

## АЛГОРИТМ ХЭНДОВЕРА В СЕТИ MOBILE WiMAX

*Моисеев С.Н., Филин С.А., Кондаков М.С.*

**Введение**

Беспроводная сеть передачи данных Mobile WiMAX [1] будет использоваться в качестве сотовой сети. Следовательно, алгоритмы хэндовера будут играть большую роль в сети Mobile WiMAX. Стандарт IEEE 802.16 [2] уделяет большое внимание механизмам обеспечения требований по качеству обслуживания (QoS – quality of service) пользователей. Соответственно, алгоритм хэндовера также должен участвовать в обеспечении требований QoS.

Традиционные алгоритмы хэндовера принимают решение по уровню принимаемого сигнала или по отношению «сигнал\(\text{шум}+\text{помеха}\)» (ОСШП). В качестве сектора, обслуживающего пользователя, выбирается сектор с максимальным значением ОСШП. Такой подход имеет два ключевых недостатка. Во-первых, не учитываются требования QoS. Во-вторых, он не учитывает загрузки секторов. В [3] предложен алгоритм хэндовера в сотовой сети, балансирующий нагрузку. Целью этого алгоритма является минимизация разности загрузок разных секторов. Тем не менее, такая целевая функция не приводит к минимизации загрузки секторов.

В [10] была предложена модель загрузки беспроводной сети передачи данных на основе множественного доступа с частотно-временным разделением (OFDMA – orthogonal frequency division multiple access). Модель включает загрузку прямого и обратного каналов, загрузку сектора и сети. В этой статье предлагается алгоритм хэндовера в беспроводной сети передачи данных Mobile WiMAX, обеспечивающий выполнение требований QoS пользователей и балансирующий нагрузку секторов сети. Последнее свойство алгоритма приводит к существенному увеличению пропускной способности сети Mobile WiMAX.

**Модель загрузки**

Предполагается, что беспроводная сеть передачи данных Mobile WiMAX состоит из нескольких секторов и нескольких пользователей. Сектора передают данные пользователям в прямом канале, а пользователи передают данные секторам в обратном канале. Сектора и пользователи имеют ограничения на максимальные значения мощности передачи. Пользователь может иметь несколько сервисных потоков прямого канала и несколько сервисных потоков обратного канала. Сервисный поток – это поток блоков данных некоторого сервиса.

Беспроводная сеть использует технологию передачи данных на ортогональных по частоте поднесущих (OFDM – orthogonal frequency division multiplexing), множественный доступ OFDMA и временной дуплекс. Каж-

*Предложен алгоритм хэндовера в беспроводной сети передачи данных Mobile WiMAX. Основные преимущества предложенного алгоритма заключаются в том, что он обеспечивает выполнение требований по качеству обслуживания пользователей, а также балансирует нагрузку секторов сети. Предложенный алгоритм обеспечивает существенный выигрыш в пропускной способности сети Mobile WiMAX по сравнению с традиционными алгоритмами хэндовера, принимающими решение по мощности принимаемых сигналов или по отношению «сигнал\(\text{шум}+\text{помеха}\)».*

дый сектор использует кадры для передачи данных прямого и обратного каналов. Кадр состоит из кадра прямого канала и кадра обратного канала. Положение границы между кадрами прямого и обратного каналов может адаптивно меняться. Во временной области кадр состоит из символов OFDM, а в частотной области – из поднесущих.

Будем рассматривать структуру кадра с частотным разнесением. В этом случае, поднесущие, назначенные пользователю, псевдослучайно разносятся по всему спектру сигнала OFDM. При этом, хотя пользователю назначается только часть поднесущих, его условия приёма характеризуются средними по символу OFDM условиями. Описание системы Mobile WiMAX, технологии OFDM и множественного доступа OFDMA на русском языке доступно в [4], [5].

Блоки данных сервисного потока должны передаваться так, чтобы удовлетворялись требования QoS этого сервисного потока. Набор требований QoS каждого сервисного потока включает минимальную среднюю скорость передачи, максимальную среднюю задержку и максимальную вероятность ошибки. Все эти требования QoS в системе Mobile WiMAX могут быть удовлетворены выбором соответствующего значения мощности передачи [6] – [9].

В системе Mobile WiMAX доступны следующие параметры адаптации: положение границы между кадрами прямого и обратного каналов, схемы кодирования и модуляции, а также значения мощности передачи.

Будем использовать наше определение модели загрузки системы [10]. 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.

В соответствии с моделью [10], для вычисления каждой из загрузок (прямого и обратного каналов, сектора и сети)

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.

**Модель загрузки обратного канала.** Общим ресурсом системы в этом случае является частотно-временной ресурс кадра обратного канала. Мощности передачи определяются индивидуальными ресурсами системы. Параметры адаптации включают схемы кодирования и модуляции, а также 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

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

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

**Модель загрузки прямого канала.** Общими ресурсами системы в этом случае являются частотно-временной ресурс кадра прямого канала, а также мощность передачи сектора. Параметры адаптации, как и для обратного канала, включают схемы кодирования, а также 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  $\rho^{DL}$  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  $\rho^{DL}$ . Это невозможно сделать с помощью линейной функции. Наилучшей нелинейной функцией для этого является  $\max(s^{DL}, \rho^{DL})$  [10]. 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

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

где  $q^{DL}$  – множество схем кодирования и модуляции, назначенных сервисным потокам в прямом канале,  $p^{DL}$  – множество значений мощности передачи, назначенных сервисным потокам в прямом канале;  $p_{i,j}^{DL}$  – значение мощности передачи, назначенное сервисному потоку  $j$  пользователя  $i$ , а  $p_{i,j}^{QoS}$  – минимальное значение мощности передачи, которое должно быть назначено сервисному потоку  $j$  пользователя  $i$  для того, чтобы удовлетворить требования QoS этого сервисного потока.

**Модель загрузки сектора и сети.** 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

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

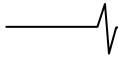
Загрузка всей сети, включающей  $K$  секторов, характеризуется множеством загрузок её секторов

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

**Алгоритм хэндовера**

Опишем предлагаемый алгоритм хэндовера в беспроводной сети передачи данных Mobile WiMAX, включающей  $K$  секторов. Основной целью алгоритма является перераспределение нагрузки на перегруженные сектора между остальными секторами сети, т.е. устранение перегрузки. В некоторых случаях невозможно устранить перегрузку в секторах из-за специфического расположения пользователей. Для этих секторов необходимо максимально уменьшить их загрузку. Алгоритм хэндовера, достигающий эту цель, максимизирует ёмкость сети. В реальной системе выполнение алгоритма хэндовера занимает некоторое время. Поэтому, увеличение трафика может привести к перегрузке в секторах, которые практически полностью загружены. Второй целью алгоритма хэндовера является балансирование загрузки в не перегруженных секторах. Соответственно, определим оптимальный алгоритм хэндовера как алгоритм, минимизирующий максимальную загрузку во всех подмножествах множества секторов сети Mobile WiMAX, начиная с подмножества с максимальным количеством секторов и заканчивая подмножествами с минимальным количеством секторов.

Предлагается следующий оптимальный алгоритм хэндовера в беспроводной сети передачи данных Mobile



WiMAX. Обозначим  $V^{old} = \{V_1^{old}, V_2^{old}, \dots, V_M^{old}\}$  – текущий набор обслуживающих секторов, где  $V_i^{old}$  – обслуживающий сектор пользователя  $i$ ,  $M$  – количество пользователей в сети Mobile WiMAX. Результатом оптимального алгоритма хэндовера будет новый набор  $V^{new} = \{V_1^{new}, V_2^{new}, \dots, V_M^{new}\}$  обслуживающих секторов. Новый набор должен минимизировать максимальную загрузку сектора во всех подмножествах множества секторов  $\{1, 2, \dots, K\}$  при условии выполнения требований QoS всех  $M$  пользователей сети Mobile WiMAX.

Для каждого пользователя  $i$  определим набор его целевых секторов  $\Xi_i$  следующим образом. В набор  $\Xi_i$  будем включать только те сектора, в которых требования QoS выполняются для этого пользователя. Требования QoS выполняются для пользователя  $i$  в секторе  $k$ , если его индивидуальная загрузка в этом секторе  $y_{k,i}$  не больше 1, а также выполняются условия (1) и (2). Индивидуальная загрузка  $y_{k,i}$  пользователя  $i$  в секторе  $k$  равна загрузке сектора (3), при условии, что он обслуживает только одного этого пользователя.

Оптимальный алгоритм хэндовера выполняют в  $K-1$  шагов. На первом шаге минимизируют максимальную загрузку сектора среди всех  $K$  секторов. Другими словами, находят набор обслуживающих секторов  $V^{(1)}$  такой, что

$$V^{(1)} = \arg \min_v (\max u), V_i^{(1)} \in \Xi_i, i=1, 2, \dots, M.$$

После первого шага для найденного набора обслуживающих секторов  $v = V^{(1)}$  имеем сектор  $k^{(1)}$  с максимальной загрузкой

$$k^{(1)} = \arg \max_k u.$$

В этом секторе нельзя уменьшить нагрузку без увеличения максимальной загрузки среди  $K$  секторов. Поэтому сектор  $k^{(1)}$  и все его пользователи исключаются из дальнейшего рассмотрения.

На втором шаге минимизируют максимальную загрузку сектора среди оставшихся  $K-1$  секторов. После второго шага опять имеем сектор  $k^{(2)}$  с максимальной загрузкой, которая исключается из дальнейшего рассмотрения. В результате на последнем шаге  $K-1$  имеем два оставшихся сектора. Минимизируем максимальное значение загрузки сектора для них.

Новый набор обслуживающих секторов  $v^{new}$  имеет вид

$$v^{new} = \omega_1^{new} \cup \omega_2^{new} \cup \dots \cup \omega_{K-2}^{new} \cup v^{(K-1)},$$

где набор  $\omega_n^{new}$ ,  $n=1, \dots, K-2$ , состоит из элементов  $V_{l(n)}^{new} = k^{(n)}$ , где  $k^{(n)}$  – номер сектора, исключённого на шаге  $n$ , а  $l(n)$  – номера пользователей, исключённых на шаге  $n$ ;  $v^{(K-1)}$  – набор обслуживаемых секторов, найденный на шаге  $K-1$ .

После того, как новый набор обслуживающих секторов  $V^{new}$  найден, осуществляют процедуру хэндовера для пользователей с новым номером обслуживающего сектора  $V_i^{new} \neq V_i^{old}$ .

Предложенный оптимальный алгоритм хэндовера не осуществляет перебор всех подмножеств множества секторов  $\{1, 2, \dots, K\}$ . Вместо этого, он анализирует одно подмножество из  $K$  секторов, одно подмножество из  $K-1$  секторов, ..., одно подмножество из двух секто-

ров. Тем не менее, он является оптимальным. Когда минимизируют максимальную нагрузку сектора среди  $l$  секторов, где  $l=K, K-1, \dots, 3$ , находят сектор  $k^{(K-l+1)}$  с максимальным значением загрузки. Невозможно уменьшить максимальную загрузку сектора  $k^{(K-l+1)}$  среди  $l$  секторов. Соответственно, невозможно уменьшить загрузку этого сектора среди любого подмножества множества этих  $l$  секторов, включающего сектор  $k^{(K-l+1)}$ . Поэтому сектор  $k^{(K-l+1)}$  можно убрать из дальнейшего рассмотрения.

На каждом шаге оптимального алгоритма хэндовера необходимо находить набор обслуживающих секторов  $V^{(n)}$ . Для этого предлагается следующий быстрый алгоритм. Для каждого пользователя  $i$  ранжируют номера секторов из его набора целевых секторов  $\Xi_i$  в порядке возрастания индивидуальной загрузки. Начальным обслуживающим сектором пользователя  $i$  будет первый сектор из набора  $\Xi_i$ . После этого осуществляют следующую итеративную процедуру.

#### **Первый шаг:**

Выбирают сектор с максимальной загрузкой

$$k^* = \arg \max_k u,$$

где поиск  $k^*$  осуществляется только среди секторов, рассматриваемых на данном шаге алгоритма хэндовера.

Ранжируют пользователей сектора  $k^*$  в порядке убывания их индивидуальных загрузок в этом секторе.

#### **Второй шаг:**

Последовательно пробуют менять обслуживающие сектора пользователям сектора  $k^*$ , начиная с первого и заканчивая последним. Для каждого пользователя начинаем с первого и заканчиваем последним сектором из его набора целевых секторов  $\Xi_i$ .

После каждой смены обслуживающего сектора пользователя проверяют значение максимальной загрузки среди всех секторов, рассматриваемых на данном шаге алгоритма хэндовера.

Если новое значение максимальной загрузки сектора меньше чем загрузка сектора  $k^*$ , то изменение обслуживающего сектора для пользователя оставляют и переходят к первому шагу. В противном случае принимают следующую попытку.

Если для сектора  $k^*$  осуществили все попытки, и новые максимальные значения загрузки сектора были выше, чем первоначальная загрузка сектора  $k^*$ , то максимальную загрузку сектора в данном подмножестве секторов больше уменьшить нельзя. Соответственно, полученный вектор  $V^{(n)}$  является решением на данном шаге алгоритма хэндовера.

### **Моделирование**

Проанализируем характеристики предложенного быстрого алгоритма хэндовера методом моделирования беспроводной сети передачи данных Mobile WiMAX. Моделируемая сеть состоит из семи сот, где шесть сот окружают центральную соту. Коэффициент повторного использования частоты равен семи, радиус соты - 300м. Несущая частота - 2.4 ГГц, полоса сигнала - 10 МГц в каждой соте. Каждая сота содержит один сектор. Сектор имеет максимальную мощность пере-

дачи 20 Вт и всенаправленную антенну, а каждый пользователь имеет максимальную мощность передачи 1 Вт и также всенаправленную антенну. В качестве модели канала используем модель Vehicular B из [11].

Будем сравнивать предложенный алгоритм хэндовера с традиционным, основанным на ОСШП. В алгоритме, основанном на ОСШП, в качестве обслуживающего сектора выбирают сектор с максимальным значением ОСШП принимаемого пользователем сигнала. Алгоритм и процедуру хэндовера будем инициализировать раз в 20 мс для обоих алгоритмов. Будем использовать два сценария моделирования.

Первый сценарий служит для того, чтобы показать, как предложенный нами алгоритм борется с перегрузкой. В этом сценарии 28 пользователей распределяются в анализируемой сети. В процессе моделирования каждый пользователь движется со скоростью 60 км/час по траектории из 20 точек, выбранных псевдослучайно. У каждого пользователя один сервисный поток прямого канала и один сервисный поток обратного канала, каждый из которых имеет скорость трафика 120 кб/с.

Рис. 1 показывает максимальную среди семи секторов загрузку сектора в зависимости от номера кадра. Нижняя кривая соответствует предложенному в статье алгоритму, верхняя – традиционному алгоритму, а горизонтальная линия показывает критическое значение загрузки сектора, равное 1. Как видно из рис. 1, традиционный алгоритм достаточно часто приводит к перегрузке, т.е. к ситуации, когда требования QoS не выполняются для некоторых пользователей. Предложенный алгоритм сохраняет значение максимальной загрузки сектора ниже критического значения, т.е. непрерывно обеспечивает выполнение требований QoS для всех пользователей, распределяя нагрузку между секторами. Рис. 2 показывает среднюю загрузку секторов среди всех секторов за исключением сектора с максимальной загрузкой. Верхняя кривая соответствует алгоритму, предложенному в статье, а нижняя – традиционному алгоритму. Видно, что предложенный алгоритм распределяет нагрузку перегруженного сектора между остальными шестью секторами.

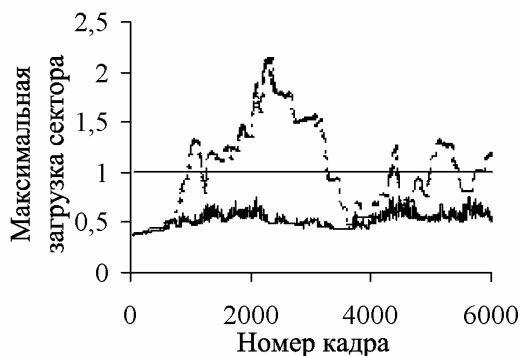


Рис. 1

Рассмотрим ситуацию, когда один сектор перегружен, а другие не полностью загружены. Перегруженный сектор

находится в режиме насыщения. Если добавлять новых пользователей в перегруженный сектор, то его пропускная способность не увеличится. Пропускная способность остальных секторов также не увеличится, так как в них не добавляются новые пользователи. Тем не менее, если передать часть пользователей перегруженного сектора в остальные сектора, то пропускная способность сети передачи данных вырастет.

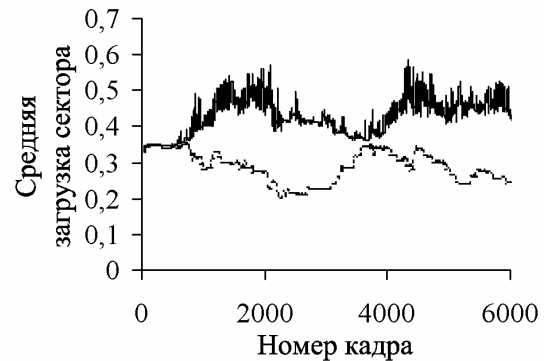


Рис. 2

Для иллюстрации выигрыша в пропускной способности сети используем второй сценарий моделирования. В этом сценарии псевдослучайно размещают 7 пользователей в зоне покрытия центрального сектора, определяемой по максимальному значению ОСШП. После этого увеличивают скорости трафиков этих пользователей.

Рис. 3 иллюстрирует загрузку центрального сектора в зависимости от суммарного трафика всех пользователей, который необходимо передавать в сети. Нижняя кривая соответствует предложенному алгоритму, верхняя кривая – традиционному, а горизонтальная линия – критическому значению загрузки. Традиционный алгоритм хэндовера, основанный на ОСШП, приводит к перегрузке при суммарном трафике 22 Мб/с, в то время как алгоритм, предложенный в данной статье, достигает перегрузки только при суммарном трафике 70 Мб/с.

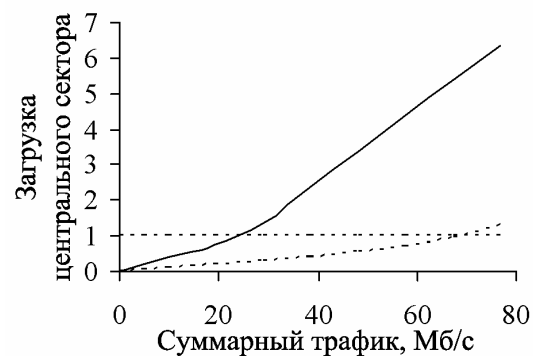


Рис. 3

Рис. 4 показывает пропускную способность сети в зависимости от суммарного трафика. Верхняя кривая соответствует предложенному алгоритму, а нижняя – традиционному. Традиционный алгоритм хэндовера, основанный на ОСШП, достигает максимального значения пропускной способности сети 22 Мб/с, в то время как предложенный в статье алгоритм достигает существенно большего значения пропускной способности, равного 70 Мб/с.

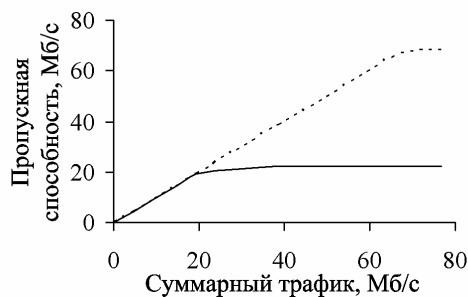


Рис. 4

## Заключение

Предложенный в статье алгоритм хэндовера в беспроводной сети передачи данных Mobile WiMAX эффективно борется с перегрузкой, обеспечивает выполнение требований QoS пользователей, а также имеет существенный выигрыш в пропускной способности по сравнению с традиционными алгоритмами, основанными на ОСШП.

## Литература

1. IEEE Standard 802.16e-2005; Amendment to IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems – Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands, Dec. 7, 2005.
2. IEEE Standard 802.16-2004; IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, Oct. 1, 2004.
3. Velayos, H., Aleo, V., Karlsson, G. Load balancing in overlapping wireless LAN cells. – IEEE International Conference on Communications: ICC 2004, 2004, v. 27, no. 1.
4. Гармонов А.В. и др. Стандарт IEEE 802.16: история создания и перспективы развития. – Мобильные системы, 2005, № 6.
5. Гармонов А.В. и др. Технический обзор стандарта IEEE 802.16. – Мобильные системы, 2005, № 11.
6. Filin, S.A. et al. QoS-guaranteed cross-layer adaptive transmission algorithms for the IEEE 802.16 OFDMA system. – IEEE Wireless Communications and Networking Conference: WCNC 2006, 2006, v. 2.
7. Filin, S.A. et al. 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, 2006, v. 11.
8. Filin, S.A. et al. QoS-guaranteed cross-layer adaptive transmission algorithms with selective ARQ for the IEEE 802.16 OFDMA system. – IEEE Vehicular Technology Conference: VTC 2006 Fall, 2006.
9. Moiseev, S.N. et al. 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, 2006.
10. Moiseev, S.N. et al. System load model for the OFDMA network. – IEEE Commun Letters, 2006, v. 10, no. 8.
11. Recommendation ITU-R M.1225; Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000, 1997.

## Уважаемые коллеги!

Вы можете подписаться на наш журнал на второе полугодие 2009 года в любом отделении почтовой связи. Подписной индекс издания по каталогу ОАО «Роспечать» - 82185.

Для тех, кто не успел оформить подписку на первое полугодие 2009 года через ОАО «Роспечать», сохраняется возможность приобретения журналов непосредственно в редакции по адресу: 107031, г. Москва, Рождественка, 6\9\20, стр. 1, Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, или оформить Заказ в соответствии с требованиями, выставленными на сайте журнала: [www.dsra.ru](http://www.dsra.ru).

Справки по телефонам: (495) 621-71-08, 621-06-10.

Факс: (495) 621-16-39.

E-mail: [nto.popov@mtu-net.ru](mailto:nto.popov@mtu-net.ru)

[tor@rgta.ryazan.ru](mailto:tor@rgta.ryazan.ru)