

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ВОЗВРАТА ОТ 2-ШАГОВОЙ К 4-ШАГОВОЙ ПРОЦЕДУРЕ СЛУЧАЙНОГО ДОСТУПА

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-11-33-40

Manuscript received 21 August 2025;
Accepted 24 October 2025

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-19-00305-П <https://rscf.ru/project/22-19-00305/> "Пространственно-временные стохастические модели беспроводных сетей с большим числом пользователей".

Рачугин Роман Олегович,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия, rro1699@gmail.com

Ключевые слова: 2-шаговая процедура случайного доступа, пропускная способность, 4-шаговая процедура случайного доступа, mMTC, Интернет Вещей

В настоящее время осуществляется активное развертывание и развитие сотовых сетей стандарта связи пятого поколения (5G), параллельно ведутся научные дискуссии относительно архитектурных особенностей и ключевых технологий следующего поколения беспроводных сетей. В рамках данных стандартов значительное внимание уделяется сценариям применения Интернета Вещей (Internet of Things, IoT). В системах массового IoT основным сценарием передачи данных является сценарий массовой межмашинной связи (mMTC). Одним из основных требованиями к сценарию mMTC является возможность обработки потенциально неограниченного количества устройств. Тенденция развития данного сценария предполагает повышение количества устройств в рамках работы одной точки доступа. Большое количество устройств обуславливает необходимость использования методов случайного множественного доступа для передачи по общему каналу. В таком случае, возрастают требования к показателям эффективности будущих поколений систем беспроводной связи, таким как: пропускная способность, плотность подключения устройств, задержка передачи данных. В современных сетях используется 4-шаговая процедура случайного доступа. Однако, использование 4-шаговой процедуры в рамках сценария массовой межмашинной связи имеет ряд недостатков: большой объем передаваемых служебных сообщений по отношению к передаваемой информации от устройств Интернета Вещей, увеличение времени передачи из-за более позднего обнаружения коллизий. В новых стандартах беспроводных сетей (5G NR) добавлена возможность использования 2-шаговой процедуры случайного доступа, которая уменьшает количество служебных сообщений. Однако, в некоторых случаях данная процедура случайного доступа также имеет недостатки: увеличение вероятности коллизии данных. Поэтому в ряде работ описывается возможность перехода от 2-шаговой процедуры в 4-шаговую процедуру при условии получения fallback RAR. Точной формулировки такого перехода нет. В данной работе предлагается несколько вариантов такого перехода и проводится сравнительный анализ этих переходов. По результатам анализа делается вывод, что некоторые варианты перехода являются наиболее перспективными для возможного использования в процедурах случайного доступа будущих поколений беспроводных сетей.

Информация об авторе:

Рачугин Роман Олегович, аспирант кафедры №25 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Рачугин Р.О. Анализ вариантов возврата от 2-шаговой к 4-шаговой процедуре случайного доступа // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №11. С. 33-40.

For citation:

R.O. Rachugin, "Analysis types of backoff from 2-step to 4-step random access procedure," T-Comm, 2025, vol. 19, no.11, pp. 33-40. (in Russian)

Введение

Алгоритмы случайного доступа играют ключевую роль в управлении соединениями устройств в беспроводных сетях, особенно в условиях растущего числа устройств. Эти алгоритмы обеспечивают первоначальный доступ пользовательского оборудования (UE) к сети, что является критически важным этапом установления связи. Наиболее распространенной процедурой случайного доступа является 4-шаговая процедура случайного доступа. Данную процедуру можно описать при помощи следующего алгоритма [1]:

Шаг 1. Каждый пользователь независимо принимает решение о передаче сообщения msg1 в начале кадра 4-шаговой процедуры случайного доступа.

Шаг 2. Базовая станция отвечает сообщением msg2.

Шаг 3. Пользователь отправляет на базовую станцию msg3.

Шаг 4. Базовая станция отвечает сообщением msg4.

Msg1 представляет собой преамбулу (последовательность определенной длины) из набора преамбул, используемых в процедуре случайного доступа. Согласно [2] msg2 является RAR (random access response), которая включает в себя: 1) временную метку, которая используется пользователем для корректировки времени передачи в восходящем канале; 2) грант в восходящем канале (ресурс для передачи msg3); 3) временной идентификатор для успешно принятых преамбул. Msg3 – запрос на подключение (connection request), отправляющийся в выделенном ресурсе в восходящем канале. Данное сообщение состоит из пользовательского идентификатора. Msg4 представляет собой сообщение (Contention Resolution). Данное сообщение подтверждает идентификацию пользователя и заканчивает процедуру случайного доступа.

В рамках внедрения и использования сетей нового поколения (5G) 4-шаговая процедура случайного доступа сталкивается с рядом недостатков, требуемых сценариями использования в сетях 5G, такими как:

1) традиционная 4-шаговая процедура RA не удовлетворяет требованиям к задержке для приложений сверхнадежной связи с малой задержкой (URLLC) [3].

2) в сценариях массовой межмашинной связи (mMTC) большое количество пользователей может пытаться получить доступ к сети одновременно, что приводит к коллизиям случайного доступа и проблемам повторной передачи [4].

3) большой объем сервисных сообщений по отношению к передаваемым данным от пользовательских устройств [3].

Для решения данных недостатков 4-шаговой процедуры случайного доступа в сетях LTE и 5G предлагаются следующие алгоритмы и методы:

1) Адаптивное распределение множества преамбул для максимизации пропускной способности с учетом нагрузки: Этот алгоритм предназначен для приоритизации при случайном доступе в 5G, особенно для межмашинного взаимодействия с высокой нагрузкой и неоднородными требованиями к качеству обслуживания (QoS) [5]. Основная идея данного алгоритма заключается в динамическом выделении различного числа преамбул разным классам устройств, основываясь на текущую нагрузку и требования к качеству обслуживания. Адаптивное распределение преамбул работает следующим образом: преамбулы делятся на две группы «высокоприоритетные» и «низкоприоритетные», соотношение преамбул между группами динамически изменяется. Максимизация

пропускной способности достигается за счет оптимизации количества преамбул в каждой группе, тем самым повышая общую пропускную способность.

2) Разрешение конфликтов с использованием идентификаторов абонентов: Этот метод решает проблему случайного доступа, улучшая масштабируемость протокола установления соединения в сетях LTE [6]. Основной идеей данного метода является динамическая приоритизация передачи устройствами на основе уникальных идентификаторов. Данный метод работает следующим образом: устройства передают свои идентификаторы в виде бинарных последовательностей, затем базовая станция выявляет конфликты и определяет устройства с наивысшим приоритетом для доступа. Использование данного подхода позволяет уменьшить коллизии во время процедуры случайного доступа, а также повысить пропускную способность.

3) Запрет класса доступа (ACB) [7-9]. Идея данного механизма заключается в том, что абоненты принимают решение о передаче преамбулы на первом этапе процедуры случайного доступа с определенной вероятностью. Таким образом, не все абоненты будут передавать преамбулу на шаге 1 в каждой итерации процедуры, что позволяет уменьшить количество коллизий и среднюю задержку передачи в системах случайного доступа. Для уменьшения средней задержки вероятность передачи в ACB в целом должна зависеть от количества абонентов, участвующих в процедуре случайного доступа [10]. На основе точного знания количества абонентов, готовых к передаче, можно выбрать оптимальную вероятность передачи, которая минимизирует среднюю задержку передачи. Эта стратегия использует знание точного количества абонентов, что на практике невозможно.

4) Глубокое обучение для обнаружения преамбул: методы глубокого обучения могут использоваться для улучшения обнаружения агрегированных последовательностей преамбул [11]. Основная идея данного метода заключается в агрегации последовательностей Задова-Чу из разных корней для создания большего набора доступных преамбул. Это позволяет значительно увеличить количество уникальных преамбул за счет всех возможных комбинаций пар последовательностей.

Описанные алгоритмы и методы, позволяют решить ряд недостатков 4-шаговой процедуры случайного доступа для применения в сетях 5G, но не решают недостаток большого объема сервисных сообщений, поэтому в сетях 5G NR предложен переход к 2-шаговой процедуре случайного доступа [12, 13]. Данную процедуру можно описать при помощи следующего алгоритма:

Шаг 1. Пользователь выбирает одну из преамбул и передает её вместе со своими данными (msgA).

Шаг 2. Базовая станция детектирует преамбулу и пытается детектировать пользовательские данные, затем возвращает ответ пользователю (msgB).

Сообщение msgA является объединением сообщений msg1 и msg3 из 4-шаговой процедуры случайного доступа, а сообщение msgB является объединением сообщений msg2 и msg4.

Множество исследований посвящено сравнению двух основных схем случайного доступа. Так, в работе [14] проводится анализ 2-шаговой и 4-шаговой процедур с точки зрения вероятности успешной передачи пакетов, среднего энергопотребления и пропускной способности. Результаты показывают, что 2-шаговая процедура демонстрирует более

высокую вероятность успешной передачи, меньшее энергопотребление и повышенную пропускную способность по сравнению с 4-шаговой.

В другой работе [15] рассматриваются те же две процедуры, но в условиях модели «запрос-очередь» с передачей данных блоками по M пакетов. Предполагается, что каждый абонент имеет буфер неограниченного размера с изначально заполненной очередью сообщений. В данной конфигурации авторы приходят к выводу, что 4-шаговая процедура превосходит 2-шаговую по максимальной пропускной способности и обеспечивает меньшую среднюю задержку.

Согласно исследованиям [12-14], в 2-шаговой процедуре случайного доступа возможно два различных способа сопоставления преамбул и ресурсных блоков для передачи пользовательских данных: взаимно-однозначное (one-to-one) и многоканальное (many-to-one) отображение. Следует отметить, что при использовании подхода many-to-one повышается вероятность ошибок декодирования пользовательских данных. В то же время, подход one-to-one хотя и снижает вероятность ошибочного декодирования, но требует больше ресурсов для передачи данных. Как отмечено в [12], в случае успешного детектирования преамбулы при неуспешном декодировании пользовательских данных базовая станция отправляет fallback RAR-сообщение, что приводит к переходу пользователя к 4-шаговой процедуре (начиная с этапа передачи пользовательских данных msg3).

В данном исследовании рассматривается исключительно случай many-to-one сопоставления. Ошибки приема пользовательских данных могут быть вызваны как шумами канала, так и коллизиями при выборе преамбул.

1 Обзор 2-шаговой процедуры случайного доступа

В целях последующего анализа рассмотрим более детально 2-шаговую процедуру случайного доступа, предполагающую отображение по схеме many-to-one между преамбулами и ресурсными блоками, предназначенными для передачи пользовательских данных. Как было сказано ранее, при получении fallback RAR сообщения осуществляется переход от 2-шаговой процедуры случайного доступа к 4-шаговой.

На текущий момент отсутствует установленное определение условий перехода от 2-шаговой к 4-шаговой процедуре случайного доступа. В связи с этим в настоящей работе будут рассмотрены несколько интерпретаций. Переход к 4-шаговой процедуре будет инициирован только в случае получения пользователем отклика типа fallback RAR. Согласно работе [12] переход к 4-шаговой процедуре начинается с передачи сообщения msg3. Предположим, что в таком случае пользователь передает msg3 (состоящее из RRC и своих данных), затем базовая станция декодирует сообщение и отвечает сообщением msg4. Такая интерпретация наиболее похожа на базовый алгоритм 4-шаговой процедуры. Схема рассмотренной интерпретации представлена на рисунке 1.

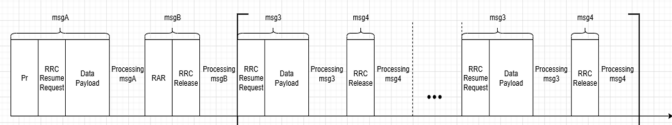


Рис. 1. Первая схема интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре

В рассмотренной ранее интерпретации на каждое сообщение msg3, базовая станция отвечает сообщением msg4. Аналогично работе [15], где данные передавались блоками по M пакетов, можно предположить возможность одинарного ответа от базовой станции на последовательность сообщений от разных пользователей в соответствии с порядком их передачи. Рассмотрим вторую интерпретацию перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре. В данном случае пользователи также начинают передачу с msg3 (состоящее из RRC и своих данных), но в данном случае базовая станция ответит лишь одним сообщением msg4 после приема всех msg3. Будем полагать, что длительность передачи сообщения msg4 остается неизменной. Схема данной интерпретации представлена на рисунке 2.

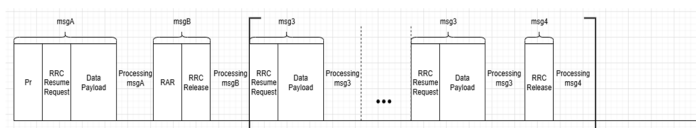


Рис. 2. Вторая схема интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре

Вторая схема уменьшает общее время, затрачиваемое на часть кадра процедуры случайного доступа, а также потенциально уменьшает нагрузку на базовой станции, так как в данном случае базовой станции необходимо отправить в ответ только 1 сообщение msg4.

Другой интерпретацией возможного перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой является схема, в которой пользователи передают одно общее RRC сообщение. Будем полагать, что длительность данного блока не изменяется. Далее каждый пользователь передает только свои данные. Затем базовая станция декодирует пользовательские данные и на каждое сообщение с пользовательскими данными отвечает сообщением msg4. В данном случае общее время части кадра случайного доступа для 4-шаговой процедуры уменьшается по сравнению с первой интерпретацией. Схема данной интерпретации представлена на рисунке 3.

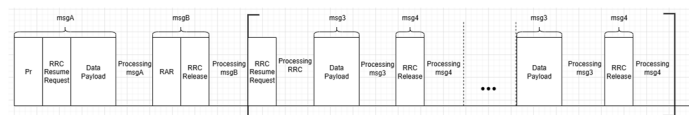


Рис. 3. Третья схема интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре

Четвертой интерпретацией, рассматриваемой в этой работе, является схема, которая является комбинацией второй и третьей интерпретации. В данном случае часть кадра 4-шаговой процедуры начинается с передачи общего RRC сообщения всех пользователей, затем каждый пользователь передает свои данные. После получения всех пользовательских данных базовая станция отвечает одним общим сообщением msg4 для всех переданных пользовательских данных в соответствии с порядком их передачи. Аналогично предыдущим интерпретациям будем полагать, что длительность RRC сообщения и msg4 не изменяется. Время части кадра случайного доступа уменьшается по сравнению со всеми рассмотренными ранее интерпретациями. Однако, в данном случае для реализации такой интерпретации необходимы дополнительные вычислительные ресурсы на базовой станции.

Схема такой интерпретации представлены на рисунке 4.

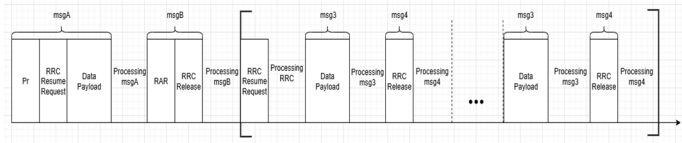


Рис. 4. Четвертая схема интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре

В дальнейшем под 2-шаговой процедурой случайного доступа с переходом к 4-шаговой будет пониматься такой сценарий, при котором изначально применяется 2-шаговый доступ, однако в зависимости от условий (например, при получении fallback RAR) осуществляется переключение на 4-шаговую процедуру.

Следовательно, описанный ранее алгоритм работы 2-шаговой процедуры можно представить с следующим виде:

Шаг 1: Пользователи независимо выбирают одну из преамбул и передают её вместе со своими данными в msgA в начале кадра 2-шаговой процедуры случайного доступа. Вероятность передачи определяется вероятностью $p = \min\left(1, \frac{L}{M_t}\right)$ (где M_t – это число активных пользователей в кадре t , а L – число уникальных преамбул в системе).

Шаг 2: Базовая станция детектирует и оценивает число полученных преамбул, а также пытается декодировать пользовательские данные. Далее посылает пользователям msgB.

Шаг 3: Затем система работает в соответствии с полученным ответом от базовой станции.

- В случае получения успешного RAR система переходит к следующему кадру 2-шаговой процедуры случайного доступа.
- В случае получения fallback RAR система переходит к 4-шаговой процедуре, используя один из ранее описанных способов перехода. Важно заметить, что в системе для 4-шаговой процедуры выделяется i дополнительных ресурсных блоков, где i – число уникальных преамбул, полученных базовой станцией после обработки msgA.

2 Анализ пропускной способности для интерпретаций перехода из 2-шаговой в 4-шаговую процедуру случайного доступа

Введем упрощенную модель системы для 2-шаговой процедуры случайного доступа со следующими допущениями:

Допущение 1. Система имеет L уникальных преамбул. Преамбула – некоторый сигнал. Базовая станция достоверно определяет номера уникальных преамбул. Однако, базовая станция не может оценить точное число пользователей, выбравших одинаковую преамбулу.

Допущение 2. Всё время работы системы разбито на кадры. Все абоненты точно знают границы кадров и могут участвовать в процедуре случайного доступа только в начале каждого кадра.

Допущение 3. Система имеет потенциально неограниченное число пользователей. В таком случае понятия «пользователь» и «сообщение» эквивалентны. Количество сообщений, поступающих в систему в каждом кадре распределено по закону Пуассона с параметром λ .

Для введенной модели системы и ранее описанных интерпретаций перехода из 2-шаговой процедуры случайного доступа в 4-шаговую определим и проанализируем пропускную способность. Обозначим пропускную способность как η_s , которая подразумевает максимальную входную интенсивность пользователей в систему в течении 1 секунды (Λ) и конечной задержкой.

Для определения η_s необходимо сделать перерасчет пропускной способности из [пользователей\слот] в [пользователей\длительность кадра СД]. Пропускная способность может быть посчитана как отношение числа успешно переданных сообщений на среднюю длительность кадра процедуры случайного доступа. В таком случае, с учетом временных расходов на сервисные сообщения, пропускная способность может быть посчитана как $\eta(L) = Le^{-1}$. Таким образом, η_s может быть посчитана по следующей формуле:

$$\eta_s = 1000Le^{-1} / E[T_{CD}], \quad (1)$$

где $E[T_{CD}]$ – среднее время кадра случайного доступа.

Для дальнейшего анализа посчитаем $E[T_{CD}]$ для каждой интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой. Данную величину для первой интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой можно посчитать как:

$$E[T_{CD}] = \sum_{j=0}^{\infty} T_{CD1}(L|j) \Pr\{j\}, \quad (2)$$

где $\Pr\{j\}$ – это вероятность того, что j пользователей решил передавать, $T_{CD1}(L|j)$ – длительность кадра процедуры случайного доступа для первой интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры в 4-шаговую.

Значение $T_{CD1}(L|j)$ может быть посчитано по следующей формуле:

$$T_{CD1}(L|j) = \begin{cases} T_{2\text{-шаговая}}, & j \in \{0,1\}; \\ T_{2\text{-шаговая}} + T_1 \sum_{i=1}^L I\{q_i | j\}, & j \geq 2, \end{cases} \quad (3)$$

где $T_{2\text{-шаговая}}$ – время 2-шаговой процедуры, T_1 – время затрачиваемое на один блок 4-шаговой процедуры в первой интерпретации, $I\{q_i | j\}$ – индикаторная функция, означающая что i -тую преамбулу выбрал хотя бы один абонент при j активных пользователях, участвующих в процедуре случайного доступа.

Рассмотрим подробнее слагаемые в (3). Время, затрачиваемое на часть 2-шаговой процедуры может быть определена как сумма интервалов времени, затрачиваемых для передачи и обработки сообщений msgA и msgB. В таком случае формула для расчета $T_{2\text{-шаговая}}$ будет иметь следующий вид:

$$T_{2\text{-шаговая}} = T_{msgA} + T_{PmsgA} + T_{msgB} + T_{PmsgB}. \quad (4)$$

где T_{msgA} – время, затрачиваемое на передачу сообщения msgA, T_{PmsgA} – время, затрачиваемое на обработку сообщения msgA, T_{msgB} – время, затрачиваемое на передачу сообщения msgB, T_{PmsgB} – время, затрачиваемое на обработку сообщения msgB.

Для расчета T_1 может быть использована следующая формула:

$$T_1 = T_{msg3} + T_{Pmsg3} + T_{msg4} + T_{Pmsg4}, \quad (5)$$

где T_{msg3} – время, затрачиваемое на передачу сообщения msg3, T_{Pmsg3} – время, затрачиваемое на обработку сообщения msg3, T_{msg4} – время, затрачиваемое на передачу сообщения msg4, T_{Pmsg4} – время, затрачиваемое на обработку сообщения msg4.

Из описания алгоритма работы 2-шаговой процедуры описанного ранее следует, что число пользователей, решивших передавать в кадре это некоторая случайная величина. При увеличении числа пользователей распределение данной случайной величины сходится к распределению Пуассона с параметром L . Следовательно, (2) может быть записана в следующем виде:

$$E[T_{CD1}] = T_{2-шаговая} (1+L)e^{-L} + \sum_{j=2}^{\infty} \left(T_{2-шаговая} + T_1 \sum_{i=1}^L I\{q_i | j\} \right) \frac{L^j}{j!} e^{-L}. \quad (6)$$

В работе [16] среднее значение функции $I\{q_i | j\}$ может быть посчитано по следующей формуле:

$$E[I\{q_i | j\}] = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{L} \right)^j \right). \quad (7)$$

Согласно анализу похожей системы с расписанием, представленному в работе [16], конечное выражение для (6) будет иметь следующий вид:

$$E[T_{CD1}] = T_{2-шаговая} + T_1 L (1 - e^{-1} - e^{-L}). \quad (8)$$

Посчитаем среднее время кадра процедуры случайного доступа для второй интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре. В данном случае формула расчета времени необходимого на кадр процедуры случайного доступа будет иметь вид:

$$T_{CD2}(L | j) = \begin{cases} T_{2-шаговая}, j \in \{0, 1\}; \\ T_{2-шаговая} + T_2 \sum_{i=1}^L I\{q_i | j\} + T_{P4}, j \geq 2, \end{cases} \quad (9)$$

где T_2 – время, затрачиваемое на один блок 4-шаговой процедуры во второй интерпретации перехода, T_{P4} – время необходимое для передачи и обработки одного сообщения msg4.

Значение T_2 может быть посчитано, используя формулу:

$$T_2 = T_{msg3} + T_{Pmsg3}. \quad (10)$$

Формула для расчета T_{P4} будет иметь следующий вид:

$$T_{P4} = T_{msg4} + T_{Pmsg4}. \quad (11)$$

Аналогично выводу, представленному для первой интерпретации, покажем итоговую формулу расчета среднего времени необходимого для одного кадра случайного доступа второй интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре. Данное значение может быть посчитано по следующей формуле:

$$E[T_{CD2}] = T_{2-шаговая} + T_2 L (1 - e^{-1} - e^{-L}) + T_{P4} (1 - e^{-L} - L e^{-L}). \quad (12)$$

Рассмотрим третью интерпретацию перехода. Для расчета времени кадра процедуры случайного доступа имеет следующий вид:

$$T_{CD3}(L | j) = \begin{cases} T_{2-шаговая}, j \in \{0, 1\}; \\ T_{2-шаговая} + T_3 \sum_{i=1}^L I\{q_i | j\} + T_{CRR}, j \geq 2, \end{cases} \quad (13)$$

где T_3 – время, затрачиваемое на один блок 4-шаговой процедуры в третьей интерпретации, T_{PRRC} – время необходимое на передачу и обработку одного сообщения RRC.

Значение T_3 может быть посчитано по формуле:

$$T_3 = T_{data} + T_{Pdata} + T_{msg4} + T_{Pmsg4}. \quad (14)$$

где T_{data} – время, затрачиваемое на передачу пользовательских данных, T_{Pdata} – время, затрачиваемое на обработку пользовательских данных.

Формула для расчета значений T_{CRR} имеет следующий вид:

$$T_{CRR} = T_{RRC} + T_{PRRC}. \quad (15)$$

где T_{RRC} – время, затрачиваемое на передачу сообщения RRC, T_{PRRC} – время, затрачиваемое на обработку сообщения RRC.

Для расчета средней длительности кадра случайного доступа данной интерпретации воспользуемся аналогичным подходом расчета как для первой интерпретации. В таком случае, средняя длительность кадра процедуры случайного доступа может быть посчитана по следующей формуле:

$$E[T_{CD3}] = T_{2-шаговая} + T_3 L (1 - e^{-1} - e^{-L}) + T_{CRR} (1 - e^{-L} - L e^{-L}). \quad (16)$$

Далее покажем, как может быть посчитано время кадра случайного доступа для четвертой интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре. Данное значение может быть посчитано следующим образом:

$$T_{CD4}(L | j) = \begin{cases} T_{2-шаговая}, j \in \{0, 1\}; \\ T_{2-шаговая} + T_4 \sum_{i=1}^L I\{q_i | j\} + T_{CRR} + T_{P4}, j \geq 2, \end{cases} \quad (17)$$

где T_4 – время, затрачиваемое на один блок 4-шаговой процедуры в четвертой интерпретации перехода.

Значения T_4 могут быть посчитаны по следующей формуле:

$$T_4 = T_{data} + T_{Pdata}. \quad (18)$$

Основываясь на выводе средней задержки кадра процедуры случайного доступа для первой интерпретации и (18), средняя задержка для данной интерпретации может быть посчитана как:

$$E[T_{CD4}] = T_{2\text{-шаговая}} + T_4L(1 - e^{-1} - e^{-L}) + (T_{CRRC} + T_{P4})(1 - e^{-L} - Le^{-L}). \quad (19)$$

Следовательно, с учетом (1), (6), (12), (16) и (19) можем определить формулы для расчета значения η_S для каждой интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре. Формулы для расчета пропускной способности имеют следующий вид:

$$\eta_{S1}(L) = \frac{1000Le^{-1}}{T_{2\text{-шаговая}} + T_1L(1 - e^{-1} - e^{-L})}. \quad (20)$$

$$\eta_{S2}(L) = \frac{1000Le^{-1}}{T_{2\text{-шаговая}} + T_2L(1 - e^{-1} - e^{-L}) + T_{P4}(1 - e^{-L} - Le^{-L})}. \quad (21)$$

$$\eta_{S3}(L) = \frac{1000Le^{-1}}{T_{2\text{-шаговая}} + T_3L(1 - e^{-1} - e^{-L}) + T_{CRRC}(1 - e^{-L} - Le^{-L})}. \quad (22)$$

$$\eta_{S4}(L) = \frac{1000Le^{-1}}{T_{2\text{-шаговая}} + T_4L(1 - e^{-1} - e^{-L}) + (T_{CRRC} + T_{P4})(1 - e^{-L} - Le^{-L})}. \quad (23)$$

Для вычисления значений η_S воспользуемся типовыми значениями интервалов времени передачи сообщений в 4-шаговой и 2-шаговой процедурах случайного доступа, приведенных в таблице 2 в работе [15]. Необходимые нам интервалы времени имеют следующие значения: $T_{msgA} = 2TTI + T_{data}$ (TTI – интервал времени передачи, T_{data} – время необходимое на передачу пользовательских данных), $T_{PmsgA} = 1TTI + 3$ мс, $T_{msgB} = 2TTI$, $T_{msg3} = TTI + T_{data}$, $T_{Pmsg3} = 3$ мс, $T_{Pdata} = 3$ мс – TTI и $T_{PmsgB} = T_{msg4} = T_{Pmsg4} = T_{RRC} = T_{PRRC} = TTI$. Предположим, что $TTI = 0,5$ мс.

4 Результаты расчета пропускной способности для интерпретаций перехода от 2-шаговой к 4-шаговой с учетом временных затрат

Расчетные значения полученные по (20) – (23) представлены на рисунках 5 и 6.

На рисунке 5 представлена зависимость пропускной способности с учетом временных интервалов η_S от числа уникальных преамбул L при $T_{data} = TTI$ для всех интерпретаций перехода.

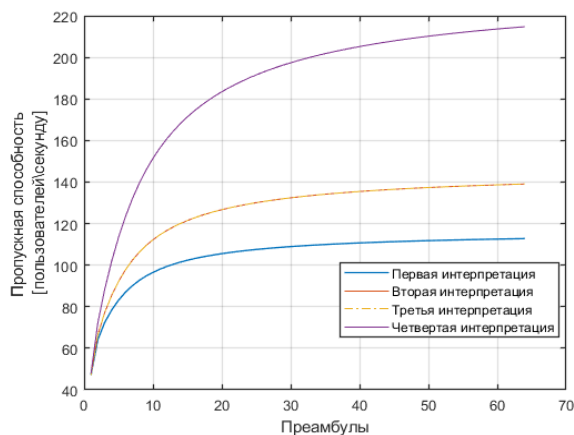


Рис. 5. График зависимости пропускной способности от числа уникальных преамбул при $T_{data} = 0.5$ мс

Согласно полученным результатам можно сделать вывод, что при $T_{data} = TTI$ наилучшую пропускную способность при числе преамбул $L > 1$ имеет четвертая интерпретация, наихудшую – первая интерпретация. Вторая и третья интерпретация равны друг другу, так как длительность передачи и обработки RRC равна длительности и обработке сообщения msg4.

На рисунке 6 представлены результаты расчета зависимости пропускной способности η_S от числа преамбул L при $T_{data} = 10$ мс.

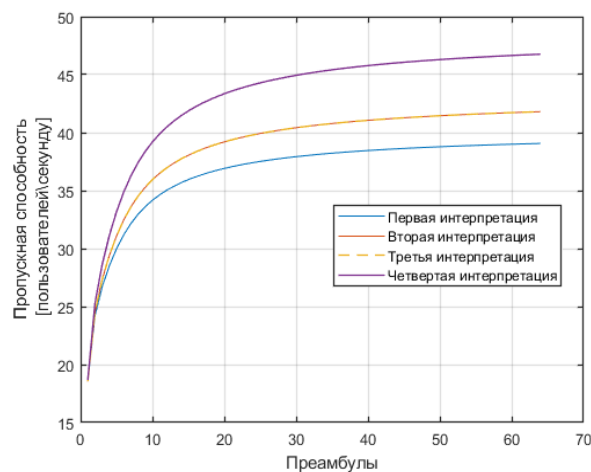


Рис. 6. График зависимости пропускной способности от числа уникальных преамбул при $T_{data} = 10$ мс

Согласно представленным результатам на рисунке 6 при увеличении T_{data} выигрыш четвертой интерпретации от остальных уменьшается, по сравнению с результатами представленными на рисунке 5. Однако, при такой длительности T_{data} четвертая интерпретация всё ещё имеет наилучшую пропускную способность по сравнению с остальными интерпретациями, а первая наихудшую. Важно отметить, что данный выигрыш достигается за счет увеличения необходимых вычислительных ресурсов на базовой станции.

Выводы

В данной работе был проведен обзор 4-шаговой процедуры случайного доступа. В ходе обзора обозначены некоторые недостатки, которые ограничивают применение 4-шаговой процедуры в сетях 5G. Также, были описаны алгоритмы и методы, позволяющие адаптировать применение стандартной 4-шаговой процедуры случайного доступа для сетей 5G. Кроме этого, была описана 2-шаговая процедура случайного доступа и интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре случайного доступа в случае получения fallback RAR. Для всех рассмотренных интерпретаций проведен анализ и расчет пропускной способности. Произведено сравнение расчета пропускной способности для четырех интерпретаций перехода при разных значениях длительности интервала передачи пользовательских данных.

Согласно полученным результатам расчета пропускной способности можно заключить, что при рассмотренных значениях длительности интервала передачи пользовательских данных четвертый вариант интерпретации имеет наибольшую пропускную способность при любом значении числа уникальных преамбул $L > 1$.

Однако, при увеличении длительности интервала передачи пользовательских данных выигрыш четвертой интерпретации уменьшается. Также, важно отметить, что все интерпретации кроме первой требует увеличенных вычислительных ресурсов на базовой станции.

Проведенные результаты исследования показывают, что разные варианты перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой позволяют добиться разной пропускной способности. Первая интерпретация перехода аналогична 4-шаговой процедуре случайного доступа. Отметим, что для этого вида перехода не требуется дополнительных изменений в работе базовой станции, однако, данная интерпретация имеет наихудшие значения пропускной способности.

Вторая и третья интерпретации перехода показывают одинаковые результаты при учете того, что длительность передачи и обработки сообщения msg4 равна длительности передачи и обработки сообщения RRC. Для обоих вариантов перехода увеличение пропускной способности относительно первого варианта обуславливается необходимостью усложнения части передачи сообщения msg4 для второй интерпретации перехода и передачи сообщения RRC для третьей интерпретации.

Четвертая интерпретация имеет наилучшую пропускную способность, но данный выигрыш обуславливается необходимостью усложнением части передачи сообщений msg4 и RRC, так как применяется комбинированная идея из второго и третьего варианта перехода от 2-шаговой процедуры случайного доступа к 4-шаговой.

Финансовая поддержка

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-19-00305-П <https://rscf.ru/project/22-19-00305/> "Пространственно-временные стохастические модели беспроводных сетей с большим числом пользователей".

Литература

1. *Toor W. T.* Evolution of random access process: From Legacy networks to 5G and beyond // *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2022. Vol. 33. No. 6. P. E3776.

2. *Yang, Bei.* Intelligent random access for massive-machine type communications in sliced mobile networks // *Electronics*, 2023. No. 2. P. 329.

3. *Segura, David.* 5G early data transmission (Rel-16): Security review and open issues // *IEEE Access*, 2022. No. 10. P. 93289-93308.

4. *Wang W. C.* Low Latency Signature-Based 4-Step Random Access Procedure for Massive Machine-Type Communications // *Journal of Mobile Multimedia*, 2024. Vol. 20. No. 1, pp. 213-238.

5. *Althumali, H., Othman, M.* Priority-based load-adaptive preamble separation random access for QoS-differentiated services in 5G networks // *Journal of Network and Computer Applications*, 2022. No. 203. P.103396.

6. *Vilgelm M., Linares S. R., Kellerer W.* Enhancing cellular M2M random access with binary countdown contention resolution // 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), IEEE, 2017. P. 1-6.

7. *Song S., Seo J. B., Jin H.* Online control of two-step random access: A step towards umtc // 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), IEEE, 2023. P. 1-6.

8. *Alvi, Maira.* Mini-slot based access barring scheme for IoT networks // *Human-Centric Computing and Information Sciences*, 2023. No.13.

9. *Alvi M., Toor W. T.* Mini-Slot Based Access Barring Scheme for IoT Networks // *Human-centric Computing and Information Sciences Journal*, 2023. Vol. 13, pp. 13-32.

10. *Jin H., Toor W. T.* Recursive pseudo-Bayesian access class barring for M2M communications in LTE systems // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017. Vol. 66, No. 9, pp. 8595-8599.

11. *Mostafa A. E.* Aggregate preamble sequence design and detection for massive IoT with deep learning // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021. Vol. 70. No. 4, pp. 3800-3816.

12. *Kim J.* Two-step random access for 5G system: Latest trends and challenges // *IEEE Network*, 2020. Vol. 35. No. 1, pp. 273-279.

13. *Peralta E.* Two-step random access in 5G new radio: Channel structure design and performance // 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), IEEE, 2021. P. 1-7.

14. *Zhou H.* Analyzing novel grant-based and grant-free access schemes for small data transmission // *IEEE Transactions on Communications*, 2022. Vol. 70. No. 4, pp. 2805-2819.

15. *Zhao X., Dai L.* Connection-based Aloha: Modeling, optimization, and effects of connection establishment // *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023. Vol. 23. No. 2, pp. 1008-1023.

16. *Burkov, Artem, Alexey Frolov, and Andrey Turlikov.* Contention-based protocol with time division collision resolution // 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). IEEE, 2018.

ANALYSIS TYPES OF BACKOFF FROM 2-STEP TO 4-STEP RANDOM ACCESS PROCEDURE

Roman O. Rachugin, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia,
rro1699@gmail.com

Abstract

Currently, the active deployment and development of cellular networks of the fifth generation communication standard (5G) is underway, while scientific discussions are ongoing regarding the architectural features and key technologies of the next generation of wireless networks. Within the framework of these standards, considerable attention is paid to the application scenarios of the Internet of Things (IoT). In mIoT systems, the main data transfer scenario is the massive Machine-Type Communication (mMTC) scenario. One of the main requirements for the mMTC scenario is the ability to process a potentially unlimited number of devices. The development trend of this scenario assumes an increase in the number of devices within the operation of one access point. A large number of devices necessitates the use of random multiple access methods for transmission over a common channel. In this case, the requirements for the performance indicators of future generations of wireless communication systems increase, such as: throughput, device connection density, data transmission delay. Modern networks use a 4-step random access procedure. However, using the 4-step procedure in the context of a massive Machine-Type Communication scenario has a number of disadvantages: a large volume of transmitted service messages in relation to the transmitted information from IoT devices, an increase in transmission time due to later detection of collisions. New wireless network standards (5G NR) add the ability to use a 2-step random access procedure, which reduces the number of service messages. However, in some cases this random access procedure also has disadvantages: an increased probability of data collision. Therefore, a number of works describe the possibility of backoff from a 2-step procedure to a 4-step procedure, provided that a fallback RAR is received. There is no precise formulation of such a backoff. In this paper, several types of such a backoff are proposed and a comparative analysis of these transitions is carried out. Based on the results of the analysis, it is concluded that some types of backoff are the most promising for possible use in random access procedures of future generations of wireless networks.

Keywords: 2-step procedure random access, throughput, 4-step procedure random access, mMTC, IoT

References

- [1] W. T. Toor, "Evolution of random access process: From Legacy networks to 5G and beyond," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2022. Vol. 33. No. 6. P. E3776.
- [2] Yang Bei, "Intelligent random access for massive-machine type communications in sliced mobile networks," *Electronics*, 2023. No. 2. PP. 329.
- [3] Segura David, "5G early data transmission (Rel-16): Security review and open issues," *IEEE Access*, 2022. No. 10, pp. 93289-93308.
- [4] W. C. Wang, "Low Latency Signature-Based 4-Step Random Access Procedure for Massive Machine-Type Communications," *Journal of Mobile Multimedia*, 2024. Vol. 20. No. 1. PP. 213-238.
- [5] H. Althumali, M. Othman, "Priority-based load-adaptive preamble separation random access for QoS-differentiated services in 5G networks," *Journal of Network and Computer Applications*, 2022. No. 203. P. 103396.
- [6] M. Vilgelm, S. R. Linares, W. Kellerer, "Enhancing cellular M2M random access with binary countdown contention resolution," *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, IEEE, 2017, pp. 1-6.
- [7] S. Song, J. B. Seo, H. Jin, "Online control of two-step random access: A step towards umtc," *2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, IEEE, 2023, pp. 1-6.
- [8] Maira Alvi, "Mini-slot based access barring scheme for IoT networks," *Human-Centric Computing and Information Sciences*, 2023. No.13.
- [9] M. Alvi, W. T. Toor, "Mini-Slot Based Access Barring Scheme for IoT Networks," *Human-centric Computing and Information Sciences Journal*, 2023. Vol. 13, pp. 13-32.
- [10] H. Jin, W. T. Toor, "Recursive pseudo-Bayesian access class barring for M2M communications in LTE systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017. Vol. 66, No. 9, pp. 8595-8599.
- [11] A. E. Mostafa, "Aggregate preamble sequence design and detection for massive IoT with deep learning," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021. Vol. 70. No. 4, pp. 3800-3816.
- [12] J. Kim, "Two-step random access for 5G system: Latest trends and challenges," *IEEE Network*, 2020. Vol. 35. No. 1, pp. 273-279.
- [13] E. Peralta, "Two-step random access in 5G new radio: Channel structure design and performance," *2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*, IEEE, 2021, pp. 1-7.
- [14] H. Zhou, "Analyzing novel grant-based and grant-free access schemes for small data transmission," *IEEE Transactions on Communications*, 2022. Vol. 70. No. 4, pp. 2805-2819.
- [15] X. Zhao., L. Dai, "Connection-based Aloha: Modeling, optimization, and effects of connection establishment," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023. Vol. 23. No. 2, pp. 1008-1023.
- [16] Artem Burkov, Alexey Frolov, and Andrey Turlikov, "Contention-based protocol with time division collision resolution," *2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. IEEE, 2018.

Information about author:

Roman O. Rachugin, postgraduate student of the Department № 25 of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation", Saint Petersburg, Russia. ORCID 0000-0001-5813-3867