

Алгоритм адаптивного выбора конкурентного окна в сетях IEEE 802.11bd

В.А. Торгунаков^{*,**}, В.А. Логинов^{*}, Е.М. Хоров^{*}, А.И. Ляхов^{*}

^{*}Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук, Москва

^{**}Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Москва

Поступила в редколлегию 15.11.2022 г., Принята 01.12.2022 г.

Аннотация—В настоящее время активно развиваются сети для передачи данных между объектами интеллектуальных транспортных систем V2X. Большинство существующих сетей V2X работают по стандарту IEEE 802.11p. Однако эти сети могут обеспечивать только базовые приложения V2X и не способны удовлетворить требованиям современных приложений. Вследствие этого комитет IEEE начал разработку нового стандарта IEEE 802.11bd. Существенным нововведением этого стандарта является использование метода объединения каналов, который позволяет передавать данные в нескольких каналах сразу. Одним из подходов, позволяющих значительно повысить эффективность метода объединения каналов, является правильный выбор конкурентного окна. В данной работе предложен адаптивный алгоритм выбора конкурентного окна, который совместим с методом объединения каналов, прост в реализации, не требует изменения уже существующих устройств и учитывает требования к качеству обслуживания различных типов трафика. С помощью имитационного моделирования показано, что предложенный алгоритм увеличивает максимально допустимую плотность станций, при которой ещё выполнены требования к качеству обслуживания, на 25% по сравнению со стандартизованным решением.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Адаптивный выбор конкурентного окна, метод объединения каналов, IEEE 802.11bd, ITS, V2X

DOI: 10.53921/18195822_2022_22_4_373

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развиваются интеллектуальные транспортные системы (англ.: Intelligent Transport Systems, ITS). В таких системах транспортные средства могут обмениваться данными между собой и объектами придорожной инфраструктурой для того чтобы сделать движение более комфортным и безопасным. Для повсеместного применения ITS необходимо развёртывание сетей для передачи данных между устройствами (англ.: Vehicle-To-Everything networks, сети V2X). Сети V2X могут значительно уменьшить число транспортных происшествий и увеличить удобство вождения. Это достигается, например, за счёт использования приложений, которые предупреждают водителя о неожиданном появлении пешехода или о дорожном происшествии. Ожидается, что в будущем сети V2X будут обеспечивать работу автономных транспортных средств [1].

Основной технологией радиодоступа, которая обеспечивает работу сетей V2X, является Dedicated Short Range Communications (DSRC). Эта технология описывается набором стандартов для беспроводного доступа к среде в транспортных сетях (англ.: Wireless Access in Vehicular Environment, WAVE), где стандарт IEEE 802.11p специфицирует работу канального (англ.: Medium Access Control, MAC) и физического уровней. Сети DSRC работают в диапа-

зоне 5,9 ГГц, который выделен для сетей V2X в некоторых регионах, таких как Европейский союз, США и Япония.

Исследования показывают, что сети IEEE 802.11p способны удовлетворить требованиям базовых приложений, обеспечивающих безопасность дорожного движения, если сеть не слишком нагружена [2, 3]. Такие приложения подразумевают периодический обмен широкополосными сообщениями с частотой 1–10 Гц и требуют, чтобы задержка передачи сообщений и доля потерянных пакетов (англ.: Packet Loss Ratio, PLR) были не больше 50–500 мс и 10% соответственно [4, 5].

Однако сети IEEE 802.11p не способны удовлетворить более строгим требованиям, которые накладывают современные приложения V2X. Например, приложение, обеспечивающее обмен данными при движении машин в очень плотном ряду, требует, чтобы задержка передачи сообщений и PLR были ниже 25 мс и 90% соответственно [6]. Вследствие этого в комитете IEEE была создана рабочая группа IEEE 802.11bd, которая разрабатывает новый стандарт для обеспечения новых приложений V2X.

Стандарт IEEE 802.11bd разрабатывается, чтобы повысить надёжность передачи данных, пропускную способность и дальность передачи данных по сравнению с IEEE 802.11p. Для достижения этих целей в IEEE 802.11bd был добавлен ряд нововведений. Одним из существенных нововведений IEEE 802.11bd является использование метода объединения каналов, который позволяет передавать данные в двух смежных каналах одновременно и может существенно повысить производительность станций, использующих IEEE 802.11bd. При этом метод объединения каналов основан на базовом одноканальном методе случайного доступа с процедурой отсрочки, длительность которой определяется размером конкурентного окна.

Изучению методов объединения каналов в сетях IEEE 802.11bd посвящено несколько исследований [7–11]. В частности в работах [8, 9] исследуется влияние размера конкурентного окна на производительность методов объединения каналов. Авторы заключают, что стандартизированное значение конкурентного окна для широкополосного трафика далеко от оптимального, и производительность сети может быть значительно повышена при соответствующем изменении этого параметра.

Проблема подбора оптимального значения конкурентного окна активно исследовалась для стандарта IEEE 802.11p [12–18]. Однако алгоритмы, предложенные авторами упомянутых работ, неэффективны в сетях IEEE 802.11bd. Основной причиной является то, что авторы не учитывают требования к качеству обслуживания различных типов трафика, количество которых значительно возросло в сетях IEEE 802.11bd.

В настоящей работе предложен алгоритм адаптивного выбора конкурентного окна для сетей IEEE 802.11bd. При помощи имитационного моделирования в среде имитационного моделирования ns-3 показано, что предложенный алгоритм позволяет значительно снизить долю станций с неудовлетворёнными требованиями к качеству обслуживания. Предложенный алгоритм как с базовым одноканальным методом доступа, так и с методами объединения каналов, и прост в реализации.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приведено подробное описание методов доступа к среде в сетях IEEE 802.11bd. Обзор литературы содержится в разделе 3. Описание адаптивного алгоритма выбора конкурентного окна представлено в разделе 4. Рассматриваемый сценарий детально описан в разделе 5. Описание используемых метрик приведено в разделе 6. Численные результаты обсуждаются в разделе 7. Раздел 8 содержит заключение.

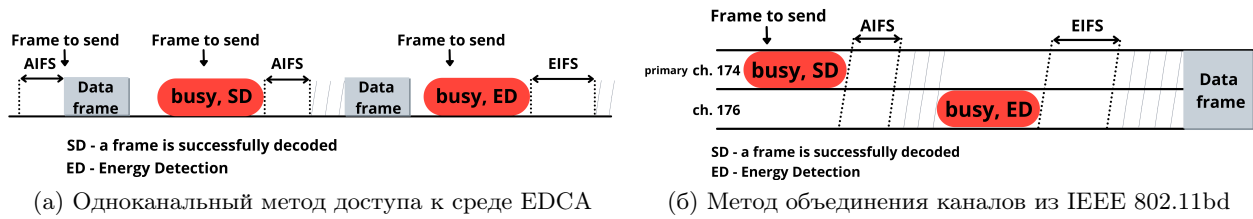


Рис. 1. Методы доступа к каналу в сетях IEEE 802.11bd

2. МЕТОДЫ ДОСТУПА К СРЕДЕ В СЕТЯХ IEEE 802.11BD

Согласно стандарту IEEE 802.11bd станции могут использовать либо базовый одноканальный метод доступа EDCA, описанный в разделе 2.1, либо метод объединения каналов, описанный в разделе 2.2.

2.1. Одноканальный метод доступа EDCA

EDCA — это базовый метод случайного доступа к каналу в современных сетях Wi-Fi. Станции, использующие EDCA, выполняют процедуру отсрочки перед каждой попыткой передачи. Изначально счётчик отсрочки принимает значение, равномерно распределённое в интервале $[0, W]$, где W — текущее значение конкурентного окна. Для широковещательного трафика W постоянно и равно минимальному значению конкурентного окна W_{min} . Станция уменьшает счётчик отсрочки на единицу, когда канал свободен на протяжении времени σ , и замораживает счётчик отсрочки, когда канал становится занятым. Станция размораживает и дополнительно уменьшает счётчик на единицу, когда канал становится свободным на протяжении интервала времени τ . Этот интервал равняется EIFS, если станции не удаётся декодировать кадр, передававшийся, когда среда была занята. В противном случае τ равняется более короткому интервалу AIFS. Когда счётчик отсрочки достигает нуля, станция передаёт кадр.

EDCA различает четыре категории доступа (AC_BK, AC_BE, AC_VI, AC_VO), каждая из которых имеет собственную очередь и свой счётчик отсрочки. При этом, минимальное и максимальное значения конкурентного окна W_{min} и W_{max} , а также AIFS для каждой очереди различаются. Это позволяет EDCA приоритизировать очереди. Работа метода доступа EDCA проиллюстрирована на рис. 1 (а).

2.2. Метод объединения каналов в стандарте IEEE 802.11bd

Станция, которая использует метод объединения каналов из IEEE 802.11bd, делит широкий канал на 2 подканала равной ширины. В основном канале станция способна задетектировать преамбулу, а во вторичном способна лишь определить занятость канала, если мощность передачи превышает заданный в стандарте порог.

Станция уменьшает счётчик отсрочки на единицу, когда оба канала свободны на протяжении времени σ , и замораживает счётчик отсрочки, если хотя бы один из каналов становится занятым во время процедуры отсрочки. Станция размораживает счётчик отсрочки только когда оба канала становятся свободными на протяжении интервала времени T . Этот интервал равняется EIFS, если станции не удаётся декодировать передачу во вторичном канале или в двух каналах сразу. В противном случае T равняется AIFS. Станция может передавать кадр только в двух каналах сразу. Работа метода объединения каналов из IEEE 802.11bd проиллюстрирована на рис. 1 (б).

3. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Методам объединения каналов в сетях IEEE 802.11bd [7–9] посвящён ряд работ. В упомянутых исследованиях с помощью имитационного моделирования исследуется эффективность различных методов объединения каналов. Однако в работе [7] всегда используется постоянное значение конкурентного окна, равное W_{min} . В свою очередь, в работах [8,9] показано, что стандартизованное значение конкурентного окна далеко от оптимального, а оптимальное значение неодинаково для различных методов доступа к среде. Тем не менее авторы не предлагают какого-либо адаптивного алгоритма выбора конкурентного окна.

Адаптивные алгоритмы выбора конкурентного окна для сетей IEEE 802.11p были предложены в ряде более ранних работ [12–18]. Авторы [12] предлагают изменять конкурентное окно в зависимости от доли успешно доставленных пакетов и показывают, что предложенный алгоритм существенно уменьшает PLR относительно стандартизованного решения. В работе [13] рассматриваются централизованный и распределённый алгоритмы выбора конкурентного окна. Исследователи показывают, что использование централизованного алгоритма позволяет увеличить пропускную способность сети. В работе [12] предлагается алгоритм, позволяющий одновременно менять и размер конкурентного окна, и мощность передачи. В работе показано, что предложенный алгоритм повышает пропускную способность сети. В свою очередь, авторы [15] описывают алгоритм, в котором устройства изначально выбирают большое значение конкурентного окна, а затем уменьшают его, если передача длится слишком долго. В работе показано, что данный подход позволяет снизить число транспортных происшествий на дороге. В статье [16] авторы предлагают алгоритм выбора конкурентного окна на основе цепей Маркова. В исследовании показано, что алгоритм максимизирует пропускную способность сети и позволяет существенно понизить PLR. Авторы [17] описывают алгоритм выбора конкурентного окна на основе обучения с подкреплением и показывают, что разработанный алгоритм позволяет значительно уменьшить PLR и распределять ресурсы сети между устройствами более честно. В статье [17] авторы предлагают назначать станциям разные приоритеты. Для этого предлагается делить время на две фазы. В первой фазе объекты придорожной инфраструктуры назначают станциям приоритет, а во второй происходит передача данных. В исследовании показано, что предложенный подход позволяет уменьшить PLR.

Существенным недостатком работ [12–18] является то, что в них не учитываются требования по задержке передачи кадров и PLR для различных типов трафика. Это приводит к низкой эффективности алгоритмов в случае наличия трафика с различными требованиями к качеству обслуживания, что является типичной ситуацией для сетей IEEE 802.11bd. Более того, в работах [12–15] рассматривается лишь одна из двух ключевых метрик: либо задержка, либо PLR. Кроме того, алгоритмы из статей [13, 14, 16–18] очевидным образом не обобщаются на случай, когда некоторые станции используют метод объединения каналов из IEEE 802.11bd. Наконец, алгоритмы из работ [17, 18] подразумевают деление времени на фазы и не могут работать в присутствии устройств 11p, которые не подчиняются делению времени на фазы.

Алгоритм, описанный в данной работе, исправляет указанные недостатки предыдущих работ.

4. АДАПТИВНЫЙ МЕТОД ВЫБОРА КОНКУРЕНТНОГО ОКНА

В настоящей работе предлагается адаптивный метод выбора конкурентного окна. Он использует наличие нескольких категорий доступа в EDCA. В предложенном адаптивном методе выбора конкурентного окна каждой из очередей приписывается некоторое значение задержки D , которое очередь старается не превышать. Сообщение с требованием по задержке D_m должно отправляться в очередь с максимальным значением D меньше D_m .

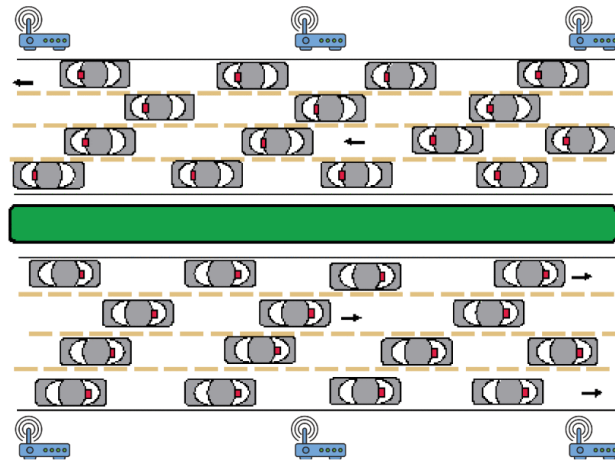


Рис. 2. Рассматриваемый сценарий

Очередь с приписанной задержкой D меняет значение конкурентного окна W следующим образом. Если задержка передачи последнего сообщения равна или превышает D , то очередь уменьшает W до минимального значения:

$$W = W_{\min}.$$

В противном случае очередь меняет W по формуле:

$$W = \min(2W, W_{\max}).$$

Изначально значение конкурентного окна устанавливается равным $W_{\min}$.

5. ИССЛЕДУЕМЫЙ СЦЕНАРИЙ

В данной работе рассматривается сценарий, где транспортные средства движутся вдоль шоссе длиной 1 км [19]. Шоссе имеет две стороны, на каждой из которых находятся 4 полосы шириной по 4 м. Стороны отделены друг от друга разделительной полосой шириной 25 м.

На шоссе находятся 3 типа станций: транспортные средства и объекты придорожной инфраструктуры, использующие стандарт IEEE 802.11p, а также транспортные средства, использующие стандарт IEEE 802.11bd. Все станции имеют один и тот же основной канал. Так как поменять алгоритм выбора конкурентного окна на уже существующих устройствах невозможно, значение конкурентного окна, отличное от $W_{\min}$, используют только транспортные средства 11bd.

Число транспортных средств на двух сторонах шоссе одинаково, а скорости транспортных средств равномерно распределены от 10 до 30 м/с. Транспортные средства не меняют полосу, по которой движутся, и виртуально перемещаются к началу своей стороны дороги, когда достигают конца полосы. В свою очередь, объекты придорожной инфраструктуры неподвижны и расположены на обеих сторонах шоссе на расстоянии 300 м друг от друга. Рассматриваемый сценарий проиллюстрирован на рис. 2.

Транспортные средства 11p ширококовещательно передают базовые сообщения приложений безопасности (англ.: Basic Safety Messages, BSMs), которые содержат информацию о размере, ускорении, скорости и местоположении передающего транспортного средства. Типичная частота генерации и размер данных сообщений равны 10 Гц и 250 байт, соответственно [20].

Помимо сообщений BSM транспортные средства 11bd также передают сообщения для коллективного восприятия окружающей среды (англ.: Cooperative Perception Messages, CPMs),

которые используются для обмена информацией с сенсоров транспортных средств. Размер сообщений CPM зависит от числа машин в радиусе действия сенсоров R . В нашей работе базовый размер сообщений CPM равен 250 байт, а каждое транспортное средство в радиусе $R = 150$ м добавляет к сообщению дополнительные 30 байт [20, 21].

Так как многие из уже внедрённых приложений безопасности основаны на обмене сообщениями BSM, не только устройства 11bd, но и устройства 11p должны иметь возможность их получать. Вследствие этого сообщения BSM передаются с использованием метода доступа EDCA. В свою очередь, сообщения CPM передаются с использованием метода объединения каналов, так как они обеспечивают работу современных приложений безопасности и почти не используются существующими устройствами.

Объекты придорожной инфраструктуры передают сообщения о текущем сигнале светофор (англ.: SPaT) и геометрии перекрестка (англ.: MAP). Эти сообщения содержат информацию о сигнале светофора и геометрии перекрёстка вблизи объекта придорожной инфраструктуры. Станции передают сообщения SPaT и MAP в одном кадре, но частота генерации сообщений SPaT равна 10 Гц, тогда как частота генерации сообщений MAP равна 1 Гц. Типичный размер сообщения SPaT равен 120 байт, тогда как размер объединённого сообщения SPaT+MAP равен 1200 байт [20, 22]. Сообщения SPaT и MAP используются во многих существующих сетях IEEE 802.11p, поэтому передаются с помощью EDCA.

В итоге в рассматриваемом сценарии имеются 3 информационных потока: сообщения BSM, передаваемые от транспортных средств ко всем станциям, сообщения CPM, передаваемые от транспортных средств 11bd к транспортным средствам 11bd, а также сообщения SPaT и MAP, передаваемые от объектов придорожной инфраструктуры к транспортным средствам.

В данной работе мы рассматриваем логнормальную модель распространения, в которой затухание определяется следующей формулой:

$$PL(l) = PL(l_0) + 10\gamma \cdot \lg\left(\frac{l}{l_0}\right), \quad (1)$$

где $\gamma = 2.83$ — это экспонента затухания, $PL(l_0) = 44$ дБ — это затухание сигнала на расстоянии $l_0 = 1$ м, а l — это расстояние от приёмника до передатчика [23]. При передаче используется сигнально-кодовая конструкция под номером один, а мощность передачи равна 23 дБм [24].

6. МЕТРИКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СЕТИ

Основными метриками качества обслуживания в сетях IEEE 802.11p/bd являются задержки передачи сообщений и PLR. PLR вычисляется по формуле (2), где учитываются только станции на той же стороне шоссе, что и передатчик.

$$PLR_m = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N_m} S_m^j}{\sum_{j=1}^{N_m} F_m^j}, \quad (2)$$

где $m \in \{“BSM”, “CPM”, “SPaT”\}$. В свою очередь, N_m — это суммарное число переданных сообщений типа m .

- Для $m = “BSM”$, F_m^j — это суммарное число станции в радиусе $R_s = 150$ м уверенного приема передатчика сообщения j ; S_m^j — это суммарное число станций, которые успешно декодировали сообщение j и находятся в радиусе R от передатчика.

- Для $m = \text{“CPM”}$, F_m^j — это суммарное число транспортных средств 11bd в радиусе R от передатчика сообщения j ; S_m^j — это суммарное число транспортных средств 11bd, которые успешно декодировали сообщение j и находятся в радиусе R от передатчика.
- Для $m = \text{“SPaT”}$, F_m^j — это суммарное число транспортных средств в радиусе R от передатчика сообщения j ; S_m^j — это суммарное число транспортных средств, которые успешно декодировали сообщение j и находятся в радиусе R от передатчика.

Задержка передачи сообщения включает в себя время простоя в очереди, длительность процедуры отсрочки и длительность передачи кадра. Если в очередь на MAC-уровне приходит новое сообщение, а старое сообщение того же типа ещё не передалось, то старое сообщение заменяется новым, а время простоя в очереди и доступа к среде старого сообщения прибавляется к задержке передачи нового.

Для оценки эффективности алгоритма, предложенного в данной работе, рассматривается доля станций с неудовлетворёнными требованиями к качеству обслуживания. У станции не выполнены требования к качеству обслуживания сообщений типа m , если средняя задержка передачи сообщений типа m больше, чем D_m или их PLR больше, чем PLR_m . Для сообщений SPaT, MAP и BSM $D_m = 100$ мс, тогда как для сообщений CPM $D_m = 10$ мс. PLR_m одинаков для всех сообщений и равен 10% [4–6, 25].

Очереди AC_BK приписано значение задержки $D = 100$ мс, а очереди AC_BE приписано значение $D = 10$ мс, поэтому при использовании адаптивного алгоритма выбора конкурентного окна сообщения BSM, SPaT и MAP попадают в очередь AC_BK, а сообщения CPM попадают в очередь AC_BE [26]. При использовании постоянного окна все сообщения попадают в очередь AC_BE.

Для каждого типа трафика m в экспериментах с фиксированным числом устройств оценивалась доля станций V_m для которых не удовлетворены требования по качеству обслуживания. После этого, вычислялась максимальная доля неудовлетворенных станций V следующим образом: $V = \max(V_{BSM}, V_{SPaT}, V_{CPM})$.

Кроме того, для каждого типа трафика m оценивалось максимальное число машин C_m на шоссе, при котором удовлетворяются требования на качество его обслуживания. В качестве метрики работы всей сети использовалось предельное число транспортных средств C , при котором удовлетворены требования на качество обслуживания всех типов трафика, т.е., $C = \min(C_{BSM}, C_{SPaT}, C_{CPM})$.

Все результаты, представленные в разделе 7, получены при помощи среды имитационного моделирования ns-3.

7. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 показана зависимость M_r от суммарного числа транспортных средств на шоссе, когда число транспортных средств 11bd равно числу транспортных средств 11p. На графике находятся четыре кривые, соответствующие двум методам доступа к среде (EDCA и методу объединения каналов из IEEE 802.11bd), а также двум алгоритмам выбора конкурентного окна (адаптивный алгоритм, описанный в разделе 4, и стандартизованное решение, где значение окна постоянно и равно 15).

Из графика видно, что использование адаптивного алгоритма выбора конкурентного окна значительно увеличивает предельное число транспортных средств по сравнению со случаем $W = 15$. Значительный выигрыш адаптивного алгоритма объясняется малым стандартизованным значением конкурентного окна, приводящим к высокому PLR.

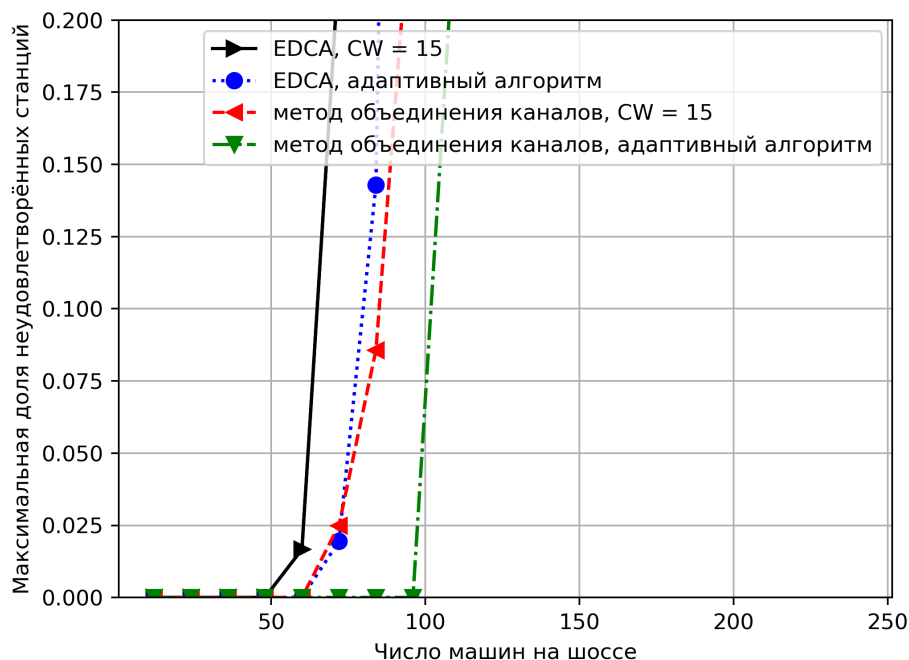


Рис. 3. Зависимость максимальной доли неудовлетворённых станций среди сообщений всех типов от суммарного числа транспортных средств на шоссе.

Таблица 1. Сравнение адаптивного алгоритма выбора конкурентного окна и метода доступа с постоянным значением W .

Алгоритм выбора конкурентного окна	C , EDCA	C , метод объединения каналов
Адаптивный	80	102
Константный, $W = 15$	64	85
Константный, $W = 31$	72	90
Константный, $W = 63$	72	92
Константный, $W = 127$	73	96
Константный, $W = 255$	73	98
Константный, $W = 511$	75	101
Константный, $W = 1023$	60	80

Для краткости в Таблице 1 приведено сравнение адаптивного алгоритма выбора конкурентного окна и метода доступа с постоянным значением W для разных значений W , разрешённых стандартом IEEE 802.11p.

Как видно из таблицы, при некоторых значениях конкурентного окна адаптивный алгоритм даёт значительный выигрыш. Однако при значениях, близких к квазиоптимальному, выигрыш невелик. Тем не менее адаптивный алгоритм обладает тем преимуществом, что он эффективен для широкого спектра сценариев, тогда как квазиоптимальное значение конкурентного окна может меняться при изменении сценария. Чтобы проиллюстрировать это, рассмотрен сценарий, где на шоссе находились только объекты придорожной инфраструктуры и транспортные средства 11bd. Адаптивный алгоритм сравнивается с алгоритмом с постоянным окном $W = 511$, которое показывает наилучший результат среди всех рассмотренных значений W , см. Таблицу 1. Результаты экспериментов приведены на рис. 4.

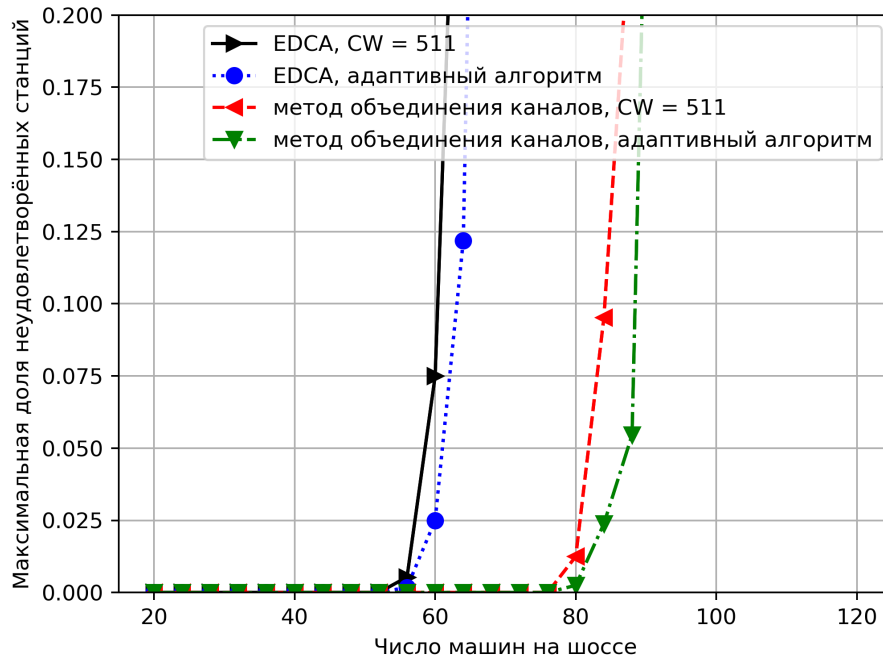


Рис. 4. Зависимость максимальной доли неудовлетворённых станций среди сообщений всех типов от суммарного числа транспортных средств на шоссе для случая, когда на шоссе находятся только транспортные средства 11bd и объекты придорожной инфраструктуры.

Как видно из графика, выигрыш от адаптивного алгоритма выбора конкурентного окна в данном сценарии значительно выше, чем в сценарии, рассмотренном ранее.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был предложен адаптивный алгоритм выбора конкурентного окна в сетях IEEE 802.11bd, который учитывает требования к качеству обслуживания различных типов трафика. С помощью имитационного моделирования было показано, что предложенный алгоритм позволяет значительно повысить долю станций с удовлетворёнными требованиями к качеству обслуживания по сравнению со стандартизованным решением, где окно постоянно и равно 15. Кроме того, было продемонстрировано, что разработанный алгоритм превосходит не только стандартизованное решение, но и метод доступа с постоянным значением конкурентного окна, так как квазиоптимальное значение конкурентного окна может меняться при изменении сценария.

В работе показано, что адаптивный алгоритм повышает качество обслуживания станций как в случае, когда используется метод доступа EDCA, так и в случае, когда используется метод объединения каналов из стандарта IEEE 802.11bd. Из результатов также следует, что разработанный алгоритм эффективен даже тогда, когда он используется только на станциях, работающих по стандарту IEEE 802.11bd.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Belogaev, A. Elokhin, A. Krasilov, E. Khorov, I. F. Akyildiz. Cost-effective v2x task offloading in mec-assisted intelligent transportation systems. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 169010–169023.

2. M. I. Hassan, H. L. Vu, T. Sakurai. Performance analysis of the IEEE 802.11 MAC protocol for DSRC safety applications. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 2011, vol. 60, no. 8, pp. 3882–3896.
3. Z. H. Mir, F. Filali. LTE and IEEE 802.11p for vehicular networking: a performance evaluation. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2014, vol. 2014, no. 1, pp. 89.
4. ASTM E2213-03. Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems. 5-GHz Band Dedicated Short-Range Communications (DSRC), Medium Access Control (MAC), and Physical Layer (PHY) Specifications, 2018.
5. ETSI TR 102 638. Intelligent transport systems (ITS); vehicular communications; basic set of applications; definitions, Version 1.1.1, 2009.
6. 3GPP TR 22.886. Study on enhancement of 3GPP support for 5G V2X services, Version 16.2.0, 2018.
7. H. Hong, Y. Y. Kim, R. Y. Kim, W. Ahn. An effective wide-bandwidth channel access in next-generation WLAN-based V2X communications. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 222.
8. V. Torgunakov, V. Loginov, E. Khorov. A Study of the Impact of the Contention Window on the Performance of IEEE 802.11bd Networks with Channel Bonding. *International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)*, 2021, C. 1–5.
9. V. Torgunakov, V. Loginov, E. Khorov. A Study of Channel Bonding in IEEE 802.11bd Networks. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 25514–25533.
10. I. Jang, D. Lim, J. Choi, J. Kim, E. Park, S. Kim. 20MHz Channel Access in 11bd: Follow-up //document IEEE 802.11-19/1103r0, 2019.
11. O. Haran, R. Toledano. 20MHz Channel Usage in 11bd //document IEEE 802.11-19/0715r0. — 2019.
12. Balon N., Guo J. Increasing broadcast reliability in vehicular ad hoc networks. *Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks*, 2006, pp. 104–105.
13. Yi Wang, A. Ahmed, B. Krishnamachari, K. Psounis. IEEE 802.11p performance evaluation and protocol enhancement. *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, 2008, pp. 317–322.
14. D.B. Rawat, D.C. Popescu, G. Yan, S. Olariu. Enhancing VANET performance by joint adaptation of transmission power and contention window size. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2011, vol. 22, no. 9, pp. 1528–1535.
15. R. Stanica, E. Chaput, A. L. Beylot. Enhancements of IEEE 802.11 p protocol for access control on a VANET control channel. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2011, pp. 1–5.
16. X. Yu, H. Xiao, S. Wang, Y. Li. An adaptive back-off scheme based on improved Markov model for vehicular ad hoc networks. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 67373–67384.
17. C. Choe, J. Ahn, J. Choi, D. Park, M. Kim, S. Ahn. A robust channel access using cooperative reinforcement learning for congested vehicular networks. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 135540–135557.
18. J. MG. An enhancement for IEEE 802.11 p to provision quality of service with context aware channel access for the forward collision avoidance application in vehicular ad hoc network. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 20, pp. 6937.
19. T. ElBatt, S. Goel, V. Kukshya, G. Holland, H. Krishnan, J. Parikh. Communications Performance Evaluation of Cooperative Collision Warning Applications //document IEEE 802.11-05/0764r0, 2005.
20. CAR 2 CAR Communication Consortium TR 2050. Position paper on road safety and road efficiency spectrum needs in the 5.9 GHz for C-ITS and cooperative automated driving, Version 2, 2020.
21. S. Campbell, N. O'Mahony, L. Krpalcova, D. Riordan, J. Walsh, A. Murphy, and C. Ryan. Sensor technology in autonomous vehicles: A review. *29th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*, 2018, pp. 1–4.
22. California CV Testbed — <http://www.caconnectedvehicletestbed.org>.

23. T. T. de Almeida, L. de Carvalho Gomes, F. M. Ortiz, J. G. R. Junior, and L. H. M. Costa. Comparative analysis of a vehicular safety application in ns-3 and veins. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 620–629.
24. O. Haran, R. Toledano, and Y. Shaul. Simulation of Multi-channel Interference //document IEEE 802.11-19/0320r0, 2019.
25. FHWA TR JPO-13-002. Signal phase and timing (spat) applications, communications requirements, communications technology potential solutions, issues and recommendations, 2012.
26. C. Suthaputchakun, A. Ganz. Priority based inter-vehicle communication in vehicular ad-hoc networks using IEEE 802.11 e. *IEEE 65th Vehicular Technology Conference (VTC2007-Spring)*, 2007, pp. 2595–2599.

Contention Window Size Adaptation Algorithm in IEEE 802.11bd Networks

V.A. Torgunakov, V.A. Loginov, E.M. Khorov, A.I. Lyakhov

Nowadays, Vehicle-To-Everything (V2X) networks are actively being developed. Most of the already existing V2X networks are based on the IEEE 802.11p standard. However, these networks can support only basic V2X applications and cannot satisfy the requirements of modern applications. Thus, IEEE started developing a new IEEE 802.11bd standard. An important novelty of this standard is a channel bonding technique that allows transmitting data in several channels simultaneously. One of the approaches that highly boosts the performance of the channel bonding technique is a contention window size adaptation. This paper proposes a contention window size adaptation algorithm that is compatible with the channel bonding technique, easy to implement, does not require any changes in legacy devices, and takes into account quality of service requirements of different types of traffic. Simulation results show that the proposed algorithm increases the maximum density of stations at which the quality of service requirements are still met by 25% compared with the legacy solution.

KEYWORDS: Contention window size adaptation, channel bonding, IEEE 802.11bd, ITS, V2X.