

# Аналитическая модель передачи CBR-потока в сетях Wi-Fi Mesh с помощью механизмов МССА и EDCA

Соломатин И.С., Иванов А.С., Хоров Е.М.

ИППИ РАН

ilya.solomatin@frtk.ru, a.ivanov@iitp.ru, khorov@iitp.ru

**Аннотация** Механизм МССА детерминированного доступа к среде, описанный в стандарте IEEE 802.11s сетей Wi-Fi Mesh, может успешно использоваться в таких сетях для передачи данных с высокими требованиями к качеству обслуживания. Этот механизм позволяет любой станции сети Wi-Fi Mesh зарезервировать последовательность периодических интервалов времени, называемых МССАОР, в течение которых только эта станция имеет право передавать, а станции в ее двухшаговой окрестности — нет. Такой подход защищает передачу данных внутри МССАОР от коллизий и эффекта скрытых станций, однако не позволяет полностью избавиться от ошибок, связанных с интерференцией со стороны станций вне двухшаговой окрестности, а также со случайными помехами в канале. При этом дополнительное время на совершение повторных попыток передач может быть обеспечено как путем резервирования более частых МССАОР, так и с помощью использования механизма случайного доступа EDCA вне интервалов МССАОР. В данной работе исследуется одновременное использование механизмов EDCA и МССА с целью компенсации недостатка времени для повторных попыток передач.

**Keywords:** Wi-Fi, МССА, EDCA, CBR, QoS

## 1 Введение

На данный момент Wi-Fi [1] является одной из самых быстроразвивающихся сетевых технологий. Необходимость объединять в сети портативные устройства, датчики (сенсоры) и носимые устройства (wearables) обеспечивает стремительный рост требований к беспроводным сетям, что приводит к регулярной разработке новых дополнений к стандарту IEEE 802.11. Технология Wi-Fi Mesh (IEEE 802.11s) является одним из таких дополнений и позволяет объединять устройства в распределенную одноранговую сеть с возможностью автоматического подключения и организации сети. Wi-Fi Mesh использует механизм детерминированного доступа к среде МССА (Mesh coordination function Controlled Channel Access), позволяющий станции сети резервировать некоторые промежутки времени для бесконкурентной передачи данных. Такой подход позволяет ослабить действие эффекта

скрытых станций, имеющего значительное влияние при использовании механизма случайного доступа EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) и тем самым обеспечить более надежную передачу чтобы удовлетворить требования пользователей сети к качеству обслуживания (QoS-требования).

При использовании МССА любая станция сети может зарезервировать несколько периодически повторяющихся интервалов времени одинаковой длительности для бесконкурентной передачи данных внутри этих интервалов от станции-владельца резервирования к станции-адресату резервирования и доставки кадра подтверждения от адресата владельцу. Такие интервалы называются МССАОР (МССА ОРportunity).

Для определения положения резервирований во времени, станции делят время на равные по длительности DTIM-интервалы. Зарезервированные интервалы времени находятся внутри DTIM-интервалов и описываются такими параметрами, как длительность каждого зарезервированного интервала (МССАОР duration), число зарезервированных интервалов внутри одного DTIM-интервала (МССАОР periodicity) и смещение первого зарезервированного интервала относительно начала DTIM-интервала (МССАОР offset).

Чтобы избежать пересечения резервирований соседних станций, станции сети периодически рассылают друг другу информацию о своих резервированиях и резервированиях своих соседей. Это позволяет почти полностью сократить взаимное влияние станций, находящихся в двухшаговой окрестности друг от друга, но не защищает от интерференции от станций, находящихся дальше двухшаговой окрестности. По этой причине даже при использовании МССА могут иметь место ошибки передачи, приводящие к недостатку канальных ресурсов, если резервирования были сделаны без учета повторных попыток передачи. Данная работа посвящена исследованию возможности компенсации недостатка канальных ресурсов с помощью использования метода случайного доступа вне зарезервированных интервалов и сравнение эффективности такого подхода с использованием МССА.

Дальнейшее изложение работы построим следующим образом. В разделе 2 дается более точная постановка задачи. В разделе 3 упоминаются работы, посвященные как исследованию механизма МССА, так и некоторых аспектов совместного использования МССА и EDCA. В разделах 4 и 5 строится математическая модель, а затем представлены результаты аналитического моделирования. Итог работы и направление дальнейших исследований приведены в разделе 6.

## 2 Постановка задачи

Рассмотрим передачу потока данных постоянной интенсивности (CBR-поток) между двумя станциями сети Wi-Fi Mesh.

Пакеты такого потока поступают в очередь станции через равные промежутки времени  $T_{in}$ .

К передаче потока предъявляются QoS-требования в виде ограничений на время доставки  $D_{QoS}$  и долю потерянных пакетов  $PLR_{QoS}$ .

Для передачи данных используются методы как случайного (EDCA), так и детерминированного (MCCA) доступа к каналу. Станция-отправитель и станция-получатель устанавливают резервирование с периодом  $T_{res}$  следования МССАОР. При этом считается, что длительность каждого МССАОР рассчитана только на одну попытку передачи пакета. В то же время станция может передавать пакеты вне МССАОР, используя для этого механизм EDCA. Считается, что станция передает с помощью случайного доступа только те пакеты, которые устареют к началу следующего МССАОР, предпринимая при этом не более  $r$  попыток передачи для каждого пакета. Более того, также считается, что для совершения этих передач достаточно времени вне МССАОР.

Станция обслуживает очередь пакетов согласно политике FIFO (First In, First Out), т.е. первым передается пакет, который провел в очереди наибольшее время. Пакет покидает очередь только в двух случаях: пакет успешно передан, либо время, которое он провел в очереди, стало больше  $D = D_{QoS} - R$ , где  $R$  — это минимальное время, достаточное для передачи одного пакета и получения подтверждения о его доставке.

Ошибки при передаче пакетов считаются случайными и независимыми. Вероятность неуспешной передачи пакета внутри интервала МССАОР равна  $q_{MCCA}$ , а вероятность неуспешной попытки передачи с помощью EDCA равна  $q_{EDCA}$ .

Для описанной системы требуется рассчитать такие параметры системы  $r$  и  $T_{res}$ , при которых передача потока удовлетворяет QoS-требованиям, а потребление канальных ресурсов минимально.

### 3 Обзор существующих работ

Согласно стандарту IEEE 802.11s [2], все устройства сети должны поддерживать механизм EDCA и, возможно, дополнительно механизм МССА. Этот стандарт умалчивает о том, как должны быть выбраны параметры резервирования для выполнения QoS-требований. Данная проблема была рассмотрена в [3] для CBR-потока.

Стандарт также не определяет многие аспекты подхода, связанного с совместным использованием механизмов случайного и детерминированного доступа. В [4] было исследовано, как должна вести себя станция, выигравшая соревнование за доступ к каналу при использовании EDCA, но не способная вести передачу из-за перекрытия с резервированием станции-соседа. При этом, однако, не рассматривалось, как именно эти два механизма могут использоваться одновременно. В данной же работе рассматривается конкретный алгоритм сочетания работы механизмов EDCA и МССА.

## 4 Математическая модель

### 4.1 Цепь Маркова

Разобьем время на слоты длительности  $\tau = \text{text}(T_{res}, T_{in})$  так, чтобы начало каждого зарезервированного интервала совпадало с началом некоторого слота. Выразим величины  $T_{res}$  и  $T_{in}$  в слотах:

$$t_{res} = \frac{T_{res}}{\tau}, t_{in} = \frac{T_{in}}{\tau}, t_{res}, t_{in} \in \mathbb{N}.$$

Процесс передачи будем описывать с помощью цепи Маркова с дискретным временем. Цепь Маркова наблюдается в начале каждого интервала МССАОР.

Состояние системы будем описывать единственным параметром  $h$ , равным целому числу слотов, которое самый старший (головной) пакет провел в очереди. Значение  $h$  может быть как положительным, так и отрицательным.  $h < 0$  в случае, когда очередь пуста, причем  $|h|$  — это число слотов, оставшихся до поступления в очередь следующего пакета.

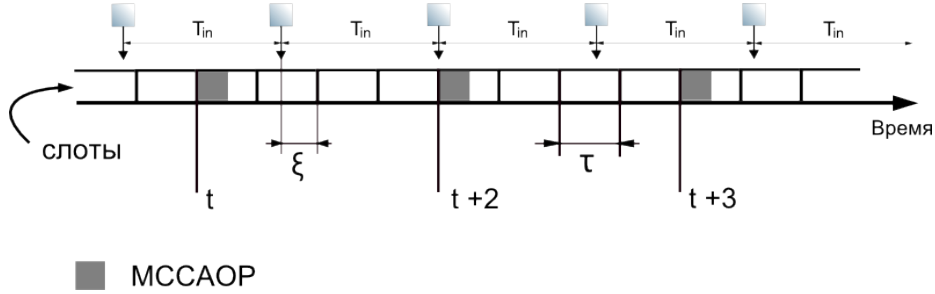


Рис. 1: Дискретное время цепи Маркова

Определим пределы, в которых изменяется параметр  $h$ . Минимальное значение  $h$  равно  $t_{res} - t_{in}$  и достигается, когда пакет поступает в пустую очередь непосредственно перед началом МССАОР и передается успешно.

Пакет поступает в очередь в некоторый момент времени внутри слота. Пусть  $\xi$  — это время между поступлением пакета в очередь и началом следующего слота. Поскольку период  $T_{in}$  равен целому числу  $t_{in}$  слотов, значение  $\xi$  одинаково для всех пакетов. В момент времени  $t$  полное время ожидания в очереди для головного пакета окажется равным  $h(t)\tau + \xi$ . Ввиду наличия требования на задержку доставки  $D_{QoS}$ , должно выполняться условие  $h(t)\tau + \xi \leq D_{QoS}$ , откуда получаем, что  $h(t) \leq d = \lfloor \frac{D-\xi}{\tau} \rfloor$ . Таким образом, значение  $h$  лежит в диапазоне  $t_{res} - t_{in} \leq h \leq \lfloor \frac{D-\xi}{\tau} \rfloor$ .

Рассмотрим возможные переходы между состояниями цепи Маркова. Пусть в момент времени  $t$  система находится в состоянии  $h(t)$ .

1.  $h(t) < 0$  соответствует пустой очереди. Тогда если  $t_{res} < |h(t)|$ , то к началу следующего МССАОР очередь всё еще будет пустой, а  $h(t+1)$  примет значение  $h(t)+t_{res}$ . Если же  $t_{res} \geq |h(t)|$ , то к началу следующего МССАОР в очереди уже будет пакет, а его возраст будет равен  $h(t)+t_{res}$ . Таким образом, если  $h(t) < 0$ , всегда происходит переход в состояние  $h(t+1) = h(t) + t_{res}$ .
2. Если  $0 \leq h(t) \leq d - t_{res}$ , то очередь не пуста, причем головной пакет не устареет к началу следующего интервала МССАОР. Тогда возможны следующие варианты:
  - С вероятностью  $q_{MCCA}$  пакет не будет передан в интервале МССАОР и система перейдет в состояние  $h(t+1) = h(t) + t_{res}$ .
  - С вероятностью  $(1 - q_{MCCA})$  пакет будет передан с использованием МССА и произойдет переход в состояние  $h(t+1) = h(t) - t_{in} + t_{res}$ .
3. Если  $d - t_{res} < h(t) \leq d$ , то головной пакет устареет к началу следующего МССАОР и в любом случае покинет очередь. Кроме того, если  $t_{res} > t_{in}$ , то дополнительно покинут очередь еще  $k = \lceil \frac{h(t) - d + t_{res}}{t_{in}} \rceil$  пакетов. Тогда произойдет переход в состояние  $h(t+1) = h(t) - kt_{in} + t_{res}$ .

Все рассмотренные переходы и их вероятности представлены в таблице 1.

Таблица 1: Возможные переходы системы из состояния  $h$

Конечное состояние	Вероятность перехода	Условие перехода
$h + t_{res}$	$\theta = 1$	$h < 0$
$h - t_{in} + t_{res}$	$\theta = 1 - q_{MCCA}$	$0 \leq h \leq d - t_{res}$
$h + t_{res}$	$\theta = q_{MCCA}$	$0 \leq h \leq d - t_{res}$
$h - kt_{in} + t_{res}$	$\theta = 1$	$d - t_{res} < h \leq d$

Составив матрицу переходных вероятностей, получим стационарное распределение вероятностей состояний системы  $\vec{\pi}_h = (\pi_{t_{res}-t_{in}}, \dots, \pi_d)^T$ .

## 4.2 Определение PLR

Пакеты отбрасываются только при переходе из состояния  $h > d - t_{res}$ . Пусть при переходе из такого состояния устареет  $k + 1$  пакет. С вероятностью  $1 - q_{MCCA}$  старший из них будет успешно передан и покинет очередь. В таком случае для передачи с использованием случайного доступа останется  $k$  пакетов. Вероятность неуспешной передачи одного пакета с использованием EDCA равна  $q_{EDCA}^r$ . Тогда мат. ожидание числа отброшенных пакетов составит  $kq_{EDCA}^r$ . Если же головной пакет не был успешно передан, то после интервала МССАОР останется  $k + 1$  устаревающих пакетов, и мат. ожидание числа отброшенных пакетов будет равно

$(k+1)q_{EDCA}^r$ . Таким образом, в среднем за один шаг цепи Маркова отбрасывается  $\sum_{h>d-t_{res}} \pi_h q_{EDCA}^r (k+q_{MCCA})$  пакетов. Поделив это число на среднее число пакетов  $T_{res}/T_{in} \equiv t_{res}/t_{in}$ , поступающих в очередь за единицу времени цепи Маркова, получаем значение PLR:

$$PLR = \frac{t_{in}}{t_{res}} \sum_{h>d-t_{res}} \pi_h q_{EDCA}^r (k+q_{MCCA}).$$

### 4.3 Определение доли используемых канальных ресурсов

Доля времени, зарезервированного с помощью МССА, равна  $\eta_{MCCA} = \frac{R}{T_{res}}$ . Найдем долю времени, используемого станцией-отправителем для передачи данных с помощью EDCA.

Пусть в начале зарезервированного интервала времени устаревают  $k+1$  пакет. С вероятностью  $1-q_{MCCA}$  один из них будет успешно передан и покинет очередь. В таком случае для передачи с использованием случайного доступа останется  $k$  пакетов, и будет предпринято в среднем  $k\bar{E}$  попыток передач, где  $\bar{E} = \frac{1-q_{EDCA}^r}{1-q_{EDCA}}$  — среднее число попыток передачи одного пакета с использованием EDCA. Если же головной пакет не был успешно передан, то после интервала МССАОР останется  $k+1$  устаревающих пакетов, и в среднем будет предпринято  $(k+1)\bar{E}$  попыток передач.

Таким образом, доля канального времени, используемого для передачи с использованием EDCA, равна:

$$\eta_{EDCA} = \frac{R}{T_{res}} \bar{E} \sum_{h>d-t_{res}} \pi_h (k+q_{MCCA}).$$

Полное потребление канальных ресурсов равно:

$$\eta(T_{res}, r) = \eta_{MCCA} + \eta_{EDCA} = \frac{R}{T_{res}} \left( 1 + \frac{1-q_{EDCA}^r}{1-q_{EDCA}} \sum_{h>d-t_{res}} \pi_h (k+q_{MCCA}) \right).$$

## 5 Численные результаты

Применим модель, разработанную в разделе 4, к поиску оптимальных параметров  $r$  и  $T_{res}$ , при которых выполнены QoS-требования, т.е. выполнено ограничение на  $PLR_{QoS}$  при заданном  $D_{QoS}$ . Рассмотрим CBR-поток с  $T_{in} = 20$  мс. Считаем, что  $\xi = 0$ , т.е. пакеты поступают в очередь в началах слотов. Рассмотрим различные пары вероятностей ошибок:  $q_{EDCA} = 0,6$  и  $q_{MCCA} = 0,2$ ,  $q_{EDCA} = 0,6$  и  $q_{MCCA} = 0,1$ ,  $q_{EDCA} = 0,3$  и  $q_{MCCA} = 0,2$ ;  $q_{EDCA} = 0,3$  и  $q_{MCCA} = 0,1$ . Значение  $PLR_{QoS}$  равно 1%. При этом рассмотрим различные значения допустимой задержки:  $D = 30$  мс, 50 мс, 100 мс, 150 мс. На рис. 2 изображены полученные с помощью аналитической модели зависимости  $PLR(T_{res}, r)$  для различных вероятностей неуспешной передачи для случая  $D_{QoS} = 50$  мс. Соответствующие этому случаю зависимости  $\eta(T_{res}, r)$  представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 2, зависимость  $PLR(T_{res}, r)$  не является монотонной по  $T_{res}$ . Это связано с тем, что при определенных значениях  $T_{res}$  попыток для передачи пакета может оказаться на одну больше, чем при соседних значениях  $T_{res}$ . Подробное объяснение этому явлению дано в [5].

Для каждого фиксированного  $r$  выберем такое  $T_{res}^*(r)$ , при котором выполнены QoS-требования, а потребление канальных ресурсов минимально:

$$T_{res}^*(r) = \arg \min_{T_{res}: PLR(T_{res}, r) \leq PLR_{QoS}} \eta(T_{res}, r).$$

Зависимости  $T_{res}^*(r)$  для различных значений задержек  $D_{QoS}$  представлены на рис. 4.

Нагрузка на канал, минимально достижимая при конкретном значении  $r$ , равна

$$\eta^*(r) = \eta(T_{res}^*(r), r).$$

Зависимости  $\eta^*(r)$  представлены на рис. 5. В конце концов оптимальные параметры  $(T_{res}^{opt}, r^{opt})$  определяются следующим образом:

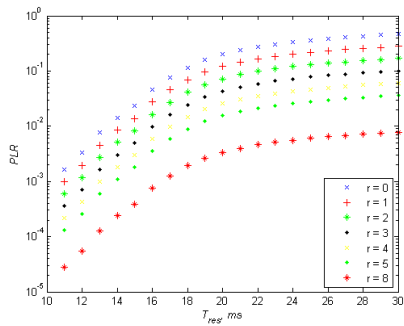
$$r^{opt} = \arg \min_r \eta^*(r), \quad T_{res}^{opt} = T_{res}^*(r^{opt}).$$

Точки на прямой  $r = 0$  соответствуют использованию только механизма МССА. Зависимости  $\eta^*(r)$  показывают, что существуют такие значения параметра  $r$ , при которых совместное использование механизмов EDCA и МССА позволяет сократить долю потребляемых канальных ресурсов по сравнению с использованием лишь МССА. К примеру, в таблице 2 указан относительный выигрыш в доле потребляемых канальных ресурсов при  $q_{EDCA} = 0,6$ ,  $q_{MCCA} = 0,2$  и оптимальные значения количества попыток передачи  $r^{opt}$ , при которых этот выигрыш достигается.

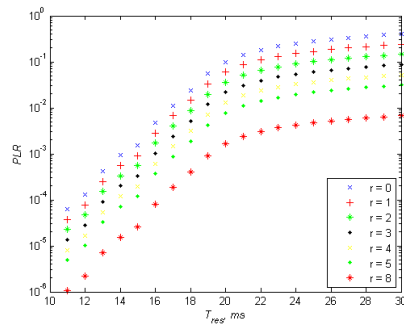
Таблица 2: Относительный выигрыш в доле потребляемых канальных ресурсов

$D_{QoS}$	$r^{opt}$	$\frac{\eta_{MCCA} - \eta_{min}}{\eta_{MCCA}}$
30 мс	6	28,9%
50 мс	3	12,9%
100 мс	2	3,75%
150 мс	1	5,2%

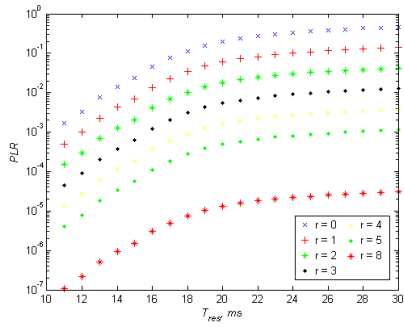
EDCA невыгодно использовать в случае  $D_{QoS} = 150$  мс когда  $q_{EDCA} = 0,6$  и  $q_{MCCA} = 0,1$ . Это связано с тем, что  $q_{MCCA}$  много меньше  $q_{EDCA}$ , а ограничение на время доставки пакета относительно велико.



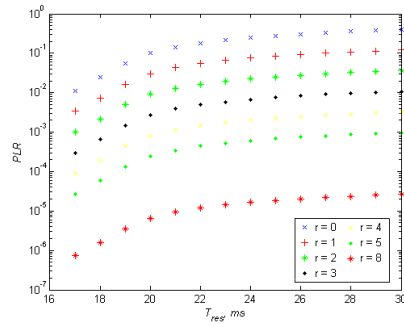
(a)  $q_{EDCA} = 0,6, q_{MCCA} = 0,2$



(b)  $q_{EDCA} = 0,6, q_{MCCA} = 0,1$



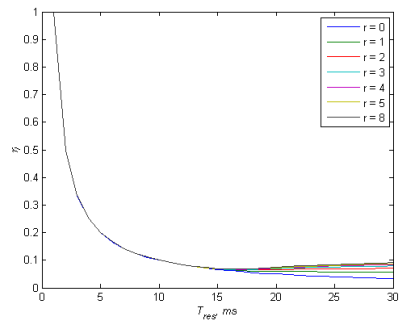
(c)  $q_{EDCA} = 0,3, q_{MCCA} = 0,2$



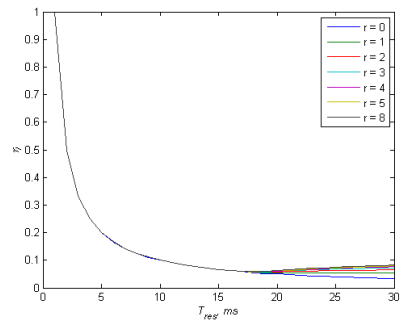
(d)  $q_{EDCA} = 0,3, q_{MCCA} = 0,1$

Рис. 2: Зависимость  $PLR(T_{res}, r)$  для  $T_{in} = 20$  мс,  $D_{QoS} = 50$  мс,  $PLR_{QoS} = 0,1\%$

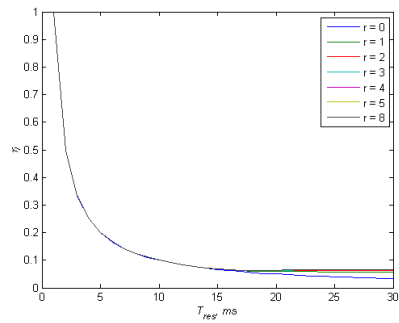




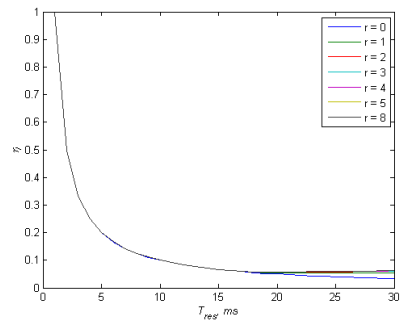
(a)  $q_{EDCA} = 0,6, q_{MCCA} = 0,2$



(b)  $q_{EDCA} = 0,6, q_{MCCA} = 0,1$

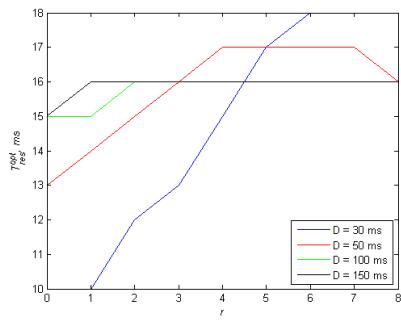


(c)  $q_{EDCA} = 0,3, q_{MCCA} = 0,2$

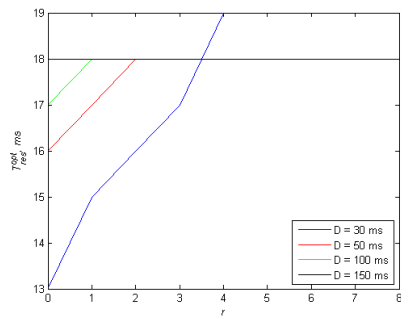


(d)  $q_{EDCA} = 0,3, q_{MCCA} = 0,1$

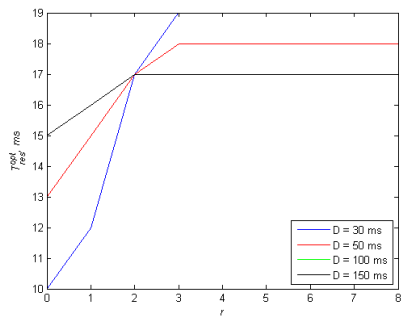
Рис. 3: Зависимость  $\eta(T_{res}, r)$  для  $T_{in} = 20$  мс,  $D_{QoS} = 50$  мс,  $PLR_{QoS} = 0,1\%$ .



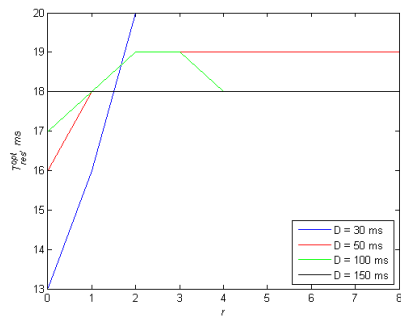
(a)  $q_{EDCA} = 0,6, q_{MCCA} = 0,2$



(b)  $q_{EDCA} = 0,6, q_{MCCA} = 0,1$

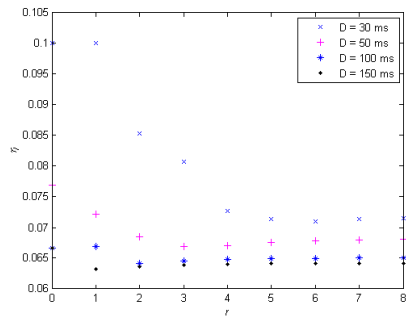


(c)  $q_{EDCA} = 0,3, q_{MCCA} = 0,2$

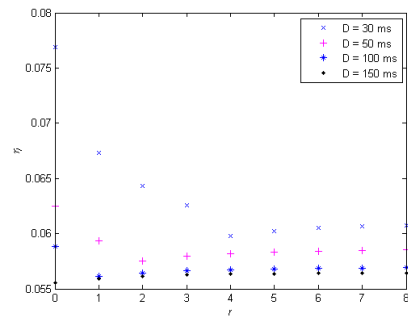


(d)  $q_{EDCA} = 0,3, q_{MCCA} = 0,1$

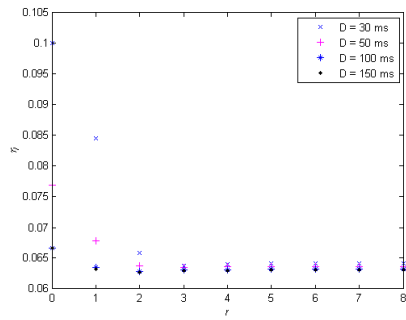
Рис. 4: Зависимость  $T_{res}^*(r)$  для  $T_{in} = 20$  мс,  $PLR_{QoS} = 0,1\%$ .



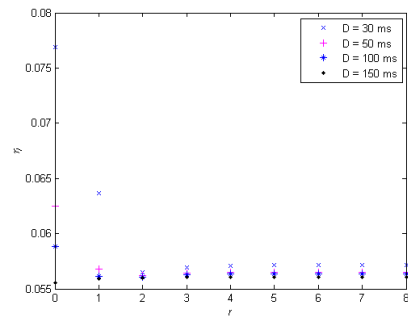
(a)  $q_{EDCA} = 0,6, q_{MCCA} = 0,2$



(b)  $q_{EDCA} = 0,6, q_{MCCA} = 0,1$



(c)  $q_{EDCA} = 0,3, q_{MCCA} = 0,2$



(d)  $q_{EDCA} = 0,3, q_{MCCA} = 0,1$

Рис. 5: Зависимость  $\eta^*(r)$  для  $T_{in} = 20$  мс,  $PLR_{QoS} = 0,1\%$ .

## 6 Заключение

В данной работе исследовано одновременное использование механизмов случайного и детерминированного доступа для передачи потока постоянной интенсивности в условиях помех. Построена аналитическая модель, позволяющая определить параметры одновременного использования этих двух механизмов, при которых удовлетворены QoS-требования, а потребление канальных ресурсов минимально.

В результате было установлено, что совместное использование механизмов EDCA и МССА позволяет существенно сократить расход канальных ресурсов по сравнению с использованием только механизма детерминированного доступа.

В ближайшем будущем будет рассмотрено одновременное использование механизмов EDCA и МССА для потока переменной интенсивности (VBR-потока).

## Список литературы

1. IEEE. — IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2012.
2. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications – Amendment 10: Mesh Networking, 2011.
3. Analytical Model of IEEE 802.11s MCCAbased Streaming in the Presence of Noise / Evgeny Shvets, Andrey Lyakhov, Alexander Safonov, Evgeny Khorov // SIGMETRICS Perform. Eval. Rev. — 2011. — Vol. 39, no. 2. — P. 38–40. — URL: <http://doi.acm.org/10.1145/2034832.2034841>.
4. Krasilov A.N., Lyakhov A.I., Moroz Yu.I. Analytical model of interaction between contention-based and deterministic channel access mechanisms in Wi-Fi Mesh networks // Automation and Remote Control. — 2013. — Vol. 74, no. 10. — P. 1696–1709. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S000511791310010X>.
5. Ivanov A.S., Lyakhov A.I., Khorov E.M. Analytical model of batch flow multihop transmission in wireless networks with channel reservations // Automation and Remote Control. — 2015. — Vol. 76, no. 7. — P. 1179–1192. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S0005117915070048>.