

УДК 004.77

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-692-700

АНАЛИЗ РАБОТЫ ПРОТОКОЛА CSMA/CA В СРЕДЕ OMNET++ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ INET FRAMEWORK

С.П. Хабаров^а, М.И. Думов^б

^а Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

^б ООО «Валком», Санкт-Петербург, 196006, Российская Федерация
Адрес для переписки: dumov.maksim@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 13.07.20, принята к печати 25.08.20

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Хабаров С.П., Думов М.И. Анализ работы протокола CSMA/CA в среде OMNET++ с использованием INET framework // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 5. С. 692–700. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-692-700

Аннотация

Предмет исследования. Проведено исследование работы протокола CSMA/CA для управления доступом к беспроводной среде передачи данных средствами среды имитационного моделирования OMNET++ с использованием фреймворка INET. Выполнен анализ работы протокола в двух режимах: с подтверждением принятых пакетов и без подтверждения. **Метод.** При проведении исследования использовался метод имитационного моделирования и анализа. В процессе моделирования средой OMNET++ генерируются статистические данные, и строится временная диаграмма. Полученные данные анализируются, дается объяснение поведения каждого шага работы модели, после чего делается общий вывод о результате имитационного моделирования. **Основные результаты.** Представлен подход к исследованию работы протокола CSMA/CA на примере имитационной модели беспроводной сети, в которой в структуру всех ее узлов включен модуль «CsmacaMac» из состава фреймворка INET. Показана возможность интегрирования этого модуля без существенного изменения модели узлов. Приведены основные результаты анализа статистических данных и временных диаграмм, полученных в ходе имитационного моделирования, и доказана необходимость использования протокола управления доступом к среде передачи данных. **Практическая значимость.** Рассмотренный подход можно использовать для разработки и тестирования новых протоколов управления доступом к среде передачи данных или для демонстрации работы существующих протоколов в образовательных целях.

Ключевые слова

беспроводные сети, CSMA/CA, моделирование, интерференция, OMNeT++, INET Framework, MAC

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-692-700

CMSA/CA PROTOCOL ANALYSIS IN OMNET++ ENVIRONMENT WITH INET FRAMEWORK

S.P. Khabarov^а, M.I. Dumov^б

^а St. Petersburg State Forest Technical University, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

^б LLC Valcom, Saint Petersburg, 196006, Russian Federation

Corresponding author: dumov.maksim@yandex.ru

Article info

Received 13.07.20, accepted 25.08.20

Article in Russian

For citation: Khabarov S.P., Dumov M.I. CMSA/CA protocol analysis in OMNeT++ environment with INET framework. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 5, pp. 692–700 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-692-700

Abstract

Subject of Research. The paper presents the study of CSMA/CA access control protocol to a wireless data transmission medium by the OMNeT++ simulation environment using the INET framework. The protocol analysis is performed in the two modes: with confirmation of the received packets and without it. **Method.** The method of simulation and analysis is used in carrying out research. The OMNeT++ environment generates statistical data and builds a time chart in the modeling process. The data obtained are analyzed; an explanation for the each step of the model behavior is given and, as a result, a general conclusion is drawn on the simulation result. **Main Results.** An approach to CSMA/CA protocol

operation study is presented on the example of a wireless network simulation model with the “CsmCaMac” module from the INET framework included in the structure of all its nodes. The possibility of this module integration is shown without significant change in the node model. The main results of the analysis of statistical data and time charts obtained during simulation are presented, and the necessity of an access control protocol for the data transmission medium is proved. **Practical Relevance.** The considered approach can be used to develop and test new access control protocols for the data medium or to demonstrate the operation of existing protocols in the educational use.

Keywords

wireless networks, CSMA/CA, modeling, interference, OMNeT++, INET framework, MAC

Введение

В настоящее время в связи с интенсивным развитием технологии 5G, в том числе применительно к построению киберфизических систем, интернету вещей и автоматизации промышленности [1–3], особое внимание уделяется организации и внедрению беспроводной связи в системах, требующих высокой готовности и надежности функционирования при малых задержках в обслуживании^{1,2} [4]. Развитие беспроводных технологий и увеличение пропускной способности позволяет эффективно соединять множество вычислительных устройств, в том числе объединенных в кластеры [5, 6]. Однако увеличение количества таких устройств приводит к возникновению проблемы множественного доступа к физической среде передачи данных. Проблема множественного доступа появляется при попытке нескольких устройств в одно и то же время транслировать в эфир радиосигнал. В этой ситуации излучаемые радиосигналы сталкиваются друг с другом, отражаются и искажаются, что приводит к невозможности принять сигнал и установить надежное соединение между устройствами [7, 8]. Данную ситуацию можно сравнить с переговорами, где множество людей пытаются высказать свои мысли. Если все люди начнут одновременно говорить, множество звуков будет образовывать какофонию, из которой никто не сможет понять, кто и что хочет сказать.

Описанная проблема особенно касается беспроводных сетей, где кроме трансляции радиосигналов беспроводных узлов, присутствует множество радиосигналов от других источников, которые также могут оказывать негативное воздействие на качество передачи данных. В беспроводных сетях решение проблемы множественного доступа возлагается на подуровень управления доступом к среде [9–12], входящий в состав канального уровня модели OSI (Open System Interconnection – взаимодействие открытых систем).

Управление доступом к среде передачи данных определяется общепринятыми протоколами и методами, которые закрепляются в том или ином стандарте. Для беспроводных сетей используется стандарт IEEE 802.11 определяющий правила взаимодействия между беспроводными узлами. Данный стандарт также включает в себя множество расширений, направленных на улучшение определенных характеристик, таких как

пропускная способность, безопасность передачи данных, расширение использования частотных диапазонов и другие характеристики. В качестве методов управления множественного доступа к среде на сегодняшний день применяются:

- Space-division multiple access (SDMA) — метод с пространственным разделением;
- Frequency Division Multiple Access (FDMA) – метод с разделением каналов по частоте;
- Time Division Multiple Access (TDMA) — метод с временным разделением;
- Carrier Sense Multiple Access (CSMA) — метод с контролем несущей. Также существуют разновидности данного метода с обнаружением коллизий «Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD)» и «Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)».

Использование одного из методов или их комбинация направлено на ограничение монопольного применения узлов беспроводной среды и создания очередности таким образом, чтобы только одно устройство могло транслировать радиосигнал в один момент времени. Это позволяет увеличить пропускную способность канала связи, его надежность и устойчивость работы [13].

В настоящей работе проводится исследование проблемы возникновения коллизий и ухудшения качества связи, при попытке множества устройств использовать единую среду передачи данных, в среде имитационного моделирования OMNeT++ [14–16] с использованием фреймворка INET. Дается оценка качества связи и надежности канала передачи данных путем сравнения количества отправленных и принятых пакетов, а также их последовательности, при отсутствии протокола управления доступом к среде.

Целью работы является обоснование необходимости использования протокола управления доступом к среде для повышения скорости передачи данных, устойчивости соединения и надежности канала передачи данных. В качестве протокола подуровня управления доступом к среде рассматривается метод множественного доступа с контролем несущей и обнаружением коллизий «CSMA/CA».

Постановка задачи и объект исследования

На примере модели простой беспроводной сети, построенной в среде моделирования OMNeT++, проведен анализ работы узлов без применения ими протоколов управления доступом к среде передачи данных, тем самым подтверждая наличие эффекта интерференции. Продемонстрирован механизм контроля несущей, ко-

¹ Google. Waymo LLC Technology. Available online: <https://waymo.com/> (дата обращения: 17.06.2020).

² Karaa. Setpoint USA Custom Automation. Available online: <https://www.setpointusa.com/blog/industrialautomation-examples/> (дата обращения: 17.06.2020).

торый используется в методе CSMA/CA, выполнен анализ, и дана оценка необходимости применения пакетов подтверждения, с последующим моделированием данной ситуации. Произведено сравнение работы двух вариантов реализации метода CSMA/CA, и сделан вывод об их надежности.

Объектом исследования является модель беспроводной сети (рис. 1), в состав которой включены три беспроводных узла, одинаковых по своей структуре: «DeviceA» (источник, генерирующий пакеты данных); «DeviceB» (приемник, принимающий пакеты данных); «DeviceM (промежуточный узел, поддерживающий режим маршрутизации), но настроенных на выполнение разных прикладных функций, а также вспомогательные модули: «configurator» (конфигуратор); «visualizator» (визуализатор); «radioMedium» (среда распространения радиоволн).

Согласно сценарию работы модели, узлы «DeviceA» и «DeviceB» не имеют прямой связи между собой, при этом узел «DeviceA» осуществляет генерацию пакетов данных и отправляет их узлу «DeviceB», через промежуточный узел «DeviceM». Для реализации данного сценария все узлы были ограничены радиусом радиоприема 250 м, а сами узлы распределены на моделируемой области так, что между узлами «DeviceA» и «DeviceB» отсутствует прямая радиосвязь, и они могут передавать данные только узлу «DeviceM», на котором настроена поддержка маршрутизации пакетов данных.

При построении модели беспроводной сети и изменении конфигурации использовались следующие готовые компоненты из состава фреймворка INET [17]:

- WirelessHost (беспроводной узел) — модуль, реализующий устройство с беспроводным сетевым интерфейсом;
- IPv4networkConfigurator (конфигуратор сети) — модуль, позволяющий настраивать статические маршруты между узлами;
- RadioMedium (среда распространения радиоволн) — модуль, реализующий работу среды передачи данных;
- IntegrateCanvasVisualizer (слой визуализации) — модуль визуализирующий эффекты распространения сигналов, сообщений и радиоволн;

— CsmCaMac (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance MAC) — модуль протокола канального уровня MAC (Media Access Control — управление доступом к среде), основан на механизме CSMA/CA по умолчанию с поддержкой подтверждения приема пакетов.

Анализ работы сети без управления доступом к среде передачи данных

Работа узлов без использования протокола доступа к среде рассматривается на основе описанного выше примера имитационной модели беспроводной сети. В конфигурационном файле были прописаны основные настройки узлов. При этом уровень приложения узла «DeviceA» определен как «UdpBasicApp (User Datagram Protocol Basic Application — основное приложение протокола датаграмм пользователя)» с возможностью генерации UDP (User Datagram Protocol — протокол пользовательских датаграмм) датаграмм длиной 1 000 Б в случайные моменты времени, интервал между которыми описан экспоненциальным законом распределения со средним значением в 10 мс (параметр «sendInterval»). Также установлен номер порта приемника 5000. Для узла «DeviceB» определены уровень приложения «UdpSink (User Datagram Protocol Sink — приемник пакетов пользовательских датаграмм)» и номер порта со значением 5000, на который узел «DeviceA» будет отправлять пакеты данных. Для узла «DeviceM» включена маршрутизация, позволяющая передавать пакеты данных от узла «DeviceA» к узлу «DeviceB».

Результат работы имитационной модели показал, что из 2 457 сообщений UDP, отправленных узлом «DeviceA» на узел «DeviceB», поступило только 40. Данный факт подтверждается и сообщениями, отображаемыми в консоли событий. В процессе работы модели узел «DeviceA» выполняет передачу пакетов узлу «DeviceM», у которого в определенные моменты времени появляется возможность ретрансляции этих пакетов. Такое поведение можно объяснить при анализе временной диаграммы первых из «захваченных» пакетов, сгенерированной автоматически средой OMNeT++ (рис. 2).

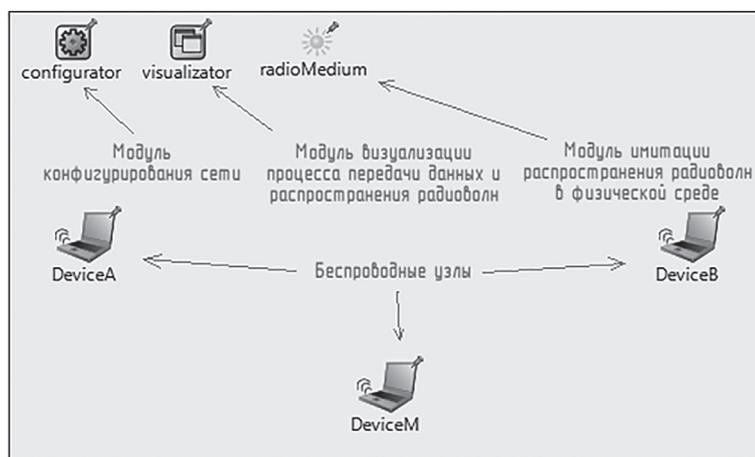


Рис. 1. Структура исследуемой модели беспроводной сети

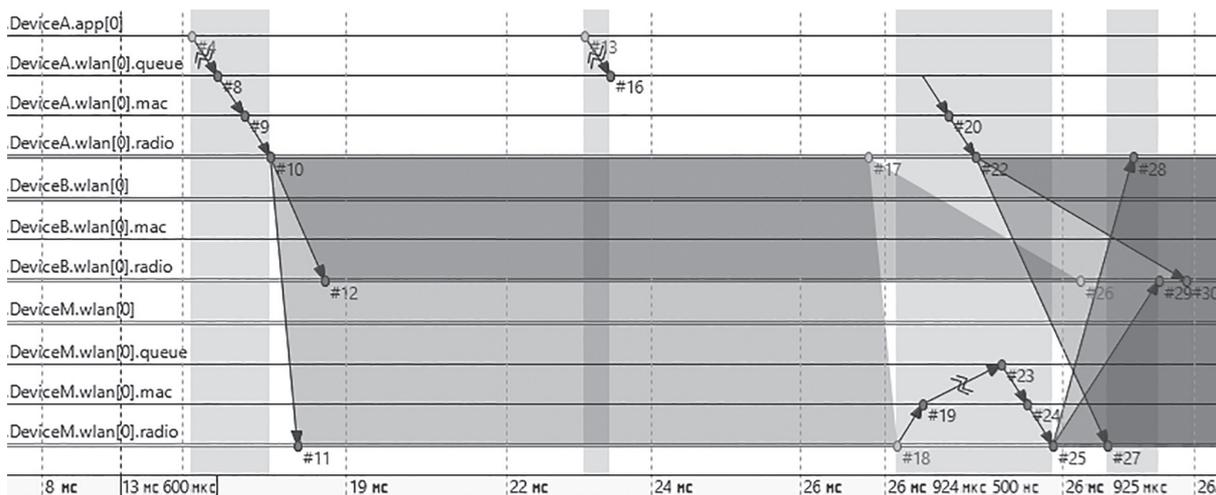


Рис. 2. Временная диаграмма работы сети без управления доступом к среде передачи данных

Из диаграммы (рис. 2) видно, что узел «DeviceA» генерирует первый пакет (шаг #4) и отправляет его в сеть (шаг #10). Узел «DeviceM» принимает от узла «DeviceA» радиосигнал (шаг #11) и начинает прием первого пакета. В это же время узел «DeviceA» на прикладном уровне генерирует второй пакет данных (шаг #13), но из-за того, что на физическом уровне еще продолжается передача первого пакета (шаги #11, #18), то он сгенерированное UDP-сообщение помещает в буфер своего сетевого адаптера (шаг #16).

После завершения приема первого пакета (шаг #18), узел «DeviceM» просматривает свою таблицу маршрутизации и определяет, что принятый пакет предназначен для узла «DeviceB» и начинает его трансляцию (шаг #25). Однако к этому моменту узел «DeviceA» уже достал из буфера сетевого адаптера ранее сегрегированный второй пакет «UDP_A-1» и уже начал его передачу (шаги #20, #22). Это приводит к тому, что на транслятер узла «DeviceB» поступают сразу два радиосигнала, которые интерферируют между собой, не позволяя распознать пакет, идущий от узла «DeviceM» (шаги #29, #30).

Данная ситуация наблюдается на протяжении всего времени работы имитационной модели, однако присутствуют моменты, когда узлу «DeviceB» удается принять пакет данных. Это происходит в тот момент, когда на узле «DeviceA» возникает пауза, во время которой радиоэфир оказывается достаточно свободным, что позволяет узлу «DeviceM» ретранслировать данные.

Подводя итог рассмотренной ситуации, можно сделать вывод, что отсутствие правил, регулирующих доступ к среде передачи данных, приводит к конкуренции узлов за радиоэфир, не позволяя никакому узлу принять пакет данных, что доказывает необходимость применения специальных протоколов управления доступом к среде передачи данных.

Анализ работы протокола CSMA/CA без использования пакетов ACK (Acknowledgement — подтверждение)

Механизмы регулирования совместного использования среды передачи данных определяются на уровне

MAC, на котором устанавливаются правила совместного использования среды передачи данных одновременно несколькими узлами беспроводной сети, которые закрепляются в том или ином стандарте¹. Одним из таких стандартов, регламентирующих механизм коммуникации в беспроводных локальных сетях, является IEEE 802.11 [18–20]. Он включает в себя два протокола, базирующихся на методе множественного доступа с контролем несущей и обнаружением коллизий.

При использовании механизма CSMA/CA узел, которому необходимо передать данные, сначала проверяет занятость канала передачи данных. Если канал занят, то узел ожидает случайный промежуток времени и повторно проверяет занятость канала передачи данных. Если при повторной проверке канал окажется свободным, то узел начнет передачу, в противном случае все повторится, но уже с новым временем ожидания.

Для включения в исследуемой модели беспроводной сети механизма множественного доступа с контролем несущей, всем узлам изменен тип модуля канального уровня на «CsmCaMac». Также, для того чтобы изучить именно механизм «контроля несущей» со случайной задержкой перед каждой передачей (Timeout), в параметрах модели отключена отправка специальных подтверждающих пакетов (Acknowledge, ACK), которые приемник отправляет источнику при успешном приеме входящего пакета.

Результат работы имитационной модели с поддержкой механизма CSMA/CA показал, что из отправленных узлом «DeviceA» 2 523 UDP-датаграмм, узлом «DeviceB» было принято только 1 369. Использование механизма контроля несущей и недопущения коллизий позволило увеличить количество принятых пакетов, но почти половина пакетов до узла «DeviceB» так и не дошла. Исследование временной диаграммы (рис. 3) объясняет причину потери пакетов.

На рис. 3 видно, что после успешного приема пакета «UDP_A-0» узлом «DeviceM» и выполнения за-

¹ Компьютер Пресс №5 2005 - <https://compress.ru/article.aspx?id=10805#Механизмы коллективного доступа в сетях 802.11> (дата обращения: 02.07.2020).

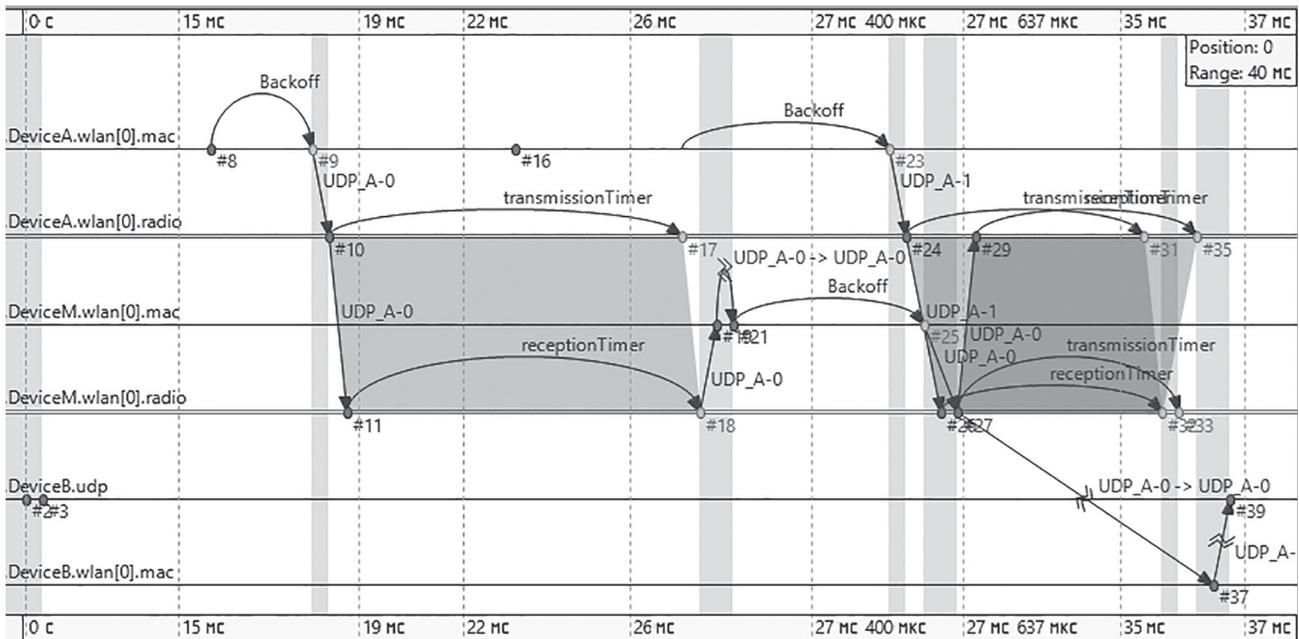


Рис. 3. Временная диаграмма работы сети с использованием CSMA/CA:

Backoff — задержка перед отправкой пакета; transmissionTimer — время передачи пакета; receptionTimer — время приема пакета; Position — позиция курсора на временной шкале; Range — диапазон отображаемого периода

держки, он начинает его передачу на соседние узлы. Но в этот момент узел «DeviceA» уже сгенерировал следующий пакет «UDP_A-1» и отправил его в сеть. Однако узел «DeviceM» не может принять его, так как выполняет передачу пакета «UDP_A-0», в результате чего пакет «UDP_A-1» безвозвратно теряется в сети. Данный факт подтверждается в том случае, когда узел «DeviceM», выдержав все необходимые задержки, начинает передачу пакета «UDP_A-2». Также это свидетельствует о том, что пакеты, переданные узлом «DeviceA», и которые могут быть приняты узлом «DeviceB», поступают на этот узел не последовательно, а с некоторым случайным прореживанием. Если для ряда практически важных применений, таких как передача постоянно обновляемой информации от датчиков или передача голоса, такая ситуация может быть приемлемой, то в большинстве иных приложений это может привести к ненужности всей передаваемой информации.

Следует отметить, что в отличие от модели беспроводной сети, рассмотренной в разделе «Анализ работы сети без управления доступом к среде передачи данных», ситуация возникновения интерференции в текущей модели появляется реже, несмотря на то, что используется механизм CSMA/CA. Его работу также можно наблюдать на временной диаграмме (рис. 3), на которой видно, что перед тем, как узлы отправляют пакеты данных с уровня MAC на физический уровень, их сетевые адаптеры выполняют задержку на случайный интервал времени («Backoff»).

Если после его окончания среда передачи данных останется незанятой, то узел отправит пакеты в сеть, в противном случае узел будет ожидать еще один случайный интервал времени. Приведение временной диаграммы к линейной временной шкале (рис. 4) по-

казывает, что из-за высокой интенсивности генерации UDP-данных узлом «DeviceA» беспроводная сеть работает в очень напряженном режиме.

В этом случае для повышения общей производительности сети применяют более сложные протоколы, использующие дополнительные методы управления доступом к среде [21]. Другим способом уменьшения количества потерянных пакетов может быть увеличение интервала времени генерации пакетов. Для проверки данного утверждения параметр «sendInterval» в настройках узла «DeviceA» был изменен с 10 мс на 50 мс. Результат повторного запуска модели показал, что, из отправленных узлом «DeviceA» 472 пакетов на узел «DeviceB» было успешно доставлено 466 пакета.

Анализ протокола CSMA/CA с использованием пакетов ACK

Анализ имитационной модели работы протокола CSMA/CA без использования пакетов ACK показал, что при повышении производительности сети механизм CSMA/CA не позволяет обеспечить высокую надежность функционирования сети. Потеря части пакетов данных приводит к тому, что на приемник они поступают в неупорядоченном режиме. В некоторых системах данная ситуация может быть неприемлема, особенно там, где предполагается передача больших объемов информации, и потеря части пакетов может привести к искажению информации и ее ненужности [22–24].

Повышение надежности канала передачи данных при использовании механизма CSMA/CA возможно за счет учета пакетов ACK, которые отправляются источнику при успешном принятии данных. Для включения данного режима в настройках имитационной модели

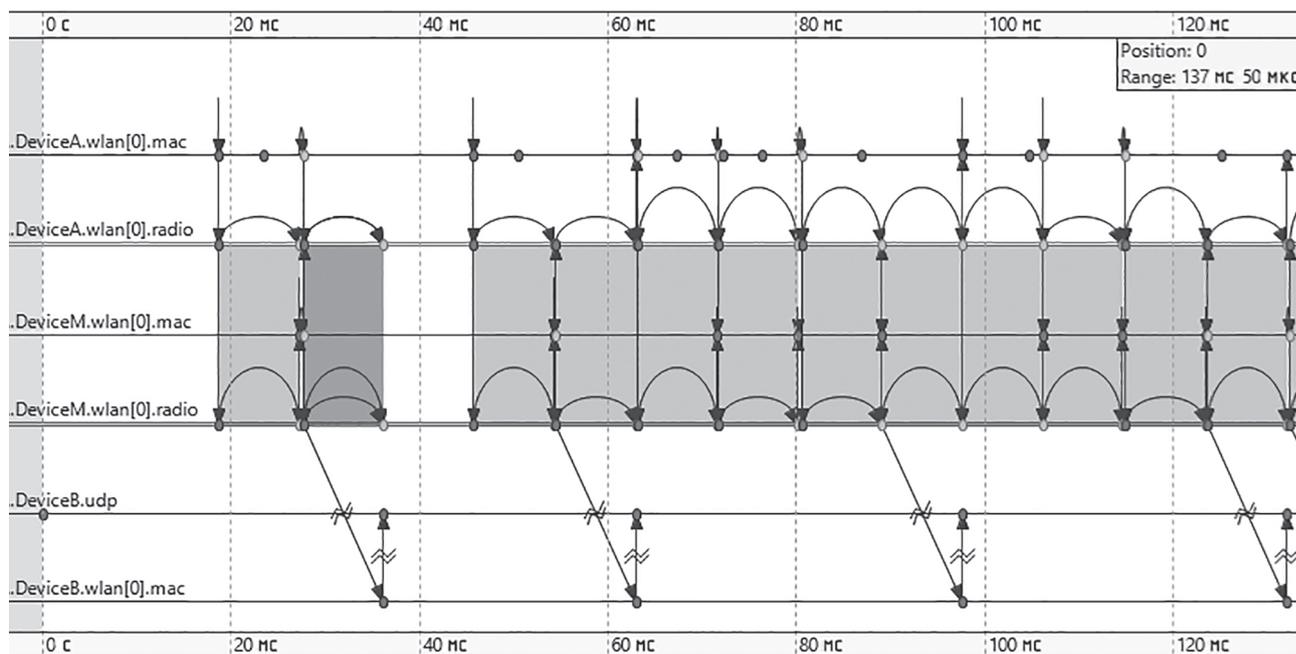


Рис. 4. Временная диаграмма, приведенная к линейной временной шкале

для всех беспроводных сетевых адаптеров значение параметра «useAck» было изменено на значение «true». Использование подтверждающих пакетов совместно с механизмом CSMA/CA приводит к тому, что узел-приемник при успешном получении пакета отправляет через случайный промежуток времени узлу-передатчику пакет подтверждения ACK. Если отправитель не

получает пакет ACK за заданное время, он выполняет повторную передачу пакета. В этом случае окно конфликтов будет устанавливаться при каждой повторной передаче, пока не достигнет максимума. После заданного количества неудачных попыток MAC отбросит кадр и выберет следующий из очереди, сбросив значения окон и счетчик повторов. Описанная ситуация при-

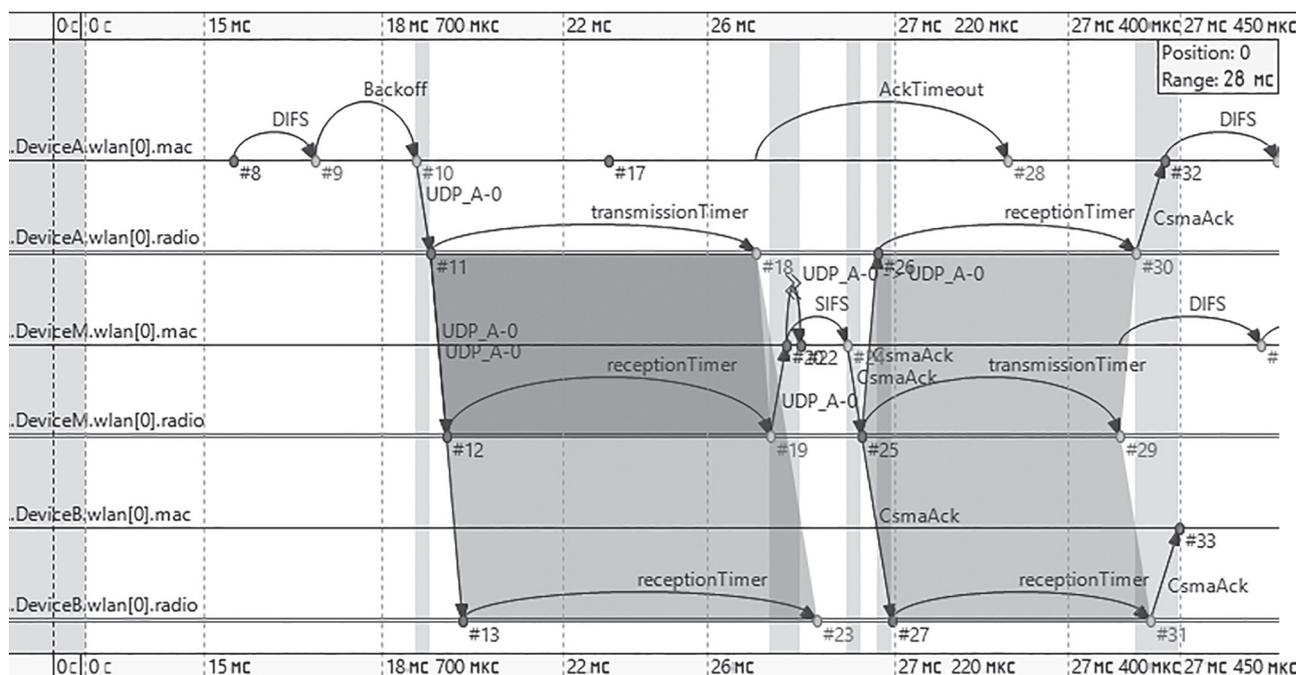


Рис. 5. Временная диаграмма с использованием CSMA/CA и ACK:

DIFS (Distributed InterFrame Space) — временной интервал между началом прослушивания среды; AckTimeout — время подтверждения получения пакета; Csmack — подтверждение получения пакета; SIFS (Short Interframe Space) — временной интервал между передачей данных и принятием; transmissionTimer — время передачи пакета; receptionTimer — время приема пакета

мерно соответствует базовому режиму IEEE 802.11.b MAC ad-hoc.

Результат работы имитационной модели с поддержкой механизма CSMA/CA и подтверждающими пакетами ACK показал, что из отправленных узлом «DeviceA» 2 500 UDP-датаграмм узлом «DeviceB» было принято всего 1 095. Анализ временной диаграммы (рис. 5) демонстрирует работу данного режима.

На приведенной временной диаграмме (рис. 5) видно, что узел «DeviceA» сгенерировал пакет «UDP_A-0» и выдержав все необходимые по протоколу интервалы, отправляет пакет с уровня MAC на физический уровень. Узел «DeviceA», не получив подтверждения о принятии пакета, генерирует следующий «UDP_A-1» и помещает его в буфер канального уровня. При этом узел «DeviceM», получив от узла «DeviceA» пакет «UDP_A-0», и выдержав интервал SIFS, отправляет узлу «DeviceA» подтверждение о приеме этого пакета.

Установив, что адресатом пакета является узел «DeviceB», узел «DeviceM» сразу после завершения передачи пакета ACK узлу «DeviceA» начинает ретрансляцию полученного пакета узлу «DeviceB», тем самым он начинает конкурировать за доступ к среде передачи данных.

Узел «DeviceA», получив подтверждение о получении пакета, готов к передаче следующего пакета. Он начинает конкурировать за доступ к среде передачи, выдерживая интервал DIFS, однако проигрывает конкуренцию узлу «DeviceM» и замолкает на интервал времени, достаточный для того, чтобы узел «DeviceM» передал пакет «UDP_A-0» на узел «DeviceB» и получил от него подтверждение о приеме ACK.

Что касается узла «DeviceB», то после окончания всех конкурентных интервалов он отправляет в сеть пакет «UDP_A-0» и перестает транслировать радиосигнал до получения подтверждающего пакета ACK от узла «DeviceB». Приемопередатчик узла «DeviceB» выполнив прием пакета «UDP_A-0» отправляет его на канальный уровень, который выдерживает интервал SIFS и одновременно с этим поднимает пакет до уровня UDP-приложений. При этом по окончании интервала SIFS узел «DeviceB» генерирует и отправляет в сеть ответный ACK-пакет узлу «DeviceM». Только после

того, как узел «DeviceM» закончит прием этого ACK-пакета, узел «DeviceA», выдержав все протокольные интервалы, может достать из своего буфера ранее сгенерированный пакет «UDP_A-1» и отправить его в сеть. Далее весь процесс передачи повторяется.

Таким образом, можно сделать вывод, что из 2 500 сгенерированных узлом «DeviceA» пакетов в сеть была отправлена только половина, тогда как оставшаяся часть осталась в буфере сетевого адаптера. Также часть пакетов будет оставаться и в буфере узла «DeviceB». Данный эффект вызван тем, что требование к достоверности передачи данных затрачивает дополнительное время на конкурентную борьбу за доступ к среде передачи данных и получение обратных пакетов ACK.

Однако важной особенностью рассмотренной модели является то, что все пакеты, поступившие на узел «DeviceB» имеют одинаковую нумерацию, которая была сгенерирована узлом «DeviceA». Из этого можно сделать вывод, что в сети отсутствует потеря в последовательности передачи пакетов, и что потерянные в сети пакеты будут передаваться до тех пор, пока не поступит подтверждающий пакет ACK.

Закключение

Приведенное исследование позволяет продемонстрировать реальные процессы, проходящие при коммуникации узлов в беспроводных сетях. Проведено имитационное моделирование и анализ ситуаций, при которых беспроводные узлы могли использовать среду передачи данных свободно, а также применять механизм CSMA/CA без подтверждения полученных сообщений и с подтверждением приема полученного пакета.

Для каждой из рассмотренных ситуаций определены статистические данные, построены временные диаграммы и проведен их анализ, позволяющий выяснить причины потери пакетов в сети и порядок коммуникации между узлами. Установлено, что использование механизма CSMA/CA с применением подтверждающих пакетов, позволяет повысить надежность сети за счет исключения потерь в последовательности передачи пакетов.

Литература

1. Moakes P. 5G new radio architecture and challenges [Электронный ресурс]. URL: https://www.commagility.com/images/pdfs/white_papers/CommAgility_5G_New_Radio_white_paper.pdf. (дата обращения: 12.07.2020).
2. Ghosh A. 5G New Radio (NR): Physical Layer Overview and Performance. IEEE Communication Theory Workshop [Электронный ресурс]. URL: <http://ctw2018.ieee-ctw.org/files/2018/05/5G-NR-CTW-final.pdf>. (дата обращения: 13.07.2020).
3. Popovski P., Trillingsgaard K.F., Simeone O., Durisi G. 5G Wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view // *IEEE Access*. 2018. V. 6. P. 55765–55779. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2872781
4. Mallinson K. 3GPP. The path to 5G: as much evolution as revolution. The mobile broadband standard [Электронный ресурс]. URL: http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1774-5g_wisearbour (дата обращения: 13.07.2020).

References

1. Moakes P. 5G new radio architecture and challenges. Available at: https://www.commagility.com/images/pdfs/white_papers/CommAgility_5G_New_Radio_white_paper.pdf. (accessed: 12.07.2020).
2. Ghosh A. 5G New Radio (NR): Physical Layer Overview and Performance. *IEEE Communication Theory Workshop*. Available at: <http://ctw2018.ieee-ctw.org/files/2018/05/5G-NR-CTW-final.pdf>. (accessed: 13.07.2020).
3. Popovski P., Trillingsgaard K.F., Simeone O., Durisi G. 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 55765–55779. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2872781
4. Mallinson K. 3GPP. *The path to 5G: as much evolution as revolution. The mobile broadband standard*. Available at: http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1774-5g_wisearbour (accessed: 13.07.2020).

5. Богатырев В.А., Богатырев С.В., Богатырев А.В. Оптимизация кластера с ограниченной доступностью кластерных групп // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 1(71). С. 63–67.
6. Богатырев В.А., Богатырев А.В., Богатырев С.В. Перераспределение запросов между вычислительными кластерами при их деградации // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 9. С. 54–58.
7. Kopetz T., Permuter H., Shamai Sh. Multiple access channels with combined cooperation and partial cribbing // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2016. V. 62. N 2. P. 825–848. doi: 10.1109/TIT.2015.2499759.
8. Назаров А.А., Шохор С.Л. Исследование управляемого несинхронного множественного доступа в спутниковых сетях связи с оповещением о конфликте // Проблемы передачи информации. 2000. Т. 36. № 1. С. 77–89.
9. Поляков И.Ю., Клименко А.Н., Зыков Д.Д., Чеботаев П.В., Шелупанов А.А., Мякочин Ю.О. Современное состояние проблемы передачи данных в гетерогенных системах связи // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20. № 3. С. 177–180. doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-177-180
10. Tyurin S.V., Shmarin I.V. Протокол множественного доступа для беспроводной сети с временным разделением каналов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 6. С. 9–15.
11. Постников С.А., Струнская-Зленко Л.В. Моделирование протокола управления доступом к среде передачи для сети с временным разделением каналов // *T-Comm*. 2009. № S3. С. 112–116.
12. Хабибулин Н.Ф., Шкердин А.Н., Щербенко А.Н. Повышение пропускной способности систем передачи с переспросом за счет введения дополнительной связи между процессами декодирования с исправлением и обнаружением ошибок // Интернет-журнал Науковедение. 2016. Т. 8. № 3(34). С. 143.
13. Тучкин А.В. Принципы функционирования протокола канально-уровня для пакетной передачи разнородного трафика по низкоскоростным каналам // *T-Comm*. 2008. Т. 2. № 3. С. 31–33.
14. Махров С.С. Использование систем моделирования беспроводных сенсорных сетей NS 2 и OMNeT++ // *T-Comm*. 2013. Т. 7. № 10. С. 67–69.
15. Хабаров С.П. Основы моделирования беспроводных сетей в среде OMNeT++: учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2019. 260 с.: ил.
16. Думов М.И., Хабаров С.П. Использование OMNeT++ для моделирования беспроводных Wi-Fi сетей // Информационные системы и технологии: теория и практика: сборник научных трудов. Вып. 10. Ч. 1. СПб.: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2018. С. 44–53.
17. Noskov I.I., Bogatyrev V.A. Simulating of fault-tolerant gateway based on VRRP protocol in OMNeT++ environment // *CEUR Workshop Proceedings*. 2019. V. 2522. P. 111–120.
18. Заяц А.М., Хабаров С.П. Организация доступа к беспроводным Ad Hoc сетям информационных систем мониторинга лесных территорий из среды ОС Windows 10 // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. № 223. С. 285–299. doi: 10.21266/2079-4304.2018.223.285-299
19. Носков И.И., Богатырев В.А., Сластихин И.А. Имитационная модель локальной компьютерной сети с агрегированием каналов и случайным методом доступа при резервировании передач // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1047–1053. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1047-1053
20. Хабаров С.П. Моделирование Ethernet сетей в среде OMNeT++ INET framework // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 3. С. 462–472. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-462-472
21. Noskov I.I., Bogatyrev V.A. Multipath redundant transmissions of critical to delays packets based on UDP protocol // *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. V. 2590. P. 1–12.
22. Хабаров С.П. Доступ к беспроводным Ad Hoc сетям средствами ОС Windows 10 // Информационные системы и технологии: теория и практика: сборник научных трудов. Вып. 10. Ч. 2. СПб.: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2018. С. 50–60.
5. Bogatyrev V., Bogatyrev S., Bogatyrev A. Clusters optimisation with the limited availability of clusters groups. *Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 1(71), pp. 63–67. (in Russian)
6. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Requests redistribution between computing clusters under degradation. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, vol. 57, no. 9, pp. 54–58. (in Russian)
7. Kopetz T., Permuter H., Shamai Sh. Multiple access channels with combined cooperation and partial cribbing. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2016, vol. 62, no. 2, pp. 825–848. doi: 10.1109/TIT.2015.2499759.
8. Nazarov A.A., Shokhor S.L. Examination of controlled nonsynchronous multiple access satellite communication networks with conflict warning. *Problemy Peredachi Informatsii*, 2000, vol. 36, no. 1, pp. 77–89. (in Russian)
9. Polyakov I.Y., Klimenko A.N., Zykov D.D., Chebotayev P.V., Shelupanov A.A., Myakochin Y.O. Current state of the data transmission problem in heterogeneous communication systems. *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 177–180. (in Russian). doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-177-180
10. Tyurin S.V., Shmarin I.V. The time division multiple access protocol for a wireless network. *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2014, vol. 10, no. 6, pp. 9–15. (in Russian)
11. Postnikov S.A., Strunskaya-Zlenko L.V. Modeling of media access control protocol for network with time-division multiplex. *T-Comm*, 2009, no. S3, pp. 112–116. (in Russian)
12. Khabibulin N.F., Shkerdin A.N., Scherbenko A.N. The repeat-request transmission systems throughput increase using the additional connection between the error correction and error detection processes. *Naukovedenie*, 2016, vol. 8, no. 3(34), pp. 143. (in Russian)
13. Tuchkin A.V. Link-level protocol for packet transmission of heterogeneous traffic over low-speed channels. *T-Comm*, 2008, vol. 2, no. 3, pp. 31–33. (in Russian)
14. Makhrov S.S. Using simulators of wireless sensor networks NS 2 and OMNeT++. *T-Comm*, 2013, vol. 7, no. 10, pp. 67–69. (in Russian)
15. Khabarov S.P. *The basics of modeling wireless networks*. OMNeT++ environment. Tutorial. St. Petersburg, Lan' Publ., 2019, 260 p. (in Russian)
16. Dumov M.I., Khabarov S.P. Using OMNeT++ for wireless Wi-Fi networks simulation. *Information Systems and Technologies: Theory and Practice*. Vol. 10. Part 1. St. Petersburg, SPbSFTU, 2018, pp. 44–53. (in Russian)
17. Noskov I.I., Bogatyrev V.A. Simulating of fault-tolerant gateway based on VRRP protocol in OMNeT++ environment. *CEUR Workshop Proceedings*, 2019, vol. 2522, pp. 111–120.
18. Zayats A.M., Khabarov S.P. Organization of access to wireless Ad Hoc networks of information systems for monitoring forest territories from the environment of os Windows 10. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii*, 2018, no. 223, pp. 285–299. (in Russian). doi: 10.21266/2079-4304.2018.223.285-299
19. Noskov I.I., Bogatyrev V.A., Slastikhin I.A. Simulation model of local computer network with channel aggregation and random access method at redundant transfer. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 1047–1053. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1047-1053
20. Khabarov S.P. Modeling of Ethernet networks in OMNeT++ INET framework medium. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, vol. 18, no. 3, pp. 462–472. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-462-472
21. Noskov I.I., Bogatyrev V.A. Multipath redundant transmissions of critical to delays packets based on UDP protocol. *CEUR Workshop Proceedings*, 2020, vol. 2590, pp. 1–12.
22. Khabarov S.P. Access to wireless Ad Hoc networks by Windows 10 software. *Information Systems and Technologies: Theory and Practice*. Vol. 10. Part 2. St. Petersburg, St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, 2018, pp. 50–60. (in Russian)
23. Noskov I.I., Bogatyrev V.A., Slastikhin I.A. Simulation of computer network with switch and packet reservation. *CEUR Workshop Proceedings*, 2019, vol. 2344.
24. Noskov I.I., Bogatyrev V.A. Interaction model of computer nodes based on transfer reservation at multipath routing. *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication*

23. Noskov I.I., Bogatyrev V.A., Slastikhin I.A. Simulation of computer network with switch and packet reservation // CEUR Workshop Proceedings. 2019. V. 2344. *Systems (WECONF 2019)*, 2019, pp. 8840607. doi: 10.1109/WECONF.2019.8840607
24. Noskov I.I., Bogatyrev V.A. Interaction model of computer nodes based on transfer reservation at multipath routing // Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2019). 2019. P. 8840607. doi: 10.1109/WECONF.2019.8840607

Авторы

Хабаров Сергей Петрович — кандидат технических наук, доцент, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-1337-0150, Serg.Habarov@mail.ru
Думов Максим Иннокентьевич — руководитель проектов, ООО «Валком», Санкт-Петербург, 196006, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-0737-182X, dumov.maksim@yandex.ru

Authors

Sergey P. Khabarov — PhD, Associate Professor, Associate Professor, St. Petersburg State Forest Technical University, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-1337-0150, Serg.Habarov@mail.ru
Maxim I. Dumov — Project Manager, LLC Valcom, Saint Petersburg, 196006, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-0737-182X, yachlovek@yandex.ru