью разработанной имитационной модели провести исследование зависимости характеристик модели от ее параметров.

**Методологические основы** облачных сетей радиодоступ, имитационного моделирования и, в частности, дискретно-событийного имитационного моделирования представлены в работах V. Q. Rodriguez, F. Guillemin, N. Nikaiein, M. K. Marina, S. Manickam, A. Dawson, R. Knopp, P. Шеннон [1-3].

**Практическая значимость магистерской работы.** В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была разработана имитационная модель облачной сети радиодоступа. С помощью разработанной имитационной модели можно исследовать зависимости характеристик модели облачной сети радиодоступа от ее параметров.

**Структура и объем работы.** Магистерская работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объем работы — 67 страницы, из них 54 страницы — основное содержание, включая 12 рисунков, список использованных источников информации — 35 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первый раздел «Облачные сети радиодоступа»** посвящен описанию основных понятий облачных сетей радиодоступа.

В подразделе 1.1 описаны основные компоненты и принципы функционирования облачной сети радиодоступа. Cloud RAN – архитектура мобильной сети, которая хорошо подходит для решения проблемы роста расходов на сеть доступа. Данная задача соответствует общей концепции виртуализации сетевых функций (NFV), которая предполагает замену аппаратных сетевых функций, работающих на специализированном оборудовании, на открытые программные приложения, функционирующие на общедоступных коммерческих серверах (COTS), развёрнутых в облачной среде. Таким образом, сетевые операторы могут создавать экземпляры виртуальных сетевых функций (VNFs) с высокой скоростью и эффективностью в различных сетевых местоположениях в соответствии с требованиями заказчика.

В подразделе 1.2 приведен обзор работ, посвященных изучению облачных сетей радиодоступа.

В подразделе 1.3 представлен обзор математических моделей, применяемых для анализа облачных сетей радиодоступа. В качестве моделей для анализа используются системы массового обслуживания  $M^{[X]}/M/C$  и  $M/G/C$ .

С помощью моделей оцениваются характеристики реальных объектов и решаются задачи оптимизации потребления ресурсов.

**Второй раздел «Математическая модель облачной сети радиодоступа»** посвящен описанию математической модели рассматриваемой системы.

В подразделе 2.1 описывается общий архитектурный подход и функционирование модели облачной сети радиодоступа [1]. С точки зрения моделирования, каждая антенна (RRH) представляет собой источник требований в направлении восходящей линии связи, в то время как для направления нисходящей линии связи требования поступают из базовой сети, которая обеспечивает подключение к внешним сетям (например, интернету или другим сервисным платформам). Затем для каждого сектора сотовой связи создаются две очереди заданий, по одной в каждом направлении. Поскольку ограничение времени на обработку субкадров нисходящих каналов составляет половину ограничения для восходящих каналов, они могут выполняться отдельно на выделенных процессорных блоках. Однако выделение процессоров для каждой очереди не является эффективным способом использования ограниченных ресурсов.

В данной работе рассматривается система C-RAN, в которой размещено 100 базовых станций сети радиодоступа ( $eNBs$ ), где каждая из них имеет полосу пропускания 20 МГц. Все  $eNBs$  имеют одну антенну (т.е. работают с одним входом и одним выходом (конфигурация SISO)) и используют дуплекс с частотным разделением, режим передачи (FDD). Антенны ( $eNBs$ ) распределены вокруг вычислительного центра в радиусе 100 км. Далее сосредоточимся на анализе функции декодирования, выполняемой во время обработки по восходящим линиям связи (от пользовательского оборудования в вычислительный центр), из-за ее недетерминированного поведения, а также потому, что она является наибольшим потребителем вычислительных ресурсов из всех функций  $BBU$  [2]. Схематическое представление, рассматриваемой восходящей линии связи и блока декодирования с параллельной обработкой входящих пакетов данных, представлено на рисунке 1.

Чтобы представить поведение облачной системы с использованием модели  $M^{[X]}/M/C$ , мы вводим в систему массового обслуживания статистические параметры [3]. Фиксируется поведение функции декодирования в мно-

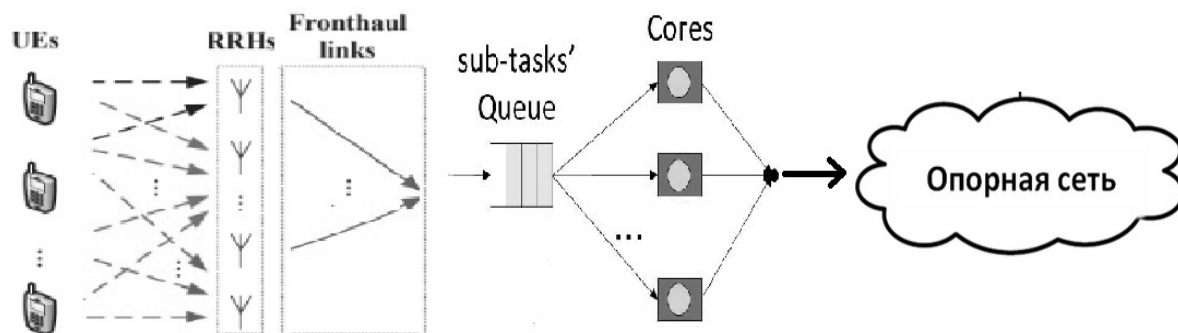


Рисунок 1 – Схема входного потока и блока декодирования  $C - RAN$

гоядерной системе, выполняющей параллелизм с помощью  $UEs$ . Рассмотрим следующие параметры:

- Среднее время обслуживания требования декодирования  $E[S]$  равно 281 микросекунде. Каждый пакет декодирования соответствует данным одного UE - пользовательского устройства;
- Среднее количество требований декодирования, требующих обслуживания одновременно, т.е. средний размер пакета, задается через  $E[B] = 5$ . Данная характеристика может быть представлена геометрическим распределением с параметром  $q = 1 - 1/(E[B])$ . Размеры пакетов находятся в интервале  $[1; 16]$ ;
- Среднее время между поступлением пакетов составляет 10 микросекунд. Каждый  $eNB$  генерирует основную часть пакетов декодирования каждую миллисекунду. Среднее время между поступлениями вычисляется путем деления периодичности подкадров на количество  $eNBs$ ;
- Временной бюджет (крайний срок) для обработки восходящей линии связи задается равным  $\delta = 2000$  микросекундам.

Подраздел 2.2 посвящен анализу модели облачной сети радиодоступа. Модель  $M^{[X]}/M/C$  может быть разумно использована для оценки времени обработки подкадра в облачной архитектуре, основанной на многоядерной платформе. В то время как время пребывания произвольного требования в партии было проанализировано в [6], время пребывания всей партии, по-видимому, получило меньше внимания в технической литературе. В этом подразделе приводятся преобразования Лапласа для этой величины; это в конечном итоге позволяет получить асимптотическую оценку вероятности

превышения большого порогового значения.

**Третий раздел «Имитационная модель облачной сети радиодоступа»** посвящен обзору средств имитационного моделирования, принципам дискретно-событийного моделирования, описанию алгоритма имитационной модели и структуре программы [4].

В подразделе 3.1 приведен обзор средств имитационного моделирования. Для построения имитационных моделей существует множество программных средств. Их можно разделить на универсальные средства, подразумевающие реализацию модели на языках программирования общего назначения, и специализированные средства или системы моделирования, включающие предметно-ориентированные сетевые симуляторы [5].

В подразделе 3.2 описаны принципы дискретно-событийного моделирования. Имитационное моделирование систем массового обслуживания основано на дискретно-событийном моделировании. Оно подразумевает построение модели, которая отражает развитие исследуемой системы в течение некоторого времени. При этом в процессе функционирования состояния переменных мгновенно изменяются в конкретные моменты времени. Система может изменяться только в исчислимое количество моментов времени. В эти моменты времени происходят некоторые события. Само событие может быть определено как мгновенное возникновение, которое воздействует на состояние системы, изменяя его.

Подраздел 3.3 содержит описание алгоритма построенной имитационной модели. Алгоритм состоит из следующих блоков:

- алгоритм поступления требований в систему,
- алгоритм начала обслуживания,
- алгоритм управляющей программы,
- алгоритм завершения обслуживания.

Подраздел 3.4 содержит основные вероятностно-временные характеристики имитационной модели [6]. После окончания обслуживания каждого требования, его общая длительность  $\tau$  пребывания в системе записывается в суммирующую переменную, содержащую аналогичную характеристику для

всех обслуженных требований. С помощью выражения

$$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^Q \tau_i}{Q},$$

где  $Q$  — количество обслуженных требований, вычисляется оценка среднего времени пребывания требования в системе.

Также оценивается среднее число требований в системе, как

$$\bar{n} = \sum_{i=0}^V np_n,$$

где  $n$  — количество требований,  $p_n$  — вероятность пребывания в системе  $n$  требований.

В подразделе 3.5 описана структура реализованной программы. Для реализации использовался язык программирования Python и модули *math*, *numpy* и *json*. Программа позволяет вычислять оценки следующих вероятностно-временных характеристик рассматриваемой облачной сети радиодоступа, моделируемой, системой массового обслуживания типа  $M^{[x]}/M/C$  при заданных параметрах [7]:

- стационарное распределение вероятностей состояний системы  $\bar{p}$ ,
- среднее времени прибытия требования  $\bar{u}$  в системе,
- среднее число фрагментов  $\bar{n}'$  в системе.

**Четвертый раздел «Исследование модели»** посвящен результатам, полученным в ходе эксперимента.

В качестве математической модели  $C - RAN$ , рассматривается система массового обслуживания  $M^{[x]}/M/C$ .

Параметры системы определены следующим образом:

- длительности интервалов между поступающими пакетами имеют экспоненциальное распределение,
- интенсивность поступления  $\lambda = 1/10$ ,
- длительность обслуживания имеет экспоненциальное распределение,
- интенсивность обслуживания  $\mu = 1/281$ ,
- число обслуживающих приборов  $C = 150$ ,
- среднее число фрагментов разбиения пакета  $\bar{b} = 5$ ,

— максимальное время нахождения пакета в системе, равно 2000 микросекунд.

**Результаты моделирования системы массового обслуживания:**

- математическое ожидание длительности пребывания пакета в системе  $\bar{u} = 599,37$ ,
- математическое ожидание количества фрагментов в системе  $\bar{n} = 59,22$ ,
- количество пакетов данных, получивших отказ от обслуживания, не превышает 6% от общего объёма, рисунок 2.

```
Всего пакетов получено: 1000235
Обслужено пакетов: 941000
Потеряно пакетов: 59235
Среднее время пребывания пакета в системе: 599.37

Всего фрагментов получено: 5001175
Обслужено фрагментов: 4705000
Потеряно фрагментов: 296175
Проверка оценки стационарного распределения: 0.9999761572186812
Среднее число фрагментов в системе: 59.22
```

Рисунок 2 – Вывод программы

Была исследована зависимость математического ожидания длительности пребывания пакета данных в системе  $\bar{u}$  от изменения интенсивности входящего в систему потока  $\lambda$ . График зависимости представлен на рисунке 3.

Также в ходе эксперимента была рассмотрена зависимость вероятности отказа от количества обслуживающих прибор, рисунок 4. Опираясь на данный график можно выбрать оптимальное количество обслуживающих приборов для исследуемой системы. Видно, что когда  $C \geq 150$  вероятность отказа находится на приемлемом уровне и практически не изменяется, следовательно, оптимальное количество обслуживающих приборов при заданных характеристиках, примерно, 150.



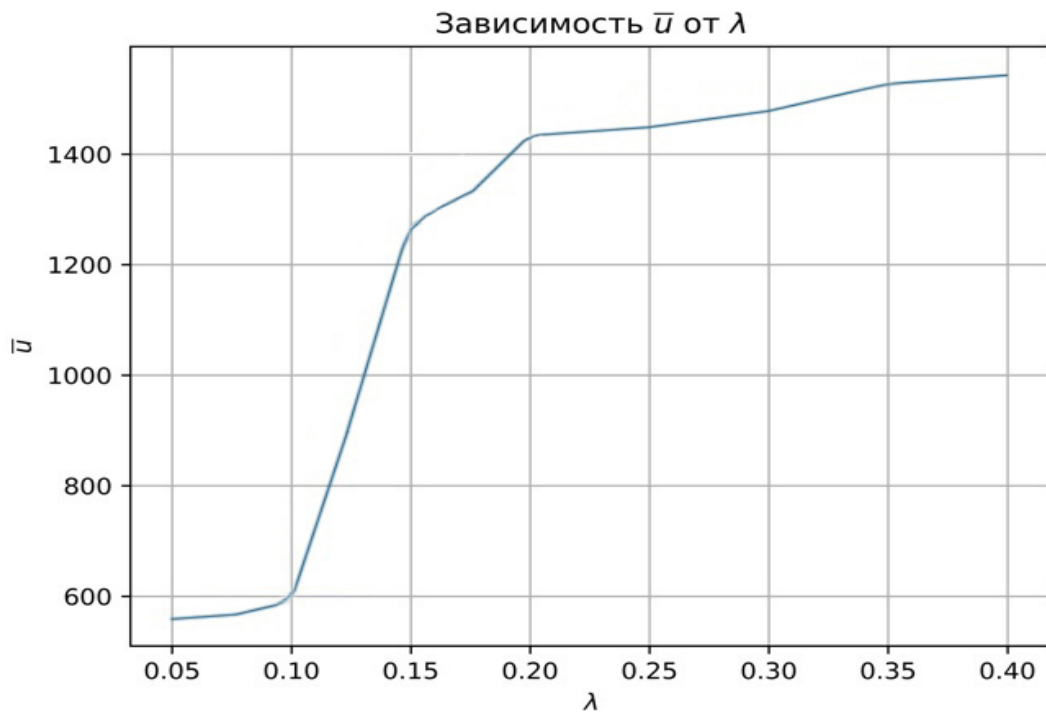


Рисунок 3 – Зависимость  $\bar{u}$  от  $\lambda$

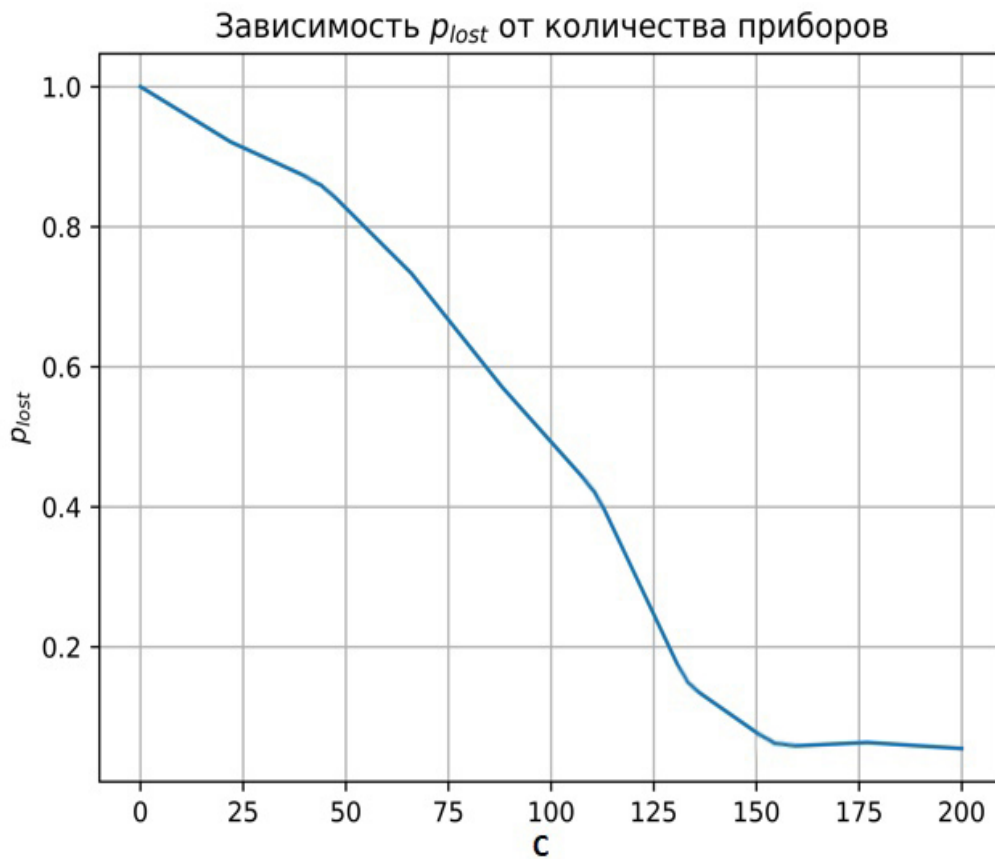


Рисунок 4 – Зависимость  $p_{lost}$  от  $C$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

C-RAN может стать не просто частью проекта 5G. Облачные структуры способны существенно упростить процесс внедрения новых стандартов радиосвязи и обеспечить оптимальный экономический результат всем участникам телекоммуникационного рынка.

Разработана имитационная модель облачной сети радиодоступа. С помощью разработанной имитационной модели проведено исследование зависимости характеристик модели облачной сети радиодоступа от ее параметров.

**Отдельные части магистерской работы были представлены на конференции:**

Сербин, В. А. Исследование модели облачной сети радиодоступа, Студенческая научная конференция факультета КНиИТ, Саратов, 3 мая 2024.

### **Основные источники информации:**

1. Rodriguez, V. Q. Cloud-RAN modeling based on parallel processing / V. Q. Rodriguez, F. Guillemin // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2018. – Vol. 36, no. 3. – Pp. 457–468.
2. Rodriguez, V. Q. On dimensioning cloud-RAN systems / V. Q. Rodriguez, F. Guillemin // Proceedings of the 11th EAI International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools. – Venice: ACM, 2017. – Pp. 132-139.
3. Nikaein, N. Processing Radio Access Network Functions in the Cloud / N. Nikaein // Proceedings of the 6th International Workshop on Mobile Cloud Computing and Services. – Paris: ACM, 2015. – Pp. 36-43.
4. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. / Р. Шеннон. – М.: Издательство «Мир», 1978. – 210 с.
5. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. // Классика CS. 3-е изд. СПб.: Питер: Киев: Издательская группа BHV, 2004. 847 с.
6. Nelson, R. Performance analysis of parallel processing systems / R. Nelson, D. Towsley, A.N. Tantawi // IEEE Transactions on Software Engineering. – 1988. – Vol. 14, no. 4. – Pp. 532-540.
7. Khatibi, S. Modelling and implementation of virtual radio resources management for 5G Cloud RAN / S. Khatibi, L. S. Ferreira, L. M. Correia, N. Nikaein // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2017.

– Vol. 20, no. 3. – Pp. 378–387.