

# Исследование механизма многоканального доступа к среде в сетях IEEE 802.11bd \*

В.А. Логинов<sup>1</sup>, В.А. Торгунаков<sup>1,2</sup>

loginov@wireless.iitp.ru, torgunakov@wireless.iitp.ru

<sup>1</sup> Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича  
Российской академии наук

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

**Аннотация** В последние годы интеллектуальные транспортные системы стремительно развиваются, а приложения для интеллектуальных транспортных систем становятся значительно более разнообразными, что приводит к росту генерируемого ими трафика. В связи с этим появилась необходимость в соответствующем увеличении пропускной способности и надёжности связи, для чего комитет IEEE 802.11 начал разработку нового стандарта IEEE 802.11bd, призванного заменить используемый сейчас IEEE 802.11p. Одним из существенных нововведений разрабатываемого стандарта является использование многоканальных методов доступа к среде. В данной работе был проведён сравнительный анализ двух многоканальных и одноканальных алгоритмов доступа к среде с точки зрения задержек передачи кадра на канальном уровне и доли успешно переданных пакетов. При помощи имитационного моделирования было показано, какого выигрыша можно достичь при использовании каждого из многоканальных методов доступа. При этом было исследовано влияние многоканальных устройств на работу устройств, использующих одноканальный алгоритм доступа к среде. Кроме того, было показано, что в некоторых случаях многоканальные методы доступа уступают используемому сейчас в IEEE 802.11p одноканальному алгоритму доступа к среде.

## 1 Введение

В настоящее время ITS (англ. Intelligent Transport Systems, ITS) активно развиваются [1]. Их функционирование невозможно без создания телекоммуникационных систем, позволяющих транспортным средствам обмениваться информацией со внешними устройствами (англ. Vehicle-to-Everything,

\* Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект №20-19-00788)

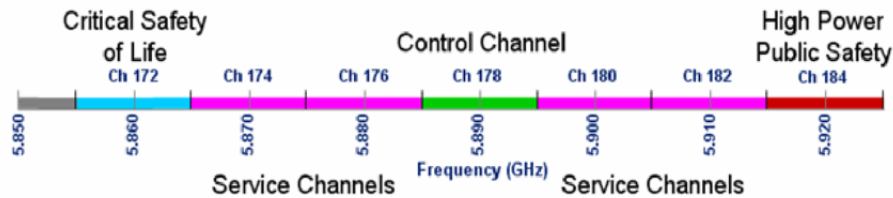


Рис. 1: Каналы DSRC в США.

V2X). Транспортные средства накапливают информацию посредством различных сенсоров, радаров, лидаров и камер. Для обеспечения автономного вождения и передвижения машин в плотном строю необходимо обеспечивать обмен этой информацией между различными транспортными средствами. Обмен информацией может также осуществляться с элементами дорожной инфраструктуры, что позволяет обеспечивать большую безопасность движения посредством передачи объектами инфраструктуры предупреждающих сообщений. Кроме того, существует большое число других приложений, которые обеспечивают удобство вождения и безопасность, а также уменьшают число пробок и предоставляют различные развлекательные сервисы. Разнообразные приложения порождают различные требования на задержки, надёжность и скорость беспроводной передачи данных. Многие организации по стандартизации приложили усилия к тому, чтобы создать стандарты для V2X сетей. Этому поспособствовало выделение спектра в диапазоне 5.9 ГГц для ITS в США (в 1999 году) и Европе (в 2008 году). На данный момент наиболее распространённым способом коммуникации в V2X является выделенная связь на короткие расстояния (англ. Dedicated Short Range Communications, DSRC), для обеспечения которой используется набор стандартов беспроводной связи в транспортной среде: стандарты IEEE 1609 и IEEE 802.11р. В настоящее время в сетях DSRC наиболее широко используются частоты в диапазоне 5.9 ГГц. В частности в США для DSRC выделен диапазон частот от 5.850 до 5.925 ГГц, который разделён на 7 каналов, см. рис. 1.

Канал 178 (с частотами от 5.885 ГГц до 5.895 ГГц) называется контрольным каналом и используется для обмена сообщениями между приложениями, которые обеспечивают безопасность дорожного движения, а также для передачи служебной информации. В свою очередь, канал 172 (с частотами от 5.855 ГГц до 5.865 ГГц) используется только для обмена данными, позволяющими обеспечить безопасность, а канал 184 (с частотами от 5.915 ГГц до 5.925 ГГц) назначен для передачи кадров на большие расстояния. В оставшихся каналах можно передавать данные любого типа, поэтому, ис-

пользуя каналы 174 и 176 или 180 и 182, можно для объединённого канала применять многоканальные методы доступа к среде.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. Раздел 2 содержит обзор литературы, посвященной исследованию методов доступа к каналу в сетях IEEE 802.11p и IEEE 802.11bd. В разделе 3 приведено сравнение одноканального метода доступа в сетях IEEE 802.11p и многоканальных методов доступа в IEEE 802.11bd. В разделе 4 описана проблема скрытых узлов. В разделе 5 представлены результаты численного моделирования. Раздел 6 содержит заключение.

## 2 Обзор литературы

Исследованию стандарта IEEE 802.11p был посвящен ряд работ [2–4], которые показывают, что системы на основе этого стандарта способны обеспечивать стабильную работу базовых приложений, встречающихся в V2X. Однако производительность этих систем оказывается недостаточной для обеспечения адекватной работы более требовательных ITS сервисов, таких как автономное вождение и передвижение машин в плотном строю.

Чтобы удовлетворить требованиям современных V2X систем в комитете IEEE 802.11 была создана рабочая группа по разработке нового стандарта IEEE 802.11bd. Целью нового стандарта является увеличение пропускной способности и дальности связи, улучшение системы позиционирования, а также уменьшение задержек при передаче пакетов. При этом существенным является также требование на совместимость устройств, работающих по стандарту IEEE 802.11bd, со старыми устройствами, работающими по стандарту IEEE 802.11p. Устройства, работающие по новому протоколу, должны не только иметь возможность обмениваться данными со старыми устройствами, но и не ухудшать работу приложений, использующих стандарт IEEE 802.11p. Это требование вызвано тем фактом, что от стабильной работы сервисов зависит безопасность дорожного движения.

Для достижения поставленных требований планируется использовать нововведения, которые позволили улучшить производительность устройств, работающих по стандартам Wi-Fi, таким как IEEE 802.11n/ac/ax [5–7]. Обзор тех нововведений из указанных стандартов, которые, возможно, будут использованы в стандарте IEEE 802.11bd был произведён, например, в [8]. Также стоит отдельно отметить, что разработка стандарта IEEE 802.11bd ведётся параллельно с разработкой стандарта IEEE 802.11be или Wi-Fi 7. Вследствие этого, те нововведения из стандарта 11be, которые позволят значительно улучшить работу устройств, использующих данный стандарт, могут быть использованы и в стандарте 11bd. Обзор таких нововведений был произведён, например, в [9].

В работах [10,11] сравниваются различные технологии физического уровня, которые могут быть использованы в IEEE 802.11bd, а в работе [12] был предложен и исследован новый алгоритм работы канального уровня. Одной из технологий, концепцию работы которой планируется позаимствовать из стандартов классического Wi-Fi (IEEE 802.11n и IEEE 802.11ac), является многоканальный метод доступа к среде. Исследования, посвящённые многоканальным методам доступа, уже проводились ранее [13]. Существенным недостатком этой работы является то, что в ней рассмотрен нереалистичный сценарий, где все устройства являются неподвижными и генерируют насыщенный трафик.

В отличие от [13], в данной статье при помощи имитационного моделирования в ns-3 [14] рассматривается сценарий движения транспортных средств по шоссе для случая ненасыщенного трафика. В качестве метрик производительности были выбраны задержка передачи кадра на канальном уровне и доля успешно переданных пакетов (англ. Packet Delivery Rate, PDR). В качестве первого многоканального метода доступа был выбран алгоритм, описанный в предварительной версии стандарта IEEE 802.11bd. Второй исследованный в данной работе многоканальный алгоритм аналогичен многоканальному методу доступа в IEEE 802.11ac.

### 3 Рассматриваемые методы доступа к среде

В данной работе было проведено сравнение трёх алгоритмов доступа к среде: одноканального и двух многоканальных. В качестве одноканального метода доступа использовался метод доступа EDCA из стандарта IEEE 802.11p, принцип работы которого проиллюстрирован на рис. 2. При его использовании устройство начинает передачу кадров только после достижения счётчиком отсрочки нулевого значения. Этот счётчик инициализируется при получении доступа к среде и после успешной передачи и равновероятно принимает целые значения из интервала  $[0, W]$ , где  $W$  — текущее конкурентное окно. Счётчик отсрочки уменьшается на единицу каждый раз, когда канал свободен в течение слота  $\sigma$ . В противном случае, если канал занят, станция останавливает счётчик и возобновляет счёт, только когда канал станет снова свободным в течение интервала AIFS, если предыдущая передача была успешно декодирована, или в течение интервала EIFS, если предыдущая передача была декодирована неуспешно. Если канальный уровень станции получает от вышестоящих уровней новый кадр и отсрочка после передачи предыдущего кадра уже истекла, то для начала передачи канал должен быть свободен в течение AIFS. Если же при получении нового кадра канальный уровень обнаруживает, что среда занята, то он ждёт окончания чужой передачи и через AIFS, если предыдущая передача была успешно де-

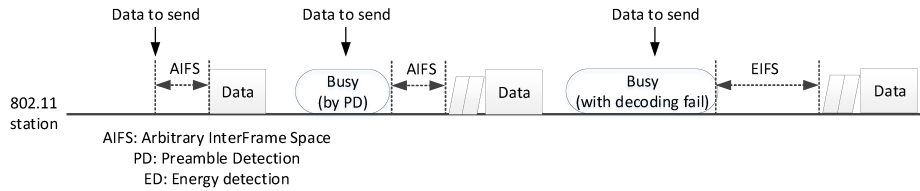


Рис. 2: Иллюстрация работы алгоритма EDCA [13].

кодирована, или через EIFS, если предыдущая передача была декодирована неуспешно, инициализирует счётчик отсрочки.

Стоит отметить, что для начала процедуры отсрочки необходимо чтобы среда оставалась свободной на протяжении всего времени AIFS или EIFS. Время EIFS больше чем AIFS, так как, кроме AIFS, включает в себя ещё и время, необходимое для получения подтверждения на кадр, который был неуспешно декодирован на принимающем устройстве. Это оправдано, так как данный кадр мог быть одноадресным и адресат мог успешно его декодировать и отправить кадр подтверждения. Под неуспешным декодированием здесь понимается либо успешное декодирование преамбулы (англ. Preamble Detection, PD) и наличие в остальной части передаваемого пакета ошибок, которые не удалось исправить, либо обнаружение занятости канала по превышению принимаемым сигналом порогового значения мощности без успешного декодирования преамбулы (англ. Energy Detection, ED).

В качестве первого многоканального метода доступа был использован алгоритм из предварительной версии стандарта IEEE 802.11bd, принцип работы которого проиллюстрирован на рис. 3. При его использовании применяется один счётчик отсрочки, который отсчитывается в двух объединённых каналах сразу: основном и вторичном. Основным для данного многоканального устройства будем называть тот канал, в котором оно может детектировать преамбулу, а вторичным тот, где многоканальное устройство может определить занятость канала только посредством ED.

Если двухканальное устройство получает кадр от вышестоящих уровней и во время получения кадра среда оказывается свободной, то для начала передачи необходимо чтобы среда оставалась свободной в течение времени AIFS. Если же до истечения времени AIFS с начала получения нового кадра началась передача хотя бы в одном из двух каналов, то устройство отсрочивает передачу и ожидает пока оба канала не будут свободны в течение межкадрового интервала: AIFS если последняя передача производилась в основном канале; EIFS если последняя передача производилась во вторичном канале или в двух каналах сразу и устройство не смогло успешно декодировать передаваемый кадр; AIFS если последняя передача производилась во вторичном канале или в двух каналах сразу и удалось успешно декодиро-

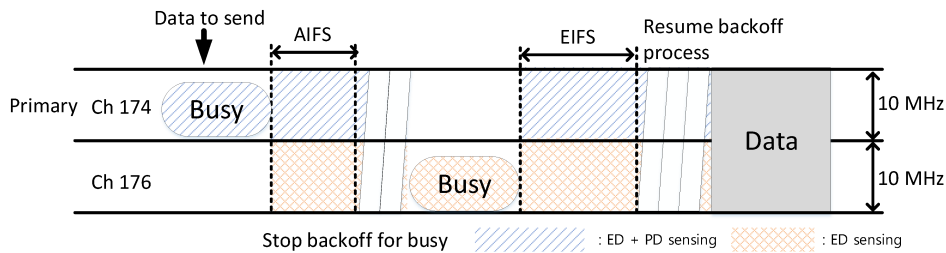


Рис. 3: Иллюстрация работы первого многоканального метода доступа [13].

вать принимаемый кадр. По прошествии межкадрового времени устройство взводит счётчик отсрочки, поведение которого было описано при рассмотрении метода EDCA, и начинает передачу по истечении этого счётчика. Если же при выполнении процедуры отсрочки хотя бы в одном из каналов начинается передача, то устройство приостанавливает процедуру отсрочки, замораживая счётчик отсрочки, и продолжает эту процедуру только после того, как оба канала остаются свободными в течение межкадрового времени, величина которого была указана в начале этого абзаца. При получении доступа к каналу устройство может передавать только в двух каналах сразу.

В качестве второго многоканального метода доступа был использован алгоритм аналогичный тому методу доступа, который описан в стандарте IEEE 802.11n. Принцип работы данного алгоритма проиллюстрирован на рис. 4.

При использовании данного метода доступа к среде устройство применяет описанный выше алгоритм EDCA для основного канала. Однако при получении доступа к каналу устройство может передавать как в основном канале, так и в двух каналах сразу. Передача осуществляется в двух каналах сразу, если на момент получения доступа к основному каналу вторичный канал был свободным на протяжении времени не меньшего чем AIFS. В противном случае передача осуществляется только в основном канале. Отличие данного алгоритма от метода доступа, описанного в IEEE 802.11n, заключается в том, что для передачи в двух каналах сразу вторичный канал должен быть свободен на протяжении времени AIFS, а не PIFS как в IEEE 802.11n. Это сделано для обеспечения большей честности по отношению к одноканальным устройствам, так как AIFS дольше, чем PIFS.

#### 4 Проблема скрытых узлов

В случае, когда не все устройства находятся в зоне интерференции друг друга, может возникнуть проблема скрытых узлов. Эта проблема иллюстрируется на рис. 5.

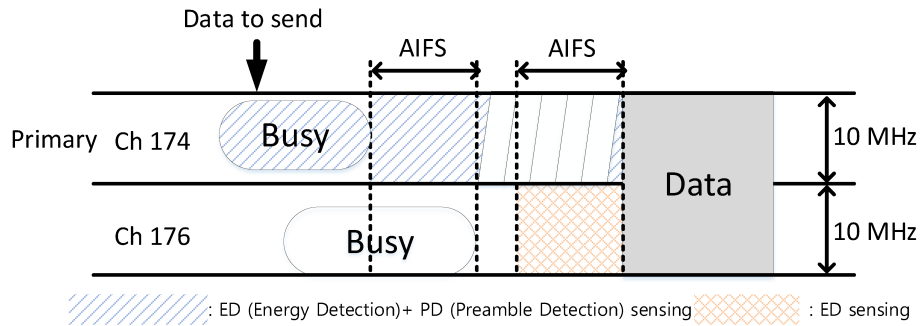


Рис. 4: Иллюстрация работы второго многоканального метода доступа [13].

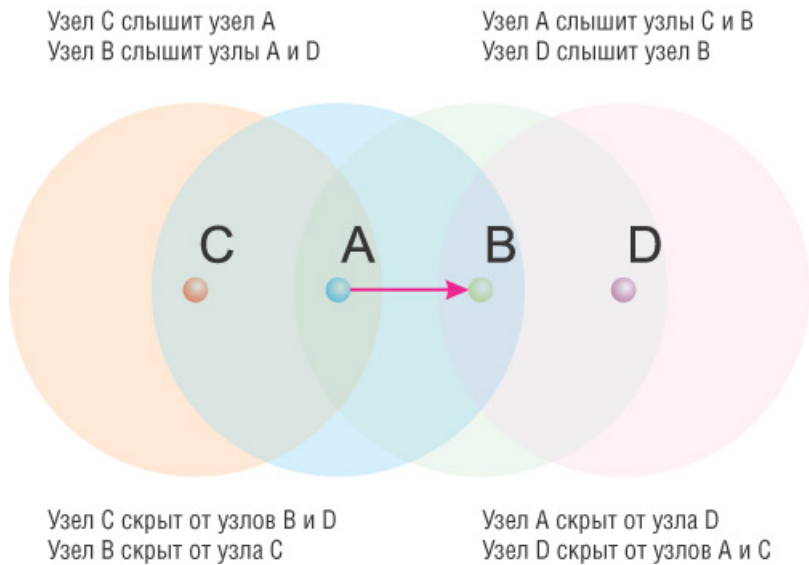


Рис. 5: Иллюстрация проблемы скрытых узлов.

Предположим, что в ситуации, изображённой на рис. 5, устройство А передаёт кадр устройству В. Так как устройство А не находится в зоне интерференции устройства D, устройство D не слышит передачу устройства А. Следовательно устройство D не будет откладывать свою передачу, если вокруг нет других узлов кроме тех, которые указаны на рисунке. В таком случае предположим, что устройство D начало передачу лишь немного позже устройства А. Тогда если на устройстве В, как это было в нашем исследовании, не реализован эффект захвата, то из-за интерференции устройство В не примет кадр ни от устройства А, ни от устройства D. В итоге по сравнению со сценарием, где все устройства находятся в зоне интерференции

друг друга, у устройства D будет меньшая задержка передачи кадра на канальном уровне и у обоих устройств будет меньший PDR. То есть если не рассматривать специально подобранные стационарные сценарии, проблема скрытых узлов приводит к снижению PDR и задержки передачи кадра. В частности проблема скрытых узлов приводит к снижению задержек передачи кадра и PDR в сценарии движения устройств по шоссе, который будет описан в разделе 5 этой статьи.

## 5 Численные результаты

Для сравнения производительности многоканальных и одноканального методов доступа была использована среда имитационного моделирования ns3. В частности, были реализованы 2 описанных выше многоканальных метода доступа на основе имеющегося модуля WAVE, который позволяет моделировать работу протокола IEEE 802.11p [15].

В работе было рассмотрено 2 сценария. В первом сценарии все устройства находились в зоне уверенного приёма друг друга в маленьком квадрате размером 10 на 10 метров и были неподвижны. Во втором сценарии устройства двигались по прямоугольному шоссе размером 30 на 1500 метров. Изначально они были разбросаны по прямоугольной области в соответствии с равномерным распределением и имели скорость, равномерно распределённую от нуля до 20 м/с. Узлы выбирали произвольную точку на шоссе и двигались к этой точке с изначально заданной скоростью. По достижении этой точки они выбирали новую точку и скорость движения.

Для каждого сценария было рассмотрено 4 случая относительно типов устройств, находящихся в сценарии. В первых трёх случаях в сценарии находилось одинаковое число устройств всех трёх типов: одноканальных в основном канале, одноканальных во вторичном канале и двухканальных. При этом в первом случае многоканальные устройства использовали алгоритм из черновой версии IEEE 802.11bd (11bd на графиках); во втором случае все многоканальные устройства использовали алгоритм аналогичный методу доступа, применяемому в IEEE 802.11n, и имели один и тот же основной канал (11n несимметричный на графиках); в третьем случае многоканальные устройства использовали тот же алгоритм, что и во втором эксперименте, но у половины двухканальных устройств основным был канал 174, а у второй половины 176 (11n симметричный на графиках). В четвёртом случае многоканальные устройства были заменены одноканальными и равномерно распределены по двум каналам (только одноканальные на графиках). В итоге во всех случаях в рамках одного сценария было одинаковое суммарное число узлов.

В всех случаях широкоэвещательно передавались базовые сообщения приложений безопасности (англ. Basic Safety Messages, BSM) размером в 200



байт. Частота передачи BSM была 10 Гц. В данном исследовании была рассмотрена передача широковещательных сообщений, так как этот тип трафика является наиболее распространённым в сетях V2X [16]. Так как в эксперименте передавались широковещательные сообщения, величина конкурентного окна была постоянной. В текущей работе рассчитывались задержки передачи кадров на канальном уровне, включающие в себя время простоя кадра в очереди, получения доступа к среде и передачи кадра на физическом уровне. Также рассчитывался PDR, в котором учитывались только пакеты, отправляемые устройствам, находящимся во время передачи на расстоянии не более 100 метров от передатчика. Для одноканальных устройств при расчёте PDR учитывались только передачи другим одноканальным устройствам, а для многоканальных в PDR учитывались только передачи другим многоканальным устройствам. Параметры имитационного моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1: Параметры имитационного моделирования

Тип устройства	одноканальное	многоканальное
Размер сообщения, байт	200	200
Частота генерации BSM, Гц	10	10
Размер окна	16	16
Скорость передачи данных, Мбит/с	6	12
Тип кода	свёрточный	свёрточный
Скорость кода	0.5	0.5
Модуляция	QPSK	QPSK

Графики, сравнивающие производительность одноканального и многоканальных методов доступа в стационарном сценарии, показаны на рис. 6. Как можно заметить, при малом числе устройств задержка при использовании многоканальных методов доступа заметно ниже, так как при передаче в объединённом канале в 20 МГц скорость передачи данных на физическом уровне у многоканальных в 2 раза больше, а при малой плотности трафика доля одноканальных передач у метода доступа аналогичного алгоритму доступа к среде в IEEE 802.11n пренебрежимо мала по сравнению с долей двухканальных передач. Однако при увеличении числа узлов задержка при использовании многоканального метода из черновой версии стандарта IEEE 802.11bd начинает стремительно расти из-за большой задержки при доступе к среде. Задержка доступа к среде у многоканальных устройств, работающих по протоколу из черновой версии стандарта IEEE 802.11bd, растёт быстрее, чем у остальных устройств, так как они слышат передачи всех устройств, находящихся в эксперименте. В свою очередь, одноканаль-

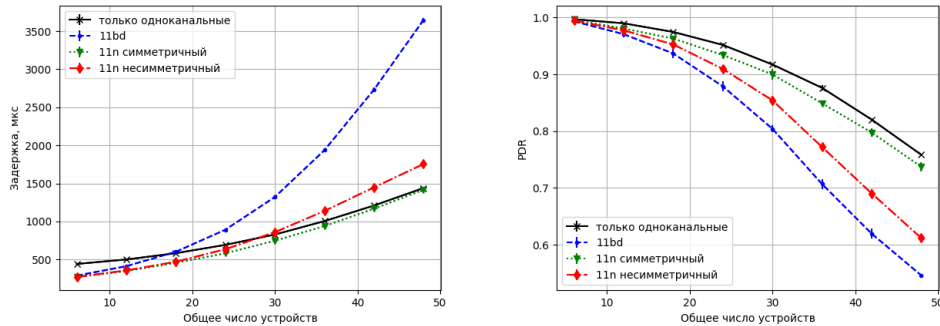


Рис. 6: Зависимость задержки передачи кадра и PDR от числа узлов в стационарном сценарии для двухканальных методов доступа и одноканального метода доступа в случае, когда многоканальные устройства отсутствуют.

ные устройства не слышат передачи устройств, находящихся в другом канале, а многоканальный метод доступа аналогичный тому, который описан в IEEE 802.11n, отсчитывает счётчик отсрочки только в основном канале. Задержки передачи кадра у многоканального метода доступа аналогичного используемому в IEEE 802.11n растут быстрее, чем задержки передачи кадра у одноканальных устройств, так как с увеличением плотности трафика доля одноканальных передач у двухканальных устройств растёт. Задержки многоканального метода доступа аналогичного тому, который используется IEEE 802.11n, растут быстрее в ситуации, когда все многоканальные устройства имеют один и тот же основной канал, так как в таком случае основной канал, где и происходят одноканальные передачи многоканальных устройств, оказывается перегруженным относительно ситуации, когда половина многоканальных устройств имеет один основной канал, а другая половина имеет другой основной канал.

Что касается PDR, у многоканальных устройств он оказывается ниже, чем у одноканальных. Это происходит по причине того, что при одновременной передаче в объединённом канале в 20 МГц кадр многоканального устройства интерферирует с кадром любого другого устройства, находящегося в эксперименте, а кадры одноканальных устройств могут интерферировать только с кадрами одноканальных устройств из этого же канала или с кадрами многоканальных устройств. Многоканальный метод доступа аналогичный алгоритму доступа к среде из IEEE 802.11n превосходит метод доступа к среде из черновой версии стандарта IEEE 802.11bd с точки зрения PDR, так как первый метод доступа допускает передачу как в объединённом, так и в основном канале, что уменьшает влияние эффекта, описанного в начале этого абзаца. Если при использовании метода досту-

па аналогичного описанному в IEEE 802.11n все устройства имеют один и тот же основной канал, то этот канал оказывается перегруженным относительно ситуации, когда половина многоканальных устройств имеет один основной канал, а половина другой. Это приводит к тому, что в симметричном случае на графике многоканальные устройства имеют больший PDR, чем в несимметричном случае.

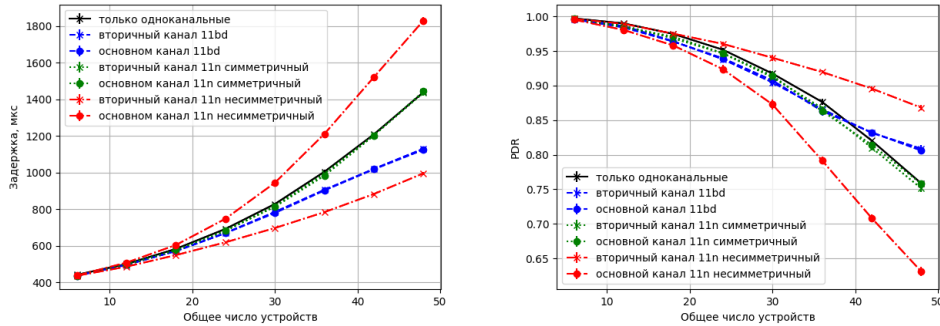


Рис. 7: Зависимость задержки передачи кадра и PDR от числа узлов в стационарном сценарии для одноканальных устройств.

Графики, показывающие влияние многоканальных устройств на производительность одноканального метода доступа в стационарном сценарии, показаны на рис. 7. В данном исследовании считалось, что многоканальный метод доступа удовлетворяет условию честности по отношению к одноканальным устройствам, если он не ухудшает работу одноканального метода доступа в сценарии с многоканальными устройствами относительно сценария без многоканальных устройств. Для того чтобы удовлетворить условию честности многоканальный метод доступа не должен ухудшать работу одноканальных устройств ни с точки зрения PDR, ни с точки зрения задержек.

Как можно заметить, в случае когда многоканальные устройства используют метод доступа из черновой версии IEEE 802.11bd, задержки у одноканальных устройств снижаются по сравнению со случаем, где многоканальные устройства отсутствуют. В свою очередь, при использовании метода доступа аналогичного тому, который описан в IEEE 802.11n, задержки у одноканальных устройств остаются такими же, как и в случае, в котором многоканальные устройства отсутствуют. То есть в двух описанных выше случаях многоканальные устройства удовлетворяют условию честности с точки зрения задержки передачи кадра, но в силу того, что алгоритм из стандарта IEEE 802.11bd отсчитывает счётчик отсрочки сразу в двух

каналах, он излишне сильно защищает одноканальные устройства с точки зрения задержек. Также можно заметить, что в случае, когда все многоканальные устройства использовали алгоритм аналогичный описанному в стандарте IEEE 802.11n и имели один и тот же основной канал, одноканальные устройства в основном канале имеют самые большие задержки, а устройства во вторичном канале самые низкие задержки относительно одноканальных устройств в других случаях. Это вызвано тем, что основной канал в случае 2 на графике оказывается значительно более нагруженным, а вторичный канал, напротив, значительно менее нагруженным, чем в случае 1 на графике. Аналогичное замечание справедливо и для PDR у одноканальных устройств в случае 2 на втором графике.

Что касается PDR, у одноканальных устройств в случаях, где присутствовали многоканальные устройства, он оказывается лишь незначительно ниже, чем у одноканальных устройств в случае, когда многоканальные устройства отсутствовали. При этом в случае когда многоканальные устройства используют протокол из черновой версии стандарта IEEE 802.11bd, PDR у одноканальных устройств падает медленнее и при большом числе узлов становится больше, чем PDR у одноканальных устройств в случае, когда многоканальные устройства отсутствуют. Это вызвано стремительным ростом задержек у многоканальных устройств, использующих алгоритм из черновой версии стандарта IEEE 802.11bd, при увеличении числа устройств в эксперименте. В итоге можно утверждать, что многоканальный метод доступа из IEEE 802.11bd и многоканальный метод доступа аналогичный алгоритму из IEEE 802.11n в случае, когда половина многоканальных устройств имеет один основной канал, а половина другой, удовлетворяют условию честности в стоячем сценарии относительно одноканальных устройств. В свою очередь, многоканальный метод доступа аналогичный описанному в IEEE 802.11n в случае когда все многоканальные устройства имеют один и тот же канал не удовлетворяет условию честности в стоячем сценарии относительно одноканальных устройств.

Графики, сравнивающие производительность одноканального и многоканальных методов доступа в сценарии шоссе, показаны на рис. 8. На данных графиках присутствуют те же эффекты, которые наблюдались в стоячем сценарии. Однако в силу того, что в сценарии шоссе присутствует проблема скрытых узлов, которая была рассмотрена ранее, поведение графиков здесь несколько иное. Так как многоканальные устройства могут вызывать проблему скрытых узлов у всех остальных устройств, находящихся в сценарии, а одноканальные устройства могут вызывать проблему скрытых узлов только у одноканальных устройств в том же канале, то в случаях, где присутствовали многоканальные устройства, проблема скрытых узлов будет выражена сильнее. В свою очередь, усиление проблемы скрытых узлов приводит

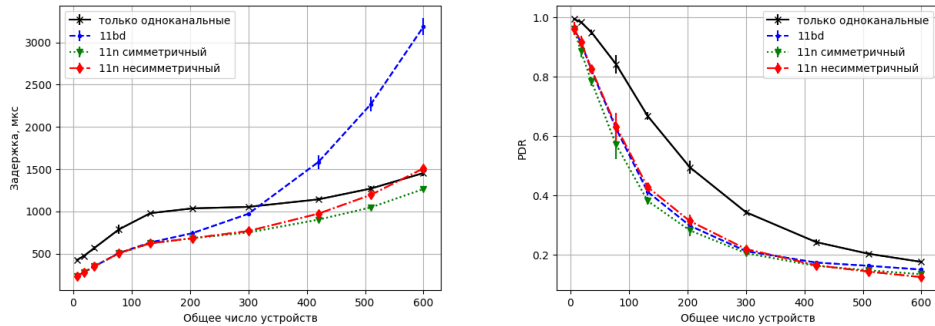


Рис. 8: Зависимость задержки передачи кадра и PDR от числа узлов на шоссе для двухканальных методов доступа и одноканального метода доступа в случае без многоканальных устройств.

к падению задержек и PDR у всех устройств в соответствующем эксперименте. Это и объясняет тот факт, что, по сравнению со стоячим сценарием, при тех же задержках и PDR графики для многоканальных устройств смещаются ниже относительно графика для одноканальных устройств в случае, в котором двухканальные устройства отсутствовали.

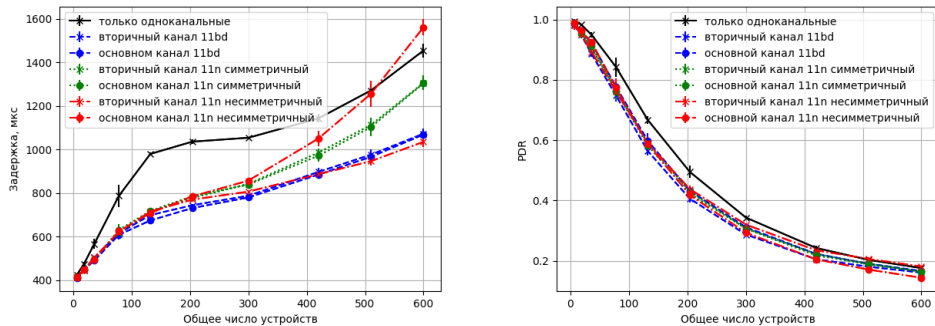


Рис. 9: Зависимость задержки передачи кадра и PDR от числа узлов на шоссе для одноканальных устройств.

Графики, показывающие влияние многоканальных устройств на производительность одноканального метода доступа в сценарии шоссе, показаны на рис. 9. В силу эффекта, который был объяснён при описании предыдущих двух графиков, в сценарии шоссе все предложенные двухканальные мето-

ды доступа удовлетворяют условию честности с точки зрения задержек, но не удовлетворяют условию честности с точки зрения PDR. То есть ни один из многоканальных методов доступа не удовлетворяет условию честности относительно одноканальных устройств.

## 6 Заключение

В данной работе был проведён сравнительный анализ двух многоканальных и одноканальных алгоритмов доступа к среде с точки зрения задержек передачи кадра на канальном уровне и доли успешно переданных пакетов. При помощи имитационного моделирования было показано, что в определённых ситуациях многоканальные устройства значительно превосходят одноканальные с точки зрения задержки передачи кадра на канальном уровне, однако проигрывают одноканальным устройствам с точки зрения доли успешно доставленных пакетов. В исследовании также было изучено влияние устройств, использующих многоканальный метод доступа к среде, на работу одноканальных устройств и было выяснено, что в стационарном сценарии многоканальные алгоритмы обеспечивают надлежащий уровень честности по отношению к одноканальным устройствам. Кроме этого, было показано, как мобильность устройств влияет на производительность многоканальных методов доступа и их честность по отношению к одноканальным устройствам и выяснено, что в сценарии шоссе условию честности по задержкам по отношению к одноканальным устройствам удовлетворяют все двухканальные алгоритмы, а условию честности по доли успешно доставленных пакетов не удовлетворяет ни один из многоканальных алгоритмов.

## Список литературы

1. Zear Aditi, Singh Pradeep, Singh Yashwant. Intelligent Transport System: A Progressive Review // Indian Journal of Science and Technology. — 2016. — 08. — Vol. 9.
2. Eichler S. Performance Evaluation of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard // 2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference. — 2007. — P. 2199–2203.
3. Mir Zeeshan Hameed, Filali Fethi. LTE and IEEE 802.11p for vehicular networking: a performance evaluation // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. — 2014. — Vol. 2014, no. 1. — P. 89.
4. Evaluation of the IEEE 802.11 p MAC Method for Vehicle-to-Vehicle Communication / K. Bilstrup, E. Uhlemann, E. G. Strom, U. Bilstrup // 2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference. — 2008. — P. 1–5.
5. Gast Matthew. 802.11 n: a survival guide. — "O'Reilly Media, Inc. 2012.
6. Gast Matthew S. 802.11 ac: a survival guide: Wi-Fi at gigabit and beyond. — "O'Reilly Media, Inc. 2013.

7. A tutorial on IEEE 802.11 ax high efficiency WLANs / Evgeny Khorov, Anton Kiryanov, Andrey Lyakhov, Giuseppe Bianchi // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2018. — Vol. 21, no. 1. — P. 197–216.
8. Naik G., Choudhury B., Park J. IEEE 802.11bd 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications // IEEE Access. — 2019. — Vol. 7. — P. 70169–70184.
9. Khorov Evgeny, Levitsky Ilya, Akyildiz Ian F. Current Status and Directions of IEEE 802.11 be, the Future Wi-Fi 7 // IEEE Access. — 2020.
10. Anwar Waqar, Franchi Norman, Fettweis Gerhard. Physical layer evaluation of V2X communications technologies: 5G NR-V2X, LTE-V2X, IEEE 802.11 bd, and IEEE 802.11 p // 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall) / IEEE. — 2019. — P. 1–7.
11. On the Reliability of NR-V2X and IEEE 802.11bd / Waqar Anwar, Norman Franchi, Gerhard Fettweis, Andreas Traßl // IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). — 2019. — 09.
12. Ahn Woojin, Kim Ronny Yongho. Distributed Triggered Access for BSM Dissemination in 802.11 bd V2V Networks // Applied Sciences. — 2020. — Vol. 10, no. 1. — P. 311.
13. An Effective Wide-Bandwidth Channel Access in Next-Generation WLAN-Based V2X Communications / Hanseul Hong, Young Yong Kim, Ronny Yongho Kim, Woojin Ahn // Applied Sciences. — 2020. — Vol. 10, no. 1. — P. 222.
14. Network simulator 3 (NS-3). — Access mode: <https://www.nsnam.org/>.
15. Implementation and evaluation of wave 1609.4/802.11 p in ns-3 / Junling Bu, Guozhen Tan, Nan Ding et al. // Proceedings of the 2014 Workshop on ns-3. — 2014. — P. 1–8.
16. Kenney J. An Automaker Perspective on Next Gen V2X. — Available online: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-0917-00-0ngv-an-automaker-perspective-on-next-gen-v2x.pptx> (accessed on 24 September 2019).