

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 21. Is. 4. Number 84 (2024). Pp. 30–42
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.003>
UDC 656.2

SIMULATION MODELING FOR THE ANALYSIS OF COMPETITION MECHANISMS AND SURVEY SUPPORT IN QOS MANAGEMENT

Zh.B. Esmambetov

International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: esmambetov.zhasulan@mtgu.edu.kz

Zhasulan Esmambetov — master student, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan
E-mail: esmambetov.zhasulan@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0003-7238-5288>.

© Zh.B. Esmambetov

Abstract. With the rapid development of IEEE 802.11 wireless local area networks and the increasing volume of multimedia traffic, the problem of providing the required Quality of Service (QoS) has become particularly relevant. Modern WLANs operate under conditions of high user density and heterogeneous traffic, which significantly complicates medium access control at the MAC layer. Therefore, the study of medium access mechanisms and their impact on network performance indicators is of great importance. The aim of this research is to analyze and compare the efficiency of contention-based access mechanisms (DCF) and polling-based controlled access mechanisms (PCF) in IEEE 802.11 wireless networks in terms of QoS support. To achieve this goal, the following tasks are addressed: analysis of existing medium access mechanisms, development of WLAN simulation scenarios in the OPNET environment, investigation of the impact of different traffic types and station density on delay, throughput, and retransmission attempts, and evaluation of the effectiveness of combining contention and polling mechanisms. The simulation results demonstrate that the DCF mechanism is more efficient for non-multimedia traffic and low station density, providing lower overhead and higher throughput. At the same time, the PCF mechanism ensures better delay performance and significantly reduces the number of retransmissions for multimedia traffic and in high-density network scenarios. It is shown that an increase in the number of stations leads to a substantial degradation of QoS when only contention-based access is used. In conclusion, the study confirms that a combination of contention-based and polling-based access mechanisms can significantly improve QoS support in IEEE 802.11 WLANs. The obtained results can be applied in the design and optimization of wireless networks intended to support multimedia and real-time services.

Keywords: IEEE 802.11, WLAN, QoS, DCF, PCF, simulation modeling

For citation: Zh.B. Esmambetov. Simulation Modeling for the Analysis of Competition Mechanisms and Survey Support in QoS Management//Industrial Transport of Kazakhstan. 2024. Vol. 21. No. 84. Pp. 30–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.003>.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

**QOS-ТІ БАСҚАРУДАҒЫ БӘСЕКЕЛЕСТІК МЕХАНИЗМДЕРІ МЕН
САУАЛНАМА ҚОЛДАУЫН ТАЛДАУ ҮШІН ИМИТАЦИЯЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ**

Ж.Б. Есмамбетов

Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: esmambetov.zhasulan@mtgu.edu.kz

Жасулан Есмамбетов — магистрант, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: esmambetov.zhasulan@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0003-7238-5288>.

© Ж.Б. Есмамбетов

Аннотация. IEEE 802.11 стандартына негізделген сымсыз жергілікті желілердің қарқынды дамуы және мультимедиялық трафик көлемінің артуы қызмет көрсету сапасын (Quality of Service, QoS) қамтамасыз ету мәселесінің өзектілігін арттырып отыр. Қазіргі WLAN желілері абоненттік құрылғылардың жоғары тығыздығы мен әртекті трафик жағдайында жұмыс істейді, бұл деректерді беру ортасына қол жеткізуді басқаруды едәуір күрделендіреді. Осыған байланысты MAC-деңгейіндегі ортаға қол жеткізу механизмдерін зерттеу маңызды ғылыми және практикалық міндет болып табылады. Зерттеудің мақсаты — IEEE 802.11 сымсыз желілерінде QoS қолдау тұрғысынан бәсекелестік қол жеткізу механизмі (DCF) мен сауалнамаға негізделген басқарылатын қол жеткізу механизмі (PCF) тиімділігін талдау және салыстыру. Аталған мақсатқа жету үшін ортаға қол жеткізу механизмдерін талдау, OPNET ортасында WLAN модельдеу сценарийлерін әзірлеу, әртүрлі трафик түрлері мен станциялар санының кідіріс, өткізу қабілеті және қайта жіберу санына әсерін зерттеу, сондай-ақ механизмдерді біріктіріп қолданудың тиімділігін бағалау міндеттері қойылды. Модельдеу нәтижелері DCF механизмінің мультимедиялық емес трафик үшін және станциялар саны аз болған жағдайда тиімді екенін көрсетті. Ал PCF механизмі мультимедиялық трафикті беру кезінде және желі тығыздығы жоғары жағдайларда кідірісті азайтып, қайта жіберулер санын едәуір төмендететіні анықталды. Станциялар санының артуы тек бәсекелестік механизмді қолданған кезде QoS көрсеткіштерінің нашарлауына әкелетіні дәлелденді. Қорытындылай келе, бәсекелестік және сауалнама механизмдерін біріктіріп қолдану IEEE 802.11 WLAN желілерінде қызмет көрсету сапасын арттыруға мүмкіндік беретіні анықталды. Зерттеу нәтижелері мультимедиялық сервистерді қолдайтын сымсыз желілерді жобалау мен оңтайландыруда пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: IEEE 802.11, WLAN, QoS, DCF, PCF, модельдеу

Дәйексөздер үшін: Ж.Б. Есмамбетов. QoS-ті басқарудағы бәсекелестік механизмдері мен сауалнама қолдауын талдау үшін имитациялық модельдеу//Қазақстан өндіріс көлігі. 2024. Том. 21. № 84. 30–42 бет. (Орыс. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.003>.

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ВОЗМОЖНОСТИ МЕХАНИЗМОВ КОНКУРЕНЦИИ И ОПРОСА В ПОДДЕРЖКЕ QOS

Ж.Б. Есмамбетов

Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: esmambetov.zhasulan@mtgu.edu.kz

Жасулан Есмамбетов — магистрант, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: esmambetov.zhasulan@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0003-7238-5288>.

© Ж.Б. Есмамбетов



Аннотация. В условиях интенсивного развития беспроводных локальных сетей стандарта IEEE 802.11 и роста объёмов мультимедийного трафика особую актуальность приобретает задача обеспечения требуемого качества обслуживания (Quality of Service, QoS). Современные WLAN функционируют в условиях высокой плотности пользовательских устройств и разнородных нагрузок, что существенно усложняет управление доступом к среде передачи данных на канальном уровне. В этой связи важным является исследование механизмов доступа к среде и их влияния на основные показатели производительности сети. Целью данного исследования является анализ и сравнительная оценка эффективности механизмов конкурентного доступа (DCF) и контролируемого доступа на основе опроса (PCF) в беспроводных сетях IEEE 802.11 с точки зрения поддержки QoS. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи: анализ существующих механизмов доступа к среде передачи данных, разработка сценариев имитационного моделирования WLAN в среде OPNET, исследование влияния различных типов трафика и плотности станций на задержку, пропускную способность и количество повторных передач, а также оценка целесообразности комбинированного использования механизмов конкуренции и опроса. В результате проведённого моделирования установлено, что механизм DCF является более эффективным при передаче немультимедийного трафика и при малом количестве станций, обеспечивая меньшие накладные расходы и более высокую пропускную способность. В то же время механизм PCF демонстрирует лучшие показатели по задержке и количеству повторных передач при передаче мультимедийного трафика и в условиях высокой плотности сети. Показано, что увеличение числа станций приводит к существенному ухудшению QoS при использовании только механизма конкуренции. В заключение сделан вывод о том, что комбинированное использование механизмов конкуренции и опроса позволяет повысить эффективность поддержки качества обслуживания в WLAN. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации беспроводных сетей IEEE 802.11, ориентированных на работу с мультимедийными сервисами.

Ключевые слова: IEEE 802.11, WLAN, QoS, DCF, PCF, имитационное моделирование

Для цитирования: Ж.Б. Есмаубетов. Имитационное моделирование для анализа возможности механизмов конкуренции и опроса в поддержке QoS//Промышленный транспорт Казахстана. 2024. Т. 21. No. 84. Стр. 30–42. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.003>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Бурное развитие беспроводных сетей передачи данных и стремительный рост количества мобильных и мультимедийных сервисов обуславливают повышенные требования к качеству обслуживания (Quality of Service, QoS) в беспроводных локальных сетях стандарта IEEE 802.11. Современные WLAN широко используются для передачи разнородного трафика, включая чувствительные к задержкам мультимедийные приложения (VoIP, видеоконференции), что актуализирует задачу эффективного управления доступом к среде передачи данных на канальном уровне.

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых механизмам доступа к среде в сетях IEEE 802.11, проблема обеспечения гарантированного качества обслуживания в условиях высокой плотности станций и смешанного трафика остаётся нерешённой в полной мере. Анализ существующих работ показывает, что механизмы конкуренции и опроса обладают как преимуществами, так и существенными ограничениями при работе с мультимедийным и немультимедийным трафиком (Ле, Симонина, 2015: 137–141; Анисимов, 2016: 82–98). В частности, механизмы конкуренции

демонстрируют высокую пропускную способность при малой нагрузке, но характеризуются ростом задержек и числа коллизий при увеличении количества станций, тогда как механизмы опроса обеспечивают более стабильные показатели QoS, но сопровождаются дополнительными накладными расходами (Ле, 2016б: 203–204; Ле, 2017а: 56–61).

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью комплексного анализа механизмов доступа к среде передачи данных на MAC-уровне IEEE 802.11 с целью выявления условий их эффективного применения для поддержки QoS в WLAN с различной плотностью абонентских устройств. Особый интерес представляет сравнительное исследование механизмов распределённого конкурентного доступа (DCF) и контролируемого доступа на основе опроса (PCF) при передаче разнородного трафика в условиях моделирования.

Объектом исследования являются беспроводные локальные сети стандарта IEEE 802.11.

Предметом исследования являются механизмы доступа к среде передачи данных на канальном уровне (DCF и PCF) и их влияние на показатели качества обслуживания в WLAN.

Целью исследования является анализ и сравнение эффективности механизмов конкуренции и опроса при передаче мультимедийного и немультимедийного трафика в беспроводных сетях IEEE 802.11 с точки зрения обеспечения QoS.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать существующие механизмы доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11;
- исследовать особенности работы механизмов DCF и PCF при передаче различных типов трафика;
- разработать сценарии моделирования WLAN в среде OPNET с различным количеством станций и типами нагрузки;
- выполнить сравнительный анализ задержки, пропускной способности и количества повторных передач для различных механизмов доступа;
- определить условия, при которых комбинация механизмов конкуренции и опроса обеспечивает улучшение показателей QoS.

Методами исследования являются аналитический обзор научных публикаций, имитационное моделирование в среде OPNET, а также сравнительный анализ полученных статистических показателей.

Научная новизна исследования заключается в комплексной оценке эффективности механизмов DCF и PCF в условиях смешанного трафика и различной плотности станций, а также в обосновании целесообразности их комбинированного применения для повышения качества обслуживания в WLAN.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования полученных результатов при проектировании и оптимизации беспроводных сетей IEEE 802.11, ориентированных на поддержку мультимедийных сервисов и работу в условиях высокой плотности пользовательских устройств.

Материалы и методы.

В рамках данного исследования были сформулированы следующие научные вопросы:

- Как влияют механизмы доступа к среде передачи данных DCF и PCF на показатели качества обслуживания (QoS) в беспроводных сетях стандарта IEEE 802.11?
- Насколько эффективно данные механизмы обеспечивают передачу мультимедийного и немультимедийного трафика при различной плотности станций?
- Как изменяются задержка, пропускная способность и количество повторных

передач при увеличении числа абонентских станций в WLAN?

- Способствует ли комбинированное использование механизмов конкуренции и опроса улучшению QoS в условиях смешанного трафика?

В качестве рабочей гипотезы выдвинуто предположение о том, что механизмы конкурентного доступа (DCF) более эффективны при передаче немультимедийного трафика и при малом количестве станций за счёт меньших накладных расходов, тогда как механизмы опроса (PCF) обеспечивают более стабильные показатели качества обслуживания при передаче мультимедийного трафика и в условиях высокой плотности узлов сети. Предполагается, что комбинированное применение механизмов конкуренции и опроса позволяет повысить уровень QoS в WLAN по сравнению с использованием одного механизма доступа.

Материалом исследования являются результаты имитационного моделирования беспроводных локальных сетей стандарта IEEE 802.11, полученные в программной среде OPNET Modeler. Моделируемая сеть представляет собой WLAN с одной точкой доступа (Access Point, AP) и набором абонентских станций (STA), взаимодействующих в общем беспроводном канале.

В количественном отношении материал исследования включает:

- сценарии с различным числом станций: 8, 16, 24 и 32 STA;
- четыре типа трафика: Voice (VoIP), Video (High Resolution Video Conferencing), HTTP (Heavy Browsing), FTP (High Load);
- время моделирования каждого сценария — 30 минут;
- фиксированный радиоканал с номером 1 и параметрами, установленными по умолчанию в OPNET.

В качественном отношении исследование охватывает сравнение двух принципиально различных подходов к доступу к среде передачи данных:

- механизмов конкуренции (DCF);
- механизмов опроса (PCF), а также их комбинированного использования для различных классов трафика.

Распределение типов трафика между станциями осуществлялось равномерно, что позволило обеспечить репрезентативность результатов и корректность сравнительного анализа. Такой подход минимизирует влияние случайных факторов и повышает достоверность выводов исследования.

Исследование проводилось в несколько последовательных этапов:

- Аналитический этап, включающий изучение отечественных и зарубежных научных публикаций, посвящённых механизмам доступа к среде передачи данных в WLAN и проблемам обеспечения QoS.

- Проектирование модели, в ходе которого была разработана структура беспроводной сети IEEE 802.11 в среде OPNET с заданными параметрами точек доступа, абонентских станций и типов трафика.

- Формирование сценариев моделирования, включающих различные комбинации механизмов доступа (DCF, PCF), типов трафика и количества станций.

- Проведение имитационного моделирования и сбор статистических данных по основным показателям эффективности сети.

- Анализ и интерпретация результатов, включающие сравнительную оценку задержки, пропускной способности и количества повторных передач для различных сценариев.

- Формулирование выводов о целесообразности применения и комбинирования механизмов доступа для повышения качества обслуживания в WLAN.

В работе использован комплекс научных методов, обеспечивающих полноту и достоверность полученных результатов:

- метод анализа и обобщения научных источников, применяемый для формирования теоретической базы исследования;
- метод имитационного моделирования, реализованный в среде OPNET Modeler, позволяющий воспроизводить поведение беспроводных сетей в условиях, приближенных к реальным;
- метод экспериментального исследования, заключающийся в варьировании параметров сети (количество STA, тип трафика, механизм доступа);
- метод сравнительного анализа, использованный для сопоставления показателей QoS при различных механизмах доступа;
- методы статистической обработки результатов, обеспечивающие объективность интерпретации данных моделирования.

Новизна исследования заключается в систематическом сравнении механизмов DCF и PCF в условиях смешанного трафика и различной плотности станций на основе единой модели WLAN. В отличие от ряда ранее опубликованных работ, в данном исследовании используется расширенный набор сценариев с равномерным распределением мультимедийного и немультимедийного трафика, что позволяет более точно оценить влияние механизмов доступа на показатели QoS и обосновать необходимость их комбинированного применения.

Результаты и обсуждение

Механизм доступа – это механизм взаимодействия элементов сети со средой передачи данных, определяющий правила получения права передачи данных по используемому каналу. То есть механизмы доступа отвечают за решение проблемы нескольких станций, готовых одновременно использовать среду. В общем случае контроль управления доступом представляет собой некоторую работу, которую производит сеть перед тем, как принять предлагаемое новое соединение. Это процесс принятия решения о том, какой ресурс (частотный, временной, пространственный, кодовый) можно выделить для новой передачи в сеть. Существуют два механизма, которые используются для доступа к беспроводной среде на MAC- уровне: механизм конкуренции и механизм опроса. Для WLAN два вышеуказанных механизма разделяются на:

- DCF, EDCA (Enhanced Distributed Channel Access): механизмы, принадлежащие группе механизмов конкуренции;
- PCF, HCCA (HCF Controlled Channel Access): механизмы, принадлежащие группе механизмов опроса.

Далее будут рассмотрены основные существующие механизмы доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11.

Используем моделирование в OPNET для того, чтобы доказать несколько утверждений, отмеченных выше. Для простоты в качестве примера возьмем DCF и PCF, которые являются яркими представителями механизма конкуренции и механизма опроса соответственно. Задержка, количество попыток повторной передачи и пропускная способность сети используются в качестве критериев для сравнения.

Сначала построим беспроводную сеть: WLAN с одной AP и восемью STA, канал установлен в 1. Время выполнения моделирования 30 минут для каждого сценария. Другие параметры устанавливаются по умолчанию в OPNET. Создаем следующие сценарии:

- сценарий 1: 8 STA используют DCF для передачи немультимедиа трафика (HTTP трафик (Heavy Browsing));
- сценарий 2: 8 STA используют DCF для передачи мультимедиа трафика (VoIP (параметры по умолчанию в OPNET));
- сценарий 3: 8 STA используют PCF для передачи немультимедиа трафика (HTTP трафик (Heavy Browsing));
- сценарий 4: 8 STA используют PCF для передачи мультимедиа трафика (VoIP

(параметры по умолчанию в OPNET)).

Далее изменим количество STA с 8 на 16, 24, 32. В каждом случае используются 4 разных типа трафика: Voice (VoIP), Video (Video Conferencing – High Resolution Video), HTTP (Heavy Browsing), FTP (High Load). Эти типы трафика равномерно распределены между STA: например, количество STA 8, из них 2 STA передают один тип трафика; количество STA 16, из них 4 STA передают один тип трафика и т.д. Таким образом, сформируем сценарии следующим образом:

- сценарии 5, 7, 9 и 10: 8, 16, 24 и 32 STA соответственно передают 4 типа трафика посредством механизма DCF;

- сценарии 6 и 8: 8 и 16 STA соответственно передают 4 типа трафика посредством механизма DCF для немультимедиа трафика, посредством механизма PCF для мультимедиа трафика.

После получения результатов моделирования, выполним сравнение результатов:

- сценарий 1 и сценарий 2 (рисунок 20). Результаты показывают, что при использовании механизма конкуренции задержка мультимедиа трафика больше задержки немультимедиа трафика на 91 %. Это означает, что механизм конкуренции более подходит для передачи немультимедиа трафика.

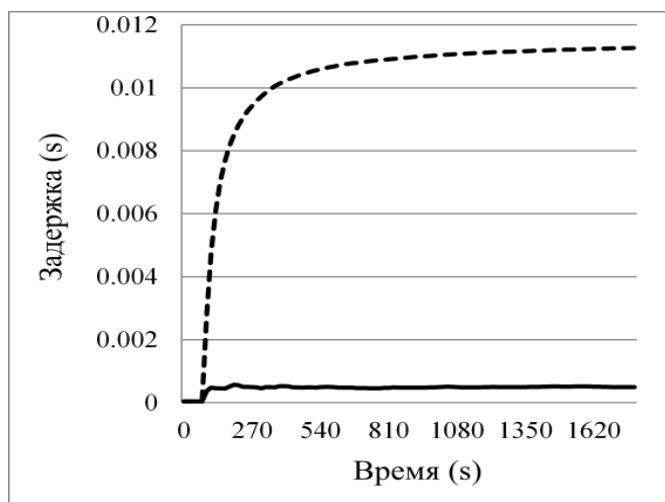


Рис. 1. Сравнение сценариев 1 (сплошная) и 2 (штриховая) по задержке

- сценарий 2 и сценарий 4 (Рис. 1). Результаты показывают, что при использовании механизма конкуренции и механизма опроса для мультимедиа трафика задержка для механизма опроса меньше на 13%. Это означает, что механизм опроса поддерживает QoS лучше, чем механизм конкуренции.

- сценарий 1 и сценарий 3 (Рис. 2). Результаты показывают, что при использовании механизма опроса количество попыток повторной передачи значительно уменьшается (на 98%), потому что происходит меньше коллизий.

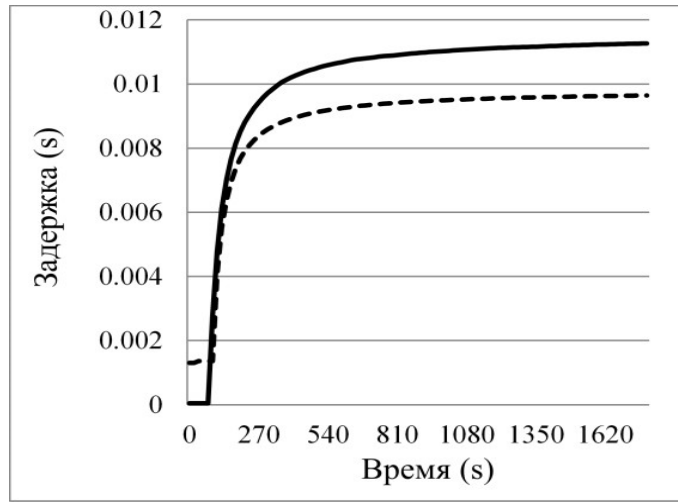


Рис. 2. Сравнение сценариев 2 (сплошная) и 4 (штриховая) по задержке

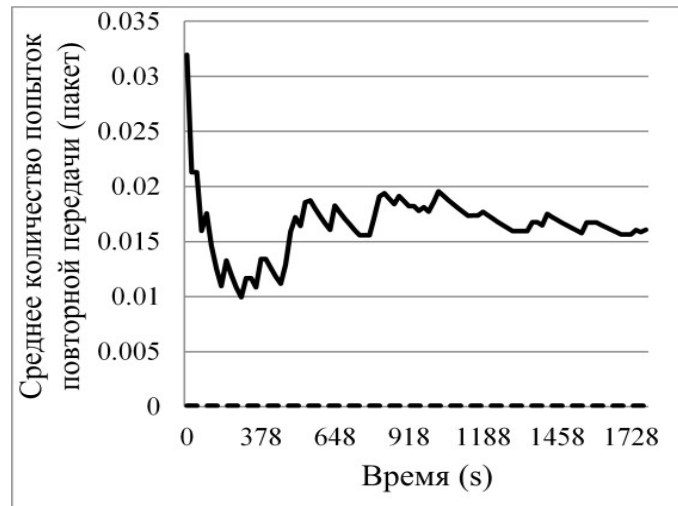


Рис. 3. Сравнение сценариев 1 (сплошная) и 3 (штриховая) по количеству попыток повторной передачи

- сценарии 5, 7, 9, 10 (Рис. 3). Результаты показывают, что при увеличении количества STA задержка также увеличивается при использовании механизма конкуренции. Конкретнее, задержка увеличивается на 95 % и 58 % при изменении количества STA от 8 до 24 STA и от 24 до 32 STA соответственно. Количество попыток повторной передачи растет на 81 % и 34% соответственно.

- сценарий 5 и сценарий 6 (Рис. 4 и 5). Результаты показывают, что при малом количестве STA пропускная способность при использовании механизма конкуренции больше, чем при использовании механизма опроса на 3%, а задержка меньше на 22 %.

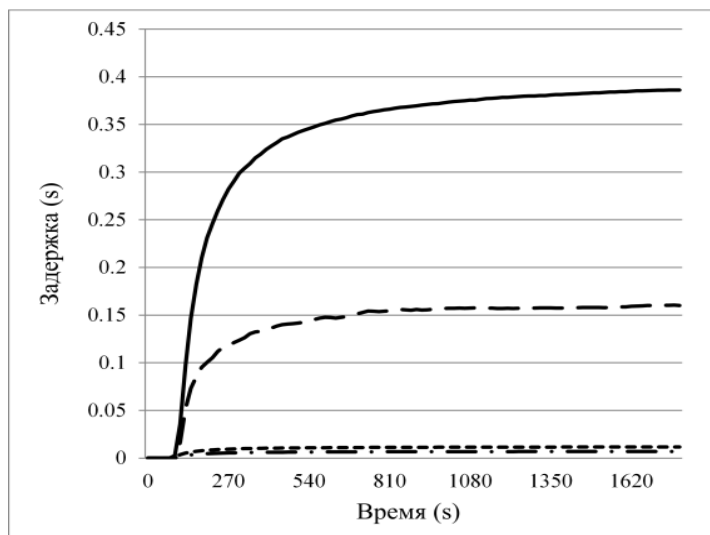


Рис. 4. Сравнение сценариев 5 (штрихпунктирная), 7 (короткая штриховая), 9 (длинная штриховая), 10 (сплошная) по задержке

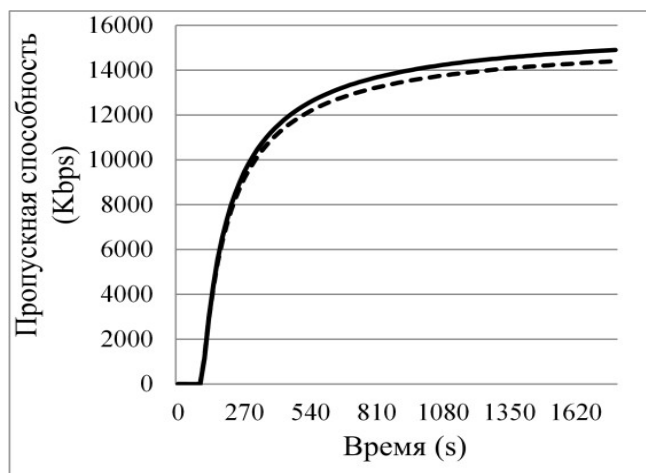


Рис. 5. Сравнение сценариев 5 (сплошная) и 6 (штриховая) по задержке

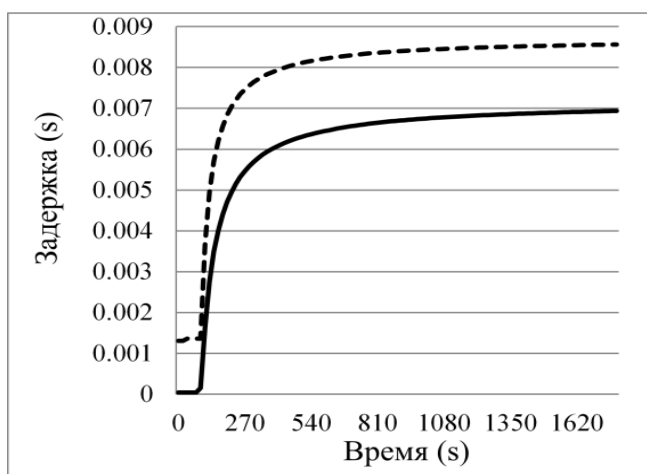


Рис. 6. Сравнение сценариев 5 (сплошная) и 6 (штриховая) по пропускной способности

- сценарий 7 и сценарий 8 (Рис. 7 и 8). Результаты показывают, что когда

количество STA увеличивается, то задержка при использовании механизма конкуренции увеличивается на 12 % по сравнению с использованием механизма опроса, а пропускная способность уменьшается на 4 %.

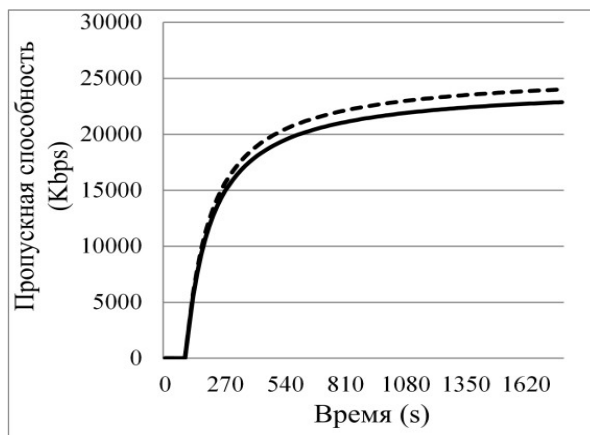


Рис. 7. Сравнение сценариев 7 (сплошная) и 8 (штриховая) по пропускной способности

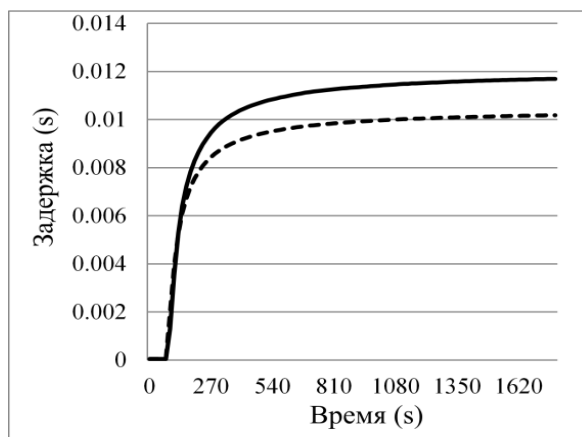


Рис. 8. Сравнение сценариев 7 (сплошная) и 8 (штриховая) по задержке

Итак, проанализированы преимущества и недостатки в поддержке качества обслуживания механизмов конкуренции и опроса. Из анализа следует, что только комбинация механизма конкуренции и механизма опроса может улучшить способность поддерживать QoS в WLAN. Однако, такая комбинация недостаточна, потому что существуют другие проблемы, которые необходимо решить для достижения лучшей производительности сети, например, проблема расхода опроса, метод планирования трафика на MAC-уровне, способность поддержки VBR (Variable Bit Rate) трафика.

Заключение

В настоящей работе выполнено комплексное исследование механизмов доступа к среде передачи данных на канальном уровне беспроводных локальных сетей стандарта IEEE 802.11 с целью оценки их способности обеспечивать требуемое качество обслуживания при передаче разнородного трафика. Основное внимание было сосредоточено на сравнительном анализе механизмов конкурентного доступа (DCF) и контролируемого доступа на основе опроса (PCF) в условиях различной плотности абонентских станций и смешанной нагрузки.

Поставленная цель исследования — анализ эффективности механизмов конкуренции и опроса с точки зрения поддержки QoS в WLAN — была достигнута за счёт

использования имитационного моделирования в программной среде OPNET Modeler. В ходе работы был реализован комплексный методический подход, включающий аналитический обзор научных источников, проектирование модели беспроводной сети, формирование сценариев моделирования и сравнительный анализ ключевых показателей производительности.

Методы исследования были реализованы последовательно и системно. Имитационное моделирование позволило воспроизвести функционирование сети IEEE 802.11 в условиях, приближенных к реальным, с контролируемым изменением числа станций, типов трафика и используемых механизмов доступа. Применение экспериментального и сравнительного методов обеспечило объективность анализа задержки, пропускной способности и количества повторных передач, что позволило всесторонне оценить влияние исследуемых механизмов на качество обслуживания.

В результате проведенного исследования были получены следующие значимые результаты. Установлено, что механизм конкурентного доступа DCF демонстрирует более высокую эффективность при передаче немультимедийного трафика в условиях малой плотности станций, обеспечивая меньшую задержку и более высокую пропускную способность за счёт отсутствия накладных расходов, характерных для механизмов опроса. Однако при передаче мультимедийного трафика и увеличении количества абонентских станций наблюдается существенный рост задержек и числа повторных передач, обусловленный увеличением вероятности коллизий.

Показано, что механизм опроса PCF обеспечивает более стабильные показатели качества обслуживания при передаче мультимедийного трафика, в частности, снижение задержки и уменьшение количества повторных передач по сравнению с механизмом конкуренции. Это подтверждает его преимущество в условиях высокой плотности сети и при работе с трафиком, чувствительным к задержкам.

Результаты моделирования также выявили закономерное ухудшение показателей QoS при увеличении числа станций в сценариях с использованием только механизма конкуренции. Рост задержки и количества повторных передач при увеличении плотности сети указывает на ограниченную масштабируемость DCF в условиях смешанного трафика. В то же время сценарии, предусматривающие комбинированное использование механизмов конкуренции и опроса, продемонстрировали более сбалансированные характеристики сети, особенно при передаче мультимедийных потоков.

Полученные результаты подтверждают выдвинутую в работе гипотезу о том, что ни механизм конкуренции, ни механизм опроса в отдельности не способны обеспечить оптимальную поддержку качества обслуживания в беспроводных сетях IEEE 802.11 при всех режимах работы. Механизм DCF является целесообразным для передачи немультимедийного трафика при ограниченном числе станций, тогда как механизм PCF более эффективно поддерживает QoS для мультимедийных сервисов и в условиях высокой плотности узлов.

Таким образом, доказана истинность утверждения о необходимости комбинированного использования механизмов конкуренции и опроса для повышения эффективности WLAN. Полученные результаты вносят вклад в развитие научных представлений о механизмах управления доступом к среде передачи данных и расширяют существующие подходы к обеспечению QoS в беспроводных сетях.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных выводов при проектировании и оптимизации беспроводных локальных сетей, ориентированных на поддержку мультимедийных и сервисов реального времени. Результаты работы могут быть использованы при настройке параметров точек доступа и выборе механизмов доступа в корпоративных, образовательных и общественных WLAN с высокой плотностью пользователей.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением рассматриваемых механизмов доступа за счёт включения EDCA и HCCA, а также с разработкой адаптивных алгоритмов управления доступом, способных динамически изменять параметры MAC-уровня в зависимости от характеристик трафика и состояния сети. Дополнительным направлением является исследование поддержки трафика с переменной битовой скоростью (VBR), а также снижение накладных расходов, связанных с механизмами опроса и планирования.

Таким образом, полученные в работе результаты подтверждают актуальность выбранной темы и демонстрируют, что дальнейшее развитие механизмов комбинированного доступа и интеллектуального планирования трафика является перспективным направлением повышения производительности и качества обслуживания беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11.

ЛИТЕРАТУРА

Анисимов, 2016 — Анисимов Д.В. Модель и алгоритмы управления параметрами канального уровня беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11, функционирующих в составе распределенных систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13. — Орёл. — 2016. — С. 82–98. [Russ.]

Ле, 2015 — Ле Ч.Д., Симонина О.А. Анализ механизмов сосуществования беспроводных технологий в нелицензируемом диапазоне 2.4 ГГц. // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. — 2015. — С. 137–141. [Russ.]

Ле, 2016а — Ле Ч.Д., Симонина О.А. Механизм приоритизации для обеспечения минимизации задержки в условиях конкурентной среды в сетях Wi-Fi с плотным распределением устройств. // Информационные технологии и системы. 2016. — 2016. — № 3(95). — С. 99–106. [Russ.]

Ле, 2016б — Ле Ч.Д., Симонина О.А. Анализ проблем обеспечения QoS в высокоплотной Wi-Fi сети. // 71-я СПбНТОРЭС. — 2016. — С. 203–204. [Russ.]

Ле, 2017а — Ле Ч.Д. Анализ производительности высокоплотной wlan с многими точками доступа посредством моделирования в OPNET // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2017. — Том 11. — №3. — С. 56–61. [Russ.]

Ле, 2017б — Ле Ч.Д. Анализ использования определения значения TXOP в IEEE 802.11. // 72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио (СПбНТОРЭС). — Санкт-Петербург. — 2017. — Volume 1. — С. 59–61. [Russ.]

Ле, 2017в — Ле Ч.Д., Симонина О.А. Механизм мультиопроса в высокоплотных сетях IEEE 802.11 Технологии и средства связи. // Труды учебных заведений связи. — 2017. — № 3(1). — С. 80–92. [Russ.]

Ле, 2019б — Ле Ч.Д., Симонина О.А. Использование SDN для обеспечения QoS в беспроводных сетях с высокой плотностью устройств. // Информационные технологии и системы. — 2016. — № 3(95). — С. 99–106. [Russ.]

Ле, 2020а — Ле Ч.Д., Симонина О.А. Организация приоритетного доступа в сетях IoT с высокой плотностью устройств и чувствительными к задержкам сервисами. // Электросвязь. — 2016. — № 9. — С. 63–67. [Russ.]

Ле, 2022 — Ле Ч.Д. EMATMM: Эффективный метод планирования трафика для механизма мультиопроса в высокоплотных WLAN. // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики: Серия Естественные и технические Науки. — 2017. — № 7-8. — С. 17–26.

REFERENCES

Le, 2015 — Le, Ch.D., Simonina, O.A. (2015). Analiz mekhanizmov sosushchestvovaniya besprovodnykh tekhnologii v nelitsenziruемом diapazone 2.4 GGts [Analysis of coexistence mechanisms of wireless technologies in the unlicensed 2.4 GHz band]. // Aktual'nye problemy infotelekkommunikatsii v nauke i obrazovanii. — 2015. — Pp. 137–141. [in Russ.]

Anisimov, 2016 — Anisimov, D.V. (2016). Model' i algoritmy upravleniya parametrami kanal'nogo urovnya besprovodnykh setei standarta IEEE 802.11, funktsioniruyushchikh v sostave raspredelennykh sistem [Models and algorithms for managing data link layer parameters of IEEE 802.11 wireless networks operating as part of distributed systems]. PhD diss. (Technical Sciences), specialty 05.12.13. Orel. — 2016. — Pp. 82–98. [in Russ.]

Le, 2016a — Le, Ch.D., Simonina, O.A. (2016). Mekhanizm prioritizatsii dlya obespecheniya minimizatsii zaderzhki v usloviyakh konkurentnoi sredy v setyakh Wi-Fi s plotnym raspredeleniem ustroystv [Prioritization mechanism for delay minimization in competitive environments of dense Wi-Fi networks]. // Informatsionnye tekhnologii i sistemy. — 2016. — No. 3(95). — Pp. 99–106. [in Russ.]

Le, 2016b — Le, Ch.D., Simonina, O.A. (2016). Analiz problem obespecheniya QoS v vysokoplotnoi Wi-Fi seti [Analysis of QoS provisioning issues in high-density Wi-Fi networks]. // Proceedings of the 71st St. Petersburg Scientific and Technical Conference on Radio Electronics and Communications (SPbNTORÉS). — 2016. — Pp. 203–204. [in Russ.]

Le, 2017a — Le, Ch.D. (2017). Analiz proizvoditel'nosti vysokoplotnoi WLAN s mnogimi tochkami dostupa posredstvom modelirovaniya v OPNET [Performance analysis of high-density WLAN with multiple access points using OPNET simulation]. // T-Comm: Telekkommunikatsii i transport. — 2017. — Vol. 11. — No. 3. — Pp. 56–61. [in Russ.]



Le, 2017b — Le, Ch.D. (2017). Analiz ispol'zovaniya opredeleniya znacheniya TXOP v IEEE 802.11 [Analysis of TXOP value determination usage in IEEE 802.11]. // Proceedings of the 72nd All-Russian Scientific and Technical Conference Dedicated to Radio Day (SPbNTORÉS), St. Petersburg. — 2017. — Vol. 1. — Pp. 59–61. [in Russ.]

Le, 2017c — Le, Ch.D., Simonina, O.A. (2017). Mekhanizm mul'tioprosa v vysokoplotnykh setyakh IEEE 802.11 [Multi-polling mechanism in high-density IEEE 802.11 networks]. // Trudy uchebnykh zavedenii svyazi. — 2017. — No. 3(1). — Pp. 80–92. [in Russ.]

Le, 2019b — Le, Ch.D., Simonina, O.A. (2016). Ispol'zovanie SDN dlya obespecheniya QoS v besprovodnykh setyakh s vysokoi plotnost'yu ustroystv [Use of SDN to ensure QoS in high-density wireless networks]. // Informatsionnye tekhnologii i sistemy. — 2019. — No.3(95). — Pp. 99–106. [in Russ.]

Le, 2020a — Le, Ch.D., Simonina, O.A. (2016). Organizatsiya prioritetnogo dostupa v setyakh IoT s vysokoi plotnost'yu ustroystv i chuvstvitel'nymi k zaderzhkam servisami [Organization of priority access in IoT networks with high device density and delay-sensitive services]. // Elektrosvyaz'. — 2020. — No. 9. — Pp. 63–67. [in Russ.]

Le, 2022 — Le, Ch.D. (2017). EMATMM: Effektivnyi metod planirovaniya trafika dlya mekhanizma mul'tioprosa v vysokoplotnykh WLAN [EMATMM: An efficient traffic scheduling method for multi-polling mechanisms in high-density WLANs]. // Sovremennaya nauka: Aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki. — 2022. — No. 7–8. — Pp. 17–26. [in Russ.]