

Научная статья

УДК 621.396.1

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-119-126>

EDN:HBVZAJ



Оценка эффективности механизмов случайного и определенного доступа абонентов к широкополосной сети спутниковой связи

Михаил Сергеевич Парфенов¹ ✉, mikhail.parfenov.88.88@bk.ru

Владислав Александрович Фукалов¹, vladfukalov@ya.ru

Александр Александрович Шевченко², alex_pavel1991@mail.ru

Дмитрий Федорович Ткачев¹, dimas.portnoy@inbox.ru

¹Военная академия связи им. С.М. Буденного,
Санкт Петербург, 194064, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Рост числа терминалов и интенсивности подключений в спутниковых сетях с топологией «звезда» обостряет задачу выбора эффективного механизма доступа к общему радиоканалу. Существующие подходы – определенный (TDMA) и случайный (ALOHA) доступ – имеют существенные ограничения, а критерии их выбора в зависимости от нагрузки недостаточно формализованы.

Целью исследования является сравнение эффективности двух рассматриваемых механизмов и выявления условий, при которых один из них обеспечивает лучшую производительность. В ходе исследования были использованы **методы** аналитического и имитационного моделирования. Для случайного доступа строго выведена формула математического ожидания числа слотов, занятых ровно одним терминалом. Аналитическая модель верифицирована с помощью стохастического моделирования на Python.

Результат. Получена и подтверждена аналитическая модель, точно прогнозирующая эффективность случайного доступа.

Научная новизна. Впервые строго выведена и верифицирована формула для ожидаемого числа успешно занятых слотов, что позволяет оценивать производительность без ресурсоемкого моделирования. Установлен количественный критерий выбора между определенным и случайным доступом. Модель учитывает реальную конкуренцию терминалов и применима к протоколам ALOHA и TDMA.

Практическая значимость. Представленное решение предлагается использовать при проектировании и адаптивном управлении МАС-уровнем в спутниковых сетях VSAT, IoT-системах и сетях телеметрии. Полученные критерии выбора механизма доступа могут быть реализованы в виде алгоритмов динамической реконфигурации в программно-конфигурируемых сетях (SDN), позволяя автоматически переключаться между режимами в зависимости от текущей нагрузки. Это обеспечит оптимальное использование полосы пропускания, минимизацию задержек и повышение общей устойчивости сети.

Ключевые слова: случайный доступ, математическое ожидание, симуляция, вероятностное распределение, эффективность механизма, спутниковая сеть, топология «звезда», аналитическая модель, оценка производительности, многоканальный доступ, стохастическое моделирование

Ссылка для цитирования: Парфенов М.С., Фукалов В.А., Шевченко А.А., Ткачев Д.Ф. Оценка эффективности механизмов случайного и определенного доступа абонентов к широкополосной сети спутниковой связи // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 5. С. 119–126. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-119-126. EDN:HBVZAJ

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-119-126>

EDN:HBVZAJ

Effectiveness Evaluation of Random and Defined Subscriber Access Mechanisms to a Broadband Satellite Communications Network

✉ Mikhail S. Parfenov¹, mikhail.parfenov.88.88@bk.ru

Vladislav A. Fukalov¹, vladfukalov@ya.ru

Alexandr A. Shevchenko², alex_pavel1991@mail.ru

Dmitriy F. Tkachev¹, dimas.portnoy@inbox.ru

¹Military Academy of Communications,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

²The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

Annotation

Relevance. The increase in the number of terminals and the intensity of connections in satellite communication networks with the «star» topology actualizes the problem of choosing an effective mechanism for accessing a common radio channel. The well-known approaches of deterministic and random access have significant limitations. At the same time, there are no clear analytical criteria for choosing between mechanisms depending on the load, which makes it difficult to optimize network performance.

Purpose (research): The aim is to compare the effectiveness of two mechanisms for entering satellite terminals into a network with the "star" topology: with specific slot access and with random access. The assessment is aimed at identifying conditions under which one of the mechanisms is superior to the other in key performance indicators.

Methods. The solution of the problem is based on a combination of analytical and simulation modeling. To evaluate the effectiveness of random access, a strict combinatorial derivation of the mathematical expectation formula for the number of slots selected by exactly one terminal was carried out. The verification of the analytical model was performed using stochastic modeling in Python.

Result. A validated analytical model has been obtained that makes it possible to accurately predict the effectiveness of the random access mechanism. The data obtained is applicable in the design of satellite communication networks to optimize terminal entry time and channel resource allocation. **The novelty** elements are rigorous analytical inference and verification of the formula for the mathematical expectation of the number of successfully occupied slots with random access, which allows you to accurately predict performance without large-scale modeling. The novelty also includes the establishment of a quantitative criterion for choosing an access mechanism. The proposed model takes into account the real conditions of terminal competition for channel resources and is applicable to the analysis of protocols such as ALOHA and TDMA.

Practical significance. The presented solution is proposed to be used in the design and adaptive management of the MAC layer in VSAT satellite networks, IoT systems and telemetry networks. The obtained criteria for selecting an access mechanism can be implemented as dynamic reconfiguration algorithms in software-configurable networks, allowing automatic switching between modes depending on the current load. This will ensure optimal use of bandwidth, minimize delays, and increase overall network stability.

Keywords: random access, mathematical expectation, simulation, probability distribution, mechanism efficiency, satellite network, star topology, analytical model, performance evaluation, multichannel access, stochastic modeling

For citation: Parfenov M.S., Fukalov V.A., Shevchenko A.A., Tkachev D.F. Effectiveness Evaluation of Random and Defined Subscriber Access Mechanisms to a Broadband Satellite Communications Network. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(5):119–126. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-119-126. EDN:HBVZAJ

Введение

В современных спутниковых системах связи важную роль играет организация эффективного доступа терминалов к сетевым ресурсам, особенно в сетях с топологией «звезда», где все терминалы взаимодействуют через центральный узел – спутник или наземную станцию [1]. Такие архитектуры широко используются в системах спутниковой связи типа VSAT (аббр. от англ. Very Small Aperture Terminal), где центральная станция управляет обменом данными с распределенными терминалами [2]. В таких сетях особенно актуальна задача быстрого и надежного входа терминалов в сеть, в том числе при периодическом или случайном подключении большого числа пользователей. От эффективности механизма входа напрямую зависит задержка установления соединения, использование полосы пропускания и общая производительность системы [3]. При этом важно минимизировать коллизии, избыточные попытки доступа и время ожидания, особенно в условиях ограниченной пропускной способности радиоканала.

В данной статье рассматриваются два подхода к организации входа терминалов в сеть: механизм определенного доступа (с арбитром) и механизм произвольного (случайного) доступа. В первом случае каждый терминал получает предварительно назначенный слот для передачи запроса на вход, что обеспечивает детерминированное поведение системы [4]. Такой подход реализуется, например, в системах с централизованным планированием (TDMA с центральным контроллером) [5]. Во втором – каждый терминал случайным образом выбирает один из доступных слотов, что приводит к возможным коллизиям, но позволяет избежать централизованного управления и снижает задержку при низкой нагрузке [6]. Примером является протокол ALOHA или его модификации, широко применяемые в спутниковых и беспроводных сетях [7].

Целью исследования является сравнительный анализ эффективности этих двух механизмов в зависимости от ключевых параметров: числа терминалов, числа выделенных слотов и характера нагрузки. Особое внимание уделено аналитическому моделированию механизма случайного доступа, его верификации посредством имитационного моделирования и практической интерпретации результатов для проектирования реальных спутниковых сетей [8].

Симуляция выбора терминалами слотов для входа

Оценка эффективности механизма определенного доступа проста – количество терминалов, успешно выбравших слот, равно общему количеству слотов, выделенных для входа. Это обеспечи-

вает 100-процентную эффективность при $N \leq K$, где N – число терминалов; K – число слотов. Однако такой механизм требует централизованного управления и предварительной синхронизации, что увеличивает сложность системы [9].

Для оценки эффективности механизма произвольного доступа используется симуляция. Симуляция представляет собой функцию, написанную на языке Python. Функция принимает два аргумента: первый (K) – общее количество выделенных слотов для входа, второй (N) – общее количество терминалов, каждый из которых выбирает один слот из K возможных. В теле функции происходит подсчет количества слотов, выбранных только один раз, в 100 000 экспериментах. На выходе симуляции получается распределение случайной величины k – количества слотов, выбранных ровно один раз для фиксированных K и N [10]. Такой подход позволяет оценить не только математическое ожидание, но и дисперсию, форму распределения и вероятность успешного входа. Результаты симуляции визуализируются в виде гистограмм, которые отображены на рисунке 1, что дает наглядное представление о поведении системы при $K = 50$ и разных нагрузках.

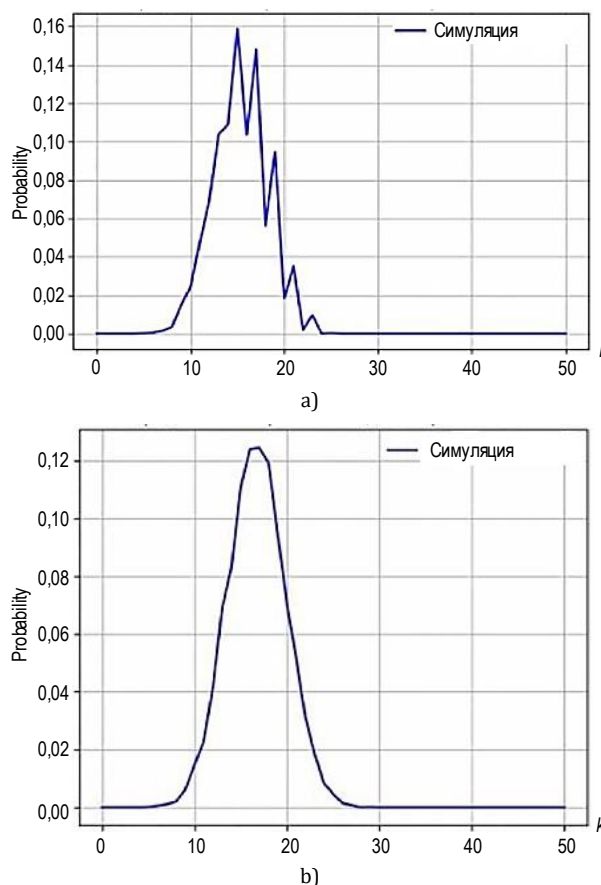


Рис. 1. График распределения вероятности для k при: а) $N = 25$; б) $N = 76$

Fig. 1. Graph of the Probability Distribution for k at: a) $N = 25$; b) $N = 76$

Аналитический вывод выражения для математического ожидания числа удачно выбранных слотов

Для строгой оценки эффективности механизма случайного доступа был проведен аналитический вывод выражения для математического ожидания числа слотов, выбранных ровно один раз.

1) Для любой конкретной системы из K слотов для входа и N терминалов, избирающих равновероятно ячейку от 1 до K , можно построить множество всевозможных последовательностей, состоящих из номеров слотов, выбранных каждым терминалом.

Для примера при $N = 3, K = 2$ – это множество будет состоять из следующих последовательностей:

1, 1, 1
1, 1, 2
1, 2, 1
1, 2, 2
2, 1, 1
2, 1, 2
2, 2, 1
2, 2, 2

Мощность этого множества равна K^N [11].

2) Множество всех последовательностей назовем $A_{\geq 0}$ – содержит в себе последовательности с 0 или большим числом не повторяющихся номеров.

Множество $A_{\geq 1}$, содержащее в себе последовательности с 1 или большим числом не повторяющихся номеров, будет полностью вложено во множество $A_{\geq 0}$.

Так, получаем последовательность вложенных множеств:

$$\{ \dots \subset A_{\geq k} \subset A_{\geq k-1} \subset \dots \subset A_{\geq 1} \subset A_{\geq 0} \}. \quad (1)$$

3) Можно заметить, что мощность множества, состоящего из последовательностей только с числом k не повторяющихся номеров, равна:

$$|A_{=k}| = |A_{\geq k}| - |A_{\geq k+1}|.$$

Значит, для вычисления числа возможных последовательностей с k не повторяющимися номерами достаточно вывести выражение для оценки мощности множества $A_{\geq k}$.

4) Мощность множества $A_{\geq k}$ можно вычислить, исходя из следующего:

- пусть есть K слотов для входа N терминалов:
 $\square \square \square \square \dots \square$;
- первый терминал может выбрать любой слот из K возможных: $\square \square \square \blacksquare \dots \square$;
- второй терминал может выбрать любой слот из $K - 1$ возможных: $\square \blacksquare \square \blacksquare \dots \square$;
- k -й терминал может выбрать любой слот из $K - k + 1$ возможных;
- остальные терминалы могут выбрать любые из $K - k$ незанятых слотов.

Тогда в первом приближении, с учетом выбора k терминалов из N , мощность множества $A_{\geq k}$ можно представить в виде выражения:

$$|A_{\geq k}| = K(K-1) \dots (K-k+1) \times (K-k)^{(N-k)} \times \times C_k^N = \frac{K!}{(K-k)!} \times (K-k)^{(N-k)} \times C_k^N. \quad (2)$$

5) Выражение (2) учитывает последовательности, состоящие из $i > k$ не повторяющихся элементов C_k^i раз вместо 1, в силу пересечения множеств из $\geq k$ числа не повторяющихся элементов, поэтому необходимо скомпенсировать число этих последовательностей вот так:

$$|A_{\geq k}| = \frac{K!}{(K-k)!} \times (K-k)^{(N-k)} \times \times C_k^N - \sum_{i=k-1}^{\min(K,N)} |A_{=i}| \times (C_k^i - 1). \quad (3)$$

6) Таким образом, получаем выражения:

$$|A_{=k}| = |A_{\geq k}| - |A_{\geq k-1}|, \quad (4)$$

$$|A_{=k}| = \frac{K!}{(K-k)!} \times (K-k)^{N-k} \times \times C_k^N - \sum_{i=k-1}^{\min(K,N)} |A_{=i}| \times (C_k^i - 1). \quad (5)$$

Понимая, что компенсация во втором выражении вырождается в ноль для $k = K$, можно рекурсивно считать количество возможных последовательностей для каждого k и, следовательно, – вычислять вероятность при фиксированных K, N , а также – математическое ожидание k .

Сравнение распределений случайной величины k , получаемых от симуляции и от выведенной функции распределения

Покажем справедливость выведенных выражений, сравнив распределение от симуляции с распределением по формуле. Для этого выведенные выражения переведем в функцию Python, которая, как и симуляция, будет возвращать распределение случайной величины k – количество слотов, которые были выбраны один раз. Также сравним математическое ожидание этой величины от симуляции и от формулы (рисунок 2) при $K = 36$.

Для проверки корректности аналитических выражений проведено сравнение распределения, полученного по формуле, с результатами симуляции:

- $K = 36, N = 20$: математическое ожидание по формуле = 11,71, по симуляции = 11,708 – расхождение менее 0,1 % (рисунок 2а);
- $K = 36, N = 1$: $E[k] = 1,0$ – ожидаемо, один терминал всегда успешно выбирает слот (рисунок 2б);
- $K = 36, N = 47$: пик около 10–12, что соответствует высокой вероятности коллизий (рисунок 2с).

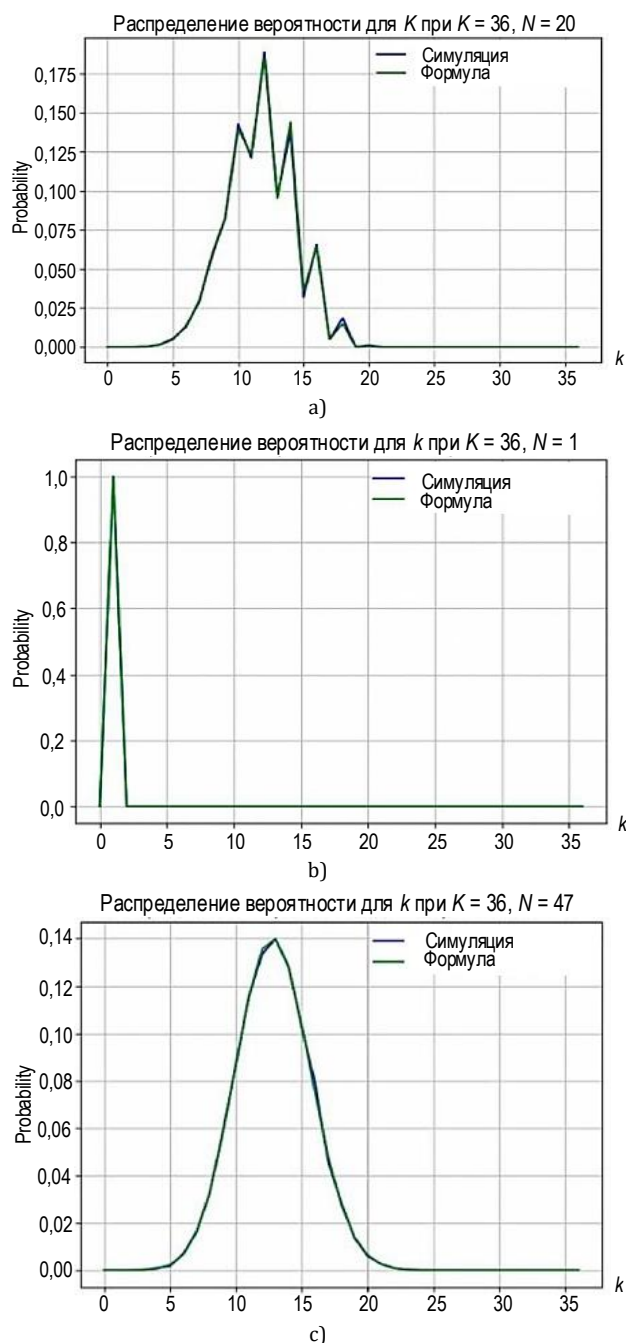


Рис. 2. График распределения вероятности для k : а) $N = 20$; б) $N = 1$; в) $N = 47$

Fig. 2. Graph of the Probability Distribution for k : а) $N = 20$; б) $N = 1$; в) $N = 47$

Во всех случаях распределение, полученное по аналитической формуле, совпадает с результатами симуляции с высокой точностью. Это подтверждает справедливость вывода для любого количества терминалов N и любого количества слотов K . Такой уровень согласования позволяет использовать аналитическую модель для прогнозирования производительности без необходимости масштабного моделирования.

Сравнение эффективности механизмов произвольного и определенного доступа для входа терминалов в сеть

1) Начнем сравнение эффективности механизмов с оценки количества терминалов, успешно занявших слот при фиксированном значении количества слотов для входа $K = 50$ и переменном значении общего количества терминалов N , которые пытаются занять слот (рисунки 3–4).

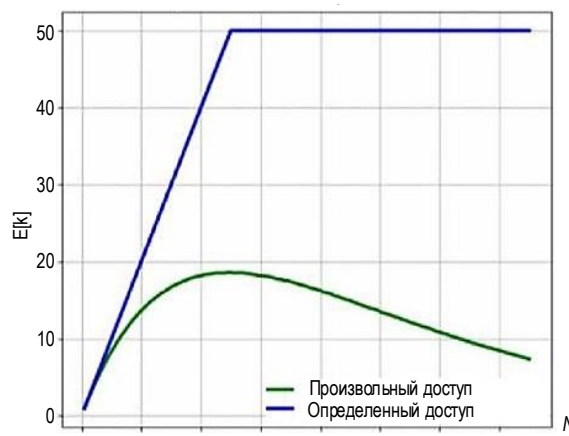


Рис. 3. График зависимости количества терминалов, занявших слот k , от общего количества N

Fig. 3. Graph of the Dependence of the Number of Terminals Occupying Slot k on the Total Number of N

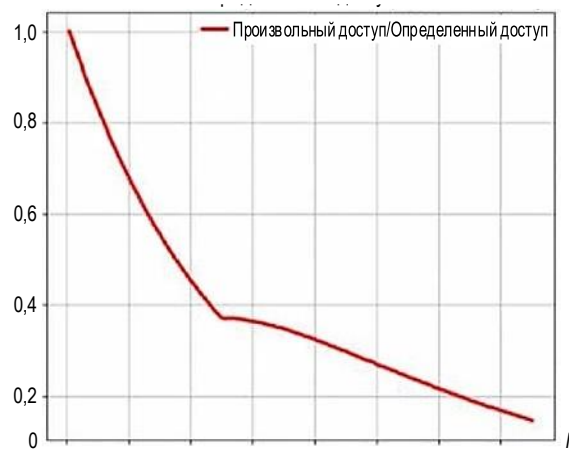


Рис. 4. График отношения механизмов произвольного и определенного доступа

Fig. 4. Graph of the Relationship between Random and Defined Access Mechanisms

Согласно графику, приведенному на рисунке 3, пик эффективности механизма произвольного доступа наступает тогда, когда количество слотов, выделенных для входа, равняется количеству входящих терминалов. Отсюда следует, когда число слотов K , выделенных для входа приблизительно равно числу терминалов N , желающих войти, эффективность входа механизма произвольного доступа составляет 35–40 % от эффективности механизма определенного доступа.

2) Теперь оценим количество фреймов, требуемое для входа N терминалов, при $K = 50$, выделенных под вход слотов. Будем считать, что для входа терминалам требуется успешно занять ровно один слот. График зависимости количества фреймов, требуемых для входа N терминалов, показан на рисунке 5.



Рис. 5. График зависимости количества фреймов, требуемых для входа N терминалов

Fig. 5. Graph of the Dependence of the Number of Frames Required for the Input of N Terminals

По графику видно, что при числе терминалов N , много большим числа выделенных под вход слотов K время входа по механизму произвольного доступа стремится к бесконечности. Время входа по механизму определенного доступа, напротив, растет линейно по мере увеличения количества терминалов N .

3) В конце оценим эффективность входа терминалов в сеть по двум механизмам при стационарной работе, когда общее количество терминалов не в сети M не равно количеству терминалов N , желающих войти в сеть одновременно. Число слотов K , выделяемое под вход, возьмем равным числу N . Также число успешно занятых слотов для входа одного терминала сделаем варьируемым параметром. Результаты проиллюстрированы на рисунке 6.

При стационарной работе можно наблюдать обратную ситуацию – механизм произвольного доступа эффективнее механизма определенного доступа до количества терминалов N , желающих войти одновременно, меньше произведения общего количества терминалов не в сети M на относительную эффективность механизма произвольного доступа по отношению к механизму определенного доступа. Относительная эффективность для каждой конфигурации K, N . Для текущего эксперимента, где $K = N$, механизм произвольного доступа будет эффективней при $N < M * 0,4$. Так происходит из-за того, что при входе механизмом определенного доступа слоты для входа выделяются поочередно для каждого терминала не в се-

ти. Это значит, что каждый из N терминалов получает свой слот только каждые M слотов. Механизм же произвольного доступа этого недостатка лишен, потому что каждый из слотов может занять каждый из терминалов.

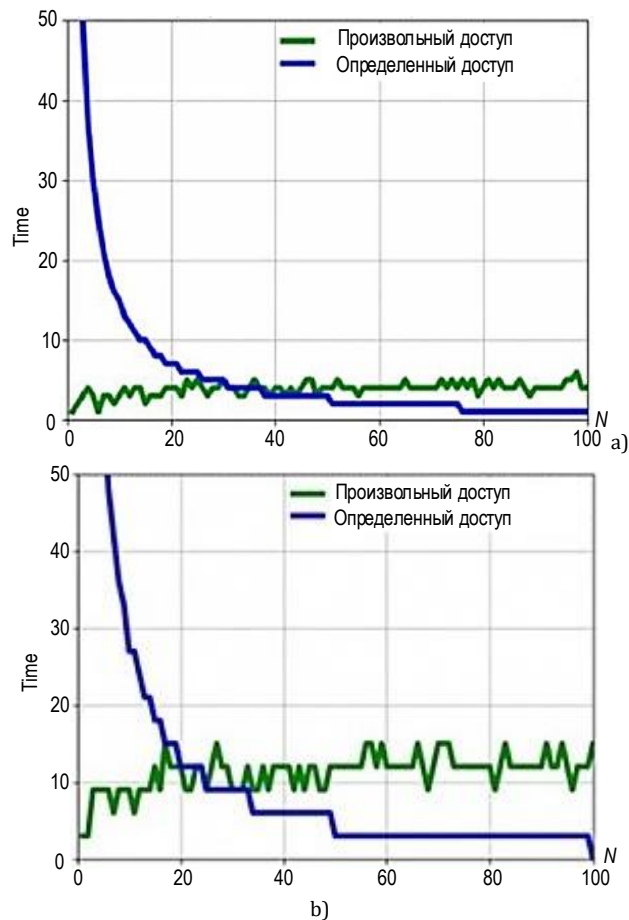


Рис. 6. График зависимости количества фреймов, требуемых для входа N терминалов из 150 (а) и 99 (б) терминалов не в сети

Fig. 6. Graph of the Dependence of the Number of Frames Required for the Input of N Terminals out of 150 and 99 (b) Terminals Offline

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует, что выбор между механизмами случайного и определенного доступа (с арбитром) для входа терминалов в спутниковую сеть с топологией «звезда» не может быть однозначным, и должен опираться на конкретные условия эксплуатации сети, такие как плотность подключений, общее число терминалов, частота входа и требования к задержке. Анализ показал, что каждый из механизмов обладает своими сильными и слабыми сторонами, и их эффективность кардинально меняется в зависимости от нагрузки [11].

Механизм произвольного (случайного) доступа оказывается наиболее эффективным в условиях низкой или умеренной нагрузки, когда число терминалов, одновременно желающих войти в сеть,

существенно меньше или сопоставимо с числом выделенных слотов. В таких сценариях он обеспечивает высокую гибкость, отсутствие необходимости в централизованном планировании и минимальные задержки при входе. Особенно выгодным этот механизм становится в стационарных сетях, где общее число терминалов велико, но активными являются лишь их фрагмент. В этом случае, как показывают результаты моделирования, представленные на рисунке 6, механизм случайного доступа позволяет терминалам входить в сеть быстрее, поскольку не требует ожидания своей «очереди» в циклическом распределении. При $N < 0,4M$, где M – общее число терминалов, а N – число активных, он превосходит механизм с арбитром по скорости установления соединения.

Однако при высокой нагрузке, когда число терминалов N превышает число доступных слотов K , эффективность случайного доступа резко падает из-за роста коллизий. Вероятность того, что два или более терминалов выберут один и тот же слот, стремится к единице, что приводит к необходимости многократных повторных попыток [12]. Как показано на рисунке 5, время входа при таком механизме растет нелинейно и может стремиться к бесконечности при значительной перегрузке. Это делает его неприемлемым для систем с высокой плотностью подключений или жесткими требованиями к предсказуемости задержки.

В свою очередь, механизм определенного доступа, несмотря на необходимость централизованного управления и синхронизации, обеспечивает стабильную и детерминированную производительность. Количество успешно входящих терминалов в каждом фрейме предсказуемо и равно

$\min(N, K)$, а общее время входа растет линейно. Это делает его идеальным выбором для критически важных приложений, где требуется гарантированная пропускная способность и минимальные колебания задержки – например, в системах военной связи, телеметрии или управления инфраструктурой.

Научная значимость работы заключается в строгом комбинаторном выводе аналитической модели для математического ожидания числа успешно занятых слотов при случайном доступе, что позволяет прогнозировать производительность без масштабного моделирования. Верификация модели с помощью имитационного моделирования на Python подтвердила ее высокую точность (погрешность менее 0,5 %), что открывает возможности для ее использования в автоматизированных системах проектирования сетей.

Практическая ценность исследования состоит в разработке методики выбора оптимального механизма доступа на основе анализа сценария использования. Предложенные критерии (например, $N < 0,4M$) могут быть включены в алгоритмы адаптивного управления MAC-уровнем в спутниковых системах, IoT-сетях и других распределенных архитектурах.

В перспективе, результаты могут быть развиты для анализа гибридных механизмов, сочетающих элементы обоих подходов, а также для учета реальных факторов: задержек распространения сигнала, эффекта захвата (capture effect), помех и мобильности терминалов. Это позволит создавать более устойчивые и эффективные протоколы доступа для современных и будущих спутниковых сетей связи.

Список источников

1. Зинкин С.В., Мурсаев А.Н. Особенности многостанционного доступа с временным разделением каналов в системах спутниковой связи // Наука, техника и образование. 2021. Т. 7(82). С. 11–15. DOI:10.24411/2312-8267-2021-10701. EDN:DOOFCL
2. Перегудов М.А., Стешковой А.С. Модель централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA // Труды СПИИРАН. 2020. Т. 19. № 1. С. 128–154. DOI:10.15622/sp.2020.19.1.5. EDN:UHASTF
3. Pratt T., Bostian C.W., Allnutt J.E. Satellite Communications. Wiley, 2003.
4. Stallings W. Data and Computer Communications. Pearson, 2017.
5. Чуднов А.М. Математические основы моделирования, анализа и синтеза систем. СПб.: ВАС, 2021. EDN:YKTFWD
6. Аниканов Г.А., Коновальчик П.М., Моргунов В.М., Овчаров В.А. Контролируемый многомодельный доступ к среде беспроводных сетей передачи данных // Труды СПИИРАН. 2015. № 1(38). С. 246–286. EDN:TQURCP
7. Petkovic M., Devaja T., Vukobratovic D., Escibano F.J., Stefanović Č. Reliability Analysis of Slotted Aloha with Capture for an OWC-based IoT system // Proceedings of the 17th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS, Berlin, Germany, 06–09 September 2021). IEEE, 2021. DOI:10.1109/ISWCS49558.2021.9562172
8. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. Pearson, 2021.
9. Степанов С.Н. Модель совместного обслуживания трафика сервисов реального времени и трафика данных. II // Автоматика и телемеханика. 2011. № 5. С. 139–147. EDN:NTUBKV
10. Чуднов А.М., Положинцев Б.И., Кичко Я.В. Анализ помехозащищенности обмена данными группы беспилотных летательных аппаратов в условиях оптимизированных помех // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 12. С. 33–47. DOI:10.18127/j00338486-202212-03. EDN:BDEIHK

11. Пономарев Д.Ю., Демичева А.А., Гаипов К.Э. Имитационная модель обслуживания вызовов в спутниковой сети с учетом использования частотного ресурса // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2023. Т. 11. № 4(43). С. 29. DOI:10.26102/2310-6018/2023.43.4.014. EDN:LBZEVH
12. Ross S.M. Introduction to Probability Models. Academic Press, 2019.

References

1. Zinkin S.V., Mursaev A.N. Features of multi-station access with temporary channel separation in satellite communication systems. *Science, Technology and Education*. 2021;7(82):11–15. (in Russ.) DOI:10.24411/2312-8267-2021-10701. EDN:DOOFCL
2. Peregudov M., Steshkov A. Digital Radio Networks Centralized Elements Synchronization Model with Random Multiple Access to the CSMA/CA Type Medium. *SPIIRAS Proceedings*. 2020;19(1):128–154. (in Russ.) DOI:10.15622/sp.2020.19.1.5. EDN:UHASTF
3. Pratt T., Bostian C.W., Allnutt J.E. *Satellite Communications*. Wiley; 2003.
4. Stallings W. *Data and Computer Communications*. Pearson; 2017.
5. Chudnov A.M. *Mathematical Foundations of Modeling, Analysis and Synthesis of Systems*. St. Petersburg: Military Academy of Communications Publ.; 2021. (in Russ.) EDN:YKTFWD
6. Anikanov G.A., Konovalchik P.M., Morgunov V.M., Ovcharov V.A. The Multi-Controlled Media Access to Wireless Data Networks. *SPIIRAS Proceedings*. 2015;1(38):246–286. (in Russ.) EDN:TQURCP
7. Petkovic M., Devaja T., Vukobratovic D., Escibano F.J., Stefanović Č. Reliability Analysis of Slotted Aloha with Capture for an OWC-based IoT system. *Proceedings of the 17th International Symposium on Wireless Communication Systems, ISWCS, 06–09 September 2021, Berlin, Germany*. IEEE; 2021. DOI:10.1109/ISWCS49558.2021.9562172
8. Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. Pearson; 2021.
9. Stepanov S.N. A model of joint maintenance of real-time service traffic and data traffic II. *Avtomatika i Telemekhanika*. 2011;5:139–147. (in Russ.) EDN:NTUBKV
10. Chudnov A.M., Polozhintsev B.I., Kichko Ya.V. Analysis of Data Exchange Immunity UAV Groups Under Optimized Interference. *Radioengineering*. 2022;86(12):33–47. (in Russ.) DOI:10.18127/j00338486-202212-03. EDN:BDEIHK
11. Ponomarev D.Yu., Demicheva A.A., Gaipov K.E. Simulation model of call service in a satellite network with consideration to frequency resource utilization. *Modeling, Optimization and Information Technologies*. 2023;4(43):29. DOI:10.26102/2310-6018/2023.43.4.014. (in Russ.) EDN:LBZEVH
12. Ross S.M. *Introduction to Probability Models*. Academic Press; 2019.

Статья поступила в редакцию 24.09.2025; одобрена после рецензирования 19.10.2025; принята к публикации 20.10.2025.

The article was submitted 24.09.2025; approved after reviewing 19.10.2025; accepted for publication 20.10.2025.

Информация об авторах:

ПАРФЕНОВ
Михаил Сергеевич

адъюнкт научно-исследовательского центра Военной академии связи
им. С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0009-0000-9118-0200>

ФУКАЛОВ
Владислав Александрович

старший оператор роты (научной) Военной академии связи
им. С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0009-0008-9068-9054>

ШЕВЧЕНКО
Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры защищенных систем связи
Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0001-9113-1089>

ТКАЧЕВ
Дмитрий Федорович

кандидат технических наук, начальник отдела научно-исследовательского
центра Военной академии связи им. С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0009-0004-2256-9270>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.