

Вейлер Андрей Игоревич

аспирант, старший преподаватель кафедры телекоммуникационных систем и вычислительных средств, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск. ORCID: 0009-0006-3289-4012. SPIN-код: 6734-8496. AuthorID: 1206689.

Электронный адрес: andrei_veiler@mail.ru

Andrei I. Veyler

Postgraduate, Senior Lecturer at the Department of Telecommunication Systems and Computing, Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk. ORCID: 0009-0006-3289-4012. SPIN code: 6734-8496. Author ID: 1206689.

E-mail address: andrei_veiler@mail.ru

Брагин Кирилл Игоревич

аспирант, старший преподаватель кафедры телекоммуникационных систем и вычислительных средств, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск. ORCID: 0000-0003-4334-0307. SPIN-код: 5937-3633. AuthorID: 1068160.

Электронный адрес: bragik.irl@yandex.com

Kirill I. Bragin

Postgraduate, Senior Lecturer at the Department of Telecommunication Systems and Computing, Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk. ORCID: 0000-0003-4334-0307. SPIN code: 5937-3633. Author ID: 1068160.

E-mail address: bragik.irl@yandex.com

Дроздова Вера Геннадьевна

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем и вычислительных средств, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск. ORCID: 0009-0002-0427-9929. SPIN-код: 5833-6580. AuthorID: 1070635.

Электронный адрес: drozdova@sibguti.ru

Vera G. Drozdova

Ph.D. of Technical Sciences, Docent, Head at the Department of Telecommunication Systems and Computing, Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk. ORCID: 0009-0002-0427-9929. SPIN code: 5833-6580. Author ID: 1070635.

E-mail address: drozdova@sibguti.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОТОКОЛА 5G RLC ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С НИЗКИМИ ЗАДЕРЖКАМИ В СЕТЯХ OPEN RAN НА ПЛАТФОРМЕ ARM

Аннотация. Обеспечение сверхнизких задержек и высокой пропускной способности на канальном уровне является критически важной задачей для реализации сценариев eMBB (Enhanced Mobile Broadband) и URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications) в сетях мобильной связи. Существующие подходы к борьбе с чрезмерной буферизацией – алгоритмы активного управления очередями (AQM), архитектура L4S (Low Latency, Low Loss, Scalable throughput), стандартизированная

Оптимизация протокола 5G RLC для высокоскоростной передачи данных с низкими задержками в сетях OpenRAN на платформе ARM

в 3GPP Release 18, фокусируются исключительно на очередях, игнорируя задержки, возникающие в самой программной реализации протокола RLC (Radio Link Control). Это ограничение критически снижает их эффективность в декомпозированных архитектурах Open RAN с жесткими требованиями к задержке. В данной работе предложен комплекс методов оптимизации RLC: кольцевой буфер с ассоциативными списками сегментов, декомпозиция сущностей TX и RX с механизмом синхронизации и технология DPDK. Реализация выполнена с учетом архитектуры ARM Cortex-A72. Эксперименты на промышленной платформе NXP LX2160A (16 ядер Cortex-A72) с эмуляцией нагрузки до 4 пользовательских устройств и 4 распределенных блоков DU показали улучшение пропускной способности, снижение средней задержки в очереди и сокращение времени обработки пакетов. Предложенные решения могут быть адаптированы для отечественного оборудования 5G и перспективных сетей 6G.

Ключевые слова: 5G NR, Open RAN, RLC, uRLLC, OpenAirInterface, DPDK, ARM.

Для цитирования: Вейлер А.И., Брагин К.И., Дроздова В.Г. Оптимизация протокола 5G RLC для высокоскоростной передачи данных с низкими задержками в сетях OpenRAN на платформе ARM // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2026. № 3. С. 130–143. DOI: 10.18137/RNU.V9187.26.03.P.130

OPTIMIZING 5G RLC FOR HIGH-THROUGHPUT AND LOW-LATENCY COMMUNICATION IN OPEN RAN DEPLOYMENTS ON ARM ARCHITECTURE

Abstract. Ensuring ultra-low latency and high throughput at the link layer is a critical task for implementing eMBB (Enhanced Mobile Broadband) and URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications) scenarios in mobile networks. Existing approaches to combat bufferbloat—such as Active Queue Management (AQM) algorithms and the L4S (Low Latency, Low Loss, Scalable throughput) architecture standardized in 3GPP Release 18—focus exclusively on queues, ignoring delays originating within the software implementation of the RLC (Radio Link Control) protocol itself. This limitation critically reduces their effectiveness in decomposed Open RAN architectures with stringent latency requirements. This paper proposes a suite of RLC optimization methods: a ring buffer with associative segment lists, the decomposition of TX and RX entities with a synchronization mechanism, and DPDK technology. The implementation is tailored for the ARM Cortex-A72 architecture. Experiments on the industrial NXP LX2160A platform (16 Cortex-A72 cores), emulating loads of up to 4 UEs and 4 Distributed Units (DU), demonstrated improved throughput, reduced average queuing delay, and shorter packet processing times. The proposed solutions can be adapted for domestic 5G equipment and future 6G networks.

Keywords: 5G NR, Open RAN, RLC, uRLLC, OpenAirInterface, DPDK, ARM.

For citation: Veyler A.I., Bragin K.I., Drozdova V.G. (2026) Optimizing RLC for High-Throughput and Low-Latency Communication in Open RAN Deployments on ARM Architecture. *Vestnik of the Russian New University. The series: Complex systems: models, analysis and management*. No. 3. Pp. 130–143. DOI: 10.18137/RNU.V9187.26.03.P.130 (In Russian).

Введение

Современные сети 5G переходят от проприетарных систем к открытым архитектурам Open RAN (O-RAN) [1]. Ключевой особенностью является разделение базовой станции

на RU, DU и CU (Рисунок 1). Цель – повысить гибкость, снизить нагрузку между блоками и стоимость владения. Ключевым элементом канального уровня является протокол RLC, унаследованный от 4G и доработанный в 5G NR. Он отвечает за повторные передачи, сегментацию и управление SRB и DRB. В варианте разделения Open RAN 7.2x RLC выполняется в DU [2], становясь конечным протоколом на его стороне.

RLC должен удовлетворять требованиям uRLLC, eMBB и mMTC [3]. Задержка uRLLC и пропускная способность eMBB зависят от скорости обработки RLC. Задачу усложняет поддержка различных нумерологий, сокращающих время обработки до десятков микросекунд, а также наличие FDD, где передача и приём (UL) осуществляются одновременно.

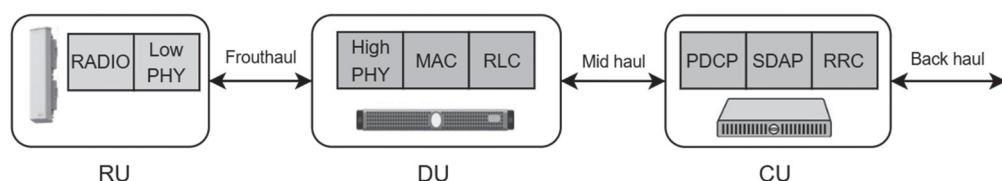


Рисунок 1. Архитектура Open Ran с функциональным разделением по опции 7,2x

Несмотря на заслуженную популярность открытого стека программного обеспечения 5G Open Air Interface (OAI) в исследовательских целях, его текущая реализация RLC требует адаптации под соответствие промышленным спецификациям 3GPP. Основными барьерами являются: использование медленных линейных структур данных, неоптимальная синхронизация потоков – общие блокировки для доступа к нисходящему (DL) и восходящему (UL) каналам, а также накладные расходы сетевого стека для передачи между блоками DU и CU. Данные факторы ограничивают предельную пропускную способность и ведут к росту задержек в канале, что особенно критично при развертывании на специализированных встраиваемых ARM-платформах, ориентированных на телеком-оборудование при работе с одновременно большим количеством пользовательских устройств.

Вопросам производительности открытых программных стеков 5G посвящено немало современных исследований. В работах коллектива под руководством Nikaein M. (Eurecom) заложены основы архитектуры OpenAirInterface [4; 5]. В первую очередь функциональная полнота протоколов и их соответствие стандартам 3GPP [6]. Проблематика задержек в архитектуре Open RAN поднимается в исследованиях [7; 8]. Авторы доказали, что для выполнения требований URLLC необходимо детерминированное исполнение функций DU, но конкретные методы оптимизации в этих работах не предлагаются. Вопросы применения технологии DPDK (Data Plane Development Kit) для ускорения обработки пакетов поднимаются в работе [9], где авторы демонстрируют его использование совместно с GPU для обработки уровня L1 в архитектуре O-RAN. Однако предложенные методы ориентированы на серверные платформы и не учитывают специфику реализации RLC на ARM-архитектурах. Отдельное направление составляют работы по использованию сетевого кодирования как альтернативы классическому ARQ. Такие работы демонстрируют потенциал для снижения задержек за счёт исключения повторных передач, однако требуют отхода от стандартов 3GPP и вносят дополнительную вычислительную нагрузку на абонентские терминалы при выполнении операций декодирования в полях Галуа [10].

Оптимизация протокола 5G RLC для высокоскоростной передачи данных
с низкими задержками в сетях OpenRAN на платформе ARM

Таким образом, существующие работы либо анализируют проблемы, либо предлагают менять стандарты.

Цель настоящего исследования – комплексная оптимизация RLC для ARM-платформ с сохранением совместимости с 3GPP. Для достижения цели поставлены задачи:

- выявление узких мест OAI реализации;
- внедрение ассоциативных структур данных;
- реализация отдельных блокировок для DL и UL;
- интеграция DPDK с Zero-cору;
- исследование производительности и экспериментальное подтверждение на промышленной ARM-платформе.

Функции протокола RLC

Протокол RLC в стеке 5G находится между PDCP и MAC. Его основная задача – обеспечить надежную и своевременную передачу данных через радиоканал. В отличие от сетей 4G [11], где допускалась предварительная обработка пакетов, архитектура 5G NR требует сегментации SDU в реальном времени. Модуль RLC осуществляет сегментацию пакетов от PDCP в соответствии с размером транспортного блока (Grant), выделенного планировщиком gNB на MAC-уровне для конкретного ТТІ. Данный процесс критичен при использовании высоких нумерологий (SCS 60/120 кГц и более), где ТТІ сокращается до десятков микросекунд.

В соответствии с 3GPP TS 38.322 [6], определены три режима RLC:

- ТМ – простейший режим без заголовков, сегментации и обратной связи (для BCCH);
- UM – с заголовками и сегментацией, но без обратной связи (для голосового трафика);
- AM – дополнительно реализует ARQ, гарантируя доставку (для сигнальных сообщений).

RLC в режиме UM [6] представлен передающим (TX) и принимающим (RX) процессами. В режиме AM модель является единой двунаправленной сущностью с обратной связью через Control PDU (Status PDU – ACK/NACK). Выбор режима связан с типом радиоканалов (Radio Bearers): сигнальные (SRB), за исключением SRB0 (ТМ), используют только AM; пользовательские (DRB) могут использовать AM или UM.

В архитектуре O-RAN Split 7.2x RLC остается в составе DU (см. Рисунок 1), выполняя агрегацию трафика от CU через интерфейс F1-U [12]. Передача данных между CU и DU осуществляется по протоколу GTP-U поверх IP-стека [13]. Это создает требования к эффективной работе с сетевым стеком ОС и быстрому демультиплексированию. Ключевые параметры конфигурации RLC [14]: *sn-FieldLength*, *t-Reassembly*, а для AM – *t-Poll Retransmit*, *t-Status Prohibit*, *poll PDU* и *poll Byte*. Их настройка влияет на баланс между пропускной способностью, задержкой и надежностью доставки.

Анализ и методы оптимизации программного стенка RLC в Open Air Interface 5G. Методология исследования

Методология исследования, использованная в данном исследовании, включает оценку и анализ эффективности протокола NR RLC от Open Air Interface 5G с использованием

аппаратной платформы NXP LX2160A (архитектура ARMv8). Для верификации результатов и оценки производительности были использованы следующие инструменты:

- Linux Perf для сбора аппаратно-поддерживаемых метрик производительности;
- Flame Graph для наглядной визуализации распределения времени выполнения.

Экспериментальный фреймворк и параметры настройки представлены детально для обеспечения понимания проведенных экспериментов и оценок.

Анализ реализации RLC в Open Air Interface 5G

Реализация протокола RLC в Open Air Interface 5G основана на классических подходах к реализации сетевых стеков, разработанных для обеспечения необходимой функциональности, и полностью соответствует спецификациям 3GPP [6; 14]. Архитектурно обработка данных разделена на две логические сущности: передающую (Transmitter, TX) и принимающую (Receiver, RX). Код написан универсально и подходит как для базовой станции, так и для пользовательского оборудования, что упрощает поддержку и верификацию.

Алгоритм обработки на передающей стороне (TX) для режимов с подтверждением (AM) и без подтверждения (UM) включает в себя следующие этапы (Рисунок 2).

1. Приём SDU от PDCP. Передающая сторона RLC получает SDU от вышестоящего протокола PDCP по заранее созданному радиоканалу с конкретным идентификатором через FIFO-очередь (First In First Out).

2. Выделяется память для хранения заголовка и данных; заранее заполняется заголовок RLC таким образом, будто пакет уже готов к отправке целиком без сегментации.

3. Подготовленная SDU буферизируется в TX в порядке FIFO.

4. MAC по готовности ресурсов запрашивает RLC выдать SDU из буфера с конкретным идентификатором. Далее заголовок RLC модифицируется: добавляется SN (Sequence Number), и по необходимости, если запрошенный размер данных из MAC меньше, чем размер SDU, данные сегментируются.

5. Только для случая RLC AM создается копия PDU и хранится в буфере, пока не будет принята ACK-квитанция.

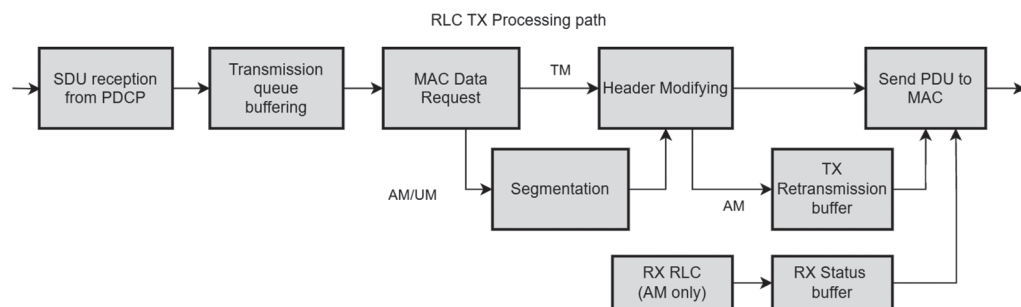


Рисунок 2. Путь обработки данных на передающей стороне RLC

Обработка принимающей стороны для AM/UM (Рисунок 3).

1. Приёмная сторона RLC получает PDU от MAC на конкретную сессию абонента Radio Bearer и начинает декодировать заголовок, извлекая SN, флаги сегментации и длину буфера.

Оптимизация протокола 5G RLC для высокоскоростной передачи данных с низкими задержками в сетях OpenRAN на платформе ARM

2. Проверяется, что полученный SN находится внутри текущего окна приёма и здесь же отбрасываются дубликаты.
3. Сегменты собираются в один SDU.
4. Для RLC AM формируется STATUS PDU, содержащий информацию о принятых и потерянных сегментах данных.
5. Пакет отправляется на PDCP для дальнейшей обработки.

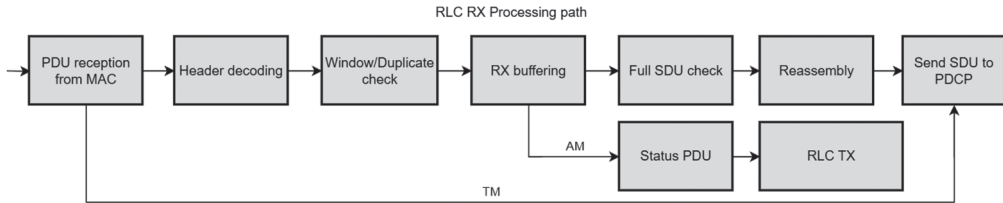


Рисунок 3. Путь обработки данных на принимающей стороне RLC

Основные операции RLC, такие как приём PDU, проверка полноты SDU, управление окнами приёма, требуют частого поиска элементов по SN. В текущей реализации для поиска PDU с определенным SN используется линейный обход списка (Рисунок 4), что имеет линейную сложность $O(n)$, где n – количество элементов в списке. Помимо поиска для перечисленных функций выше вставка элемента в список для дальнейшей его обработки осуществляется по правилу сортировки «сначала по SN, а затем по SO внутри одного SN».

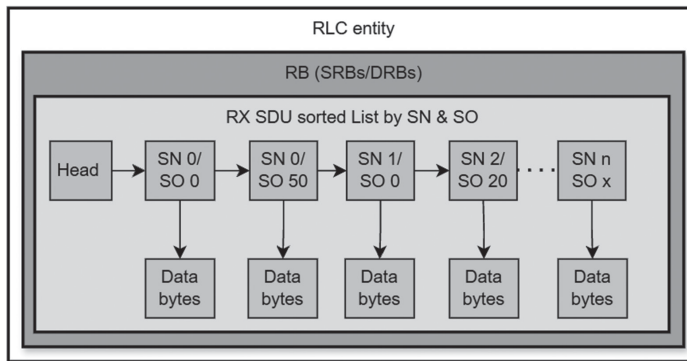


Рисунок 4. Текущая структура данных для хранения SDU в принимающей сущности RLC

Кольцевой буфер и списки сегментов

Как сказано выше, одним из основных узких мест является использование односвязных списков для хранения сегментов, ожидающих подтверждения (в режиме AM) и подлежащих сборке (AM/UM). Предлагаемый метод, индексируемый порядковым номером SN, подразумевает использование кольцевого буфера, где каждая ячейка содержит список сегментов SDU данного SN. Размер такого кольцевого буфера есть максимальный размер SN ($N = 2^{sn_fieldlength} - 1$). Каждая ячейка SN в такой таблице содержит односвязный список на сегменты, отсортированные в порядке SO (Segment Offset). По мере поступления

PDU для добавления новых элементов отпадает необходимость проходить по всему списку для поиска сначала по SN, а затем по SO: достаточно воспользоваться готовой таблицей, где индексом выступает тот самый SN. Таким образом, за счет использования дополнительной памяти временная сложность выполнения операций поиска, а также вставки и удаления сокращаются до константной $O(1)$ (Рисунок 5).

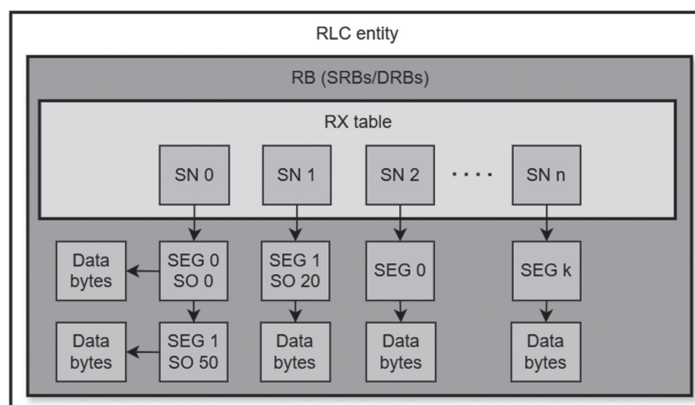


Рисунок 5. Кольцевой буфер и списки сегментов

Использование аналогичных таблиц для индексации по SO внутри одного SN избыточно, так как максимальное количество сегментов для одного SN невелико и заранее неизвестно в отличие от окна SN. За счет прямой адресации кольцевой буфер по SN решает проблемы с поиском, вставкой и удалением элементов, что особенно критично для RLC AM с его большим размером SN (18 бит, $N = 2^{18}$).

Механизм синхронизации сущностей TX и RX

В архитектуре OAI сущности RLC могут быть вызваны из различных потоков, например, из потока обработки DL/UL от MAC, а также из потока взаимодействия с PDCP. Для обеспечения целостности данных в текущей реализации используется единый примитив синхронизации на весь RLC – mutex (взаимное исключение), который захватывается при любом обращении к RLC: при постановке пакета в очередь от PDCP, при формировании PDU для MAC и др.

Данный подход гарантирует потокобезопасность, но создает существенное ограничение производительности, поскольку единый мьютекс не позволяет параллельно выполняться операциям передачи (Tx) и приема (Rx), что подтвердило профилирование с использованием утилиты perf. В режиме без подтверждений (UM) сущности TX и RX являются полностью независимыми друг от друга, как показано выше, и могут быть разделены на две независимые блокировки. Что касается режима с подтверждением (AM), то полное разделение невозможно из-за наличия общих структур, требующих синхронизованного доступа, например, буфер повторной передачи и буфер статусов RX, которые могут быть модифицированы как на TX, так и на RX в случайный момент времени. Однако для сокращения времени ожидания TX пока обрабатывается RX, и наоборот, размеры критических секций можно сократить до конкретных мест пересечения этих сущностей.

Оптимизация протокола 5G RLC для высокоскоростной передачи данных
с низкими задержками в сетях OpenRAN на платформе ARM

Технология DPDK

В архитектуре Open RAN с разделением на CU и DU передача данных по интерфейсу F1-U осуществляется с использованием GTP-U поверх IP-сети. В стандартной реализации используются сокет Berkeley, что прибавляет накладных расходов из-за копирований между пользовательским пространством и ядром, переключений контекстов и задержек планировщика ОС. Для оптимизации возможна интеграция DPDK, позволяющая осуществлять прямой доступ к сетевым интерфейсам из пользовательского пространства, минимизируя копирования и исключая вмешательство ядра.

В данной работе DPDK используется для сквозной обработки данных на всем пути через RLC – от приёма из CU до передачи на MAC (и обратно). SDU и PDU размещаются в заранее выделенных пулах памяти. Поскольку эксперименты проводились на одном узле, где CU и DU функционируют как отдельные процессы, DPDK был применен для оптимизации внутриузловых обмена между компонентами и в качестве заранее выделенного буфера памяти.

**Экспериментальное исследование производительности алгоритмов RLC
на платформе ARM. Параметры сценария 5G**

Для оценки эффективности предложенных методов оптимизации был проведен комплекс экспериментов на платформе ARM. Целью экспериментов являлась оценка вклада каждой из предложенных оптимизаций в снижение задержек и повышение пропускной способности, а также проверка масштабируемости решения при увеличении числа UE. Параметры эксперимента выбирались таким образом, чтобы создать нагрузку, соответствующую реальным условиям эксплуатации базовых станций.

Выбор параметров протокола RLC, указанный в Таблице, обусловлен необходимостью адаптации механизмов передачи под конкретный тип информационного потока, а также требованиями к надёжности, пропускной способности и задержке.

Таблица

Параметры конфигурации RLC

Параметр	SRB AM	DRB AM	DRB UM
SN field length	12 бит	18 бит	12 бит
t-reassembly	25 мс	15 мс	15 мс
t-poll-retransmit	45 мс	45 мс	–
t-status-prohibit	0 мс	15 мс	–
poll-pdu	infinity	64	–
poll-byte	Infinity	500 кБайт	–
max-retx-threshold	8	32	–
tx-maxsize	1048576	1048576	1048576
rx-maxsize	1048576	1048576	1048576

Источник: таблица составлена авторами по результатам исследования.

Для SRB приоритет отдаётся надёжности. Разрядность SN = 12 бит достаточна для низкоинтенсивного обмена. Ограничение max_retx_threshold = 8 играет критическую

роль: если сообщение не доставлено за восемь попыток, инициируется RRC re-establishment, предотвращая «зависание» терминала [15].

Для DRB AM ключевым требованием является высокая пропускная способность. SN = 18 бит необходима для работы на гигабитных скоростях. max_retx_threshold = 32 в сочетании с poll_pdu = 64 и poll_byte = 500 кБ позволяет снизить долю служебного трафика [16]. Для DRB UM определяющим фактором становится задержка. Отказ от ARQ и t_reassembly = 15 мс обеспечивают своевременную доставку данных, критичных к задержкам [16; 17]. Потеря отдельного пакета признаётся менее критичной, чем внесение дополнительной задержки.

План экспериментов

- Оценка вклада каждой оптимизации. С сущностями 1 на 1 в режиме FDD без потерь измеряется производительность и задержки для разных размеров пакетов (см. Таблицу).
- Для оценки оптимизаций при работе ARQ использовано до 4 UE с вероятностью потерь 10 % (только для RLC AM), что принудительно активирует повторные передачи.
- Для измерения задержек использовался метод Уэлфорда, обеспечивающий численно устойчивое вычисление средних и дисперсии без хранения всей выборки.

Эксперимент 1. Вклад оптимизаций

Эксперимент проводился в режимах RLC AM и UM при нагрузке 1 UE и 1 DU. Использовались пакеты размером 1500, 600 и 128 байт. Результаты представлены на Рисунках 6–8.

Для объективной оценки общего выигрыша использована суммарная пропускная способность DL+UL, нивелирующая эффект перераспределения ресурсов от запуска к запуску между направлениями. Данный эффект возникает из-за особенностей синхронизаций на мьютексах и недетерминированного направления нагрузки по ядрам в реализациях, использующих одну не разделенную на TX/RX сущность RLC.

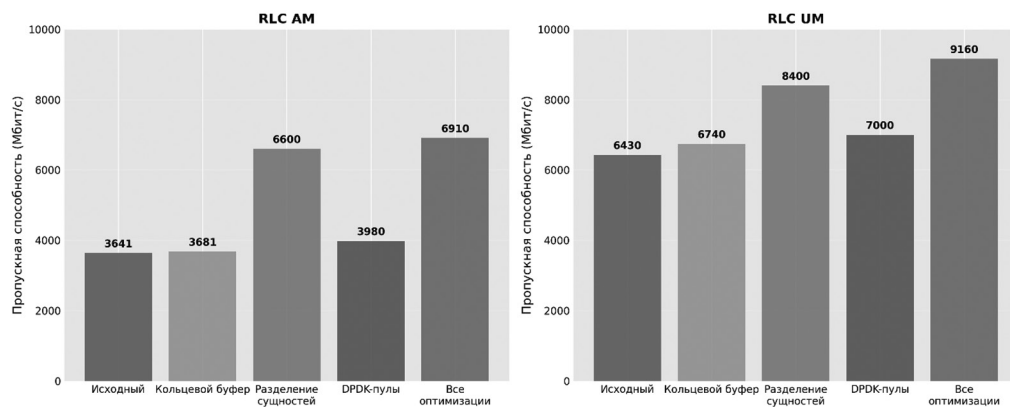


Рисунок 6. Суммарная пропускная способность RLC для пакета размером 1500 байт

Оптимизация протокола 5G RLC для высокоскоростной передачи данных с низкими задержками в сетях OpenRAN на платформе ARM

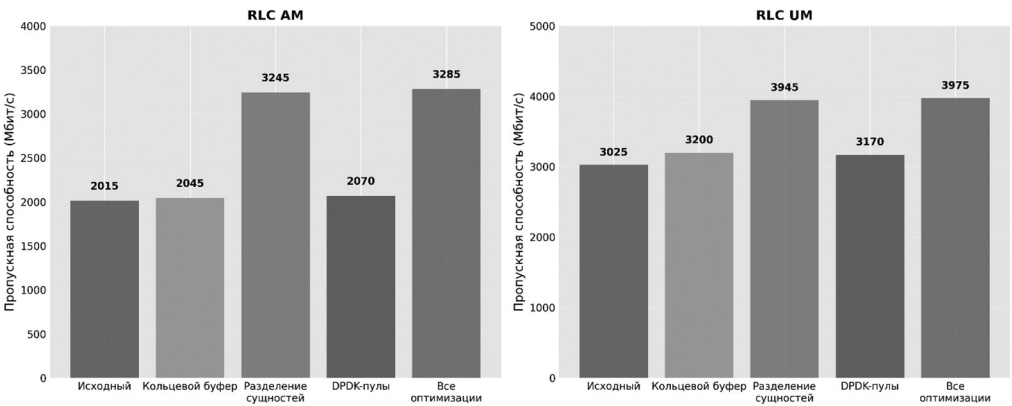


Рисунок 7. Суммарная пропускная способность RLC для пакета размером 600 байт

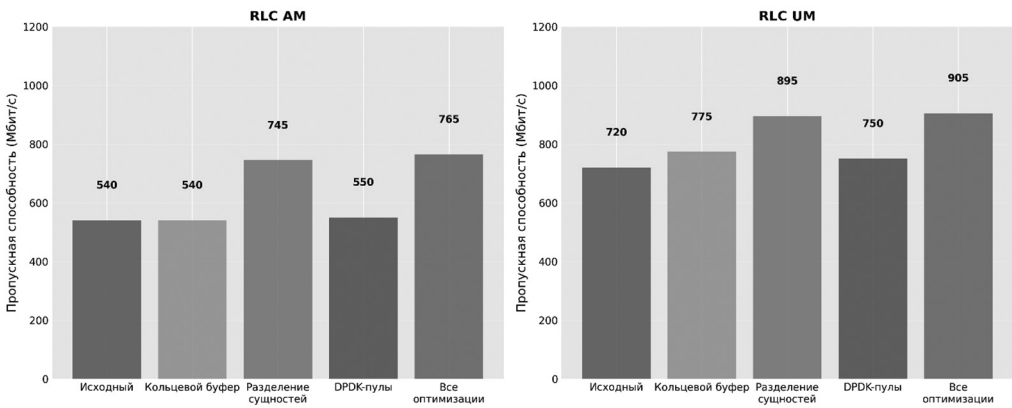


Рисунок 8. Суммарная пропускная способность RLC для пакета размером 128 байт

Эксперимент 2. Механизм ARQ

Для измерений была выбрана конфигурация 4 UE и 4 gNB (8 активных RLC-сущностей), развернутая на платформе NXP LX2160A. Данный сценарий позволяет достичь использования привязки ко всем доступным 16 ядрам процессора, исключая накладные расходы и случайные выбросы из-за планировщика ОС и переключений контекстов. В рамках данного эксперимента для каждого UE был реализован сценарий максимальной нагрузки трафиком, включающий сигнальные радиоканалы SRB0 (режим TM) и SRB1 (режим AM), а также каналы данных DRB0 (AM) и DRB1 (UM). Для DRB0 RLC AM для каждого пакета (106 пакетов для каждой сущности gNB) было записано время ожидания в очереди на отправку и построены CDF (Рисунок 9).

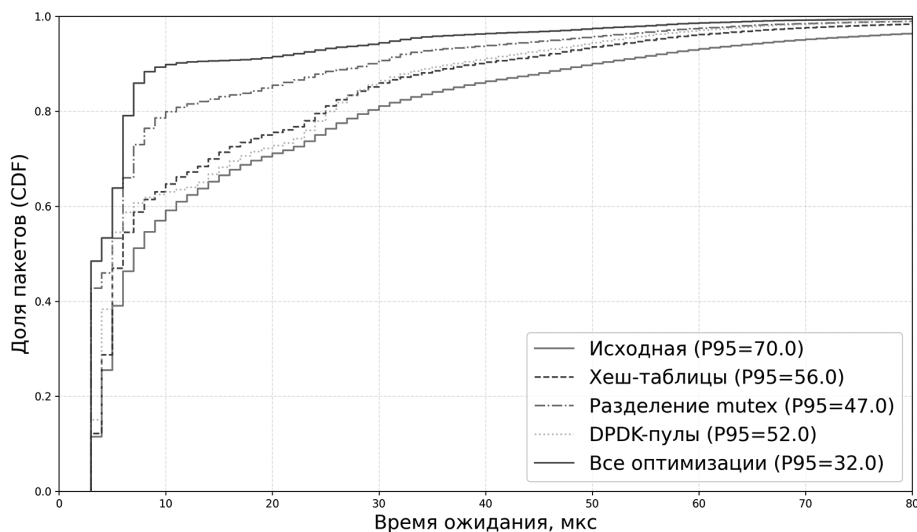


Рисунок 9. CDF времени ожидания пакета в очереди на отправку для RLC AM DRB0 при нагрузке 4 UE

Анализ полученных результатов

Наибольший прирост пропускной способности достигнут для крупных пакетов (1500 байт), где вычислительные затраты на заголовки пакетов менее значительны (см. Рисунок 6). Для режима AM прирост скорости передачи данных составил 90 % (с 3641 до 6910 мбит/с), для режима UM – 42 % (с 6430 до 9160 мбит/с). С уменьшением размера пакета эффект оптимизаций сохраняется. Для пакетов 600 байт прирост в режиме AM достиг 62 % относительно базовой версии, а в режиме UM – 31 % (см. Рисунок 7). Для пакетов 128 байт – 42 и 25 % соответственно (см. рисунок 8). Характерно, что наибольший выигрыш наблюдается в режиме AM, что объясняется нагрузкой механизма ARQ, который был существенно оптимизирован за счет кольцевого буфера и разделения сущностей.

Оптимизации позволили сократить время обработки tx- и rx-пакетов в 1,5–2 раза. Наиболее показателен режим AM для пакетов 600 байт, где время обработки пакетов снизилось с 3,21 до 1,13 мкс ($\approx 65\%$), в RX с 3,12 до 1,20 мкс ($\approx 62\%$). Важно отметить, что комбинация всех оптимизаций показывает наилучшие результаты, подтверждая синергию предложенных методов.

Размер пакета влияет на закономерный рост времени ожидания в очереди и снижение пропускной способности из-за увеличения доли заголовков. Однако относительная эффективность сохраняется во всем диапазоне размеров.

Таким образом, предложенный комплекс оптимизаций обеспечивает прирост пропускной способности от 25 до 90 % в зависимости от режима и размера пакета; сокращение времени ожидания пакета в буфере – до 45 %; снижение времени обработки – до 86 % и уменьшение выбросов задержек за счет уменьшения дисперсии – на 39 %.

Заключение

В ходе выполненной работы проведен анализ и оптимизации реализации протокола RLC в стеке Open Air Interface 5G. Выявленные узкие места – линейный поиск в списках, единая сущность для TX/RX RLC и накладные расходы на копирование данных – были устранены путем внедрения кольцевого буфера с прямой индексацией, декомпозиции TX/RX-сущностей и интеграции механизмов Zero-сору.

Переход к константной сложности поиска SDU позволил снизить время обработки пакетов на 95-м перцентиле в 2,1 раза (до 32 мкс). Разделение на сущности обеспечило прирост пропускной способности до 90 % в режиме AM и до 42 % в режиме UM, достигая пиковых значений 9,16 Гбит/с.

Все эксперименты проводились на промышленной ARM-платформе NXP LX2160A. Перспективным вектором развития работы является переход от использования DPDK для управления памятью к полноценной реализации сетевого интерфейса F1-U на базе драйверов DPDK, что позволяет исключить накладные расходы стандартного сетевого стека, а также поддерживать стабильные показатели пропускной способности и задержек для растущего числа пользовательских устройств.

Полученные результаты полностью удовлетворяют требованиям 3GPP TR 38.913 для сценариев uRLLC (задержка < 100 мкс) и eMBB (пропускная способность до 10 Гбит/с) [3]. Разработанные решения могут быть использованы при создании отечественного оборудования 5G и перспективных сетей 6G. Исходный код модифицированного протокола и инструкции по его развертыванию доступны в открытом репозитории (https://github.com/kruffka/NR_RLC).

Литература

1. Polese M. L., Bonati S. D'Oro [et al.] (2023) Understanding O-RAN: Architecture, Interfaces, Algorithms, Security, and Research Challenges. IEEE Communications Surveys & Tutorials. Vol. 25, no. 2. Pp. 1376-1411. DOI: 10.1109/COMST.2023.3239220
2. ETSI TS 103 982 V14.0.0 (2026-03). Publicly Available Specification (PAS); O-RAN Architecture Description (O-RAN.WG1.TS.OAD-R004-v14.00). Sophia Antipolis: ETSI, 2026. 38 p.
3. ETSI TR 138 913 V18.0.0 (2024-05). 5G; Study on scenarios and requirements for next generation access technologies (3GPP TR 38.913 version 18.0.0 Release 18). Sophia Antipolis: ETSI, 2024. 41 p. [Electronic resource]. Available at: <http://www.etsi.org> (accessed: 22.03.2024).
4. Kaltenberger F., Silva A.P., Gosain A. [et al.] (2020) Open Air Interface: Democratizing Innovation in the 5G Era. Computer Networks. Vol. 176. P. 107284. DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107284
5. Nikaein N., Marina M.K., Manickam S. [et al.] (2014) Open Air Interface: A flexible platform for 5G research. ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev. Vol. 44, no. 5. Pp. 33-38.
6. 3GPP. TS 38.322 V17.3.0: NR; Radio Link Control (RLC) protocol specification. Sophia Antipolis: ETSI, 2024.
7. Sohaib R.M., Shah S.T., Jamshed M.A. [et al.] (2025) Optimizing URLLC in Open RAN: Standards Magazine. Vol. 9, no. 3. Pp. 33–39. DOI: 10.1109/MCOMSTD.2025.3572604
8. Анализ вычислительной сложности и времени выполнения стека протоколов в сетях 5G New Radio / Я.В. Крюков, А.А. Покаместов, Е.В. Рогожников [и др.] // Доклады ТУСУР. 2020. Т. 23, № 3. С. 31-37. DOI: 10.21293/1818-0442-2020-23-3-31-37
9. Kundu L., Lin X., Agostini E. [et al.] (2024) Hardware Acceleration for Open Radio Access Networks: A Contemporary Overview. IEEE Communications Magazine. Vol. 62, no. 9. Pp. 160-167. DOI: 10.1109/MCOM.023.2300281

10. Vasudevan V.A., Esfahanizadeh H., Kim B.D. [et al.] (2026) Revisiting the Interface Between Error and Erasure Correction in Wireless Standards. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Vol. 44, no. 4. Pp. 3237-3250. DOI: 10.1109/JSAC.2026.3651705
11. 3GPP. TS 36.322 V10.0.0. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Radio Link Control (RLC) protocol specification (Release 10). Sophia Antipolis: ETSI, 2011. 42 p.
12. 3GPP. TS 38.470 V17.0.0: 5G; NG-RAN; F1 general aspects and principles (Release 17). Sophia Antipolis: ETSI, 2022. 20 p.
13. 3GPP. TS 38.474 V17.0.0: 5G; NG-RAN; F1 data transport (Release 17). Sophia Antipolis: ETSI, 2022. 9 p.
14. 3GPP. TS 38.331 V18.5.1: 5G; NR; Radio Resource Control (RRC): Protocol specification (Release 18). Sophia Antipolis: ETSI, 2025. 1668 p.
15. Irazabal M., Lopez-Aguilera E., Demirkol I. [et al.] (2021) Preventing RLC Buffer Sojourn Delays in 5G: *IEEE Access*. Vol. 9. Pp. 39466-39488. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3063769
16. Kumar R., Francini A., Panwar S. [et al.] (2018) Dynamic control of RLC buffer size for latency minimization in mobile RAN, 2018: *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Barcelona, 2018. Pp. 1-6.
17. Kumar R., Francini A., Panwar S. [et al.] (2019) Design of an enhanced bearer buffer for latency minimization in the mobile RAN, 2019: *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. Waikoloa, HI, USA, 2019. Pp. 1-6.

References

1. Polese M. L., Bonati S. D'Oro [et al.] (2023) Understanding O-RAN: Architecture, Interfaces, Algorithms, Security, and Research Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Vol. 25, no. 2. Pp. 1376-1411. DOI: 10.1109/COMST.2023.3239220
2. ETSI TS 103 982 V14.0.0 (2026-03). Publicly Available Specification (PAS); O-RAN Architecture Description (O-RAN.WG1.TS.OAD-R004-v14.00). Sophia Antipolis: ETSI, 2026. 38 p.
3. ETSI TR 138 913 V18.0.0 (2024-05). 5G; Study on scenarios and requirements for next generation access technologies (3GPP TR 38.913 version 18.0.0 Release 18). Sophia Antipolis: ETSI, 2024. 41 p. [Electronic resource]. Available at: <http://www.etsi.org> (accessed: 22.03.2024).
4. Kaltenberger F., Silva A.P., Gosain A. [et al.] (2020) Open Air Interface: Democratizing Innovation in the 5G Era. *Computer Networks*. Vol. 176. P. 107284. DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107284
5. Nikaein N., Marina M.K., Manickam S. [et al.] (2014) Open Air Interface: A flexible platform for 5G research. *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* Vol. 44, no. 5. Pp. 33-38.
6. 3GPP. TS 38.322 V17.3.0: NR; Radio Link Control (RLC) protocol specification. Sophia Antipolis: ETSI, 2024.
7. Sohaib R.M., Shah S.T., Jamshed M.A. [et al.] (2025) Optimizing URLLC in Open RAN: *Standards Magazine*. Vol. 9, no. 3. Pp. 33-39. DOI: 10.1109/MCOMSTD.2025.3572604
8. Kryukov Ya.V., Pokamestov D.A., Rogozhnikov E.V. [et al.] (2020) Analysis of Computational Complexity and Execution Time of the Protocol Stack in 5G New Radio Networks: *Doklady TUSUR: Proceedings of TUSUR University*. Vol. 23, no. 3. Pp. 31-37. DOI: 10.21293/1818-0442-2020-23-3-31-37 (In Russian).
9. Kundu L., Lin X., Agostini E. [et al.] (2024) Hardware Acceleration for Open Radio Access Networks: A Contemporary Overview. *IEEE Communications Magazine*. Vol. 62, no. 9. Pp. 160-167. DOI: 10.1109/MCOM.023.2300281
10. Vasudevan V.A., Esfahanizadeh H., Kim B.D. [et al.] (2026) Revisiting the Interface Between Error and Erasure Correction in Wireless Standards. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Vol. 44, no. 4. Pp. 3237-3250. DOI: 10.1109/JSAC.2026.3651705

Оптимизация протокола 5G RLC для высокоскоростной передачи данных
с низкими задержками в сетях OpenRAN на платформе ARM

11. 3GPP. TS 36.322 V10.0.0. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) protocol specification (Release 10). Sophia Antipolis: ETSI, 2011. 42 p.
12. 3GPP. TS 38.470 V17.0.0: 5G; NG-RAN; F1 general aspects and principles (Release 17). Sophia Antipolis: ETSI, 2022. 20 p.
13. 3GPP. TS 38.474 V17.0.0: 5G; NG-RAN; F1 data transport (Release 17). Sophia Antipolis: ETSI, 2022. 9 p.
14. 3GPP. TS 38.331 V18.5.1: 5G; NR; Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 18). Sophia Antipolis: ETSI, 2025. 1668 p.
15. Irazabal M., Lopez-Aguilera E., Demirkol I. [et al.] (2021) Preventing RLC Buffer Sojourn Delays in 5G. *IEEE Access*. Vol. 9. Pp. 39466-39488. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3063769
16. Kumar R., Francini A., Panwar S. [et al.] (2018) Dynamic control of RLC buffer size for latency minimization in mobile RAN. 2018: IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Barcelona, 2018. Pp. 1–6.
17. Kumar R., Francini A., Panwar S. [et al.] (2019) Design of an enhanced bearer buffer for latency minimization in the mobile RAN. 2019: IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Waikoloa, HI, USA, 2019. Pp. 1-6.

Поступила в редакцию: 21.04.2026

Поступила после рецензирования: 29.05.2026

Принята к публикации: 15.06.2026

Received: 21.04.2026

Revised: 29.05.2026

Accepted: 15.06.2026