

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой системного анализа и
автоматического управления

к. ф.-м. н., доцент

_____ И. Е. Тананко

ОТЧЕТ О ПРАКТИКЕ

студента 1 курса 171 группы факультета КНиИТ
направления 09.04.01 — Информатика и вычислительная техника
Сербина Владислава Андреевича

вид практики: производственная

кафедра: системного анализа и автоматического управления

курс: 1

семестр: 1

продолжительность: рассредоточенная, с 01.09.22 по 31.12.22, с 09.01.23 по
15.01.23

Руководитель практики,

доцент, к. ф.-м. н.

Е. П. Станкевич

Саратов 2023

Тема практики:
«Научно-исследовательская работа»

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Основные понятия облачной сети радиодоступа	5
2 Изучение облачной сети радиодоступа	8
3 Основные принципы функционирования облачной сети радиодоступа ...	11
3.1 Виртуальные функции.....	11
3.2 Параллельная обработка	13
4 Моделирование C-RAN системой массового обслуживания.....	16
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	19
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	20

ВВЕДЕНИЕ

Традиционные архитектуры сетей сотовой связи сталкиваются с огромными проблемами из-за беспрецедентного 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 также активно рассматривается в качестве основного кандидата для будущих сотовых систем 5G.

Целью данной работы является изучение предметной области будущей научно-исследовательской работы, подбор и анализ литературы связанной с темой облачных сетей радиодоступа.

Работа состоит из трех разделов.

В первом разделе рассматриваются основные понятия облачной сети радиодоступа, а именно, такие понятия как базовый блок, виртуализация сетевых функций и многие другие.

Во втором разделе представлен обзор работ, в которых рассматриваются разные аспекты облачной сети радиодоступа.

В третьем разделе говорится об основных принципах функционирования C-RAN.

1 Основные понятия облачной сети радиодоступа

Cloud RAN – архитектура мобильной сети, которая хорошо подходит для решения проблемы роста расходов на сеть доступа, что до сих пор является одной из главных проблем в бизнесе операторов связи. Кроме того, эта новая концепция позволяет сетевым операторам предлагать инновационные услуги и разворачивать виртуализированные сети по требованиям заказчика. Эта задача соответствует общей концепции виртуализации сетевых функций (*NFV*) [1], которая как раз и состоит в замене сетевых функций, работающих аппаратно на выделенном частном оборудовании, открытыми программными приложениями, работающими на общих коммерческих готовых серверах (*COTS*) на облачных платформах. 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 [2].

Основополагающий принцип виртуализации заключается в размещении сетевых функций на одной или нескольких виртуальных машинах (*VMs*). *VNFs* развертываются поверх виртуализированной инфраструктуры, которая может охватывать более одного физического местоположения и даже инфраструктуру облачных вычислений. В идеале *VNFs* должны располагаться там, где они наиболее эффективны с точки зрения производительности и стоимости. *VNFs* могут размещаться в центрах обработки данных, сетевых узлах или даже на устройствах конечных пользователей в зависимости от требуемой производительности (в частности, задержки) и ресурсов (пропускная способность, хранение и вычисления).

Однако облачные технологии и коммерческое использования сетевых функций порождают новые проблемы, особенно при виртуализации сетей беспроводного доступа. Это, в частности, относится к *Cloud-RAN* (*C-RAN*), целью которой является реализация обработки радиосигналов в базовых блоках (*BBU*) с использованием программного обеспечения. В настоящее время изучается несколько функциональных разделений, наиболее амбициозным из них, безусловно, является полная централизация функций *BBU* [3]. Эта архитектура основана на распределенных антеннах и базовых блоках (*BBUs*), сгруппированных в центральном офисе (*CO*). *BBU* включает в себя критически важные функции нижнего уровня, такие как кодирование и декодирование каналов,

модуляция и демодуляция, а также планирование радиосвязи, управление радиоканалом и сравнение данных. Гибкое перераспределение ресурсов между базовыми станциями сети доступа позволяет лучше адаптироваться к временным и сезонным изменениям трафика.

Например, в дневные часы большинство абонентов находятся на работе в бизнес-центрах, различных организациях и на предприятиях ближе к центру города. В рабочие часы трафик в этой области увеличивается, и там требуется больше ресурсов *BBU*. В жилых зонах в рабочие часы трафик невысок. Напротив, в вечернее, ночное и утреннее время, концентрация трафика пользователей в жилых зонах больше, чем в центре города.

При традиционном построении сети доступа, для каждой зоны потребуется количество ресурсов *BBU* из расчёта на максимальный трафик в определённые часы и дни недели. В другое время ресурсы *BBU* недозагружены. Это приводит к росту стоимости владения сетью радиодоступа, поскольку количество *BBU* рассчитывается из максимальных значений.

Полностью централизованная архитектура может обеспечить многосоставное радиосвязное взаимодействие и управление помехами, что обеспечит как лучшую эффективность использования спектра частот, так и пользовательский опыт [4, 5]. Однако полная централизация должна соответствовать строгим требованиям к задержке, определенным стандартами Long Term Evolution (LTE) [6]. Фактически, обработка в базовом блоке (*BBU*) должна быть завершена в течение 1 миллисекунды в направлении нисходящего канала и 2 миллисекунд в направлении восходящего канала. Как следствие, высокопроизводительные процессоры и их эффективное использование являются обязательными условиями при построении *C-RAN*.

Многие усилия уже были направлены на внедрение традиционной сети радиодоступа (*RAN*) с помощью технологии виртуализации сетевых функций. Некоторые исследования показывают, что функции, принадлежащие физическому уровню, особенно функция кодирования канала, потребляют наибольшее количество времени обработки и вычислительных ресурсов [7]. Таким образом, помимо требования к высокопроизводительным процессорам, можно рассматривать методы параллельного программирования для обеспечения гибкости, применяемой *NFV* [8, 9]. Более того, одна из основных проблем производительности *C-RAN* связана с недетерминированным поведением функции коди-

рования канала, т.е. изменчивостью времени, которое требуется для выполнения процесса кодирования и декодирования. Основная причина нестабильности обусловлена характеристиками радиоканала каждого пользовательского оборудования (UE), подключенного к eNodeB (eNB), требуемой скоростью передачи данных на UE, а также объемом трафика в ячейке.

2 Изучение облачной сети радиодоступа

C-RAN, также называемая централизованной RAN, была впервые представлена China Mobile Research Institute в 2010 году [10]. С тех пор в литературе появились различные исследования и платформы для проведения испытаний. Безусловно, главной проблемой этого перспективного подхода, основанного на программном обеспечении, является требуемое поведение виртуальных функций RAN в реальном времени. Эта проблема была в значительной степени изучена и проанализирована промышленностью [5, 11] и сетевыми операторами [4, 8, 12], а также академические исследователи, в частности, благодаря разработке нескольких решений с открытым исходным кодом, таких как OAI [13] и Amarisoft.

Анализ производительности виртуализированных функций RAN при использовании OAI и нескольких сред виртуализации, таких как виртуальная машина на основе ядра (KVM), Docker и контейнера Linux (LXC), был представлен в [7]. Результаты показывают, что направление восходящей связи является доминирующей нагрузкой на обработку и требует разделения и/или ускорения. Функции кодирования и декодирования являются наиболее трудоемкими и отличаются высокой вариабельностью. Также обнаружено, что подходы, основанные на контейнерах, обеспечивают несколько лучшую производительность, чем подходы, основанные на гипервизоре.

Первые попытки сократить время выполнения функций RAN были представлены в [14]. Авторы предлагают структуру, которая разбивает набор BBU на группы, которые одновременно обрабатываются на общей однородной вычислительной платформе. Эта работа показывает, что централизованная архитектура потенциально может привести к экономии вычислительных ресурсов по меньшей мере на 22% за счет использования различий в нагрузке на обработку между eNBs (BBUs). Прирост производительности при выполнении принципов совместного использования ресурсов и статистического мультиплексирования также показан в [15].

Статья [16] посвящена описанию типов мобильных облачных вычислений и описанию новой технологии, которая обеспечивает создание вычислительных ресурсов, хранилищ и сетевых ресурсов на границах мобильной сети радиодоступа (RAN). В качестве метода исследования приводится анализ существующих типов облачных вычислений, а также особенность мобильных граничных

вычислений. В качестве результатов приведено краткое описание некоторых проблем, связанных с разработкой и реализацией сетей связи пятого поколения. Одной из наиболее сложных проблем является децентрализация облачных вычислений и создание вычислительных возможностей на границах сотовой сети, также исследуются основные функции и преимущества технологии МЕС для сотовой системы 5G. На основе данной архитектуры можно достичь требуемой задержки передачи данных в сетях 5G, что считается основной проблемой при реализации жизненно важных приложений.

В рамках [3] рассматривается реализация облачной сети радиодоступа (C-RAN) на централизованной многоядерной системе. Изучается две стратегии планирования параллельно выполняемых заданий BBU, где вычислительные ресурсы могут быть распределены либо по пользовательским запросам (UE), либо по блокам кода (CB). Используя данные, полученные при запуске RAN-кода с открытым исходным кодом (а именно, OAI), авторы внедряют модель пакетной очереди (многоприборная система $M^{[X]}/M/k$) для оценки необходимой вычислительной мощности в центре обработки данных при соблюдении жестких требований к задержке в нисходящем и восходящем каналах связи. Результаты полученные в рамках исследования дают ценные рекомендации по определению размера и разворачиванию облачных систем.

Обратим внимание, что системы реального времени и параллельной обработки широко изучались в литературе в течение многих лет. Большая часть усилий была направлена на улучшение стратегий планирования как в однопроцессорных, так и в многопроцессорных моделях, например, в моделях "Earliest Deadline First"(EDF) и "Processor Sharing"(PS). Тем не менее, единственный способ повысить производительность C-RAN с точки зрения задержки, избегая при этом накладных расходов, – это разложить тяжелые длинные задачи на параллельно выполняемые небольшие задания [9, 12].

Наиболее популярные варианты использования C-RAN основаны на областях с огромным спросом, таких как городские районы с высокой плотностью населения с макро и микро ячейками, общественные места и т.д. Следующие из них в настоящее время рассматриваются академическими кругами и промышленностью:

- *Разделение сети* предлагает разумный способ сегментации сети и поддержки индивидуальных сервисов, например, частной мобильной сети. Срезы

могут быть развернуты с определенными характеристиками с точки зрения качества обслуживания (QoS), задержки, пропускной способности, безопасности, доступности и т.д. Этот сценарий и строгие требования к производительности C-RAN изучены в [17].

- *Сети 5G с несколькими арендаторами* работают с различными операторами виртуальных сетей мобильной связи (VNOs), различными соглашениями об уровне обслуживания (SLA) и технологиями радиодоступа (RATs). Глобальный сценарий 5G C-RAN приведен в [18]. Авторы предлагают централизованное управление виртуальными радиоресурсами (VRRMs), так называемый “V-RAN enabler” для организации глобальной среды. Объект управления оценивает доступные радиоресурсы на основе скорости передачи данных различных технологий доступа и распределяет их между различными службами в сети с помощью планировщика OAI.

- *Сосуществование разнородных функциональных подразделений* для поддержки полной или частичной централизации функций сети RAN. Углубленный анализ прироста производительности при выполнении различных функциональных разделений представлен в [11]. Результаты показывают, что производительность снижается, когда функции RAN нижнего уровня сохраняются рядом с антеннами. В этой работе рекомендуется полная централизация, чтобы воспользоваться преимуществами “физической” межсотовой связи для развертывания передовых технологий многоточечного взаимодействия для повышения качества обслуживания (QoE).

- *Интеллектуальные сети*, которые позволяют автоматизировать развертывание eNBs для предоставления дополнительной пропускной способности в режиме реального времени [18]. Эти интеллектуальные процедуры приносят огромную экономическую выгоду сетевым операторам, которые сегодня массово инвестируют в расширение пропускной способности своей сети.

Другие растущие облачные приложения были кратко описаны в [11]. Она включает в себя массовые приложения Интернета вещей (IoT), широкополосную связь, чувствительную к задержкам (например, виртуальная реальность, видеоповтор на стадионах и т.д.), приложения с низкой задержкой и высокой надежностью, такие как дорожные ассистенты и покрытие железных дорог, поскольку C-RAN обеспечивает быструю передачу для UEs, движущихся с высокой скоростью.

3 Основные принципы функционирования облачной сети радиодоступа

C-RAN нацелена на централизацию обработки радиосигналов в базовом блоке (BBU), поступающих от различных антенн в центральный офис (CO) или, в более общем плане, в облако. Другими словами, C-RAN разъединяет антенны (удаленные радиопередатчики (RRHs)) и блоки обработки сигналов (BBU). C-RAN можно рассматривать как BBU-пул, который обрабатывает десятки или даже сотни станций (eNBs). Станция обычно состоит из 3 секторов, каждый из которых оснащен RRH. RRH имеет два радиочастотных тракта для нисходящих и восходящих радиосигналов, которые передаются по оптоволоконным линиям связи в пул BBU.

3.1 Виртуальные функции

VNF в C-RAN — это не что иное, как виртуализированный BBU (vBBU), который программно реализует все сетевые функции, принадлежащие трем нижним уровням стека протоколов LTE. Эти функции в основном касаются таких функций PHY, как генерация сигнала, IFFT /FFT, модуляция и демодуляция, кодирование и декодирование, планирование радиосвязи, объединение /сегментация протокола управления радиоканалом (RLC) и процедуры шифрования/дешифрования протокола эволюции пакетных данных (PDCP) для нисходящей и восходящей линий связи [19]. Задача состоит в том, чтобы выполнять виртуальные функции BBU достаточно быстро, чтобы увеличить расстояние между функциями RRHs и BBU (а именно, пулом BBU) и, таким образом, повысить уровень концентрации BBU в CO для экономии капитальных и операционных затрат.

Как показано на рисунке 1, vBBU может быть создан в верхней части облачной инфраструктуры и смоделирован с помощью графика пересылки подфункций, которые, в свою очередь, могут быть разделены на параллельно выполняемые задания. Задания BBU могут выполняться на многоядерной платформе в соответствии со стратегией планирования, которая находится в ядре операционной системы (OS) хоста. В [20] предлагается архитектура C-RAN, в которой используются преимущества производительности, обеспечиваемые контейнерами, которые, в отличие от виртуальных машин, содержат единую ОС, т.е. все ядра управляются глобальным планировщиком.

Когда пользовательское оборудование (UE) требует либо передачи, либо приема данных, вызывается экземпляр vBBU. Как следствие, различные экземпляры виртуального BBU выполняются одновременно на вычислительной платформе. В сотовых системах на основе LTE блок данных передачи (а именно, подкадр) может состоять из данных различных UE. Вся обработка субкадра в базовом диапазоне должна выполняться в течение 2 миллисекунд и 1 миллисекунды в направлении восходящей линии связи и нисходящей линии связи соответственно. Поскольку субкадр генерируется каждую миллисекунду в обоих направлениях (рисунок 2) [12], обработка в BBU всех ячеек, принадлежащих облачной системе, скорее всего, требует высокопроизводительных параллельных вычислений.

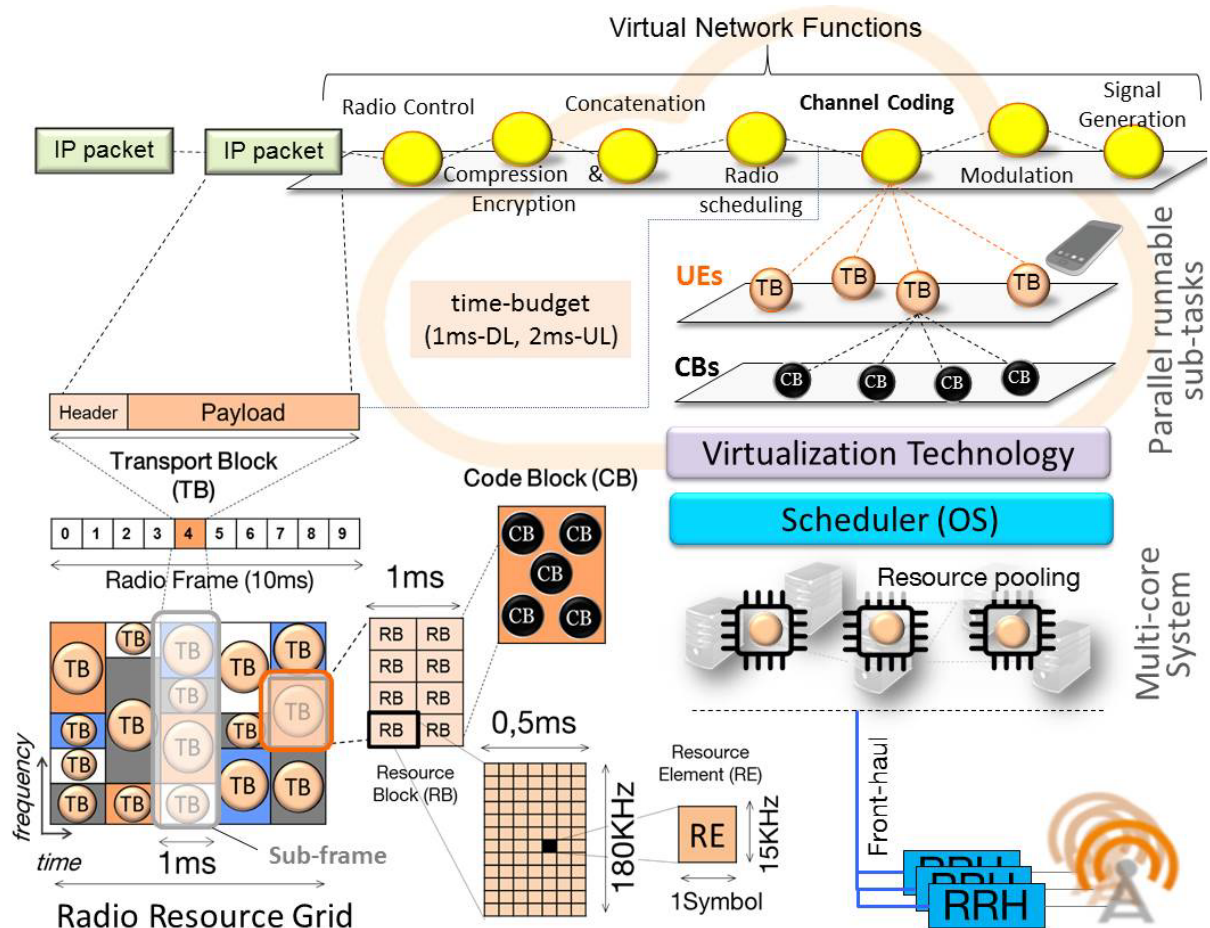


Рисунок 1 – Архитектура C-RAN

При выполнении функций BBU в многоядерной системе могут быть предусмотрены различные стратегии планирования, такие как планирование для каждого подкадра LTE [14] или с более высокой степенью детализации, например, для UE или для блока кода (CB) [8, 9]. Стратегия планирования должна по-

высить производительность пула VBU с точки зрения задержки. Как отмечено в [8,9], прирост производительности наиболее заметен, когда планировщик имеет дело с короткими заданиями (например, обработка CBs), вместо того, чтобы выделять вычислительные ресурсы для тяжелых задач (например, обработка подкадров) [12].

3.2 Параллельная обработка

Общая философия параллельных вычислений состоит в разделении больших задач на более мелкие подзадачи с возможностью параллельного выполнения. Параллельное выполнение подзадач позволяет сократить время выполнения всей задачи. В облачной системе обработка функции кодирования канала является наиболее ресурсоемкой и, кроме того, имеет недетерминированное поведение [7]. Далее мы рассмотрим параллельную обработку функции кодирования канала, которая может выполняться либо для каждого UEs (т.е. для транспортных блоков (TBs)), либо для блока кода (CBs) параллельно.

Для конкретики, мы используем тот факт, что в LTE, когда размер транспортного блока (TB) слишком велик, перед обработкой он сегментируется, с помощью подфункции кодирования / декодирования, на более короткие блоки данных, называемые CBs. CB представляет собой наименьший блок обработки, который может выполняться параллельно.

Стоит отметить, что передача радиосигнала между UE и eNB генерирует TB каждую миллисекунду [21]. Время обработки TB зависит от условий радиоканала, загрузки данных на UE и объема трафика в ячейке. Планировщик радиосвязи выделяет количество блоков физических ресурсов (RBs) для каждого UE в зависимости от объема трафика в соте и определяет схему модуляции и кодирования (MCS) на основе качества радиоканала. Как количество блоков ресурсов (NRB), так и MCS определяют размер транспортного блока (TBS), т.е. полезные данные [11].

На рисунке 1 показаны облачные блоки данных (т.е. TBs, CBs, RBs и элементы ресурсов (REs)) и предлагаемое параллельное выполнение [8,9]. В работе рассматривается RBs с обычным циклическим префиксом (CP) (наиболее распространенным в сетях LTE) [22]. Таким образом, RB состоит из 12 поднесущих (боковая полоса несущей радиочастоты, которая модулируется для передачи дополнительной информации.) в частотной области и 7 символов во временной области. Следовательно, наименьшей определенной единицей является RE, ко-

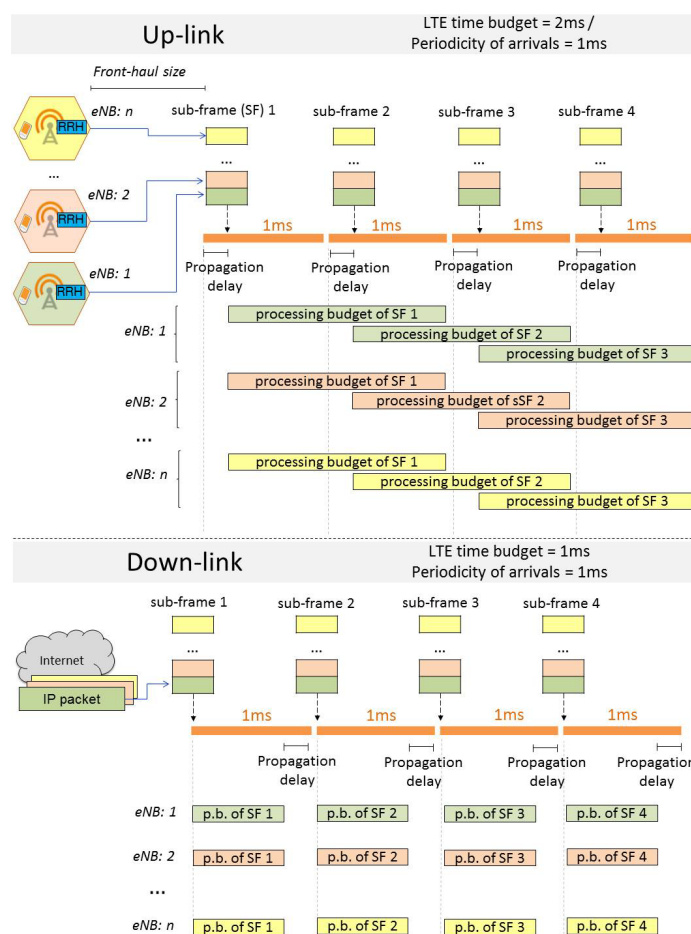


Рисунок 2 – Процесс обработки подкадров

торая состоит из одной поднесущей (15 кГц) и одного символа.

В работе [3] используется параллельная обработка в строгом смысле этого слова, чтобы задания выполнялись одновременно на отдельных ядрах, таким образом избегая процессоров с разделением времени. При параллельных вычислениях каждое задание выполняется на одном ядре и только на одном в любой момент. И наоборот, параллельные вычисления позволяют одновременное выполнение заданий на одном ядре за счет перекрытия периодов времени; это приводит к моделям PS с общим использованием процессоров [23]. Однако недостаток совместного использования процессора заключается в том, что многозадачность на одном ядре требует переключения контекста и разделения памяти, что может заметно увеличить задержку.

При выполнении параллельной обработки для каждого UE количество заданий параллельного кодирования определяется количеством UEs, запланированного в подкадре LTE. При применении параллельной обработки для каждого CBs количество заданий параллельного кодирования определяется произведе-

нием количества запланированных UEs и количества CBs для каждого из них. Количество CBs на UE задается большим целым числом TBS, деленным на размер используемого блока кода (CBS), т.е. $N_{CB} = \lceil TBS / (6144 - 24) \rceil$ [8], где мы используем тот факт, что LTE определяет минимальный и максимальный размер блока кода, равный 40 и 6144 бита соответственно. Последние 24 бита каждого CB соответствуют циклической проверке избыточности (CRC) [6, 12].

4 Моделирование C-RAN системой массового обслуживания

С точки зрения моделирования, каждая антенна (RRH) представляет собой источник заданий в направлении восходящей линии связи, в то время как для направления нисходящей линии связи задания 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.

Нельсон и др. в [24] оценивают производительность различных моделей параллельной обработки при рассмотрении “централизованных” (а именно, доступ с одной очередью в многоядерных системах) и “распределенных” архитектур (а именно, доступ с несколькими очередями в многоядерных системах). Также рассматриваются модели параллелизма (так называемое “расщепление”) и непараллелизма (так называемое “отсутствие расщепления”). Результаты показывают, что при любой загрузке системы (а именно ρ) наименьшее среднее время отклика задания достигается системой “централизованный /разделяющий”, т.е. наилучшая производительность с точки зрения задержки (время отклика) достигается при обработке параллельно выполняемых задач в едином общем пуле ресурсов (рисунок 3).

В работе [3] предлагается для моделирования C-RAN использовать единую систему массового обслуживания с общим пулом обслуживаемых устройств, а именно многоядерную систему с C-ядрами. Глобальный планировщик выделяет вычислительные ресурсы для каждого выполняемого задания кодирования (нисходящий канал) или декодирования (восходящий канал).

Мы предполагаем, что в vBBUs (в частности, функции виртуального кодирования / декодирования) поступает пуассоновский поток вызовов, т.е. время между приходами выполняемых заданий VBU распределено экспоненциально. Это разумно отражает тот факт, что существует достаточно большое количество антенн, которые не синхронизированы. Возникновение заданий является результатом суперпозиции независимых точечных процессов. Это оправдыва-

ет предположение пуассоновского входящего потока требований. На практике кадры приходят с фиксированными относительными фазами. Таким образом, рассмотрение пуассоновского входящего потока в некотором смысле является предположением наихудшего случая. Поступления заданий не синхронизированы, поскольку RRHs находятся на разных расстояниях от пула BBU. Кроме того, при отсутствии выделенных каналов задержка на входе (время между прибытиями) может сильно варьироваться из-за сетевого трафика.

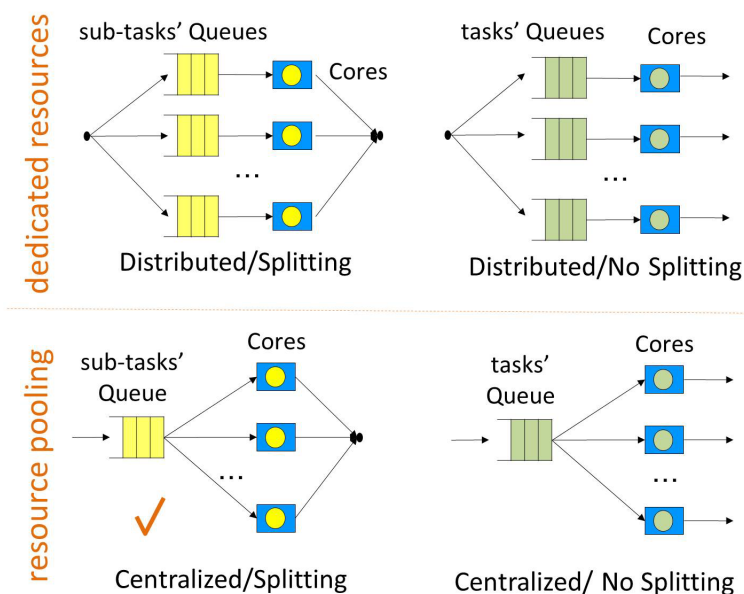


Рисунок 3 – Системы параллельной обработки

Параллельное выполнение задач кодирования и декодирования в многоядерной системе с С-ядрами может быть смоделировано системой массового обслуживания $M^{[X]}/M/k$. Время выполнения каждой подзадачи зависит от рабочей нагрузки, а также от сетевой подфункции, которую она реализует. Количество параллельно выполняемых подзадач, принадлежащих сетевой подфункции, является переменным. Таким образом, рассматривается объем нефиксированного размера, который поступает в момент поступления каждого запроса. Время между прибытиями требований экспоненциально с параметром λ . Размер пакета B не зависит от состояния системы.

В случае Cloud-RAN полный функциональный параллелизм невозможен, поскольку некоторые процедуры базовой блока (например, IFFT, модуляция и т.д.) требуют последовательного выполнения. Однако параллелизм данных функций BBU (в частности, декодирования и кодирования) обещает значительное повышение производительности. Эти утверждения тщательно изучены

в [8, 9]. Результаты показывают, что время выполнения функций BBU может быть значительно сокращено при выполнении параллельной обработки в подкадре, т.е. за счет параллельного выполнения либо UEs, либо даже меньших блоков данных, так называемых CBs.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Network Functions Virtualisation (NFV); Architectural Framework [Электронный ресурс]. — 2013. — URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/nfv/001_099/002/01.01.01_60/gs_nfv002v010101p.pdf (дата обращения 09.01.2023). Загл. с экр. Яз. англ.
- 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 *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.
- 4 Cloud-ran architecture for 5g [Электронный ресурс]. — 2019. — URL: http://www.hit.bme.hu/~jakab/edu/litr/5G/WhitePaper_C-RAN_for_5G-Telefonica_Ericsson.PDF (дата обращения 09.01.2023). Загл. с экр. Яз. англ.
- 5 Cloud-ran [Электронный ресурс]. — 2015. — URL: http://www.hit.bme.hu/~jakab/edu/litr/5G/Ericsson_wp-cloud-ran.pdf (дата обращения 09.01.2023). Загл. с экр. Яз. англ.
- 6 LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures [Электронный ресурс]. — 2017. — URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136213/14.02.00_60/ts_136213v140200p.pdf (дата обращения 09.01.2023). Загл. с экр. Яз. англ.
- 7 *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.
- 8 *Rodriguez, V. Q.* VNF modeling towards the cloud-RAN implementation / V. Q. Rodriguez, F. Guillemin // *International Conference on Networked Systems (NetSys)*. — Gottingen: IEEE, 2017. — Pp. 1–8.
- 9 *Rodriguez, V. Q.* Towards the deployment of a fully centralized Cloud-RAN architecture / V. Q. Rodriguez, F. Guillemin // *13th International Wireless Com-*

- munications and Mobile Computing Conference (IWCMC). — Valencia: IEEE, 2017. — Pp. 1055–1060.
- 10 C-RAN, the road towards green RAN [Электронный ресурс]. — 2011. — URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/C-ran-the-Road-towards-Green-Ran/eaa3ca62c9d5653e4f2318aed9ddb8992a505d3c> (дата обращения 09.01.2023). Загл. с экр. Яз. англ.
 - 11 Cloud-RAN, the next-generation mobile network architecture [Электронный ресурс]. — 2017. — URL: <https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/mbb/cloud-ran-the-next-generation-mobile-network-architecture.pdf?la=en> (дата обращения 09.01.2023). Загл. с экр. Яз. англ.
 - 12 *Rodriguez, V. Q.* Performance analysis of VNFs for sizing cloud-RAN infrastructures / V. Q. Rodriguez, F. Guillemin // Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN). — Berlin: IEEE, 2017. — Pp. 1–6.
 - 13 *Nikaein, N.* OpenAirInterface / N. Nikaein, M. K. Marina, S. Manickam, A. Dawson, R. Knopp, C. Bonnet // *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. — 2014. — Vol. 44, no. 5. — Pp. 33–38.
 - 14 *Bhaumik, S.* CloudIQ / S. Bhaumik, S. P. Chandrabose, M. K. Jataprolu, G. Kumar, A. Muralidhar, V. Srinivasan, T. Woo // Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking. — Istanbul: ACM, 2012. — Pp. 125–136.
 - 15 *Rodriguez, V. Q.* Performance analysis of resource pooling for network function virtualization / V. Q. Rodriguez, F. Guillemin // 17th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks). — Montreal: IEEE, 2016. — Pp. 158–163.
 - 16 *Мутханна, А. С. А.* Исследование облачных вычислений в сотовых сетях / А. С. А. Мутханна, А. А. Атея, М. И. Филимонова // *Информационные технологии и телекоммуникации*. — 2017. — Т. 5, № 3. — С. 45–49.
 - 17 *Nikaein, N.* Network Store: Exploring Slicing in Future 5G Networks / N. Nikaein, E. Schiller, R. Favraud, K. Katsalis, D. Stavropoulos, I. Alyafawi, Z. Zhao // Pro-

- ceedings of the 10th International Workshop on Mobility in the Evolving Internet Architecture. — Paris: ACM, 2015. — Pp. 8–13.
- 18 *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.
 - 19 *Dahlman, E.* 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband / E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold. — Amsterdam: Elsevier, 2014. — 510 pp.
 - 20 *Barik, R. K.* Performance analysis of virtual machines and containers in cloud computing / R. K. Barik, R. K. Lenka, K. R. Rao, D. Ghose // *International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*. — Greater Noida: IEEE, 2016. — Pp. 1204–1210.
 - 21 *Ашурметова, Н. З.* Исследование архитектуры облачной системы C-RAN / Н. З. Ашурметова // *Наукосфера*. — 2021. — Т. 7, № 1. — С. 125–133.
 - 22 *Hasan, S. F.* Emerging Trends in Communication Networks / S. F. Hasan. — London: Springer, 2014. — 76 pp.
 - 23 *Kleinrock, L.* Queueing systems: computer applications / L. Kleinrock. — New York: Wiley-Interscience, 1976. — 576 pp.
 - 24 *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.