

Анализ методов передачи потоковых данных с использованием МССА

Красилов А.Н.
ИППИ РАН
krasilov@iitp.ru

Швец Е.А.
ИППИ РАН
leednee@iitp.ru

Аннотация

В стандарте IEEE 802.11s, регламентирующем работу mesh-сетей на базе технологии Wi-Fi, был предложен метод детерминированного доступа к среде передачи данных – МССА. Данный метод позволяет станциям mesh-сети заблаговременно резервировать временные интервалы для передачи данных, что, в свою очередь, является очень удобным для передачи потоков с постоянной интенсивностью (например, аудио-потоков). Однако, стандарт IEEE 802.11s не дает никакого руководства по использованию метода МССА. В данной работе предлагаются несколько методов организации передачи потоковых данных с помощью МССА: с использованием подтверждений и без. Мы рассматриваем, как эффективность предложенных методов зависит от таких параметров сценария, как отношение сигнал-шум в канале и требования к качеству обслуживания, предъявляемые при передаче потоков, и находим области эффективности предложенных методов. Также мы рассматриваем как использование механизма агрегирования пакетов влияет на эффективность предложенных методов.

1. Введение

В последние годы во всем мире отмечается колоссальный рост объемов передаваемой мультимедийной информации, связанный с развитием Интернета и ростом рынка мультимедийных услуг. Помимо требований к широкой полосе, такой тип трафика накладывает ограничения на время доставки пакета и вероятность его потери, то есть предъявляет определенные требования к качеству обслуживания (Quality of Service) – QoS-требования. Формализовать эти требования можно так: каждый пакет должен быть доставлен от станции-отправителя станции-получателю не более чем за время D^{QoS} , а доля пакетов, не доставленных станции-получателю

или доставленных не вовремя, не должна превышать PLR^{QoS} . В данной работе исследуется проблема передачи потоковых данных, предъявляющих требования QoS, в многошаговых беспроводных сетях (mesh-сетях), построенных на базе стандарта IEEE 802.11s [1].

Возможность предоставления QoS в беспроводных сетях в значительной степени определяется используемым методом доступа к среде. В стандарте IEEE 802.11s определены два принципиально различных метода доступа к среде: метод случайного доступа (EDCA) и метод детерминированного доступа (МССА). Как показано во многих работах [2, 3, 4] метод случайного доступа не гарантирует QoS в многошаговых сетях ввиду проблемы скрытых станций. Для решения этой проблемы в стандарте IEEE 802.11s был предложен метод детерминированного доступа, который позволяет станциям mesh-сети заблаговременно резервировать временные интервалы для передачи данных. Каждое МССА-резервирование (далее резервирование) представляет собой набор временных интервалов одинаковой длительности, расположенных на равном расстоянии друг от друга. Использование фиксированных резервирований является очень удобным для передачи потоков с постоянной интенсивностью. Однако, стандарт IEEE 802.11s не регламентирует, как использовать метод МССА.

Рассмотрим, какие задачи необходимо решить для того, чтобы организовать передачу потока с заданными требованиями к качеству обслуживания с использованием МССА. Во-первых, QoS-требования при передаче потока в многошаговой сети предъявляются "из конца в конец". Однако пакеты передаются по каждому из шагов маршрута последовательно. Поэтому необходим алгоритм, который позволяет каким-либо образом распределить QoS-требования между шагами передачи. Иными словами необходим алгоритм, который для каждого шага i будет назначать требования D_i^{QoS} и PLR_i^{QoS} таким образом, чтобы $\sum_i D_i^{QoS} \leq D^{QoS}$ и $\prod_i (1 - PLR_i^{QoS}) \geq (1 - PLR^{QoS})$. Во-вторых, в виду того, что в канале возможны по-

тери пакетов из-за помех, на каждом шаге i необходимо организовать резервирование (или несколько резервирований) таким образом, чтобы с учетом возможных повторных передач выполнялись требования D_i^{QoS} и PLR_i^{QoS} . При этом передача пакетов внутри интервалов резервирований может осуществляться с использованием механизма подтверждений или без. В первом случае, для обеспечения требования PLR_i^{QoS} передачу пакета необходимо повторять до тех пор, пока не будет получено подтверждение или не истечет время D_i^{QoS} , отведенное на его передачу. Во втором случае необходимо заранее спланировать повторные передачи пакета таким образом, чтобы вероятность его потери заведомо не превышала заданный порог PLR_i^{QoS} .

Для решения описанных выше задач в работе предлагаются несколько методов организации резервирований для передачи потоков с заданными требованиями к качеству обслуживания и проводится их сравнительный анализ. Для упрощения исследований рассматривается передача потоков постоянной интенсивности с фиксированным размером пакета. Примером таких потоков являются аудио-потоки. Также в работе учитывается влияние механизма агрегирования пакетов (т.е. объединение нескольких подряд идущих пакетов в один) на эффективность предложенных методов. Заметим, что агрегирование пакетов снижает накладные расходы при передаче пакетов, однако вносит дополнительную задержку, т.н. "задержку агрегирования", которую необходимо учитывать при установлении резервирований.

2. Анализируемые Методы

Рассмотрим один из методов передачи потоковых данных с помощью МССА, использующий механизм подтверждения передачи. Этот метод подробно описан в работе [5]. При использовании данного метода требование на задержку делится между шагами маршрута: i -му шагу отводится время D_i^{QoS} для передачи, $\sum_i D_i^{QoS} = D^{QoS}$. Каждая станция использует специальную очередь для хранения пакетов, которые необходимо передать. Станция устанавливает ровно одно резервирование, и в каждом интервале резервирования передает первый пакет из очереди. Пакет удаляется из очереди, если после его передачи было получено подтверждение, либо истекло время D_i^{QoS} , отведенное на его передачу. Доля потерянных на каждом шаге пакетов может быть оценена при помощи модели, описанной в [5]. Зная доли потерянных пакетов на каждом шаге, легко оценить долю потерянных пакетов на всем маршруте.

Два других метода передачи, анализируемые в данной статье, не используют механизм подтверждений.

При использовании первого метода без подтвер-

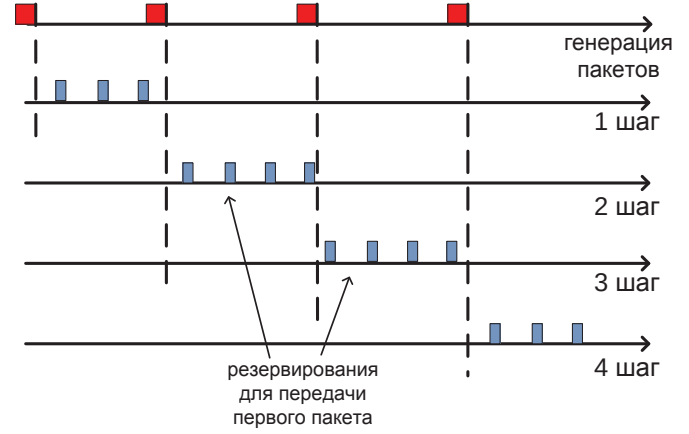


Рис. 1. Передача пакета первым методом без подтверждений

ждений каждая станция-ретранслятор устанавливает ровно одну серию резервирований и хранит только один пакет в очереди. Если новый пакет поступает на передачу, старый пакет удаляется из очереди. Рассмотрим пока случай, когда не происходит агрегирования на МАС-уровне. Вторая станция на маршруте начинает передачу пакета (ретранслирует пакет) только после того, как первая станция гарантированно закончила его передачу (т.е. после того как на первой станции появился новый пакет на передачу). Третья станция начинает передачу пакета, когда ее гарантированно закончила вторая станция, и т.д. Принцип передачи показан на рис. 1.

Пусть отношение периода прихода пакетов t_λ к периоду установленного резервирования t_c равно $t_\lambda/t_c = n + x$, $n \in \mathbb{N}$, $x \in [0, 1)$. Тогда доля x пакетов будет иметь $n + 1$ возможность для передачи, и доля $1 - x$ пакетов будет иметь n возможностей для передачи. Пусть вероятность ошибки попытки передачи пакета равна q . Тогда доля пакетов, которые не были успешно переданы при использовании данного метода, равна

$$PLR = xq^{n+1} + (1-x)q^n. \quad (1)$$

Пусть время, необходимое для осуществления одной попытки передачи пакета, равно R . Тогда максимальная задержка, которая может возникнуть при передаче пакета по N -шаговому маршруту, равна $N(t_\lambda + R)$.

Рассмотрим теперь случай, когда происходит агрегирование пакетов на МАС-уровне. Мы предполагаем, что только первая станция может проводить агрегирование на МАС-уровне, а следующие станции просто ретранслируют пакеты, полученные от первой станции. Пусть первая станция на маршруте агрегирует каждые k сгенерированных пакетов. Можно считать, что пакеты агрегируются до того,

как поступают в очередь на передачу, которая содержит не более одного пакета. Тогда эффективный период прихода пакетов становится равным kt_λ . Задержка при передаче пакетов по N -шаговому маршруту становится равной $N(kt_\lambda + R')$, $R' > R$. Как мы видим, агрегирование пакетов при использовании такого метода значительно увеличивает задержку, и поэтому часто является невозможным. Следующий метод позволяет избежать подобной проблемы.

Предыдущий метод обеспечивал n возможностей для передачи доле пакетов $1-x$ и $n+1$ возможность доле пакетов x . Для этого каждая станция устанавливала одну серию резервирований. При передаче с использованием второго метода без подтверждений каждая станция устанавливает несколько серий резервирований. Каждая станция стремится расположить все резервирования, предназначенные для передачи пакета, сразу после момента его поступления в очередь. Для этого она устанавливает n серий резервирований с периодом резервирований равным периоду прихода пакетов. Резервирования "притыкуются" друг к другу, но отделены некоторым малым интервалом для того, чтобы продолжительная помеха не повлияла на передачу сразу в двух последовательных резервированиях. Для обеспечения дополнительной попытки передачи для доли x пакетов станция устанавливает дополнительные серии более редких резервирований. Например, если $x = 0,7$, станции может установить два дополнительных резервирования: с периодом $2t_\lambda$ и $4t_\lambda$ – тогда 0,75 пакетов получают дополнительную попытку передачи. Это несколько больше, чем необходимо, однако более точное обеспечение требуемого значения слишком сильно увеличивает число используемых серий резервирований.

При использовании этого метода каждая следующая станция может начинать передачу пакета сразу после завершения последней попытки его передачи предыдущей станцией. Задержка при передаче может быть очень малой: если время между последовательными резервированиями, предназначенными для передачи одного пакета, равно $T_{ин}$, то задержка при передаче на всем маршруте, может быть оценена как $N(R + T_{ин})(n+1)$. Пример организации резервирований с использованием данного метода приведен на рис.2. Как уже говорилось выше, данный метод хорошо подходит для передачи, если используется агрегирование. Однако данный метод имеет и недостаток: для функционирования данного метода каждая станция устанавливает несколько серий резервирований, что увеличивает накладные расходы на рекламу резервирований. Поэтому данный метод следует использовать только в том случае, если использование предыдущего метода невозможно из-за ограничений на задержку.

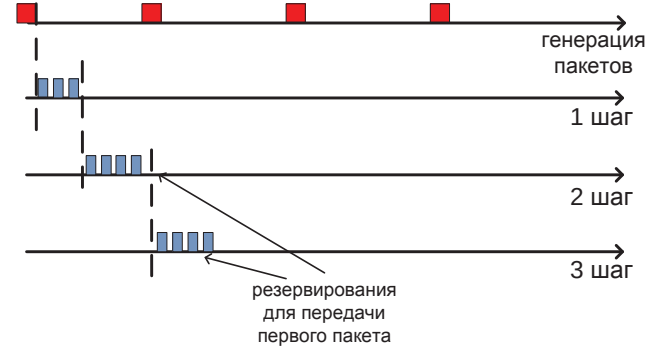


Рис. 2. Передача пакета вторым методом без подтверждений

3. Методология экспериментов

При сравнении методов мы рассматриваем оптимизированные схемы резервирований, то есть мы предполагаем, что каждый метод используется таким образом, что обеспечивается необходимое качество обслуживания и потребляется минимальный каналный ресурс. Рассмотрим, как мы организуем передачу с использованием различных методов.

Для метода с подтверждениями мы делим D^{QoS} поровну между шагами, предполагаем, что все станции устанавливают резервирование с одинаковым периодом и при помощи модели [5] находим максимальный период резервирований, позволяющий обеспечить требования к качеству обслуживания. Хотя деление доступной задержки поровну между шагами не является оптимальным методом деления, и установка резервирований с одинаковым периодом не является оптимальной схемой резервирований, такой прием существенно облегчает поиск решения и не уступает значительно оптимальному решению.

Для построения оптимальной схемы для методов без подтверждений требование PLR^{QoS} делится поровну между шагами, и на каждом шаге при помощи формулы (1) находится минимальное количество передач на пакет, которые необходимо зарезервировать.

Критерий, который используется для сравнения различных методов, – создаваемая ими нагрузка на канал ξ . При использовании каждого из методов каждая станция-ретранслятор устанавливает одну или несколько серий резервирований. Нагрузка на канал на k -ом шаге равна $\xi_k = \sum_i T/t_{ck}^i$, где T – длительность одного резервирования, а t_{ck}^i – период i -ой серии резервирований на k -ом шаге. Общая нагрузка при передаче равна $\xi = \sum_k \xi_k$.

Обратим внимание, что два метода без подтверждений обеспечивают совершенно одинаковое каче-

Таблица 1. Значения параметров протокола 802.11

SIFS	16 мс
PIFS	25 мс
ACK	44 мс

ство обслуживания, если пакетам в среднем предоставляется одинаковое количество возможностей повторных передач. Поэтому далее на графиках мы изображаем результаты, соответствующие этим методам, одной линией. Как было сказано выше, первый метод является предпочтительным в силу меньших накладных расходов, и второй следует использовать, только когда высокая степень агрегирования пакетов делает использование первого метода невозможным.

В данной работе мы предполагаем, что передача ведется на минимальной скорости, допустимой физическим уровнем IEEE 802.11 [6] – 6 Мбит/сек, поскольку использование более высоких скоростей является нецелесообразным при высоком уровне помех. Однако это является не ключевым предположением, и результаты работы могут быть легко обобщены на сценарии, когда используется произвольная скорость передачи. Для оценки вероятности ошибки q при передаче пакета на скорости 6 Мбит/с используется формула зависимости q от отношения сигнал-шум SNR и полезной нагрузки пакета L :

$$q = 1 - \left(1 - \frac{1}{2} \exp\left(-\exp\left(\frac{SNR + 5.7829}{3.4952}\right)\right)\right)^{8 \cdot L + 22},$$

см. [7]. Здесь L – размер пакета после присоединения к нему IP-, UDP-, MAC-заголовков и агрегирования на MAC-уровне. Агрегирование проводится методом A-MSDU [8] – то есть к нескольким пакетам, поступившим с IP-уровня, прикрепляется один MAC-заголовок.

Согласно правилам доступа к среде стандарта IEEE 802.11 [6], длительность одного МССА-резервирования равна $T_{packet} + SIFS + ACK + PIFS$ в случае передачи с подтверждением и $T_{packet} + PIFS$ в случае передачи без подтверждения. Здесь $PIFS$ и $SIFS$ – длительности интервалов между передачами, а ACK – время, необходимое для передачи кадра подтверждения. Значения этих параметров приведены в таблице 1.

Учитывая размер преамбулы и заголовок физического уровня, согласно стандарту IEEE 802.11 [6], длительность передачи пакета (в мкс) может быть вычислена по формуле:

$$T_{packet} = \left(20 + \left\lceil \frac{L \cdot 8 + 22}{4 \cdot Rate} \right\rceil \cdot 4\right),$$

где $Rate = 6$ Мбит/с.

В следующем разделе мы рассматриваем различные сценарии, отличающиеся длиной маршрута, степенью агрегирования и используемыми для передачи методами.

4. Численные результаты

На рис. 3 приведены результаты исследования сценария передачи потока с $t_\lambda = 20$ мс, $D^{QoS} = 150$ мс, $PLR^{QoS} = 1\%$ по трехшаговому маршруту с использованием различных методов передачи и различных степеней агрегирования на MAC-уровне. На этом и следующем рисунках подпись к графику "X Ack" ("X NoAck") означает, что на MAC-уровне проводится агрегирование таким образом, что пакеты поступают на передачу каждые X мс, при этом используется метод с подтверждениями (без подтверждений). Как видно из графиков, при низких отношениях сигнал-шум агрегирование пакетов является невыгодным (поскольку агрегирование увеличивает и без того большую вероятность ошибки при передаче), а передачу следует осуществлять методом с использованием подтверждений (поскольку это позволяет избежать большого количества повторных передач).

Относительная эффективность метода без подтверждений растет с увеличением отношения сигнал-шум; однако только при очень высоких отношениях он становится предпочтительным. Это происходит, потому что практически всегда пакеты передаются с первой попытки, и нет необходимости их повторять. Отсутствие подтверждений, в свою очередь, уменьшает накладные расходы.

Рассмотрим теперь графики на рис. 4. Здесь сценарий аналогичен предыдущему, однако пакеты на уровне приложений генерируются в два раза чаще ($t_\lambda = 10$ мс). Обратим внимание, что в этом случае агрегирование выгодно даже при довольно низ-

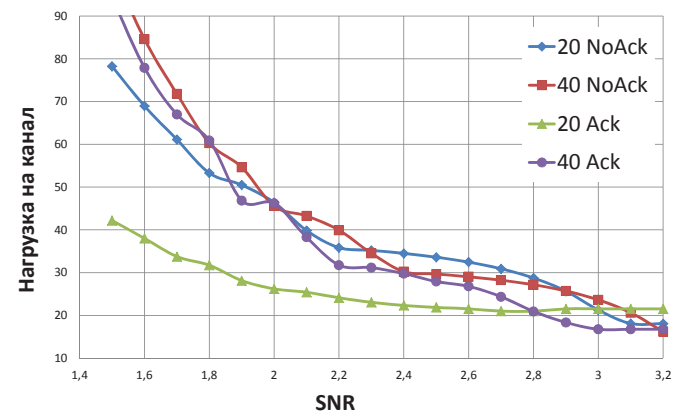


Рис. 3. $t_\lambda = 20$ мс, передача на трех шагах

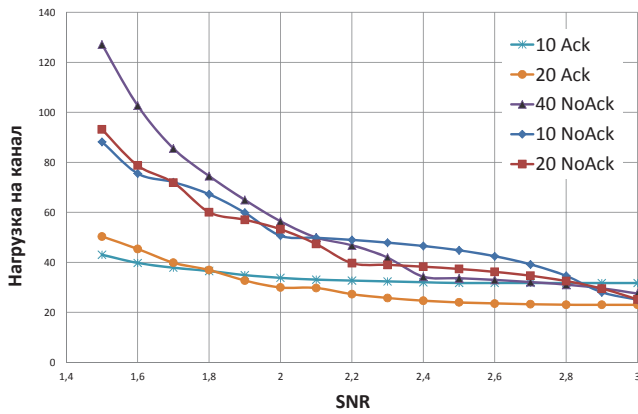


Рис. 4. $t_\lambda = 10$ мс, передача на трех шагах

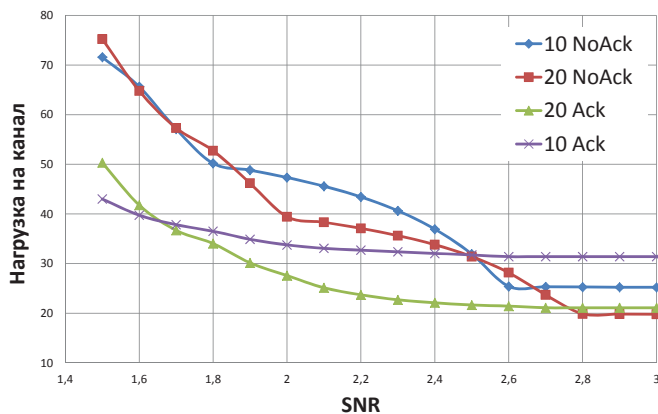


Рис. 5. $t_\lambda = 10$ мс, передача на одном шаге

ких отношениях сигнал-шум. Это объясняется тем, что отсутствие агрегирования приводит к слишком частой отправке пакетов и очень высоким накладным расходам.

На рис. 5 приведены результаты исследования передачи потока по одношаговому маршруту, $t_\lambda = 20$ мс, $D^{QoS} = 150$ мс, $PLR^{QoS} = 1\%$. Способ передачи без подтверждений работает тем лучше, чем меньше число шагов в маршруте – поскольку в этом случае QoS-требования на каждый шаг оказываются менее строгими, и поэтому на каждом шаге "можно" потерять больше пакетов; и поэтому область относительной эффективности метода без использования подтверждений увеличивается. Однако, как видно из рисунка, даже в этом случае метод с использованием подтверждений все равно является предпочтительным в широком диапазоне значений отношения сигнал-шум. Это означает, что метод с использованием подтверждений является в целом более надежным и эффективным методом передачи.

5. Выводы и направления дальнейшей работы

В данной работе рассмотрены и проанализированы различные методы передачи мультимедийных потоков в mesh-сети с использованием детерминированного метода доступа МССА в условиях помех. Рассмотрены методы с использованием подтверждений и без. Также рассмотрено влияние агрегирования на MAC-уровне на эффективность предложенных методов. Численные результаты показали, что метод передачи с использованием подтверждений является предпочтительным практически всегда, за исключением сценариев с очень высоким отношением сигнал-шум. Агрегирование на MAC-уровне является выгодным только при высоких значениях отношения сигнал-шум и при высокой частоте генерации пакетов, когда агрегирование позволяет снизить накладные расходы.

Обратим внимание на один нюанс, о котором не говорится в данной работе. В стандарте IEEE 802.11s регламентируется, что вне зависимости от того используется или нет механизм подтверждений, во время интервалов МССА-резервирования сосед как приемника, так и передатчика не должны передавать. Это является оправданным, в случае использования механизма подтверждений. Однако, если получатель не передает подтверждение, то сосед получателя, не являющийся соседом отправителя в интервале МССА-резервирования могут принимать другой пакет, а сосед отправителя, не являющийся соседом получателя – передавать пакет. Так, на рис. 6, если станция А использует МССА-резервирование для передачи пакета без подтверждения станции В, станция С может параллельно передавать пакет некоторой станции, а станция Е может принимать пакет от некоторой станции. Лишь станция D не может ни принимать, ни передавать. Таким образом, метод без использования под-

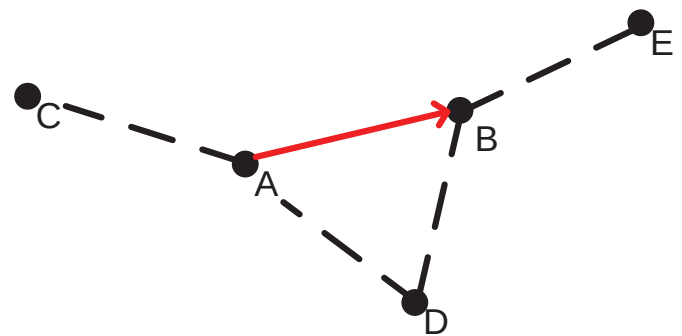


Рис. 6. Односторонняя интерференция при использовании МССА

тверждений получает некоторое преимущество, если учесть этот эффект и изменить соответствующим образом правила МССА. Фактически, передача без использования механизма подтверждений потребляет меньше канального ресурса, чем такая же по длительности передача с подтверждением. Дальнейшее сравнение рассматриваемых методов должно быть проведено с учетом этого эффекта.

Данная работа предполагает, что каждое МССА-резервирование устанавливается для передачи только одного конкретного потока. Однако, если станции необходимо передать два потока одновременно одному и тому же получателю, то она может установить более частое резервирование и использовать это резервирование для передачи сразу двух потоков. Такой метод называется мультиплексированием и потенциально может увеличить эффективность передачи с использованием подтверждений. Поэтому одно из направлений дальнейшей работы – это разработка и сравнение методов мультиплексирования.

Список литературы

- [1] *IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems – LAN/MAN Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Amendment 10: Mesh Networking*, September 2011.
- [2] Xu S. and Saadawi T., “Does the IEEE 802.11 MAC protocol work well in multihop wireless ad hoc networks?,” *IEEE Comm. Magazine*, vol. 39, no. 6, pp. 130–137, 2001.
- [3] Lyakhov A., Pustogarov I., and Gudilov A., “IEEE 802.11 direct links: Interference classification and modeling,” in *Selected Lectures on Multiple Access and Queueing Systems. Revised Selected Papers from International Workshop on Multiple Access Communications (MACOM-2008)*, pp. 15–24, Saint-Petersburg, Russia, 16–17th June, 2008.
- [4] Krasilov A., “Physical model based interference classification and analysis,” *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 6235/2010, pp. 1–12, 2010.
- [5] E. Shvets and A. Lyakhov, “Mathematical model of MCCA-based streaming process in mesh networks in the presence of noise,” in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference WCNC 2012*, April 2012.
- [6] *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*, 2007.
- [7] A. Lyakhov and M. Yakimov, “Analytical study of QoS oriented multicast in wireless networks,” in *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Volume 2011, March 2011.

- [8] *IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks. Part11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Amendment 5: High Throughput*, 2009.

Работа выполнена в рамках проектов «Методы плавного снижения качества передачи видеопотока при возникновении перегрузок в широкополосных беспроводных сетях» и «Методы обеспечения качества обслуживания при доступе к широкополосным мультимедийным услугам в беспроводных самоорганизующихся сетях» в соответствии с грантами Министерства образования и науки России (заявки №2012-1.3.1-12-000-2011-006 и №2012-1.2.1-12-000-2006-009).