

РАЗРАБОТКА И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОРЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ xAPP И rAPP В АРХИТЕКТУРЕ OPEN RAN

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-8-4-17

Manuscript received 11 May 2026;

Accepted 17 July 2026

Ермакова Анастасия Всеволодовна,
Московский технический университет связи и информатики
Москва, Россия, msikisylia@gmail.com

Варламов Олег Витальевич,
Московский технический университет связи и информатики
Москва, Россия, vov@mtuci.ru

Ключевые слова: Open RAN, xApp, rApp, RAN
Intelligent Controller, распределение радиоресурсов,
интеллектуальное управление сетью, машинное
обучение, качество обслуживания

В статье рассматривается задача интеллектуального распределения радиоресурсов в сетях радиодоступа, построенных на принципах открытой архитектуры O-RAN. Показано, что применяемые в существующих системах алгоритмы планирования, ориентированные на одну-две целевые метрики, не способны в полной мере учитывать одновременное изменение множества сетевых параметров - качества радиоканала, интенсивности трафика, требований пользователей к задержке и потерям пакетов. В качестве решения предложена модель взаимодействия компонентов xApp и rApp, реализующая двухуровневую схему управления: долгосрочный прогноз состояния сети, формируемый в контуре Non-RT RIC, и оперативную корректировку распределения физических ресурсных блоков, выполняемую в контуре near-RT RIC. Разработан математический аппарат модели, включающий формализацию задачи распределения ресурсов с учётом ограничений технологии OFDMA, авторский интегральный критерий приоритезации пользователей, объединяющий качество канала, приоритет сервиса, прогноз нагрузки и историю обслуживания, а также анализ устойчивости предложенного алгоритма управления на основе метода функций Ляпунова. Работоспособность модели проверена посредством имитационного моделирования в среде MATLAB Simulink, воспроизводящего полный цикл функционирования системы - от генерации пользовательского трафика до формирования управляющих воздействий на базовую станцию. Полученные результаты демонстрируют снижение задержки передачи данных, сокращение вероятности потери пакетов, рост спектральной эффективности и повышение справедливости распределения ресурсов между пользователями по сравнению с традиционными алгоритмами планирования.

Информация об авторах:

Ермакова Анастасия Всеволодовна, к.т.н., ассистент кафедры "Радиооборудование и схемотехника", Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, <https://orcid.org/0009-0002-8439-2111>

Варламов Олег Витальевич, д.т.н., профессор кафедры "Радиооборудование и схемотехника", Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-3996-9156>

Для цитирования:

Ермакова А.В., Варламов О.В. Разработка и имитационное моделирование алгоритма интеллектуального распределения радиоресурсов на основе взаимодействия xApp и rApp в архитектуре Open RAN // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №8. С. 4-17.

For citation:

A.V. Ermakova, O. V. Varlamov, "Development and Simulation of an Algorithm for Intelligent Radio Resource Allocation Based on the Open RAN Architecture xApp and rApp Components Interaction," T-Comm, 2026, vol. 20, no. 8, pp. 4-17. (in Russian)

Введение

Развитие сетей мобильной связи шестого поколения нельзя свести к единственной причине – здесь одновременно действует целый ряд факторов, тесно переплетённых между собой. Речь идёт прежде всего о резком росте объёмов передаваемых данных, о всё более плотном размещении базовых станций на единицу площади, о распространении сервисов, для которых критична минимальная задержка передачи, и, наконец, о постепенном переходе к программно-определяемым моделям управления сетевой инфраструктурой. Если предыдущие поколения связи были ориентированы главным образом на рост спектральной эффективности и повышение пропускной способности канала, то нынешний этап развития требует иного – сеть должна уметь подстраиваться под нагрузку, которая меняется практически в реальном времени. При этом архитектура действующих систем во многом остаётся жёстко централизованной.

Логика распределения радиоресурсов в большинстве случаев «защита» в оборудование конкретного производителя, и любое изменение алгоритмов планирования требует вмешательства в программное обеспечение самой базовой станции. Из этого вытекает сразу несколько проблем: усложняется внедрение новых решений, практически исключается возможность встроить в сеть интеллектуальные методы управления, а операторы связи оказываются в сильной зависимости от узкого круга поставщиков телекоммуникационного оборудования. Именно эта проблема во многом и породила концепцию Open Radio Access Network (O-RAN) – идею открытой, программно ориентированной архитектуры сети радиодоступа [1, 2, 28]. В отличие от закрытых интерфейсов, применявшихся ранее, O-RAN предполагает разбиение сетевой функциональности на отдельные, независимые друг от друга компоненты, которые взаимодействуют между собой через открытые, стандартизированные интерфейсы [3, 29, 30]. Благодаря этому сторонние разработчики получают возможность создавать собственные программные модули, не вмешиваясь во внутреннюю архитектуру базовых станций.

Важным элементом этой архитектуры выступает интеллектуальный контроллер радиосети – RAN Intelligent Controller (RIC) [4, 31]. Его задача состоит в принятии управленческих решений на основе анализа текущего состояния сетевых элементов. Появление RIC даёт возможность перенести значительную долю функций оптимизации с оборудования базовой станции на отдельную программную платформу, где выполняются аналитические расчёты и применяются методы машинного обучения. В рамках архитектуры O-RAN контроллер RIC делится на две функциональные подсистемы, каждая из которых ориентирована на свой временной масштаб обработки информации [5, 32, 33]. Первая – near-real-time RIC – работает в режиме, близком к реальному времени, и отвечает за быстрое реагирование на изменения сетевых параметров с задержками порядка десятков миллисекунд [6, 34]. Вторая подсистема нацелена на долгосрочный анализ производительности сети, прогнозирование её состояния и выработку стратегических управляющих решений, которые реализуются в диапазоне от нескольких секунд до часов [7, 35]. Подобное разделение задач продиктовано самой природой процессов, происходящих в

радиосети. Скажем, выбор абонента для обслуживания в определённом временном интервале требует практически мгновенного решения, тогда как анализ суточной загрузки соты или прогноз интенсивности трафика не предъявляют столь жёстких требований к скорости обработки данных. Для реализации прикладных алгоритмов управления в O-RAN предусмотрены специализированные программные компоненты двух типов – xApp и rApp [8, 9, 36-40]. Несмотря на схожие принципы построения, они решают разные классы задач.

Приложения xApp функционируют внутри near-real-time RIC и служат для оперативной корректировки сетевых параметров. Они опираются на телеметрические данные, поступающие от элементов радиодоступа через интерфейс E2 [10-13]. Проанализировав текущее состояние сети, xApp формирует управляющее воздействие и передаёт его обратно в оборудование базовой станции. Благодаря этому становится возможной динамическая настройка алгоритмов распределения ресурсов, параметров планирования, управления мощностью передачи, балансировки нагрузки между сотами, а также выбора схемы модуляции.

В отличие от xApp, приложения rApp работают в составе Non-Real-Time RIC и ориентированы на долгосрочную оптимизацию сети. Для этого они используют накопленные исторические данные, статистику эксплуатации оборудования, сведения о поведении абонентов и прогнозы трафика [14, 15]. Главная функция rApp – формирование рекомендаций по изменению сетевых параметров, которые впоследствии передаются в near-real-time RIC для практической реализации. Совместная работа xApp и rApp формирует иерархическую систему интеллектуального управления радиосетью. Верхний уровень этой иерархии занимается анализом глобальных тенденций, выявлением закономерностей в изменении нагрузки и построением прогнозов, а нижний – оперативной подстройкой параметров планирования с учётом текущей обстановки в каждой отдельной соте, что принципиально отличается от традиционных схем распределения ресурсов, опирающихся на заранее заданные алгоритмы планирования.

В классических сетях решения обычно принимаются по фиксированным процедурам – Round Robin, Maximum Carrier-to-Interference, Maximum Throughput или Proportional Fair. При всей своей распространённости каждый из этих методов настроен на достижение лишь одной целевой метрики [16-19]. Так, алгоритм Maximum Throughput максимизирует суммарную пропускную способность сети, однако способен ухудшить качество обслуживания пользователей, находящихся на границе зоны покрытия. Алгоритм Round Robin, напротив, обеспечивает равное распределение ресурсов между абонентами, но не учитывает реальное состояние радиоканала, что снижает эффективность использования спектра.

Сетям нового поколения свойственна значительная изменчивость условий передачи данных. Постоянно колеблются число активных пользователей, их пространственное расположение, уровень взаимных помех, качество радиоканала, объём трафика и требования отдельных сервисов к задержке. При таких обстоятельствах жёстко закреплённый алгоритм распределения ресурсов рано или поздно перестанет соответствовать реальному состоянию сети – стратегия, выбранная раз и навсегда, попросту не успевает за происходя-

щими изменениями [20-22]. Приложения xApp и gApp снимают эту проблему, избавляя от необходимости держаться единственного алгоритма планирования. Вместо этого состояние сети оценивается непрерывно, а стратегия распределения ресурсов подбирается исходя из текущей картины. Стоит измениться характеристикам радиоканала или интенсивности трафика – и параметры планирования пересматриваются автоматически, без вмешательства оператора. Центральную роль здесь играют технологии искусственного интеллекта и машинного обучения. С их помощью можно не только фиксировать текущее состояние сети, но и предсказывать его дальнейшее развитие, опираясь на накопленную статистику. Обучение с подкреплением, градиентный бустинг, нейронные сети и методы глубокого обучения дают возможность формировать управляющие решения с учётом сразу множества одновременно меняющихся параметров – задача, которую традиционным эвристическим алгоритмам решить попросту не под силу.

Немаловажно и то, что архитектура O-RAN открывает дорогу независимой разработке интеллектуальных приложений [23-26]. Создавать собственные алгоритмы оптимизации, работающие на общей программной платформе без изменения аппаратной части сети, могут как производители оборудования, так и операторы связи или исследовательские коллективы. Это заметно ускоряет внедрение новых методов управления и подстёгивает конкуренцию среди разработчиков программного обеспечения для мобильных сетей. Что касается непосредственно распределения радиоресурсов, наибольшим спросом пользуются приложения, отвечающие за динамическое перераспределение приоритетов обслуживания абонентов, прогнозирование перегрузки отдельных сот, интеллектуальную балансировку нагрузки, гибкое управление полосой пропускания и подбор параметров планировщика с учётом условий распространения сигнала. Работая вместе, xApp и gApp формируют замкнутый цикл управления: телеметрические данные собираются, состояние сети анализируется, нагрузка прогнозируется, вырабатываются управляющие воздействия – и тут же оценивается их результативность.

1 Разработка модели взаимодействия xApp и gApp для оптимизации распределения радиоресурсов

Отправной точкой при построении подобной модели служит наблюдение, что современные сети отличаются высокой изменчивостью условий передачи данных: число активных пользователей, их пространственное расположение, уровень взаимных помех, качество радиоканала, объём трафика и требования сервисов к задержке – всё это меняется практически непрерывно. Данная изменчивость и определяет исходное требование к разрабатываемой модели: она должна опираться не на фиксированный алгоритм планирования, а на механизм постоянной оценки состояния сети с последующим выбором наиболее подходящей стратегии распределения ресурсов. В основу модели закладывается принцип разделения функций между xApp и gApp, каждый из которых решает свою часть задачи оптимизации [27, 28]. За gApp закрепляется формирование стратегических рекомендаций на основе накопленной статистики – данных о поведении абонентов, истории эксплуатации оборудования и прогнозах трафика. Эти рекомендации передаются в real-time RIC, где приложения xApp преобразуют их в конкретные управляющие воздействия, применяемые к оборудованию базовой станции с задержкой порядка десятков миллисекунд. Таким образом модель приобретает двухуровневую структуру: верхний уровень отвечает за анализ долгосрочных тенденций и прогнозирование нагрузки, нижний – за оперативную подстройку параметров планирования применительно к текущей ситуации в конкретной соте. Главным элементом разрабатываемой модели становится использование методов искусственного интеллекта и машинного обучения – обучения с подкреплением, градиентного бустинга, нейронных сетей и алгоритмов глубокого обучения. Их применение позволяет учитывать одновременно множество изменяющихся параметров сети и формировать управляющие решения такого уровня сложности, который недостижим при использовании традиционных эвристических методов планирования.

Преимуществом предлагаемой модели выступает и то, что архитектура O-RAN, на которой она базируется, допускает независимую разработку компонентов xApp и gApp производителями оборудования, операторами связи и исследовательскими организациями – без изменения аппаратной части сети. Это расширяет возможности апробации и доработки модели, а также ускоряет внедрение новых алгоритмических решений. Применительно к задаче распределения радиоресурсов модель взаимодействия xApp и gApp должна охватывать такие функции, как динамическое перераспределение приоритетов обслуживания пользователей, прогнозирование перегрузки отдельных сот, интеллектуальную балансировку нагрузки, адаптивное управление полосой пропускания и выбор параметров планировщика с учётом текущих условий распространения радиосигнала. В совокупности эти функции формируют замкнутый цикл управления: сбор телеметрических данных, анализ состояния сети, прогнозирование нагрузки, формирование управляющих воздействий, оценка их эффективности, – который и составляет основу разрабатываемой модели взаимодействия xApp и gApp. На основании указанных параметров определяется интегральный показатель состояния сети:

$$S = f(U, PRB, SINR, CQI, I, D, J, P, T, SE, F), \quad (1)$$

где U – количество активных пользователей; PRB – уровень использования физических ресурсных блоков; $SINR$ – отношение мощности полезного сигнала к сумме шума и интерференции; CQI – индикатор качества канала; I – уровень межсотовой интерференции; D – средняя задержка передачи; J – джиттер; P – вероятность потери пакетов; T – интенсивность трафика; SE – спектральная эффективность; F – прогноз нагрузки, сформированный приложением gApp.

2 Математическое описание разработанной модели

Пусть сеть обслуживает множество абонентов $U = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$ которым необходимо поставить в соответствие множество физических ресурсных блоков (PRB) $R = \{r_1, r_2, \dots, r_M\}$. Поскольку каждому пользователю в общем случае может быть выделено произвольное число ресурсных блоков, для описания факта закрепления

ресурса за абонентом вводится бинарная переменная назначения

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } r_j \text{ назначен } u_i \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (2)$$

Матрица $\{x_{ij}\}$ размерности $N \times M$ представляет собой основную переменную задачи оптимального распределения ресурсов и полностью определяет текущую конфигурацию радиосети.

Технология множественного доступа OFDMA [41], используемая в сетях радиодоступа пятого и последующих поколений, накладывает естественное ограничение: один и тот же ресурсный блок в пределах заданного временного интервала может быть закреплён не более чем за одним пользователем. Данное требование формализуется в виде

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} \leq 1, j = 1, \dots, M. \quad (3)$$

Из этого ограничения непосредственно следует величина ресурса, которым фактически располагает i -й пользователь:

$$R_i = \sum_{j=1}^M x_{ij}. \quad (4)$$

Именно величина R_i определяет далее полосу пропускания, доступную пользователю, и, следовательно, достижимую для него скорость передачи данных. Учитывая, что один физический ресурсный блок в сетях 5G соответствует полосе $B^{PRB} = 180$ кГц (как в 4G LTE) [42], выделенная пользователю полоса пропускания составляет

$$B_i = 180000 \cdot \sum_{j=1}^M x_{ij}. \quad (5)$$

Достижимая скорость передачи данных определяется в соответствии с теоремой Шеннона [43] о пропускной способности канала с аддитивным белым гауссовским шумом, применённой к отношению сигнал/шум и интерференция (SINR), характерному для сотовых систем связи:

$$C_i = B_i \cdot \log_2(1 + \text{SINR}_i). \quad (6)$$

Подстановка выражения (5) в (6) показывает, что скорость передачи данных конкретного пользователя напрямую и однозначно определяется схемой распределения ресурсных блоков x_{ij} :

$$C_i = 180000 \cdot (\sum_{j=1}^M x_{ij}) \cdot \log_2(1 + \text{SINR}_i). \quad (7)$$

Тем самым устанавливается прямая функциональная связь между решением задачи распределения ресурсов и достигаемым качеством обслуживания абонента, что делает переменные x_{ij} объектом последующей оптимизации. Величина SINR_i раскрывается через мощность полезного сигнала, принимаемого i -м пользователем, $S = P_i \cdot G_i$, где P_i – мощность передачи, G_i – коэффициент усиления канала, и суммарную мощность межсотовой интерференции от прочих активных передатчиков сети $I = \sum_{k \neq i} P_k G_k$. С учётом теплового шума приёмника N_0 отношение сигнал/шум и интерференция определяется как

$$\text{SINR}_i = \frac{P_i \cdot G_i}{(\sum_{k \neq i} P_k G_k + N_0)} \quad (8)$$

что служит основным входным параметром для приложения хApp при оценке текущего качества радиоканала и принятии решения о назначении ресурсов конкретному пользователю. Спектральная эффективность [44], определяемая как отношение достигнутой скорости передачи к занимаемой полосе, с учётом (5) сводится к логарифмической функции от SINR и не зависит от абсолютной величины выделенной полосы:

$$SE_i = \frac{C_i}{B_i} = \log_2(1 + \text{SINR}_i). \quad (9)$$

Наряду со спектральной эффективностью для характеристики загрузки сети вводится коэффициент использования ресурсов как отношение суммарно занятых ресурсных блоков к их общему числу:

$$L = \frac{(\sum_i R_i)}{R_{\text{total}}}. \quad (10)$$

Показатель L характеризует степень загрузки соты в целом и используется впоследствии как индикатор для переключения между стратегиями управления.

Приложение хApp принимает решение о распределении ресурсов, опираясь одновременно на набор параметров разной физической природы и различной размерности – задержку, скорость передачи, отношение SINR, индикатор качества канала CQI и др. Для их совместного использования в единой оценочной функции каждый параметр x_i подвергается линейному нормированию к диапазону $[0; 1]$:

$$X_i = \frac{(x_i - x_i^{\min})}{(x_i^{\max} - x_i^{\min})}, \quad 0 \leq X_i \leq 1. \quad (11)$$

Все нормированные величины X_i образует основу интегрального показателя состояния канала пользователя, используемого при ранжировании абонентов на этапе распределения ресурсов:

$$S = \sum_{i=1}^n w_i X_i, \sum_i w_i = 1, \quad (12)$$

где w_i – весовые коэффициенты, отражающие относительную значимость каждого из учитываемых параметров. Функция прогнозирования, реализуемая гApp, состоит в оценке будущего значения интенсивности трафика $\lambda(t + \Delta t)$ по ряду предшествующих наблюдений $\lambda_t = \{\lambda(t), \lambda(t-1), \dots, \lambda(t-n)\}$ [45]. В общем виде прогнозная модель записывается как

$$\hat{\lambda}(t + \Delta t) = F(\lambda_t). \quad (13)$$

В простейшем случае функция $F(\cdot)$ принимает форму линейной авторегрессии

$$\hat{\lambda}(t + 1) = a_1 \lambda(t) + a_2 \lambda(t-1) + \dots + a_n \lambda(t-n), \quad (14)$$

тогда как при использовании рекуррентных нейронных сетей, в частности архитектуры LSTM, прогноз формируется на основе скрытого состояния сети

$$h_t = f(W_h h_{t-1} + W_x x_t + b), \hat{\lambda} = W_o h_t + b_o. \quad (15)$$

Полученное значение $\hat{\lambda}(t+1)$ передается в контур near-real-time RIC и используется приложением хApp как один из компонентов интегрального критерия при принятии оперативных решений. Приоритет обслуживания абонента естественно рассматривать как функцию класса предоставляемого сервиса, качества радиоканала, требований QoS и прогнозируемой нагрузки:

$$P_i = \alpha \cdot Service_i + \beta \cdot CQI_i + \gamma \cdot QoS_i + \delta \cdot Forecast_i. \quad (16)$$

Задача хApp состоит в выборе такого распределения ресурсов, которое обеспечивает максимум обобщенной функции полезности сети, учитывающей одновременно рост спектральной эффективности и качества обслуживания, а также снижение задержки и вероятности потерь пакетов:

$$U = \alpha \cdot SE + \beta \cdot QoS - \gamma \cdot D - \delta \cdot P. \quad (17)$$

На основании (17) задача оптимального распределения ресурсов формулируется как задача максимизации функции полезности по переменным x_{ij} при ограничениях на доступность ресурсов, минимально допустимую скорость передачи, предельную задержку и вероятность потерь:

$$\max(\alpha \cdot SE + \beta \cdot QoS - \gamma \cdot D - \delta \cdot P) \quad (18)$$

при условиях $\sum_i x_{ij} \leq 1$; $\sum_j x_{ij} \geq R_i^{min}$; $D \leq D_{max}$; $P \leq P_{max}$; $C_i \geq C_i^{min}$; $L \leq 1$. Практическое применение критерия (17)-(18) осложняется тем, что учитываемые характеристики сети находятся в объективном противоречии: рост пропускной способности, как правило, сопровождается увеличением задержки, тогда как её минимизация нередко достигается ценой снижения спектральной эффективности, что делает целесообразным представление задачи в виде многокритериальной оптимизации, для чего вводится обобщенная функция стоимости распределения $J(x)$, где $x = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{nm})$ – матрица назначения ресурсных блоков:

$$J = \alpha_1 F_{SE} + \alpha_2 F_{QoS} - \alpha_3 F_D - \alpha_4 F_L - \alpha_5 F_P, \sum_{i=1}^5 \alpha_i = 1, \quad (19)$$

где F_{SE} , F_{QoS} , F_D , F_L и F_P – частные показатели спектральной эффективности, качества обслуживания, задержки, загрузки сети и вероятности потерь соответственно. Нормировка весовых коэффициентов α_i обеспечивает возможность изменять приоритетность отдельных критериев без изменения самой структуры алгоритма распределения ресурсов. В свою очередь показатель качества обслуживания раскладывается на скорость передачи данных, задержку, джиттер и вероятность потерь, взятые с соответствующими весовыми коэффициентами β_i :

$$F_{QoS} = \beta_1 Q_T - \beta_2 Q_D - \beta_3 Q_J - \beta_4 Q_P, \sum \beta_i = 1. \quad (20)$$

Поиск распределения ресурсов, максимизирующего функцию $J(x)$ при ограничениях на занятость ресурсных блоков, минимально необходимый объем ресурсов и предельно допустимую задержку, целесообразно проводить методом множителей Лагранжа [46]. Соответствующая функция Лагранжа имеет вид

$$L = J(x) + \lambda_1 (1 - \sum_i x_{ij}) + \lambda_2 (\sum_j x_{ij} - R_i^{min}) + \lambda_3 (D_{max} - D_i) \quad (21)$$

где λ_1 , λ_2 , λ_3 – множители Лагранжа, соответствующие каждому из ограничений. Стационарная точка, отвечающая оптимальному распределению ресурсов и одновременно удовлетворяющая всем наложенным ограничениям, определяется условием равенства нулю частной производной функции Лагранжа по переменным назначения $\frac{\partial L}{\partial x_{ij}} = 0$. Поскольку

сеть радиодоступа представляет собой систему, изменяющуюся во времени, целесообразно перейти от статического описания к динамической модели.

Текущее состояние сети на шаге k представляется вектором $s(k) = [L(k), SINR(k), CQI(k), D(k), P(k)]^T$. Переход к следующему состоянию, вызванный как управляющим воздействием хApp, так и внешними изменениями среды, описывается разностным уравнением

$$s(k+1) = f(s(k), u(k)), \quad (22)$$

где $u(k)$ – управляющее воздействие, формируемое приложением хApp на основании текущего состояния сети в виде вектора. Соответственно, задача гApp состоит в формировании прогноза следующего состояния

$$\hat{s}(k+1) = F(s(k)), \quad (23)$$

на основании которого вычисляется скорректированное управляющее воздействие на следующем шаге:

$$u(k+1) = G(\hat{s}(k+1)). \quad (24)$$

Выражения (22)-(24) образуют замкнутый контур интеллектуального управления, в котором долгосрочный прогноз, формируемый гApp, непрерывно уточняет оперативные решения, принимаемые хApp. Функционирование хApp может быть также представлено как задача обучения с подкреплением, в которой после каждого управляющего воздействия агент получает вознаграждение, отражающее произошедшее изменение ключевых показателей сети:

$$R_t = \eta_1 \Delta SE + \eta_2 \Delta QoS - \eta_3 \Delta D - \eta_4 \Delta P, \sum \eta_i = 1. \quad (25)$$

При использовании алгоритма Q-обучения оценка ценности действия a в состоянии s обновляется по правилу

$$Q(s, a) = Q(s, a) + \alpha [R + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)], \quad (26)$$

где a – скорость обучения, γ – коэффициент дисконтирования будущих вознаграждений, s' – состояние, в которое переходит сеть после того, как в текущем состоянии s было выполнено действие a .

Динамику изменения уровня загрузки сети целесообразно рассматривать как цепь Маркова с конечным множеством состояний $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, каждое из которых соответствует определённому диапазону нагрузки. Переходы между состояниями описываются матрицей вероятностей $P = [p_{ij}]$, где

$$p_{ij} = P(S_{t+1} = j | S_t = i), \sum_j p_{ij} = 1. \quad (27)$$

На основании накопленной матрицы переходов гApp рассчитывает вероятность возникновения перегрузки соты в последующие интервалы времени, что используется как один из входных параметров при формировании прогноза нагрузки. Поток пользовательских заявок описывается пуассоновским процессом с интенсивностью λ , интенсивность обслуживания принимается равной μ . Соответствующий коэффициент загрузки системы $\rho = \lambda / \mu$ позволяет, в рамках модели массового обслуживания М/М/1, получить выражение для средней задержки обслуживания заявки:

$$D = \frac{1}{\mu - \lambda}, \quad (28)$$

и показывает, что при приближении интенсивности поступления заявок к предельной пропускной способности системы задержка обслуживания стремится к бесконечности, что и объясняет необходимость упреждающего вмешательства хApp до достижения критических значений коэффициента загрузки. Обобщая приведённые выше соотношения, взаимодействие хApp и гApp можно представить в виде замкнутого контура управления с обратной связью, включающего два уровня принятия решений – оперативный и стратегический. Вектор состояния сети на шаге k принимает вид $\mathbf{x}(k) = [L(k), SINR(k), CQI(k), B(k), D(k), P(k)]^T$, где $L(k)$ – коэффициент загрузки радиоресурсов, $SINR(k)$ – отношение сигнал/шум и интерференция, $CQI(k)$ – индикатор качества канала, $B(k)$ – текущая пропускная способность, $D(k)$ – средняя задержка, $P(k)$ – вероятность потери пакетов. Пусть $\mathbf{u}(k)$ – управляющее воздействие, формируемое хApp; тогда динамика сети описывается линейной моделью пространства состояний

$$\mathbf{x}(k+1) = A \cdot \mathbf{x}(k) + B \cdot \mathbf{u}(k) + \mathbf{w}(k), \quad (29)$$

где A – матрица, отражающая собственную динамику сети, B – матрица управления, $\mathbf{w}(k)$ – вектор случайных внешних возмущений (изменение пользовательской нагрузки, интерференция, перемещение абонентов). Вектор состояния $\mathbf{x}(k)$ поступает в гApp, где формируется прогноз

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = F(\mathbf{x}(k)), \quad (30)$$

используемый затем при вычислении управляющего воздействия следующего шага

$$\mathbf{u}(k+1) = G(\hat{\mathbf{x}}(k+1)). \quad (31)$$

Выражения (29)–(31) образуют полную математическую модель взаимодействия хApp и гApp: результат прогнозирования, формируемого на длительном временном горизонте, непосредственно определяет оперативное управляющее воздействие, реализуемое на горизонте near-real-time. Существующие алгоритмы планирования радиоресурсов – Round Robin, Maximum Throughput, Proportional Fair – опираются, как правило, на один-два показателя (очередность обслуживания, мгновенную скорость передачи или отношение текущей скорости к средней) и вследствие этого не способны одновременно учитывать качество канала, приоритет сервиса, ожидаемую динамику нагрузки и историю обслуживания абонента. Для устранения этого ограничения в статье вводится интегральный критерий приоритезации пользователя [47]

$$\Psi_i = \omega_1 Q_i + \omega_2 S_i + \omega_3 F_i + \omega_4 H_i - \omega_5 D_i, \sum_{i=1}^5 \omega_i = 1, \quad (32)$$

где Q_i – качество радиоканала пользователя, S_i – приоритет предоставляемого сервиса, F_i – прогноз нагрузки, рассчитанный гApp, H_i – коэффициент справедливости обслуживания, накапливающий историю распределения ресурсов, D_i – текущая задержка передачи. Ресурсный блок закрепляется за пользователем, для которого достигается максимальное значение критерия:

$$u^* = \operatorname{argmax}_i \Psi_i. \quad (33)$$

Принципиальное отличие предложенного критерия от известных алгоритмов планирования состоит во включении в него прогноза нагрузки F_i , формируемого гApp: решение о распределении ресурсов принимается тем самым не только на основании текущего состояния радиоканала, но и с учётом ожидаемого изменения условий функционирования сети. Для оценки устойчивости замкнутого контура управления (29) вводится квадратичная функция Ляпунова

$$V(k) = \mathbf{x}^T(k) \cdot \mathbf{x}(k) \geq 0. \quad (34)$$

Асимптотическая устойчивость предложенного алгоритма управления имеет место, если разность значений функции Ляпунова на соседних шагах отрицательна:

$$\Delta V = V(k+1) - V(k) < 0. \quad (35)$$

Подстановка модели состояния (29) в выражение (34) даёт $V(k+1) = \mathbf{x}^T A^T A \mathbf{x} + 2 \mathbf{x}^T A^T B \mathbf{u} + \mathbf{u}^T B^T B \mathbf{u}$, откуда следует, что при выполнении условия (35) система остаётся асимптотически устойчивой: даже при кратковременных перегрузках сети управляемые параметры возвращаются к устойчивому режиму функционирования без возникновения незатухающих колебаний. Практическая применимость предложенного критерия (32)–(33) в контуре near-real-time RIC определяется вычислительной сложностью его реализации. Вычисление значения Ψ_i для каждого из N пользователей требует $O(N)$ операций; последующее ранжирование пользователей по убыванию $\Psi_i - O(N \cdot \log \cdot N)$; распределение M ресурсных блоков между упорядоченными пользо-

вателями – αM). Суммарная вычислительная сложность алгоритма составляет, таким образом,

$$O(N \cdot \log \cdot N + M), \quad (36)$$

тогда как полный перебор всех возможных вариантов закрепления ресурсов потребовал бы $O(N \cdot M)$ операций.

Полученная оценка подтверждает применимость предложенного алгоритма для реализации в контуре near-real-time RIC, где требования к времени принятия решения составляют десятки миллисекунд. С учётом того, что применение интеллектуального алгоритма распределения ресурсов оправдано преимущественно в условиях повышенной загрузки сети, вводится критерий выбора стратегии управления в зависимости от текущего коэффициента загрузки L :

$$Policy = \begin{cases} RR, \text{ если } L < 0,4 \\ PF, \text{ если } 0,4 \leq L < 0,75 \\ AI, \text{ если } L \geq 0,75 \end{cases} \quad (37)$$

где RR – Round Robin, PF – Proportional Fair, AI – предлагаемый алгоритм на основе xApp, что позволяет снизить вычислительную нагрузку на контроллер при умеренной загрузке сети, задействуя интеллектуальное управление лишь по мере приближения сети к состоянию перегрузки. В отличие от фиксированного набора весовых коэффициентов ω_i в выражении (32), в модели предусмотрена их автоматическая корректировка по результатам работы сети. Пусть $e(k) = QoS_{target} - QoS(k)$ – отклонение фактического качества обслуживания от целевого значения [48]. Тогда обновление весов на очередном шаге производится по правилу

$$\omega_i(k+1) = \omega_i(k) + \eta \cdot e(k), \quad (38)$$

с последующей нормировкой, обеспечивающей выполнение условия $\sum \omega_i = 1$:

$$\omega_i = \frac{\omega_i}{\sum_j \omega_j}. \quad (39)$$

где η – скорость адаптации. Благодаря (38)-(39) модель способна самостоятельно изменять относительную значимость отдельных критериев по мере изменения качества обслуживания, не требуя ручной перенастройки параметров алгоритма. Объединение приведённых выше соотношений позволяет сформулировать итоговую задачу оптимального распределения радиоресурсов, решаемую в рамках предложенной модели взаимодействия xApp и gApp:

$$\max J = \alpha_1 SE + \alpha_2 QoS + \alpha_3 R - \alpha_4 D - \alpha_5 P - \alpha_6 L \quad (40)$$

при ограничениях $\sum_i x_{ij} \leq 1$; $\sum_j x_{ij} \geq R_i^{min}$; $C_i \geq C_i^{min}$; $D_i \leq D_{max}$; $P_i \leq P_{max}$; $L \leq 1$; $\Delta V < 0$, где SE – спектральная эффективность, QoS – интегральный показатель качества обслуживания, R – функция вознаграждения интеллектуального агента xApp, D – средняя задержка, P – вероятность потери пакетов, L – коэффициент загрузки радиоре-

сурсов, а условие $\Delta V < 0$ обеспечивает асимптотическую устойчивость получаемого решения в смысле (35). Разработанная математическая модель охватывает как статическую задачу распределения физических ресурсных блоков, так и динамику взаимодействия xApp и gApp во времени, включая прогнозирование нагрузки, адаптацию весовых коэффициентов и проверку устойчивости получаемых решений, что и составляет теоретическую основу дальнейшего имитационного моделирования, изложенного в разделе 3.

3 Описание разработанной модели xApp/gApp в среде MATLAB Simulink

Для оценки эффективности предложенного алгоритма интеллектуального распределения радиоресурсов была разработана имитационная модель в среде MATLAB Simulink, воспроизводящая взаимодействие компонентов xApp и gApp в архитектуре Open RAN (рис. 1). По своей структуре модель представляет замкнутую систему управления с обратной связью и объединяет пять функциональных блоков: генерацию пользовательского трафика, моделирование сети радиодоступа, сбор телеметрических данных, прогнозирование нагрузки и принятие решений о перераспределении физических ресурсных блоков.

Подобная организация модели даёт возможность проследить поведение системы управления при изменении числа активных пользователей, интенсивности трафика и характеристик радиоканала, а также оценить, как разработанные алгоритмы влияют на эффективность использования радиочастотного спектра и на итоговое качество обслуживания абонентов.

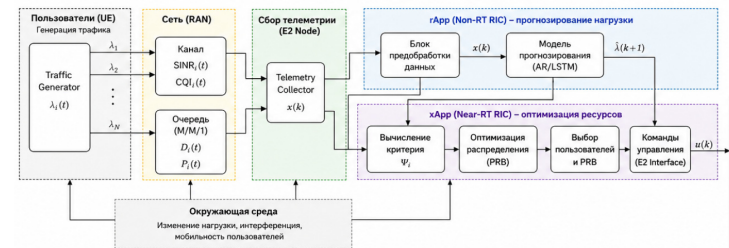


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели взаимодействия xApp и gApp в среде MATLAB Simulink

Моделирование начинается с формирования входного потока пользовательских данных, за который отвечает подсистема генерации трафика. Её назначение состоит в имитации поведения абонентских устройств сети пятого поколения и в воспроизведении разнообразных сценариев нагрузки, приближенных к реальным условиям эксплуатации мобильной связи. Каждому абоненту в модели присваивается набор индивидуальных параметров обслуживания – интенсивность генерации пакетов, требуемая скорость передачи данных, класс обслуживания и приоритет предоставляемого сервиса. Интенсивность поступления пакетов задаётся как случайный процесс, подчинённый заданному закону распределения, что позволяет воспроизвести характерную для современных сетей неравномерность пользовательской активности. Сформированный таким образом поток данных передаётся далее в модель сети радиодоступа.

Подсистема моделирования радиосети воспроизводит основные процессы функционирования базовой станции пятого поколения. На этом этапе для каждого пользователя рассчитываются параметры радиоканала, определяющие возможность передачи данных с заданным качеством обслуживания: отношение мощности полезного сигнала к суммарной мощности шума и межсотовой интерференции, индекс качества канала (CQI), доступная скорость передачи, коэффициент использования физических ресурсных блоков, вероятность потери пакетов и средняя задержка.

Скорость передачи вычисляется на основе формулы Шеннона

$$C_i = B_i \log_2(1 + \text{SINR}_i),$$

где B_i – полоса пропускания, выделенная пользователю, а SINR_i характеризует текущее состояние его радиоканала. Поскольку выделенная полоса определяется числом назначенных ресурсных блоков, любое изменение схемы их распределения напрямую отражается на пропускной способности, доступной конкретному абоненту. Помимо расчёта параметров радиоканала, модель воспроизводит обслуживание входящего трафика с использованием системы массового обслуживания M/M/1, что даёт возможность аналитически оценить влияние перегрузки сети на задержку передачи данных. При интенсивности поступления пакетов λ и интенсивности обслуживания μ среднее время ожидания определяется выражением $D = \frac{1}{\mu - \lambda}$.

Полученная зависимость демонстрирует резкий рост задержки по мере приближения интенсивности поступления пакетов к предельной пропускной способности системы – эффект, хорошо согласующийся с реальным поведением мобильных сетей в условиях перегрузки соты, когда увеличение числа активных пользователей приводит к образованию очередей и деградации качества обслуживания. Рассчитанные параметры работы радиосети поступают в подсистему сбора телеметрической информации, имитирующую функционирование интерфейса E2 архитектуры Open RAN. Её задача заключается в агрегации данных от элементов радиодоступа в единый вектор состояния сети, включающий коэффициент использования физических ресурсных блоков, отношение сигнал/шум и интерференция, показатель качества канала, среднюю задержку, вероятность потери пакетов, текущую пропускную способность соты и число активных пользователей: $\mathbf{x}(k) = [L(k), \text{SINR}(k), \text{CQI}(k), B(k), D(k), P(k)]^T$, где $L(k)$ отражает загрузку радиоресурсов, $B(k)$ – пропускную способность сети, $D(k)$ – среднюю задержку передачи данных, $P(k)$ – долю потерянных пакетов.

Сформированный таким образом вектор состояния одно- временно передаётся в гApp и хApp, обеспечивая синхронную работу обоих компонентов интеллектуального управления. Приложение гApp функционирует в составе контроллера Non-RT RIC и решает задачу долгосрочного анализа состояния сети и прогнозирования изменения нагрузки. На первом этапе поступающая телеметрия подвергается предварительной обработке: фильтруются случайные выбросы,

выполняется усреднение и нормирование показателей, формируются временные ряды. На основе подготовленных данных строится прогноз пользовательского трафика по модели $\hat{\lambda}(k+1) = F(\lambda(k), \lambda(k-1), \dots, \lambda(k-n))$, где функция $F(\cdot)$ представляет собой используемый алгоритм прогнозирования, оценивающий будущее значение нагрузки по предшествующим наблюдениям. Полученный прогноз позволяет заранее оценить ожидаемую загрузку соты, вероятность возникновения перегрузки, предполагаемое изменение пропускной способности и степень использования физических ресурсных блоков.

Эти сведения передаются в приложение хApp и служат основанием для выбора наиболее подходящей стратегии распределения ресурсов, а не просто фиксируются как справочная информация. Приложение хApp встроено в контроллер Near-RT RIC и отвечает за оперативное управление радиоресурсами практически в реальном времени. В отличие от традиционных алгоритмов планирования, опирающихся на фиксированный набор правил, предложенный алгоритм строится на интегральном критерии эффективности, позволяющем учитывать сразу несколько показателей качества обслуживания. Для каждого активного пользователя вычисляется значение $\Psi_i = \omega_1 Q_i + \omega_2 S_i + \omega_3 F_i + \omega_4 H_i - \omega_5 D_i$, где Q_i характеризует качество радиоканала, S_i – приоритет предоставляемого сервиса, F_i – прогноз нагрузки, полученный от гApp, H_i – коэффициент, учитывающий историю обслуживания пользователя, а D_i – его текущую задержку передачи данных.

Весовые коэффициенты подбираются таким образом, чтобы их сумма была равна единице, что позволяет корректно объединить разнородные критерии в единую оценочную функцию. После вычисления значений Ψ_i пользователи ранжируются по приоритету, и ресурсные блоки распределяются последовательно, начиная с абонентов с наивысшим значением критерия. При этом технология множественного доступа OFDMA накладывает дополнительное ограничение: в пределах одного временного интервала каждый физический ресурсный блок может быть закреплён лишь за одним пользователем, что формально записывается как $\sum_{i=1}^N x_{ij} \leq 1$.

Каждому абоненту выделяется минимально необходимое для гарантированного качества обслуживания количество ресурсных блоков, а суммарная нагрузка на соту не должна превышать допустимого предела – в противном случае сеть теряет способность справляться с обслуживанием трафика. По завершении процедуры распределения формируется управляющее воздействие $\mathbf{u}(k)$, которое передаётся на базовую станцию и изменяет параметры обслуживания пользователей, за счет этого реализуется функционирование интеллектуального контроллера реального времени, обеспечивающего непрерывную адаптацию сети к изменяющимся условиям. Для проверки устойчивости предложенного алгоритма в модель включена дополнительная подсистема, воспроизводящая внешние возмущающие воздействия.

В ходе экспериментов варьировались интенсивность пользовательского трафика, число активных абонентов, уро-

вень межсотовой интерференции, параметры радиосигнала и скорость перемещения пользователей, что позволило приблизить условия моделирования к реальной эксплуатации сети и оценить, сохраняет ли алгоритм эффективность при перегрузках и резких изменениях внешней среды.

Динамика состояния сети описывается дискретной моделью $\mathbf{x}(k+1) = A \cdot \mathbf{x}(k) + B \cdot \mathbf{u}(k) + \mathbf{w}(k)$, где матрица A отражает собственную динамику сети, матрица B – влияние управляющих воздействий, формируемых хАпп, а вектор $\mathbf{w}(k)$ – случайные внешние возмущения, вызванные изменениями трафика и состояния радиоканала.

По завершении каждого цикла моделирования система вновь собирает телеметрические данные, а обновлённое состояние сети передаётся в гАпп и хАпп, формируя тем самым непрерывный замкнутый контур управления, в котором результаты каждого этапа оптимизации используются для уточнения последующих решений о распределении ресурсов, данная организация в соответствии принципам архитектуры Open RAN, предполагающей постоянный обмен информацией между уровнем долгосрочного анализа и уровнем оперативного управления. Для регистрации результатов моделирования в модели предусмотрены блоки визуализации, позволяющие отслеживать динамику ключевых показателей работы сети – коэффициента использования физических ресурсных блоков, средней задержки передачи данных, вероятности потери пакетов, спектральной эффективности, скорости передачи данных и индекса справедливости распределения ресурсов между пользователями.

4 Анализ результатов моделирования

На рис. 2-7 представлены результаты исследования разработанной модели хАпп/гАпп. Динамика коэффициента использования физических ресурсных блоков при сравнении традиционного алгоритма и предложенной модели на базе хАпп/гАпп показана на рис. 2.

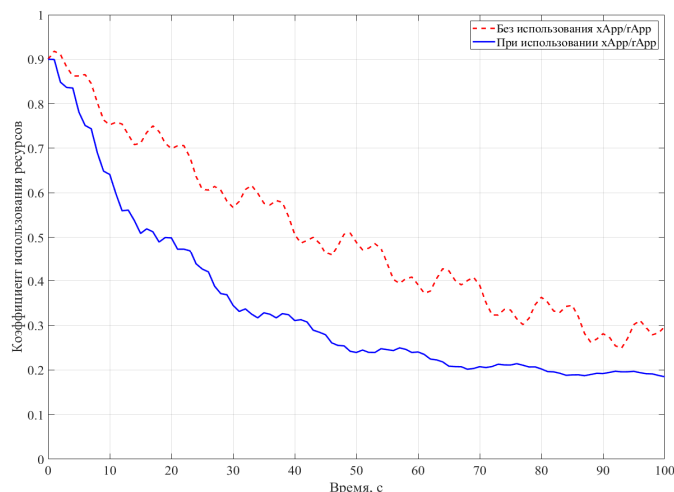


Рис. 2. Динамика коэффициента использования физических ресурсных блоков при традиционном алгоритме распределения ресурсов и предложенной модели на основе хАпп/гАпп

На начальном этапе моделирования обе кривые практически совпадают: сеть испытывает высокую нагрузку вследствие интенсивного пользовательского трафика, а система

управления ещё не располагает достаточным объёмом накопленных телеметрических данных для принятия обоснованных решений. По мере накопления статистики картина меняется – гАпп формирует прогноз предстоящего изменения нагрузки, а хАпп на его основе корректирует распределение ресурсных блоков между абонентами. Благодаря этому высвобождение занятых ресурсов начинает происходить заметно быстрее, чем при традиционной схеме планирования. К завершению эксперимента уровень загрузки сети при использовании предложенной модели стабилизируется в районе значения 0,2, тогда как без интеллектуального управления этот показатель удерживается на отметке около 0,3. Полученное различие свидетельствует о более рациональном использовании радиоресурсов: за счёт снижения загрузки формируется дополнительный резерв пропускной способности, что даёт возможность обслуживать большее число абонентов без риска возникновения перегрузки сети.

Изменение средней задержки передачи данных в процессе моделирования отражено на рис. 3.

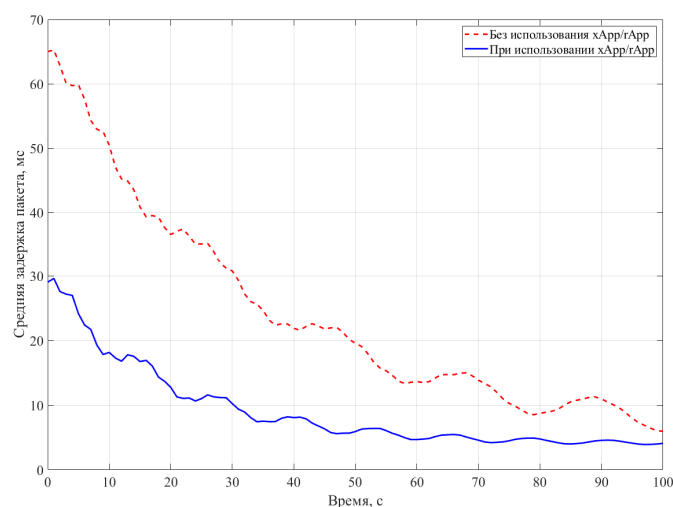


Рис. 3. Изменение средней задержки передачи пакетов в процессе моделирования

При использовании традиционной схемы распределения ресурсов, лишённой элементов интеллектуального управления, задержка снижается медленно: ресурсы закрепляются за пользователями неравномерно, вследствие чего пакеты накапливаются в очередях, а общая эффективность системы падает. При работе предложенной модели задержка сокращается значительно быстрее и уже на первой половине временного интервала моделирования выходит на стабильно низкий уровень. К завершению эксперимента средняя задержка составляет порядка 5-7 мс, тогда как при традиционном подходе она остаётся в пределах 10-12 мс. Полученное расхождение наглядно подтверждает способность предложенного алгоритма оперативно перераспределять радиоресурсы, не допуская переполнения очередей, и тем самым удовлетворять жёстким требованиям к минимальной задержке, предъявляемым современными сетями пятого поколения.

Динамика вероятности потери пакетов для сравниваемых алгоритмов представлена на рис. 4.

Данный показатель достигает наибольших значений: система ещё не успела адаптироваться к текущим условиям,

нагрузка на радиоресурсы остаётся высокой, а алгоритм распределения ресурсов действует без учёта фактического состояния радиоканала. По мере накопления телеметрических данных и включения в работу компонентов xApp и gApp ситуация заметно улучшается – количество потерянных пакетов последовательно сокращается. К окончанию эксперимента вероятность потери пакетов при использовании предложенной модели практически стремится к нулю, тогда как традиционный алгоритм сохраняет данный показатель в диапазоне 0,005-0,01.

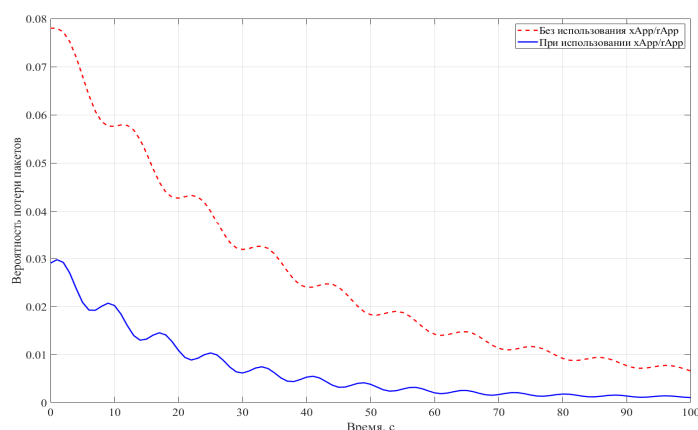


Рис. 4. Динамика вероятности потери пакетов при традиционном алгоритме распределения ресурсов и предложенной интеллектуальной модели

Полученный результат подтверждает, что сочетание прогнозирования нагрузки и интеллектуального распределения физических ресурсных блоков позволяет предотвращать переполнение очередей и тем самым повышать надёжность передачи данных в сети.

Изменение спектральной эффективности сети в ходе вычислительного эксперимента показано на рис. 5.

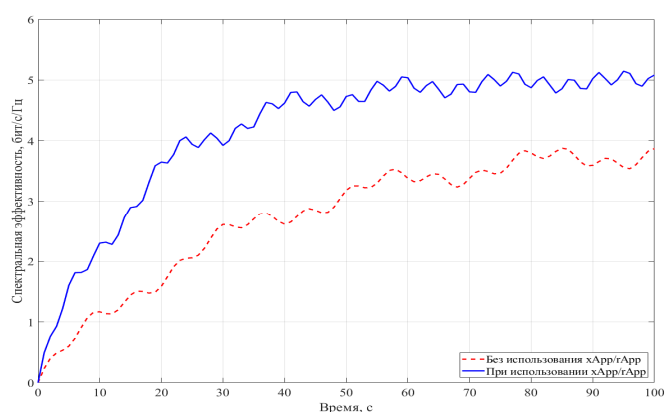


Рис. 5. Изменение спектральной эффективности сети в процессе моделирования

Для обоих сравниваемых алгоритмов наблюдается рост данного показателя по мере стабилизации работы сети, однако при использовании предложенной модели этот рост оказывается заметно более интенсивным. Уже к 20-30-й секунде моделирования спектральная эффективность достигает уровня порядка 4 бит/с/Гц, а к завершению эксперимента приближается к значению 5 бит/с/Гц. При традиционной схеме распределения ресурсов показатель стабилизируется суще-

ственно ниже – на уровне 3,5-3,8 бит/с/Гц. Полученное расхождение подтверждает, что предложенный алгоритм обеспечивает более рациональное использование доступного радиочастотного спектра и позволяет повысить пропускную способность сети без расширения занимаемой полосы частот.

Динамика индекса справедливости распределения ресурсов между пользователями приведена на рис. 6.

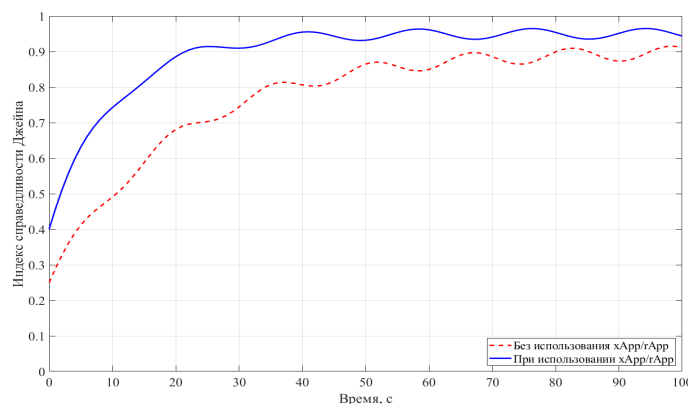


Рис. 6. Динамика индекса справедливости Джайна при распределении ресурсов между пользователями

Оба алгоритма демонстрируют сравнительно невысокие значения индекса, что объясняется неравномерным закреплением физических ресурсных блоков за абонентами в условиях ещё не устоявшейся работы системы. По мере функционирования интеллектуального механизма управления значение индекса быстро возрастает и достигает 0,95-0,97, что соответствует практически равномерному распределению ресурсов между всеми пользователями сети. При традиционной схеме планирования рост данного показателя происходит значительно медленнее, а его итоговое значение не превышает 0,88-0,90. Полученное различие свидетельствует о том, что предложенный механизм распределения ресурсов учитывает не только текущее качество радиоканала, но и индивидуальные требования пользователей к качеству обслуживания, что в совокупности обеспечивает более высокую степень справедливости предоставления сетевых ресурсов.

Результаты распределения физических ресурсных блоков между пользователями сети представлены на рис. 7.

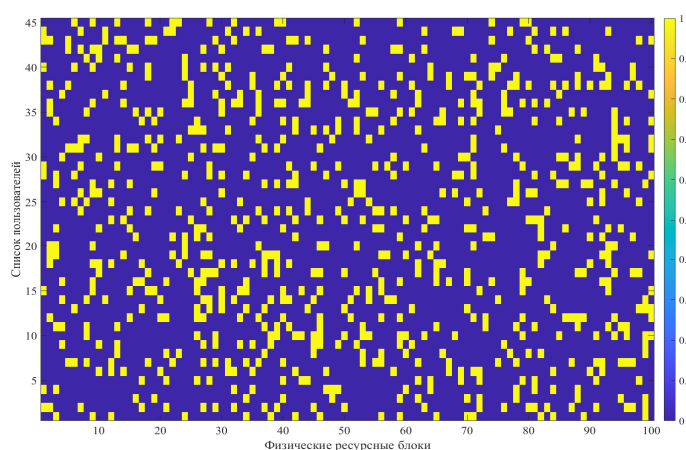


Рис. 7. Матрица распределения физических ресурсных блоков между пользователями сети

Представленная матрица распределения физических ресурсов блоков отражает процесс назначения ресурсов пользователям сети на протяжении рассматриваемого интервала моделирования: каждая строка матрицы соответствует отдельному абоненту, а каждый столбец – конкретному физическому ресурсному блоку, при этом выделенные элементы указывают на факт закрепления данного блока за соответствующим пользователем в определённый момент времени. Анализ полученной зависимости показывает отсутствие протяжённых по времени зон концентрации ресурсов у отдельных абонентов, что говорит о равномерном распределении физических ресурсов блоков между всеми пользователями сети.

Подобная структура назначения ресурсов способствует более эффективному использованию радиоинтерфейса, исключает монополизацию ресурсов отдельными пользователями и позволяет поддерживать стабильно высокое качество обслуживания даже при изменении интенсивности пользовательского трафика. Представленные результаты подтверждают корректность функционирования разработанного алгоритма распределения ресурсов и его способность адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации сети Open RAN.

Заключение

Проведённое моделирование системы интеллектуального управления радиоресурсами на основе взаимодействия xApp и rApp подтвердило её эффективность применительно к задаче оптимизации распределения ресурсов в архитектуре Open RAN. Совместное использование прогнозирования нагрузки и адаптивного управления физическими ресурсными блоками обеспечивает заметный прирост качества функционирования сети по сравнению с классическими схемами планирования.

Полученная динамика коэффициента загрузки ресурсов свидетельствует о более рациональном использовании доступного радиочастотного ресурса при работе предложенной модели. За счёт прогноза изменения пользовательского трафика, формируемого rApp, приложение xApp получает возможность заблаговременно корректировать распределение ресурсов между абонентами. Это приводит к снижению частоты локальных перегрузок соты и позволяет удерживать пропускную способность на требуемом уровне, сохраняя при этом резерв для обслуживания новых пользователей и компенсации внезапных всплесков нагрузки. Не менее показательны и временные характеристики сети: применение разработанного алгоритма сопровождается сокращением средней задержки передачи пакетов.

Динамическое перераспределение ресурсов снижает вероятность накопления пакетов в очередях, что имеет принципиальное значение для сервисов с жёсткими требованиями к задержке – в частности, для приложений класса URLLC, задач промышленной автоматизации, систем дистанционного управления и мультимедийных сервисов реального времени. Существенное снижение демонстрирует и вероятность потери пакетов: интеллектуальное управление физическими ресурсными блоками позволяет своевременно перераспределять ресурсы между пользователями и тем самым предотвращать переполнение очередей даже при резких колебаниях интенсивности трафика, что повышает об-

щую надёжность и устойчивость сети к изменению нагрузки. Дополнительным подтверждением эффективности предложенного подхода служит рост спектральной эффективности, отражающий более полное использование доступного радиочастотного спектра и увеличение передаваемого объёма данных без расширения занимаемой полосы частот – задача, напрямую отвечающая ключевым требованиям сетей пятого поколения.

Наряду с этим наблюдается устойчиво высокое значение индекса справедливости Джейна, приближающееся к единице, что говорит об отсутствии концентрации ресурсов у отдельных абонентов: каждый пользователь получает сопоставимый объём ресурсов независимо от текущего состояния своего радиоканала. Наконец, анализ матрицы распределения физических ресурсов блоков подтверждает отсутствие устойчивых зон перегрузки и равномерность распределения ресурсов во времени.

В целом, полученные результаты свидетельствуют о способности предложенного алгоритма быстро адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования сети, обеспечивая эффективное использование радиоресурса и стабильную работу системы при широком спектре сценариев нагрузки.

Литература

1. Kougoumtzidis G., Vlahov A., Poulkov V.K., Lazaridis P.I., Zaharis Z.D. Deep Learning-Aided QoE Prediction for Virtual Reality Applications Over Open Radio Access Networks // IEEE Access, vol. 11, pp. 143514-143529, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3343846.
2. Gerasimenko M. et al. Cooperative Radio Resource Management in Heterogeneous Cloud Radio Access Networks // IEEE Access, vol. 3, pp. 397-406, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2422266.
3. IEEE Draft Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Draft P802.11-REVmb/D8.0, March 2011 (Revision of IEEE Std 802.11-2007, as amended by IEEE Std 802.11k-2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, IEEE Std 802.11w-2009 and IEEE Std 802.11n-2009), vol., no., pp.1-2276, 29 March 2011, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.5741051.
4. Yun I.-H., Kim D.-S., An J., Kim D.-Y. Intelligent Network Control for Ultra-High-Speed Railway Communications: Challenges and Solutions // Electronics 2026, 15, 1942. <https://doi.org/10.3390/electronics15091942>
5. Safiullin I.A., Ashaev I.P., Korobkov A.A., Gaysin A.K., Nadeev A.F. Reinforcement Learning-Based Handover Algorithm for 5G/6G AI-RAN. *Inventions* 2026, 11, 8. <https://doi.org/10.3390/inventions11010008>
6. Firouzi R., Rahmani R. 5G-Enabled Distributed Intelligence Based on O-RAN for Distributed IoT Systems // *Sensors* 2023, 23, 133. <https://doi.org/10.3390/s23010133>
7. Koufos K., El Haloui K., Dianati M., Higgins M., Elmighani J., Imran M.A., Tafazolli R. Trends in Intelligent Communication Systems: Review of Standards, Major Research Projects, and Identification of Research Gaps. *J // Sens. Actuator Netw.* 2021, 10, 60. <https://doi.org/10.3390/jsan10040060>
8. Ermakova A.V., Varlamov O.V. Improving the Energy Efficiency of Radio Access Networks by Using an Adaptive URLLC Slot Structure Within the 5G Advanced Architecture // *Telecom.* 2026. Vol. 7, No. 2. P. 36. DOI 10.3390/telecom7020036. EDN FOVIFS.
9. Горгадзе С.Ф., Ермакова А.В. Эффективность вариантов многостанционного доступа для сотовых сетей 5G и 6G // *Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли.* 2022. Т. 14, № 2. С. 19-26. DOI 10.36724/2409-5419-2022-14-2-19-26. EDN JSJBHS.

10. Варламов О.В. Способы построения функциональных узлов ШИМ модулятора для усилителя с раздельным усилением составляющих // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Т. 20, № 2. С. 12-22. DOI 10.36724/2072-8735-2026-20-2-12-22. EDN UMHVPB.
11. Горгадзе С.Ф., Ву Ш.Д., Ермакова А.В. Синхронизация последовательностей Голда на основе быстрого преобразования в усеченном базисе функций Уолша-Адамара // Радиотехника и электроника. 2024. Т. 69, № 2. С. 137-145. DOI 10.31857/S0033849424020045. EDN KMVICC.
12. Ghalbzouri S. El., Boutiba K., Ksentini A., Benjillali M. Neural-Driven Control of RIS in 6G Networks: A GoSimRIS and xApp-Based Framework // IEEE Networking Letters. 2025. Vol. 7, No. 1, pp. 1-5. DOI 10.1109/lnet.2025.3527683. EDN VZEOIB.
13. Леохин Ю.Л., Дымкова С.С., Фатхулин Т.Д. Методы машинного обучения в прикладных задачах прогнозирования динамично изменяющихся данных // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19, № 8. С. 49-63. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-8-49-63. EDN ULVCHG.
14. Гришин И.В., Фокин Г.А., Калинин А.А., Синильников А.М. Анализ эвристических алгоритмов кластеризации с учётом робастности каналов в MIMO-NOMA системах // Электросвязь. 2026. № 1. С. 65-79. DOI 10.34832/ELSV.2026.75.1.008. EDN XUSTQZ.
15. Ву Ш.Д., Ермакова А.В., Горгадзе С.Ф. Быстрые спектральные преобразования в усеченном базисе Уолша-Адамара и синхронизация м-подобных последовательностей // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2024. Т. 15, № 5. С. 32-39. EDN PEICUG.
16. U.M.M., Sadashivappa G., Palepu R. Integration of RIC and xApps for Open -Radio Access Network for Performance Optimization // 2023 7th International Conference on Computation System and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS), Bangalore, India, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/CSITSS60515.2023.10334159.
17. Tseng C. -h., Hung C.-F., Hong B.-K., Cheng S.-M. On Manipulating Routing Table to Realize Redirect Attacks in O-RAN by Malicious xApp // 2023 26th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), Tampa, FL, USA, 2023, pp. 288-292, doi: 10.1109/WPMC59531.2023.10338835.
18. Ермакова А.В. Использование неортогональных поднесущих на основе сегментов м-последовательностей для формирования групповых сигналов систем мобильной связи // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2024. Т. 14, № 3. С. 23-29. EDN ADKJXI.
19. Штеренберг С.И., Ушаков И.А., Скорых М.А. Исследование проблем построения доверенной среды передачи. Санкт-Петербург. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2024. 123 с. ISBN 978-5-89160-317-2. EDN KEPQDW.
20. Ko H., Lee J. Enhancing O-RAN xApp Intelligence with Cross-Domain RAN-Core Data Integration // 2026 40th International Conference on Information Networking (ICOIN), Hanoi, Vietnam, 2026, pp. 867-869, doi: 10.1109/ICOIN68469.2026.11480654.
21. Горгадзе С.Ф., Ермакова А.В., Кудряшова А.Ю. Многостанционный доступ на основе циркулярных матриц многопозиционных линейных рекуррентных последовательностей // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19, № 3. С. 37-53. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-3-37-53. EDN BYRCCD.
22. Daragh V.K., Ahmadi H., Grace D. Adaptive mMIMO Control in OPEN RAN: A Dynamic xApp Approach for Energy-Efficient Antenna Management // 2025 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), Poznan, Poland, 2025, pp. 303-308, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit63408.2025.11036926.
23. Горгадзе С.Ф., Ермакова А.В., Кудряшова А.Ю. Групповые сигналы на основе симметричных ортогональных матриц и обработка многолучевых сигналов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19, № 10. С. 21-34. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-10-21-34. EDN AMTGTV.
24. Громорушкин В.Н., Варламов О.В. Разработка требований к характеристикам отдельных узлов высокoeffективного передатчика, построенного по методу раздельного усиления составляющих однополосных колебаний // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2025. Т. 17, № 4. С. 28-34. DOI 10.36724/2409-5419-2025-17-4-28-34. EDN WFABSZ.
25. Demircioglu E. Field Deployment and Performance Evaluation of an NR-V2X C-ITS Test Corridor over a 5G SA Private Network. Electronics 2026, 15, 2668. <https://doi.org/10.3390/electronics15122668>
26. Essahraoui M., Babay M.-A., Benzine H., El Bouayadi R., Mabrouki M., El Ganaoui M., Saad A. Vertical Axis Wind Turbines: A Comprehensive Critical Review of Aerodynamic Theory, Design Configurations, Performance Analysis, and Future Perspectives. Energies 2026, 19, 2544. <https://doi.org/10.3390/en19112544>
27. Ермакова А.В., Сенин И.А., Илюхин А.А., Любчиков Р.И. Совершенствование слотовой структуры URLLC и EMBB с резервированием пакетов в архитектуре 5G Advanced // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2026. Т. 16, № 2. С. 46-55. EDN GBYLSS.
28. Shen Z., Shin W., Shin J. Time-Aware Graph Neural Network for Asynchronous Multi-Station Integrated Sensing and Communications Fusion in Open RAN. Sensors 2026, 26, 2376. <https://doi.org/10.3390/s26082376>
29. Nurakhov Y., Kassymbek N., Marlambekov D., Mukhanbet A., Imankulov T. Bridging the Semantic Gap in 5G: A Hybrid RAG Framework for Dual-Domain Understanding of O-RAN Standards and srsRAN Implementation. Appl. Sci. 2026, 16, 3275. <https://doi.org/10.3390/app16073275>
30. Ermakova A.V., Vu Sy. D. Design and modeling of UPMC systems // Synchroinfo Journal. 2026. Vol. 12, No. 1, pp. 15-30. DOI 10.36724/2664-066X-2026-12-1-15-30. EDN JEDOME.
31. Chaskos E., Kolokotronis N., Shialeles S. A Next-Generation Cyber-Range Framework for O-RAN and 6G Security Validation. Future Internet 2026, 18, 29. <https://doi.org/10.3390/fi18010029>
32. Trichias K., Kaloxylas A., Willcock C. 6G Global Landscape: A Comparative Analysis of 6G Targets and Technological Trends // 2024 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), Antwerp, Belgium, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit60053.2024.10597064.
33. Yrjölä S., Matinmikko-Blue M., Ahokangas P. Developing 6G Visions with Stakeholder Analysis of 6G Ecosystem // 2023 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), Gothenburg, Sweden, 2023, pp. 705-710, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit58263.2023.10188379.
34. Wikström G. et al., Challenges and Technologies for 6G // 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT), Levi, Finland, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083880.
35. Фетисов А.Ю., Микенин А.Э., Карабасов Е.М. и др. Имитационная модель приёмника LoRa в программе GNURADIO // Технологии информационного общества: Сборник трудов XX Международной отраслевой научно-технической конференции, Москва, 10-12 марта 2026 года. М.: МТУСИ, 2026. С. 94-96. EDN KDSWQG.
36. Antón-Haro C., Trichias K., De Majo C., Kaloxylas A., Beriere J. 6G Smart Networks and Services: Global Strategies, Main Work Directions & Future Outlook // 2024 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), Antwerp, Belgium, 2024, pp. 1115-1120, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit60053.2024.10597046.
37. Zong J., Liu Y., Liu H., Wang Q., Chen P. 6G Cell-Free Network Architecture // 2022 IEEE 2nd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI), Changchun, China, 2022, pp. 421-425, doi: 10.1109/ICETCI55101.2022.9832308.
38. Liu H., Zong J., Wang Q., Liu Y., Yang F. Cloud Native Based Intelligent RAN Architecture Towards 6G Programmable Networking // 2022 7th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS), Wuhan, China, 2022, pp. 623-627, doi: 10.1109/ICCCS55155.2022.9846266.

39. Прокурат Г.А., Ермакова А.В., Микенин А.Э. Особенности аппаратно-программной оценки временных параметров сигналов в приемопередающем оборудовании LTE // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2026. Т. 17, № 4. С. 46-50. EDN CPXQDW.

40. Norp T., Sachdeva P., Anton C., Trichias K., Mohnani P. 6G Research & Innovation Activities in Europe: An Overview of EU & Nationally funded Programmes // 2024 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), Antwerp, Belgium, 2024, pp. 1109-1114, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit60053.2024.10597076.

41. Тихвинский В.О., Терентьев С.В. Перспективы развития и эволюция технологий радиointерфейса от Geran/UTRAN в направлении LTE // Вестник РАЕН. 2008. Т. 8, № 3. С. 32-40. EDN KFTESX.

42. Лемешко Н., Богаченков Д. Тестирование устройств 5G для обеспечения электромагнитной совместимости: потребности и современные возможности // Современная электроника. № 2. 2021. С. 30-38.

43. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27, № 3, pp. 379-423, 623-656.

44. Kleinrock L. Queueing Systems. Vol. 1: Theory. New York: Wiley-Interscience, 1975. 417 p.

45. Bertsekas D.P. Nonlinear Programming. 2nd ed. Belmont: Athena Scientific, 1999. 791 p.

46. Wanigasekara C. Nonlinear System Modelling and Control: Trends, Challenges, and Future Perspectives. Computation 2026, 14, 44. <https://doi.org/10.3390/computation14020044>

47. Watkins C.J.C.H., Dayan P. Q-learning // Machine Learning. 1992. Vol. 8, № 3-4, pp. 279-292.

48. Jain R., Chiu D.-M., Hawe W. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems: tech. rep. DEC-TR-301. Hudson: Digital Equipment Corporation, 1984. 38 p.

DEVELOPMENT AND SIMULATION OF AN ALGORITHM FOR INTELLIGENT RADIO RESOURCE ALLOCATION BASED ON THE OPEN RAN ARCHITECTURE xAPP AND RAPP COMPONENTS INTERACTION

Anastasia V. Ermakova, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, msikisylia@gmail.com
Oleg V. Varlamov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, vov@mtuci.ru

Abstract

This article examines the problem of intelligent radio resource allocation in radio access networks built on the principles of the O-RAN open architecture. It is shown that the scheduling algorithms used in existing systems, which focus on one or two target metrics, are unable to fully account for the simultaneous changes in multiple network parameters, including radio channel quality, traffic intensity, and user latency and packet loss requirements. As a solution, a model for interaction between xApp and rApp components is proposed. It implements a two-level control scheme: a long-term network state forecast generated in the Non-RT RIC loop and operational adjustments to the distribution of physical resource blocks performed in the near-RT RIC loop. The mathematical apparatus of the model was developed, including a formalization of the resource allocation problem taking into account the limitations of OFDMA technology, a proprietary integrated user prioritization criterion combining channel quality, service priority, load forecast, and service history, and a stability analysis of the proposed control algorithm based on the Lyapunov function method. The model's performance was verified through simulation in the MATLAB Simulink environment, reproducing the full system operation cycle-from user traffic generation to the generation of control actions on the base station. The results demonstrate reduced data transmission latency, a reduced probability of packet loss, increased spectral efficiency, and increased fairness in resource distribution among users compared to traditional scheduling algorithms.

Keywords: Open RAN, xApp, rApp, RAN Intelligent Controller, radio resource allocation, intelligent network management, machine learning, quality of service.

References

- [1] I. G. Kougiumtzidis, A. Vlahov, V. K. Poulkov, P. I. Lazaridis and Z. D. Zaharis, "Deep Learning-Aided QoE Prediction for Virtual Reality Applications Over Open Radio Access Networks," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 143514-143529, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3343846.
- [2] M. Gerasimenko et al., "Cooperative Radio Resource Management in Heterogeneous Cloud Radio Access Networks," in *IEEE Access*, vol. 3, pp. 397-406, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2422266.
- [3] "IEEE Draft Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," in *IEEE Draft P802.11-REVmb/D8.0*, March 2011 (Revision of IEEE Std 802.11-2007, as amended by IEEE Std 802.11k-2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, IEEE Std 802.11w-2009 and IEEE Std 802.11n-2009), vol., no., pp.1-2276, 29 March 2011, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.5741051.
- [4] I.-H. Yun, D.-S. Kim, J. An, D.-Y. Kim, "Intelligent Network Control for Ultra-High-Speed Railway Communications: Challenges and Solutions," *Electronics*, 2026, 15, 1942. <https://doi.org/10.3390/electronics15091942>
- [5] I.A. Safiullin, I.P. Ashaev, A.A. Korobkov, A.K. Gaysin, A.F. Nadeev, "Reinforcement Learning-Based Handover Algorithm for 5G/6G AI-RAN," *Inventions*, 2026, 11, 8. <https://doi.org/10.3390/inventions11010008>
- [6] R. Firouzi, R. Rahmani, "5G-Enabled Distributed Intelligence Based on O-RAN for Distributed IoT Systems," *Sensors* 2023, 23, 133. <https://doi.org/10.3390/s23010133>
- [7] K. Koufos, K. E. I. Haloui, M. Dianati, M. Higgins, J. Elmighani, M.A. Imran, R. Tafazolli, "Trends in Intelligent Communication Systems: Review of Standards, Major Research Projects, and Identification of Research Gaps," *J. Sens. Actuator Netw.* 2021, 10, 60. <https://doi.org/10.3390/jsan10040060>
- [8] A. V. Ermakova, O. V. Varlamov, "Improving the Energy Efficiency of Radio Access Networks by Using an Adaptive URLLC Slot Structure Within the 5G Advanced Architecture," *Telecom.* 2026. Vol. 7, No. 2. P. 36. - DOI 10.3390/telecom7020036.
- [9] S.F. Gorgadze, A.V. Ermakova, "Efficiency of multiple access options for 5G and 6G cellular networks," *H&ES Research*, 2022. Vol. 14. No 2. P. 19-26. DOI: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-19-26.
- [10] O. V. Varlamov, "Methods for constructing functional units of a PWM modulator for an amplifier with separate amplification of components," *T-Comm.* 2026. Vol. 20, No. 2. Pp. 12-22. - DOI 10.36724/2072-8735-2026-20-2-12-22.
- [11] S. F. Gorgadze, Sh. D. Wu, A. V. Ermakova, "Synchronization of Gold sequences based on fast transform in a truncated basis of Walsh-Hadamard functions," *Radio engineering and electronics.* 2024. Vol. 69, No. 2. P. 137-145. - DOI 10.31857/S0033849424020045.
- [12] S. El. Ghalbzouri, K. Boutiba, A. Ksentini, M. Benjillali, "Neural-Driven Control of RIS in 6G Networks: A GoSimRIS and xApp-Based Framework," *IEEE Networking Letters.* 2025. Vol. 7, No. 1. P. 1-5. - DOI 10.1109/lnet.2025.3527683.

- [13] Yu.L. Leokhin, S.S. Dymkova, T.D. Fatkhulin, "Machine learning methods in applied problems of forecasting dynamically changing data", *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.8, pp. 49-63. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-8-49-63.
- [14] I. V. Grishin, G. A. Fokin, A. A. Kalinkina, A. M. Sinilnikov, "Analysis of heuristic clustering algorithms taking into account channel robustness in MIMO-NOMA systems," *Electrosvyaz*. 2026. No. 1. P. 65-79. - DOI 10.34832/ELSV.2026.75.1.008.
- [15] Sh. D., A.V. Ermakova, and S. F. Gorgadze, "Fast Spectral Transformations in Truncated Walsh-Adamar Basis and Synchronization of M-Like Sequences," *Systems of Synchronization, Shaping, and Signal Processing*, 2024. vol. 15, no. 5, pp. 32-39.
- [16] U. M. M. G. Sadashivappa and R. Palepu, "Integration of RIC and xApps for Open -Radio Access Network for Performance Optimization," *2023 7th International Conference on Computation System and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS)*, Bangalore, India, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/CSITSS60515.2023.10334159.
- [17] C. -h. Tseng, C. -F. Hung, B. -K. Hong and S.-M. Cheng, "On Manipulating Routing Table to Realize Redirect Attacks in O-RAN by Malicious xApp," *2023 26th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, Tampa, FL, USA, 2023, pp. 288-292, doi: 10.1109/WPMC59531.2023.10338835.
- [18] A. V. Ermakova, "Using non-orthogonal subcarriers based on m-sequence segments to generate group signals in mobile communication systems," *DSPA: Applications of Digital Signal Processing*. 2024. Vol. 14, No. 3, pp. 23-29.
- [19] S. I. Shterenberg, I. A. Ushakov, M. A. Skorykh, "Study of problems of constructing a trusted transmission environment," St. Petersburg: St. Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M. A. Bonch-Bruевич, 2024. 123 p. ISBN 978-5-89160-317-2.
- [20] H. Ko and J. Lee, "Enhancing O-RAN xApp Intelligence with Cross-Domain RAN-Core Data Integration," *2026 40th International Conference on Information Networking (ICOIN)*, Hanoi, Vietnam, 2026, pp. 867-869, doi: 10.1109/ICOIN68469.2026.11480654.
- [21] S. F. Gorgadze, A. V. Ermakova, A. Yu. Kudryashova, "Multiple Access Based on Circular Matrices of Multiposition Linear Recurrent Sequences," *T-Comm*. 2025. Vol. 19, No. 3, pp. 37-53. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-3-37-53.
- [22] V. K. Daragh, H. Ahmadi and D. Grace, "Adaptive mMIMO Control in OPEN RAN: A Dynamic xApp Approach for Energy-Efficient Antenna Management," *2025 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, Poznan, Poland, 2025, pp. 303-308, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit63408.2025.11036926.
- [23] S. F. Gorgadze, A. V. Ermakova, A. Yu. Kudryashova, "Group signals based on symmetric orthogonal matrices and processing of multipath signals," *T-Comm*. 2025. Vol. 19, No. 10, pp. 21-34. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-10-21-34.
- [24] V. N. Gromorushkin, O. V. Varlamov, "Development of requirements for the characteristics of individual nodes of a highly efficient transmitter built using the method of separate amplification of single-sideband oscillation components," *H&ES Research*. 2025. Vol. 17, No. 4, pp. 28-34. DOI 10.36724/2409-5419-2025-17-4-28-34.
- [25] E. Demircioglu, "Field Deployment and Performance Evaluation of an NR-V2X C-ITS Test Corridor over a 5G SA Private Network," *Electronics* 2026, 15, 2668. <https://doi.org/10.3390/electronics15122668>
- [26] M. Essahraoui, M.-A. Babay, H. Benzine, R. El Bouayadi, M. Mabrouki, M. El Ganaoui, A. Saad, "Vertical Axis Wind Turbines: A Comprehensive Critical Review of Aerodynamic Theory, Design Configurations, Performance Analysis, and Future Perspectives," *Energies* 2026, 19, 2544. <https://doi.org/10.3390/en1912544>
- [27] A. V. Ermakova, I. A. Senin, A. A. Ilyukhin, R. I. Lyubchikov, "Improving the URLLC and EMBB slot structure with packet reservation in 5G Advanced architecture," *DSPA: Applications of Digital Signal Processing*. 2026. Vol. 16, No. 2. Pp. 46-55.
- [28] Z. Shen, W. Shin, J. Shin, "Time-Aware Graph Neural Network for Asynchronous Multi-Station Integrated Sensing and Communications Fusion in Open RAN," *Sensors*, 2026, 26, 2376. <https://doi.org/10.3390/s26082376>
- [29] Y. Nurakhov, N. Kassymbek, D. Marlambekov, A. Mukhanbet, T. Imankulov, "Bridging the Semantic Gap in 5G: A Hybrid RAG Framework for Dual-Domain Understanding of O-RAN Standards and srsRAN Implementation," *Appl. Sci.* 2026, 16, 3275. <https://doi.org/10.3390/app16073275>
- [30] A. V. Ermakova, Sy. D. Vu, "Design and modeling of UFMC systems," *Synchroinfo Journal*. 2026. Vol. 12, No. 1, pp. 15-30. DOI 10.36724/2664-066X-2026-12-1-15-30.
- [31] E. Chaskos, N. Kolokotronis, S. Shiales, "A Next-Generation Cyber-Range Framework for O-RAN and 6G Security Validation," *Future Internet* 2026, 18, 29. <https://doi.org/10.3390/fi18010029>
- [32] K. Trichias, A. Kaloxylas and C. Willcock, "6G Global Landscape: A Comparative Analysis of 6G Targets and Technological Trends," *2024 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, Antwerp, Belgium, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit60053.2024.10597064.
- [33] S. Yrjölä, M. Matinmikko-Blue and P. Ahokangas, "Developing 6G Visions with Stakeholder Analysis of 6G Ecosystem," *2023 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, Gothenburg, Sweden, 2023, pp. 705-710, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit58263.2023.10188379.
- [34] G. Wikström et al., "Challenges and Technologies for 6G," *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, Levi, Finland, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083880.
- [35] A. Yu. Fetisov, A. E. Mikenin, E. M. Karabasov, et al., "Simulation model of the Lora receiver in the GNURADIO program," *Technologies of the information society: Collection of proceedings of the XX International Industrial Scientific and Technical Conference*, Moscow, March 10-12, 2026. Moscow: MTUCI, 2026, pp. 94-96.
- [36] C. Ant'n-Haro, K. Trichias, C. De Majo, A. Kaloxylas and J. Beriere, "6G Smart Networks and Services: Global Strategies, Main Work Directions & Future Outlook," *2024 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, Antwerp, Belgium, 2024, pp. 1115-1120, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit60053.2024.10597046.
- [37] J. Zong, Y. Liu, H. Liu, Q. Wang and P. Chen, "6G Cell-Free Network Architecture," *2022 IEEE 2nd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI)*, Changchun, China, 2022, pp. 421-425, doi: 10.1109/ICETCI55101.2022.9832308.
- [38] H. Liu, J. Zong, Q. Wang, Y. Liu and F. Yang, "Cloud Native Based Intelligent RAN Architecture Towards 6G Programmable Networking," *2022 7th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*, Wuhan, China, 2022, pp. 623-627, doi: 10.1109/ICCCS55155.2022.9846266.
- [39] G. A. Prokurat, A. V. Ermakova, A. E. Mikenin, "Features of hardware and software estimation of timing parameters of signals in LTE transceiver equipment," *Systems of synchronization, generation and processing of signals*. 2026. Vol. 17, No. 4, pp. 46-50.
- [40] T. Norp, P. Sachdeva, C. Anton, K. Trichias and P. Mohnani, "6G Research & Innovation Activities in Europe: An Overview of EU & Nationally Funded Programs," *2024 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, Antwerp, Belgium, 2024, pp. 1109-1114, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit60053.2024.10597076.
- [41] V. O. Tikhvinsky, S. V. Terentyev, "Prospects for the development and evolution of radio interface technologies from Geran/UTRAN in the direction of LTE," *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2008. Vol. 8, No. 3, pp. 32-40.
- [42] N. Lemeshko, D. Bogachenkov, "Testing 5G devices to ensure electromagnetic compatibility: needs and modern capabilities," *Modern Electronics*. No. 2. 2021, pp. 30-38.
- [43] C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," *Bell System Technical Journal*. 1948. Vol. 27, No. 3, pp. 379-423, 623-656.
- [44] L. Kleinrock, "Queueing Systems. Volume 1: Theory," New York: Wiley-Interscience, 1975. 417 p.
- [45] D. P. Bertsekas, "Nonlinear Programming". 2nd ed. Belmont: Athena Scientific, 1999. 791 p.
- [46] C. Wanigasekara, "Nonlinear System Modeling and Control: Trends, Challenges, and Future Perspectives," *Computation* 2026, 14, 44. <https://doi.org/10.3390/computation14020044>
- [47] C. J. C. H. Watkins, P. Dayan, "Q-learning," *Machine Learning*. 1992. Vol. 8, no. 3-4, pp. 279-292.
- [48] R. Jain, D.-M. Chiu, W. Hawe, "Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems," tech. rep. DEC-TR-301. Hudson: Digital Equipment Corporation, 1984. 38 p.

Information about authors:

Anastasia V. Ermakova, PhD, Assistant Professor of the Department "Radio Equipment and Circuitry", Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, <https://orcid.org/0009-0002-8439-2111>

Oleg V. Varlamov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Radio Equipment and Circuitry", Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-3996-9156>