

УДК 621.396.4

ОЦЕНКА ЗАГРУЗКИ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ Mobile WiMAX*Моисеев С.Н., Филин С.А., Кондаков М.С.***Введение**

Модель загрузки беспроводной сети передачи данных традиционно используется в алгоритмах управления доступом новых пользователей в сеть. Загрузка сети характеризует степень использования системных ресурсов. Когда все ресурсы системы заняты, новые пользователи в сеть не допускаются.

Существует несколько моделей загрузки. В [1], [2] загрузка равна количеству пользователей в секторе. Эта модель не учитывает разные величины трафиков пользователей с мультимедийными данными, а также разные условия приёма пользователей. Авторы [3], [4] определяют загрузку как количество каналов, занятых в секторе. Этот подход игнорирует мощность передачи, которая является ограниченным системным ресурсом. Пропускная способность используется как мера загрузки в [5], [6]. Эта метрика является не информативной. Она численно не характеризует степень использования ресурса, особенно когда система перегружена. В системах с кодовым разделением каналов загрузка традиционно связана с величиной внутрисистемных помех [7], [8]. Это хороший подход для систем с кодовым разделением каналов, однако не подходит для других систем.

В статье рассматривается беспроводная сеть передачи данных на основе множественного доступа с частотно-временным разделением (OFDMA – orthogonal frequency division multiple access) с временным дуплексом. Примером может служить беспроводная сеть Mobile WiMAX [9]. В статье описывается модель загрузки сети OFDMA, а также предлагаются быстрые практические алгоритмы оценки загрузки, как для сети OFDMA с частотным, так и многопользовательским разнесением.

Модель загрузки

Модель загрузки беспроводной сети передачи данных должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Выражение для загрузки должно явно включать ресурсы сети, причём только общие ресурсы сети.
2. Загрузка должна быть нормирована на все доступные общие ресурсы сети.
3. Загрузка должна равняться минимальному требуемому размеру ресурсов сети. Минимум должен находиться при условии, что требования по качеству обслуживания (QoS – quality of service) выполняются

Представлена модель загрузки беспроводной сети передачи данных OFDMA, включающая в себя загрузку прямого и обратного каналов, загрузку сектора и сети в целом. Предложены быстрые алгоритмы оценки загрузки для частотного и многопользовательского разнесения. Предложенные модель и алгоритмы быстрого расчёта могут применяться в алгоритмах управления доступом новых пользователей в сеть, а также в алгоритмах горизонтального и вертикального «хэндовера».

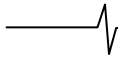
для всех пользователей сети.

Исходя из этих требований загрузку сети можно определить следующим образом:

- Загрузка равна минимальному размеру нормализованных общих ресурсов системы, необходимых пользователям.
- Минимальный размер общих ресурсов системы нормализован на размер всех общих ресурсов системы.
- Минимальный размер нормализованных общих ресурсов системы, необходимых пользователям, вычисляется при условии выполнения требований QoS всех пользователей.

Используем это определение для разработки модели загрузки беспроводной сети передачи данных OFDMA. Рассмотрим сеть OFDMA, включающую несколько секторов и несколько пользователей. Сектора передают данные пользователям в прямом канале, а пользователи – данные секторам в обратном канале. Каждый пользователь может иметь несколько сервисных потоков в прямом и обратном каналах, где сервисный поток – это поток блоков данных некоторого сервиса. Разные сервисные потоки могут иметь разные трафики.

Сеть использует технологию передачи данных на ортогональных по частоте поднесущих (OFDM – orthogonal frequency division multiplexing), множественный доступ OFDMA и временной дуплекс. Каждый сектор использует кадры для передачи данных прямого и обратного каналов. Кадр включает кадр прямого канала и кадр обратного канала, причём граница между кадрами прямого и обратного каналов может адаптивно меняться. Во временной области кадр состоит из временных слотов, каждый из которых содержит один или несколько символов OFDM, а в частотной области – из частотных подканалов, каждый из которых содержит несколько поднесущих. Временные слоты и частотные подканалы образуют частотно-временной ресурс кадра, часть которого назначается каждому сервисному потоку для передачи.



При использовании частотного разнесения поднесущие частотного подканала псевдослучайно разносятся по всему спектру сигнала OFDM. Несмотря на то, что каждому сервисному потоку принадлежит только часть поднесущих, условия приёма этого сервисного потока характеризуются средними по символу OFDM условиями приёма. Таким образом достигается усреднение частотно-селективных замираний и помех. При использовании многопользовательского разнесения частотному подканалу соответствует группа соседних поднесущих в сигнале OFDM. При этом на заданном частотном подканале условия приёма разные для разных пользователей, а у заданного пользователя условия приёма разные на разных частотных подканалах. Назначая частотный подканал пользователю с наилучшими условиями приёма, в этом подканале можно получить выигрыш от многопользовательского разнесения в пропускной способности.

Когда частотный подканал назначен сервисному потоку, этому сервисному потоку также назначается схема кодирования-модуляции и мощность передачи в частотном подканале. Сектор и пользователи имеют ограничения на максимальную мощность передачи. Блоки данных сервисных потоков должны передаваться с заданным уровнем QoS. Набор требований QoS включает минимальную среднюю скорость передачи, максимальную среднюю задержку передачи и вероятность ошибки. Все эти требования QoS в системе OFDMA могут быть выполнены выбором соответствующего значения мощности передачи [10-13]. При передаче сервисных потоков в рассматриваемой системе OFDMA доступны следующие параметры адаптации: положение границы между кадрами прямого и обратного каналов, номера назначенных частотных подканалов, номера выбранных схем кодирования-модуляции, а также значения мощности передачи.

Предлагаемая модель загрузки беспроводной сети передачи данных OFDMA включает загрузку прямого и обратного каналов, загрузку сектора, а также загрузку сети. Для вычисления каждой из этих загрузок используется следующий подход. Сначала записывается выражение для величины нормализованных общих ресурсов сети, потребляемых всеми пользователями, как функция от параметров адаптации. Затем это выражение минимизируется по параметрам адаптации при ограничении на индивидуальные ресурсы сети при условии выполнения требований QoS для всех пользователей.

Рассмотрим обратный канал. Общим ресурсом системы является частотно-временной ресурс кадра обратного канала. Мощности передачи пользователей являются индивидуальными ресурсами системы. Параметры адаптации включают частотные подканалы, схемы кодирования-модуляции и мощности передачи.

Потребляемый пользователями нормализованный общий системный ресурс обратного канала s^{UL} может быть записан как

$$s^{UL} = S^{UL} / S_{max}^{UL},$$

где S^{UL} – частотно-временной ресурс обратного канала, потребляемый пользователями, а S_{max}^{UL} – весь частотно-временной ресурс обратного канала.

Для нахождения загрузки обратного канала u^{UL} необходимо решить следующую задачу условной оптимизации

$$u^{UL} = \min_{\mathbf{q}^{UL}, \mathbf{p}^{UL}, \mathbf{f}^{UL}} (s^{UL}), P_i^{UL} \leq P_{max,i}^{UL}, P_{i,j,\ell}^{UL} \geq P_{i,j,\ell}^{QoS}, \quad (1)$$

где \mathbf{q}^{UL} – множество схем кодирования и модуляции, назначенных сервисным потокам в обратном канале, \mathbf{p}^{UL} – множество значений мощности передачи, назначенных сервисным потокам в обратном канале, \mathbf{f}^{UL} – множество частотных подканалов, назначенных сервисным потокам в обратном канале. P_i^{UL} и $P_{max,i}^{UL}$ – мощность передачи и максимальное значение мощности передачи пользователя i , $P_{i,j,\ell}^{UL}$ – значение мощности передачи, назначенное сервисному потоку j пользователя i в частотном подканале ℓ , а $P_{i,j,\ell}^{QoS}$ – минимальное значение мощности передачи, которое должно быть назначено сервисному потоку j пользователя i в частотном подканале ℓ для того, чтобы удовлетворить требования QoS этого сервисного потока.

Рассмотрим прямой канал. Общими ресурсами системы являются частотно-временной ресурс кадра прямого канала, а также мощность передачи сектора. Параметры адаптации включают частотные подканалы, схемы кодирования-модуляции и мощности передачи.

Нормализованный общий частотно-временной ресурс s^{DL} может быть получен как

$$s^{DL} = S^{DL} / S_{max}^{DL},$$

где S^{DL} – частотно-временной ресурс кадра прямого канала, потребляемый всеми пользователями, а S_{max}^{DL} – весь частотно-временной ресурс кадра прямого канала.

Нормализованный общий мощностной ресурс прямого канала ρ^{DL} равен

$$\rho^{DL} = P^{DL} / P_{max}^{DL},$$

где P^{DL} – мощность прямого канала, потребляемая всеми пользователями, а P_{max}^{DL} – максимальная мощность передачи сектора.

Для получения загрузки прямого канала u^{DL} необходимо объединить два разнородных общих системных ресурса, а именно частотно-временной ресурс s^{DL} и мощностной ресурс ρ^{DL} . Это невозможно сделать с помощью линейной функции. Наилучшей нелинейной функцией для этого является $\max(s^{DL}, \rho^{DL})$ [14]. Соответственно, выражение для потреблённого ресурса прямого канала U^{DL} имеет вид

$$U^{DL} = \max(s^{DL}, \rho^{DL}).$$

Для нахождения загрузки прямого канала u^{DL} необходимо решить следующую задачу условной оптимизации

$$u^{DL} = \min_{\mathbf{q}^{DL}, \mathbf{p}^{DL}, \mathbf{f}^{DL}} (U^{DL}), P_{i,j,\ell}^{DL} \geq P_{i,j,\ell}^{QoS}, \quad (2)$$

где \mathbf{q}^{DL} – множество схем кодирования и модуляции, назначенных сервисным потокам в прямом канале, \mathbf{p}^{DL} – множество значений мощности передачи, на-

значенных сервисным потокам в прямом канале, \mathbf{f}^{DL} – множество частотных подканалов, назначенных сервисным потокам в прямом канале; $p_{i,j,\ell}^{DL}$ – значение мощности передачи, назначенное сервисному потоку j пользователя i в частотном подканале ℓ , а $p_{i,j,\ell}^{QoS}$ – минимальное значение мощности передачи, которое должно быть назначено сервисному потоку j пользователя i в частотном подканале ℓ для того, чтобы удовлетворить требования QoS этого сервисного потока.

Рассмотрим сектор. Общими ресурсами сектора являются ресурсы прямого и обратного каналов. К параметрам адаптации прямого и обратного каналов добавляется новый параметр, а именно положение границы t между кадрами прямого и обратного каналов. Соответственно, загрузка сектора с номером k равна

$$u_k = \min_t \left[\max(u_k^{UL}, u_k^{DL}) \right]. \quad (3)$$

Наконец, **рассмотрим всю беспроводную сеть** передачи данных OFDMA, включающую K секторов. Загрузка сети характеризуется множеством загрузок её секторов

$$\mathbf{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_K\}.$$

Быстрый расчёт загрузки

Задачи условной оптимизации (1) для обратного канала, (2) для прямого канала и (3) для сектора имеют следующие сложности. Целевые функции и условия являются нелинейными функциями параметров адаптации, а область определения целевых функций, задаваемая граничными условиями, имеет сложную форму. Кроме того, часть параметров адаптации имеет дискретную, а часть – непрерывную область значений. Эти сложности делают невозможным аналитическое решение поставленных оптимизационных задач. Оптимальное решение полным перебором не приемлемо на практике. В статье предлагаются быстрые практические алгоритмы решения задач условной оптимизации (1)-(3). Они несколько отличаются для частотного и многопользовательского разнесений.

Загрузка сектора может быть найдена в два шага. На первом шаге положение границы между кадрами прямого и обратного каналов выбирается так, что кадр делится между прямым и обратным каналами пропорционально суммарным средним скоростям трафиков прямого и обратного каналов. Это положение границы не учитывает разные условия приёма пользователей. Для этого положения границы находим загрузку прямого и обратного каналов способом, описанным далее.

На втором шаге задаём положение границы между кадрами таким образом, чтобы разделить частотно-временной ресурс кадра между прямым и обратным каналами пропорционально их загрузкам, найденным на первом шаге. Для нового положения границы находим загрузку прямого и обратного каналов.

Загрузку сектора можно найти по формуле(3), используя загрузки прямого и обратного каналов, найденные на первом шаге. Это значение загрузки секто-

ра можно использовать как окончательную оценку загрузки сектора. Для уточнения этой оценки можно провести прямой поиск минимума загрузки сектора вблизи положения границы между кадрами, найденного на втором шаге.

Как отмечалось ранее, при использовании частотно-го разнесения условия приёма сервисного потока характеризуются средними по символу OFDM условиями приёма. Соответственно, не играет роли, какие частотные подканалы назначены этому сервисному потоку. Соответственно, задача условной оптимизации (2) для нахождения загрузки прямого канала u^{DL} упрощается

$$u^{DL} = \min_{q_{1,1}^{DL}, p_{1,1}^{DL}} (U^{DL}), \quad p_{1,1}^{DL} \geq p_{1,1}^{QoS}. \quad (4)$$

Предлагается решать задачу (4) итеративно. Количество итераций равно количеству сервисных потоков прямого канала всех пользователей.

На первой итерации выбирается один пользователь и один сервисный поток этого пользователя и решается оптимизационная задача

$$q_{1,1}^{DL,opt} = \arg \min_{q_{1,1}^{DL}} \left(\max(s_{1,1}^{DL}, \rho_{1,1}^{DL}) \right), \quad (5)$$

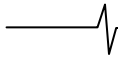
используя полный перебор по номерам схем кодирования-модуляции и $p_{1,1}^{DL,opt} = p_{1,1}^{DL}(q_{1,1}^{DL})$. В (5) значения $s_{1,1}^{DL}$ и $\rho_{1,1}^{DL}$ вычисляются при условии, что только один сервисный поток (1,1) расположен в кадре прямого канала. Примеры вычисления значения мощности передачи $p_{1,1}^{DL}$ как функции от номера схемы кодирования-модуляции $q_{1,1}^{DL}$, требований QoS и условий приёма приведены в [10–12]. После того как оптимизационная задача (5) решена, для сервисного потока (1,1) окончательно фиксируют схему кодирования и модуляции $q_{1,1}^{DL,opt}$ и мощность передачи $p_{1,1}^{DL,opt}$.

На второй итерации опять выбирают одного пользователя и один сервисный поток этого пользователя и решают оптимизационную задачу

$$q_{2,2}^{DL,opt} = \arg \min_{q_{2,2}^{DL}} \left(\max(s_{1,1}^{DL,opt} + s_{2,2}^{DL}, \rho_{1,1}^{DL,opt} + \rho_{2,2}^{DL}) \right), \quad (6)$$

используя полный перебор и $p_{2,2}^{DL,opt} = p_{2,2}^{DL}(q_{2,2}^{DL})$. В (6) значения $s_{1,1}^{DL,opt}$ и $\rho_{1,1}^{DL,opt}$ уже рассчитаны на первой итерации для $q_{1,1}^{DL,opt}$ и $p_{1,1}^{DL,opt}$, а значения $s_{2,2}^{DL}$ и $\rho_{2,2}^{DL}$ вычисляются при условии, что сервисный поток (1,1) был ранее размещён в кадре с параметрами $q_{1,1}^{DL,opt}$ и $p_{1,1}^{DL,opt}$, а сервисный поток (2,2) дополнительно размещён в кадре прямого канала. В конце второй итерации для сервисного потока (2,2) окончательно фиксируют схему кодирования-модуляции $q_{2,2}^{DL,opt}$ и мощность передачи $p_{2,2}^{DL,opt}$. Отметим, что обозначения (1,1) и (2,2) условные. Например, на первой итерации может быть выбран второй сервисный поток третьего пользователя, а на второй итерации – первый сервисный поток того же третьего пользователя системы.

Итерации продолжаются до тех пор, пока не будут рассмотрены все сервисные потоки всех пользователей прямого канала. Отметим, что на каждой итерации оптимизационная задача решается только для одного сервисного потока одного пользователя, что существенно быстрее одновременного полного перебора по всем сервисным потокам.



Наша модель загрузки беспроводной сети передачи данных OFDMA численно характеризует загрузку, как в незагруженной, так и в перегруженной ситуациях. Соответственно, быстрые алгоритмы оценки загрузки также должны это учитывать. Когда кадр прямого канала перегружен, т.е. невозможно разместить в кадре все сервисные потоки (занят весь частотно-временной ресурс) или при размещении $\rho^{DL} > 1$ (занят весь мощностной ресурс), используется следующая процедура. Сначала размещают как можно больше сервисных потоков в кадре прямого канала при условии, что $u^{DL} \leq 1$. Затем условно добавляют второй кадр прямого канала, такой же как и первый кадр, под первым кадром прямого канала. Размещают как можно больше сервисных потоков во втором кадре прямого канала при условии, что $u^{DL} \leq 1$. Это условие проверяется отдельно для второго кадра. Подобная процедура продолжается до тех пор, пока все сервисные потоки не будут размещены. После этого вычисляют загрузку прямого канала по всем использованным кадрам прямого канала. При этом суммируют размеры занятого частотно-временного ресурса всех кадров прямого канала для получения s^{DL} . Кроме того, суммируют использованную мощность передачи всех кадров прямого канала для получения ρ^{DL} (поэтому новые кадры размещаются под старыми кадрами).

Возможны различные критерии для выбора одного пользователя и одного сервисного потока этого пользователя на каждой итерации. Для частотного разнесения предлагается следующий критерий. Пользователи выбираются, начиная с пользователя с наихудшими условиями приёма, после чего последовательно рассматриваются все сервисные потоки прямого канала этого пользователя. При этом сервисные потоки выбираются, начиная с сервисного потока с максимальной средней скоростью трафика.

При использовании многопользовательского разнесения необходимо решить полную оптимизационную задачу (2) для нахождения загрузки прямого канала u^{DL} . Предлагается следующий итеративный алгоритм.

На первой итерации выбирают один сервисный поток и один частотный подканал прямого канала и решают оптимизационную задачу

$$q_{1,1,1}^{DL,opt} = \arg \min \left(\max \left(s_{1,1,1}^{DL}, \rho_{1,1,1}^{DL} \right) \right), \quad (7)$$

используя полный перебор и $p_{1,1,1}^{DL,opt} = p_{1,1,1}^{DL} \left(q_{1,1,1}^{DL} \right)$. В (7) значения $s_{1,1,1}^{DL}$ и $\rho_{1,1,1}^{DL}$ вычисляются при условии, что только один сервисный поток (1,1) расположен в одном частотном подканале (1). После того как задача (7) решена, частотный подканал (1), схема кодирования $q_{1,1,1}^{DL,opt}$ и мощность передачи $p_{1,1,1}^{DL,opt}$ окончательно назначаются сервисному потоку (1,1).

На второй итерации выбирается новый сервисный поток и новый частотный подканал, и решается задача

$$q_{2,2,2}^{DL,opt} = \arg \min \left(\max \left(s_{1,1,1}^{DL,opt} + s_{2,2,2}^{DL}, \rho_{1,1,1}^{DL,opt} + \rho_{2,2,2}^{DL} \right) \right), \quad (8)$$

используя полный перебор и $p_{2,2,2}^{DL,opt} = p_{2,2,2}^{QoS} \left(q_{2,2,2}^{DL} \right)$. В (8) значения $s_{2,2,2}^{DL}$ и $\rho_{2,2,2}^{DL}$ вычисляются при условии, что сервисный поток (1,1) уже размещён в частотном

подканале (1) с параметрами $q_{1,1,1}^{DL,opt}$ и $p_{1,1,1}^{DL,opt}$, а сервисные потоки (2,2) дополнительно размещён в частотном подканале (2).

Итерации продолжают до тех пор, пока все сервисные потоки прямого канала не будут рассмотрены. Отметим, что на каждой итерации оптимизация осуществляется для одного сервисного потока, что существенно быстрее оптимального решения. В случае перегрузки кадра прямого канала поступают аналогично случаю частотного разнесения. В случае многопользовательского разнесения на каждой итерации выбирают один сервисный поток и один частотный подканал с наилучшими условиями приёма.

В обратном канале ограничения на максимальную мощность передачи (1) имеют распределённый по пользователям характер. Соответственно, в случае частотного разнесения оптимизационная задача (1) может быть разделена на несколько независимых подзадач

$$u_i^{UL} = \min_{q_{i,j}^{UL}, p_{i,j}^{UL}} \left(s_i^{UL} \right), P_i^{UL} \leq P_{max,i}^{UL}, p_{i,j}^{UL} \geq p_{i,j}^{QoS}, \quad (9)$$

где

$$u^{UL} = \sum_i u_i^{UL}. \quad (10)$$

Предлагается следующий подход для решения каждой из задач (9). Сначала, всем сервисным потокам обратного канала рассматриваемого пользователя назначают схему кодирования-модуляции с максимальной скоростью передачи и соответствующее значение мощности передачи $p_{i,j}^{UL} = p_{i,j}^{UL} \left(q_{i,j}^{UL} \right)$, при котором выполняются требования QoS. Затем, итеративно уменьшают скорость передачи сервисных потоков до тех пор, пока ограничение на максимальную мощность передачи пользователя не будет удовлетворено. Отметим, что при уменьшении скорости передачи соответствующее ей значение мощности передачи $p_{i,j}^{UL}$, при котором удовлетворяются требования QoS, также уменьшается. Когда оптимизационные задачи (9) решены для всех пользователей, загрузка обратного канала u^{UL} находится по формуле (10).

В случае многопользовательского разнесения, оптимизационная задача (1) не может быть разделена на независимые подзадачи. Тем не менее, ограничения на максимальную мощность передачи также являются распределёнными. Поэтому предлагается решать задачу (1), последовательно рассматривая пользователей начиная с пользователя с наилучшими условиями приёма. Для рассматриваемого пользователя назначают схему кодирования-модуляции с максимальной скоростью передачи всем его сервисным потокам обратного канала. После этого размещают эти сервисные потоки в свободной части кадра прямого канала, начиная с частотных подканалов с наилучшими условиями приёма. Мощность передачи $p_{i,j,\ell}^{UL,opt} = p_{i,j,\ell}^{UL} \left(q_{i,j,\ell}^{UL} \right)$ выбирают таким образом, чтобы удовлетворялись требования QoS.

Когда кадр обратного канала перегружен, используют следующую процедуру. Размещают как можно больше сервисных потоков в первом кадре обратно-

го канала. Условно добавляют второй кадр обратного канала, такой же как и первый, справа от первого и опять размещают в нём как можно больше сервисных потоков. Эту процедуру продолжают до тех пор, пока все сервисные потоки обратного канала не будут размещены. После этого суммируют весь занятый частотно-временной ресурс использованных кадров обратного канала для нахождения s^{UL} .

Заключение

В статье представлена модель загрузки беспроводной сети передачи данных OFDMA. Она включает загрузку прямого и обратного каналов, загрузку сектора, а также загрузку сети. Также предложены быстрые алгоритмы оценки загрузок для частотного и многопользовательского разнесений.

Модель загрузки беспроводной сети передачи данных традиционно используется в алгоритмах управления доступом новых пользователей в сеть. Кроме этого, она находит применение в алгоритмах горизонтального и вертикального «хэндовера», например, в предложенном авторами статьи алгоритме горизонтального «хэндовера» в сети Mobile WiMAX [15]. При анализе этого алгоритма проводилось моделирование сети Mobile WiMAX. Моделирование показало достаточно высокую точность предложенной модели загрузки и быстрых алгоритмов её оценки.

Литература

1. Damji N., Le-Ngoc T. Dynamic downlink OFDM resource allocation with interference mitigation and macro diversity for multimedia services in wireless cellular systems. // IEEE Wireless Communication and Networking Conference: WCNC 2005. vol. 3, N. 1. pp. 1298–1304.
2. Yanmaz E., Tonguz O.K. Dynamic load balancing and sharing performance of integrated wireless networks. // IEEE J. Select. Areas Commun. 2004. vol. 22, N. 5. pp. 862–872.
3. Karlsson J., Eklundh B. A cellular mobile telephone system with load sharing – an enhancement of directed retry. // IEEE Trans. Commun. 1989. vol. 37, N. 5. pp. 530–535.
4. Kim S., Varshney P.K. Adaptive load balancing with preemption for multimedia cellular networks. // IEEE Wireless Communications and Networking Conference : WCNC 2003. vol. 4, N. 1. pp. 1680–1684.
5. Das S., Viswanathan H., Rittenhouse G. Dynamic load balancing through coordinated scheduling in packet data systems. // IEEE International Conference on Computer Communication – INFOCOM 2003. vol. 22, N. 1. pp. 786–796.
6. Velayos H., Aleo V., Karlsson G. Load balancing in overlapping wireless LAN cells. // IEEE International Conference on Communications : ICC 2004. vol. 27, N. 1. pp. 3833–3836.
7. Yeo W.Y., Cho D.H. An analytical model for reverse link rate control in cdma2000 1xEV-DO systems. // IEEE Commun. Letters. 2005. vol. 9, N. 3. pp. 270 – 272.
8. Muckenheim J., Bernhard U. A framework for load control in 3rd generation CDMA networks. // IEEE Global Telecommunications Conference : GLOBECOM 2001. vol. 6, N. 1. pp. 3738–3742.
9. Гармонов А.В., Савинков А.Ю., Филин С.А., Моисеев С.Н., Кондаков М.С. Технический обзор стандарта IEEE 802.16. // Мобильные системы. 2005. № 11. С. 16–24.
10. Filin S.A., Moiseev S.N., Kondakov M.S., Garmonov A.V., Yim D.H., Lee J., Chang S., Park Y.S. QoS-guaranteed cross-layer adaptive transmission algorithms for the IEEE 802.16 OFDMA system. // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2006), Apr. 2006.
11. Filin S.A., Moiseev S.N., Kondakov M.S., Garmonov A.V., Yim D.H., Lee J., Chang S., Park Y.S. QoS-guaranteed cross-layer transmission algorithms with adaptive frequency subchannels allocation in the IEEE 802.16 OFDMA system. // IEEE International Conference on Communications (ICC 2006), Jun. 2006.
12. Filin S.A., Moiseev S.N., Kondakov M.S., Garmonov A.V., Savinkov A.Y., Park Y.S., Yim D.H., Lee J.H., Cheon S.H., Han K.T. QoS-guaranteed cross-layer adaptive transmission algorithms with selective ARQ for the IEEE 802.16 OFDMA system. // IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2006 Fall), Sep. 2006.
13. Moiseev S.N., Filin S.A., Kondakov M.S., Garmonov A.V., Savinkov A.Y., Park Y.S., Yim D.H., Lee J.H., Cheon S.H., Han K.T. Optimal average number of data block transmissions for the ARQ mechanism in the IEEE 802.16 OFDMA system. // IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Communications (PIMRC 2006), Sep. 2006.
14. Moiseev S.N., Filin S.A., Kondakov M.S., Garmonov A.V., Savinkov A.Y., Park Y.S., Yim D.H., Lee J.H., Cheon S.H., Han K.T. System load model for the OFDMA network. // IEEE Communications Letters, vol. 10, pp. 620–622, Aug. 2006.
15. Moiseev S.N., Filin S.A., Kondakov M.S., Garmonov A.V., Savinkov A.Y., Park Y.S., Yim D.H., Lee J.H., Cheon S.H., Han K.T. Load-balancing QoS-guaranteed handover in the IEEE 802.16e OFDMA network. // IEEE Global Communications Conference (Globecom 2006), Nov.-Dec. 2006.