

УДК 621.391

**МОДЕЛЬ ПЛАНИРОВАНИЯ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО РЕСУРСА
В НИСХОДЯЩЕМ КАНАЛЕ СВЯЗИ ТЕХНОЛОГИИ LTE**

С.В. Гаркуша, Ю.А. Василенко

Приведены результаты разработки математической модели планирования частотно-временного ресурса нисходящего канала связи технологии LTE. Предложенная модель направлена на обеспечение гарантированного качества обслуживания пользователей беспроводной сети путем выделения пользовательским станциям требуемых скоростей передачи. Проведен сравнительный анализ предложенной модели с существующими методами с точки зрения обеспечения общей производительности нисходящего канала связи, степени балансировки пропускной способности, а также вероятности выделения пользовательским станциям требуемой скорости передачи. Показано, что предложенная модель в условиях высоких требований к скорости передачи пользовательских станций, по сравнению с известными методами, позволяет на 5–20% повысить степень балансировки пропускной способности нисходящего канала связи, а также на 40–100% повысить вероятность выделения пользовательским станциям требуемой скорости передачи.

Ключевые слова: LTE, частотно-временной ресурс, ресурсный блок, блок планирования, математическая модель, требуемая скорость передачи.

Введение

В технологии LTE (Long-Term Evolution), разработанной 3GPP (3rd Generation Partnership Project), одним из эффективных путей повышения производительности и улучшения основных показателей каче-

ства обслуживания (Quality of Service, QoS) является усовершенствование сетевых протоколов и механизмов, отвечающих за планирование доступных сетевых ресурсов. К подобного рода ресурсам, прежде всего, относятся временной ресурс – OFDM-символы (Orthogonal frequency-division multiplexing) и частотный ресурс – частотные поднесущие. Под OFDM-символом понимается промежуток времени, на протяжении которого амплитуда и фаза модулируемых поднесущих неизменна. Необходимо заметить, что решение задачи о выделении радиоресурсов в первую очередь основывается на требованиях к QoS и может быть возложено на систему управления радиоресурсом (Radio Resource Management, RRM), а именно на планировщик (scheduler). В технологии LTE, как и в HSDPA или WiMAX, механизмы планирования ресурсов нисходящего канала связи (DownLink) не определены стандартом, оставляя право выбора за производителями оборудования базовых станций (evolved NodeB, eNodeB) [1–3].

Результатом решения задачи распределения частотного и временного ресурсов должно быть закрепление блоков планирования (Scheduling Block, SB) за пользовательскими станциями (User Equipment, UE) в нисходящем канале связи одного кадра. Блок планирования является наименьшим структурным элементом, выделяемым одной пользовательской станции и формируемым двумя соседними ресурсными блоками (Resource Block, RB) на одинаковых поднесущих (subcarrier) [4].

В работе были проанализированы методы распределения частотного и временного ресурсов, использующие алгоритм Round Robin Scheduler [3, 5, 6]. Использование алгоритма Round Robin Scheduler предполагает выделение в равной степени частотно-временного ресурса для каждой UE. В базовой реализации Round Robin Scheduler выделяет каждой UE временной интервал, в рамках которого эта UE получает монополярный доступ к каналу. При этом скорость передачи данных UE ограничивается фактическим значением отношения сигнал/шум (signal to noise Ratio, SNR). Также были проанализированы методы [5, 6], использующие алгоритм Max C/I Ratio, который предоставляет частотно-временной ресурс пользовательской станции с самыми лучшими значениями SNR, не обеспечивая справедливость распределения этого ресурса между UE. Кроме того, в работе проанализированы методы распределения частотного и временного ресурсов, использующие алгоритм пропорционального справедливого распределения обслуживания (Proportional Fair Scheduling) [5–7]. Проведенный анализ показал, что алгоритм Proportional Fair Scheduling способствует UE, которая имеет высокое значение SNR, одновременно обеспечивая достаточное количество частотных и временных ресурсов UE с худшим значением SNR.

Анализ показал, что для предоставления доступа к частотно-временному ресурсу технологии LTE наиболее приемлемым был бы механизм, включающий в себя особенности Round Robin и Max C/I Ratio алгоритмов. Выбор алгоритма зависит от категории и величины нагрузки. Правильный выбор алгоритма для предоставления доступа особенно важен при большой нагрузке. Использование алгоритма Proportional Fair Scheduling направлено на применение для интерактивного «best effort» класса данных во избежание ситуации, при которой некоторые UE никогда не получают доступ к частотно-временному ресурсу. Указанный класс обслуживания (Class of Service, CoS) обеспечивает доставку данных UE по мере возможностей без гарантий скорости передачи данных. Повышение качества обслуживания при планировании частотно-временного ресурса каждой UE должно быть направлено на обеспечение гарантированной скорости передачи с возможностью доступа к дополнительной (не гарантируемой) полосе пропускания. Однако ни один из проанализированных механизмов не способен обеспечить подобного CoS. В результате проведенного анализа принято решение о необходимости разработки математической модели планирования частотно-временного ресурса в нисходящем канале связи технологии LTE, сформулированной как задача распределения SB для обеспечения гарантированной скорости передачи UE.

Математическая модель распределения ресурсных блоков в нисходящем канале

Предлагаемая математическая модель направлена на применение в беспроводных сетях технологии LTE, использующей временное и частотное разделение каналов. При разработке математической модели учитывается тот факт, что наименьшей структурной единицей радиоресурса, которой можно управлять при решении задачи планирования, является SB [1].

В технологии LTE предложено три вида распределения ресурсов. Разрабатываемая модель направлена на использование нулевого вида (Resource Allocation Type 0), предполагающего объединение RB в так называемые группы ресурсных блоков (resource block groups, RBG), которые выделяются UE. При этом количество RB, входящих в состав одной RBG (p), зависит от используемой ширины частотного канала. Если деление количества RB на параметр p не дает целочисленного значения, то крайняя RBG будет иметь размер, меньший p [8].

С целью учета числа подкадров, выделенных для передачи информации в нисходящем канале связи [1, 2], в математическую модель введено понятие матрицы конфигураций нисходящего канала – прямоугольной матрицы с количеством строк, соответствующим количеству конфигураций кадра (L), и с количеством столбцов, соответствующим количеству подкадров (K) в кадре, т.е.

$$H = \|h_{l,k}\|, (l = \overline{0, L-1}; k = \overline{0, K-1}),$$

где $h_{l,k} = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-й подкадр при } l\text{-й конфигурации используется} \\ & \text{для передачи информации в нисходящем канале связи;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$

В ходе решения задачи распределения блоков планирования в рамках предлагаемой модели необходимо обеспечить расчет булевой управляющей переменной ($x_{k,m}^n$), определяющей порядок распределения блоков планирования:

$$x_{k,m}^n = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-й блок планирования на } k\text{-м подкадре выделен } n\text{-й UE;} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (1)$$

где $m = \overline{0, M-1}$; $k = \overline{0, K-1}$; $n = \overline{1, N}$; M – число SB, формируемых на протяжении передачи одного подкадра; N – количество UE.

При расчете искомым переменных $x_{k,m}^n$ необходимо выполнить ряд важных условий-ограничений.

1. Условие закрепления m -го SB нисходящего канала связи на протяжении передачи k -го подкадра не более чем за одной UE:

$$\sum_{n=1}^N x_{k,m}^n \leq 1 \quad (k = \overline{0, K-1}; m = \overline{0, M-1}). \quad (2)$$

2. Условие выделения UE блоков планирования только нисходящего канала:

$$\frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=1}^N x_{k,m}^n}{M} \leq h_{l,k} \quad (k = \overline{0, K-1}; l - \text{используемая конфигурация кадра}). \quad (3)$$

3. Условие закрепления за n -й UE количества SB, обеспечивающего необходимую скорость передачи в нисходящем канале связи при используемой схеме модуляции и кодирования (Modulation and Coding Scheme, MCS):

$$\begin{aligned} & \sum_{m=\frac{M}{2}-3}^{\frac{M}{2}+2} R_{SB}^0 x_{0,m}^n + \sum_{m=\frac{M}{2}-3}^{\frac{M}{2}+2} R_{SB}^5 x_{5,m}^n + \sum_{m=0}^{\frac{M}{2}-4} R_{SB}^{0-9} x_{0,m}^n + \sum_{m=\frac{M}{2}+3}^{M-1} R_{SB}^{0-9} x_{0,m}^n + \\ & + \sum_{m=0}^{\frac{M}{2}-4} R_{SB}^{0-9} x_{5,m}^n + \sum_{m=\frac{M}{2}+3}^{M-1} R_{SB}^{0-9} x_{5,m}^n + \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^4 R_{SB}^{0-9} h_{l,k} x_{k,m}^n + \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=6}^{K-1} R_{SB}^{0-9} h_{l,k} x_{k,m}^n \geq R_{\text{треб}}^n, \end{aligned} \quad (4)$$

при $n = \overline{1, N}$, l – используемая конфигурация кадра. В выражении (4) использованы следующие переменные:

- $R_{SB}^0 = \left((N_{\text{symp}}^{RB} N_{SF}^{RB} - N_{PDCCH} - N_{PSS,SSS} - N_{PBCH}) K_s - N_{\text{pilot}} N_{SF}^{RB} \right) R_c^{n,m} k_b^{n,m} / K T_{SF}$ – пропускная способность SB [9], формируемых на нулевом подкадре и передающих сигналы первичной синхронизации (Primary Synchronization Signal, PSS), вторичной синхронизации (Secondary Synchronization Signal, SSS) и широковещательный сигнал (Physical Broadcast Channel, PBCH), где $N_{PSS,SSS} = 2$, $N_{PBCH} = 4$ OFDM-символов соответственно; N_{symp}^{RB} – количество OFDM-символов, формирующих один ресурсный блок; $N_{SF}^{RB} = 2$ – количество RB, формируемых на одинаковых поднесущих и выделяемых UE на протяжении передачи одного подкадра; $N_{PDCCH} = 3$ – количество OFDM-символов в каждом подкадре, выделенных для передачи сигнала управления (Physical Downlink Control Channel, PDCCH); $N_{\text{pilot}} = 4$ – ресурсные элементы (Resource Element, RE), выделенные для передачи пилотных сигналов в одном RB; K_s – число поднесущих для передачи данных в одном RB и одном SB; $R_c^{n,m}$ – скорость кода, используемого при кодировании сигнала n -й UE на поднесущих m -го SB; $k_b^{n,m}$ – битовая загрузка OFDM-символа n -й UE на поднесущих m -го SB; $T_{SF} = 1$ мс – время передачи одного подкадра;
- $R_{SB}^5 = \left((N_{\text{symp}}^{RB} N_{SF}^{RB} - N_{PDCCH} - N_{PSS,SSS}) K_s - N_{\text{pilot}} N_{SF}^{RB} \right) R_c^{n,m} k_b^{n,m} / K T_{SF}$ – пропускная способность SB [9], формируемых на пятом подкадре и передающих сигналы PSS и SSS;
- $R_{SB}^{0-9} = \left((N_{\text{symp}}^{RB} N_{SF}^{RB} - N_{PDCCH}) K_s - N_{\text{pilot}} N_{SF}^{RB} \right) R_c^{n,m} k_b^{n,m} / K T_{SF}$ – пропускная способность SB [9], формируемых на всех подкадрах и содержащих из служебной информации только PDCCH.
- $R_{\text{треб}}^n$ – требуемая скорость передачи n -й UE.

4. Условие объединения RB в RGB размеров, удовлетворяющих ширине используемого частотного канала:

$$x_{k,m}^n = \frac{1}{p} \sum_{z=\lfloor \frac{m}{p} \rfloor}^{\lfloor \frac{m}{p} \rfloor + 1} x_{k,z}^n \quad (n = \overline{1, N}; k = \overline{0, K-1}; m = 0, \lfloor \frac{M}{p} \rfloor p - 1); \quad (5)$$

$$x_{k,m}^n = \frac{1}{p} \sum_{z=\lfloor \frac{M}{p} \rfloor}^M x_{k,z}^n \quad (n = \overline{1, N}; k = \overline{0, K-1}; m = \lfloor \frac{M}{p} \rfloor p - 1, M), \quad (6)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ – обозначение округления числа до ближайшего целого в меньшую сторону. Условие (6) используется для объединения блоков планирования крайней группы ресурсных блоков, размеры которой могут быть меньше p .

Расчет искомым переменных (1) в соответствии с условиями-ограничениями (2)–(6) целесообразно осуществлять в ходе решения оптимизационной задачи, обеспечивая минимум или максимум предварительно выбранного критерия качества решения задачи распределения SB. Задача распределения SB может быть решена с использованием критерия оптимальности, направленного на максимизацию общей производительности нисходящего канала связи. Таким образом, критерий оптимальности примет следующий вид:

$$\max \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=\frac{M}{2}-3}^{\frac{M}{2}+2} R_{SB}^0 x_{0,m}^n + \sum_{m=\frac{M}{2}-3}^{\frac{M}{2}+2} R_{SB}^5 x_{5,m}^n + \sum_{m=0}^{\frac{M}{2}-4} R_{SB}^{0-9} x_{0,m}^n + \sum_{m=\frac{M}{2}+3}^{M-1} R_{SB}^{0-9} x_{0,m}^n + \sum_{m=0}^{\frac{M}{2}-4} R_{SB}^{0-9} x_{5,m}^n + \sum_{m=\frac{M}{2}+3}^{M-1} R_{SB}^{0-9} x_{5,m}^n + \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^4 R_{SB}^{0-9} h_{l,k} x_{k,m}^n + \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=6}^{K-1} R_{SB}^{0-9} h_{l,k} x_{k,m}^n \right), \quad (7)$$

при учете условий-ограничений (2)–(6). Использование критерия оптимальности (7) совместно с условиями-ограничениями (2)–(6) направлено на обеспечение гарантированной скорости передачи с возможностью доступа к дополнительной (не гарантируемой) полосе пропускания, что в CoS соответствует подклассу В.

Сформулированная задача с математической точки зрения является задачей смешанного целочисленного нелинейного программирования – MINLP (Mixed Integer NonLinear Programming). Переменная, используемая в критерии оптимальности (7), является целочисленной, ограничения на искомые переменные (2)–(4) носят линейный, а ограничения (5) и (6) – нелинейный характер.

Анализ решений задачи распределения блоков планирования

С целью анализа решений по планированию ресурсных блоков в нисходящем канале связи, получаемых с использованием известных методов, а также предложенной модели (1)–(7), рассмотрим пример, в котором для распределения блоков планирования в нисходящем канале связи были использованы следующие исходные данные: количество UE $N=5$; число SB, формируемых на протяжении передачи одного временного слота, $M=15$; количество OFDM-символов, формирующих один ресурсный блок, $N_{symb}^{RB}=7$; значения эффективности MCS-сигналов UE для различных ресурсных блоков – в соответствии с рис. 1; вид разделения каналов – TDD; количество подкадров, используемых для передачи информации в нисходящем канале связи, $K=4$ (конфигурация кадра – № 1 [1, 2]); количество SB, входящих в состав одной RBG, $p=2$.

Решение сформулированной в работе оптимизационной задачи было получено с использованием системы MATLAB R2012b. При этом была задействована программа minlpAssign пакета оптимизации TOMLAB. Всем пользовательским станциям были установлены одинаковые требуемые скорости передачи, которые принимали значения $R_{треб}^n = 0 - 0,26$ Мбит/с.

Как показали результаты моделирования, общая производительность нисходящего канала связи при использовании известных методов на протяжении всего интервала измерения не изменялась и составила для метода Round Robin 0,9622 Мбит/с, для метода Proportional Fair – 1,2377 Мбит/с, а для метода Max C/I Ratio – 1,4192 Мбит/с. Общая производительность нисходящего канала связи при использовании предложенной модели (1)–(7) на участке $R_{треб}^n = 0 - 0,15$ Мбит/с имела максимальное значение, соответствующее методу Max C/I Ratio, и составляла 1,4192 Мбит/с. На интервале $R_{треб}^n = 0,15 - 0,26$ Мбит/с общая производительность уменьшилась на 3%, до значения 1,3641 Мбит/с.

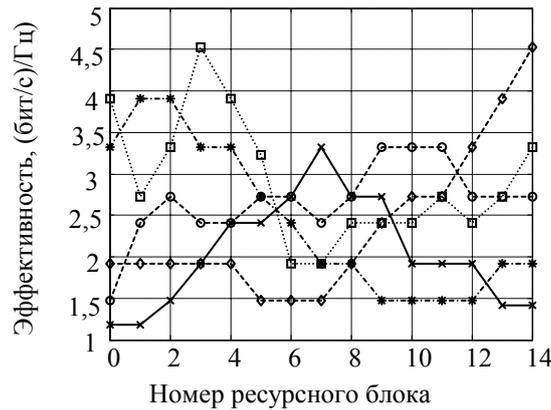


Рис. 1. Значения эффективности MCS-сигналов пользовательских станций для различных ресурсных блоков, используемых в примере; —x— соответствует первой UE, -*- - второй UE, --o-- – третьей UE, ...□... – четвертой UE, -◇- - пятой UE

На рис. 2, а, приведены результаты моделирования, отображающие динамику изменения степени балансировки пропускной способности нисходящего канала между UE. Степень балансировки пропускной способности определялась в соответствии с выражением [10]

$$F^i = 1 - \left(\max_n R_n^i - \min_n R_n^i \right) / \sum_{n=1}^N R_n^i,$$

где R_n^i – скорость передачи, выделенная n -й UE на i -м интервале измерения, $n = \overline{1, N}$. Как показали результаты моделирования (рис. 2, а), степень балансировки пропускной способности нисходящего канала связи при использовании известных методов на протяжении всего интервала измерения не изменялась и составила для метода Round Robin 0,9421, для метода Proportional Fair – 0,9163, а для метода Max C/I Ratio – 0,8214. Степень балансировки пропускной способности нисходящего канала связи при использовании предложенной модели (1)–(7) на участке $R_{\text{треб}}^n = 0 - 0,15$ Мбит/с имела минимальное значение, соответствующее методу Max C/I Ratio, и составляла 0,8214. На интервале $R_{\text{треб}}^n = 0,15 - 0,26$ Мбит/с степень балансировки пропускной способности увеличилась до 0,9859.

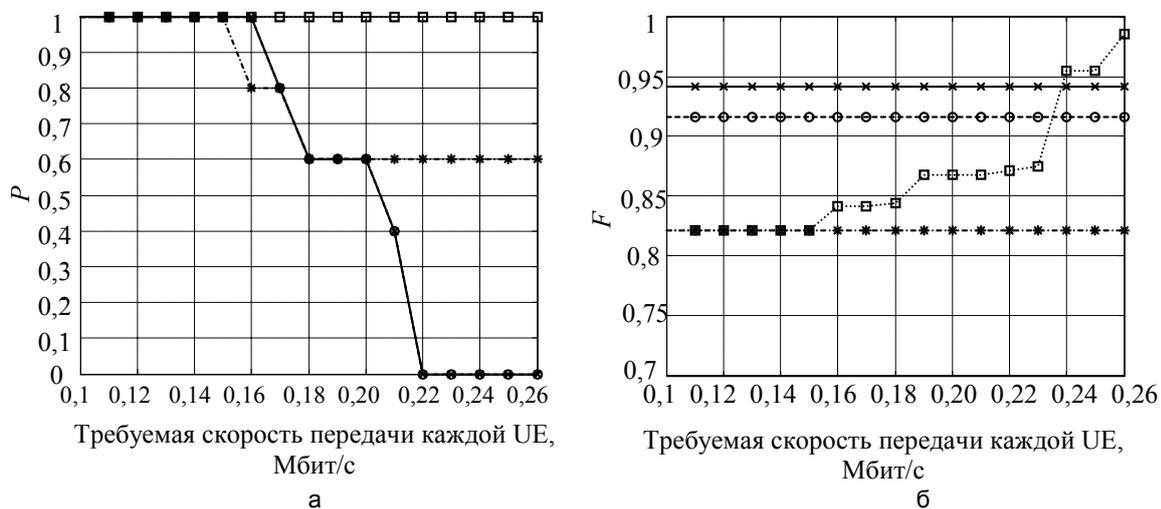


Рис. 2. Степень балансировки пропускной способности нисходящего канала связи (а) и вероятность выделения UE требуемой скорости передачи (б); —x— соответствует методу Round Robin, -*- - методу Max C/I Ratio, --o-- – методу Proportional Fair, ...□... – предлагаемой модели

На рис. 2, б, приведены результаты расчета вероятности выполнения требований по скорости передачи, выделяемой всем UE. Вероятность выполнения требований по скорости передачи на i -м интервале измерения определялась в соответствии с выражением

$$P^i = \sum_{n=1}^N Q_n^i / N,$$

где $\sum_{n=1}^N Q_n^i$ – количество UE, которым выделена требуемая скорость передачи на i -м интервале измерения, т.е.

$$Q_n^i = \begin{cases} 0, & \text{если } R_n^i < R_{\text{треб}}^i; \\ 1, & \text{если } R_n^i \geq R_{\text{треб}}^i. \end{cases}$$

Как показали результаты моделирования, при изменении требуемой скорости передачи от 0,15 Мбит/с и выше все рассмотренные известные методы не обеспечивают требуемого значения скорости передачи для всех пользовательских станций. Выполнение требования по скорости передачи известными методами обеспечивается только при невысоких значениях $R_{\text{треб}}^n$, а именно при $R_{\text{треб}}^n = 0 - 0,15$ Мбит/с. Использование предложенной модели (1)–(7) обеспечивает выделение требуемой скорости передачи UE на всем интервале измерения $R_{\text{треб}}^n = 0 - 0,26$ Мбит/с.

Заключение

Установлено, что одной из основных задач в беспроводной сети, функционирующей с использованием технологии LTE, является задача обеспечения требуемого качества обслуживания, в состав которой входит выделение пользовательским станциям сети необходимой скорости передачи в нисходящем канале связи. Также установлено, что обеспечение требуемой скорости передачи в технологии LTE может быть достигнуто путем решения задачи распределения блоков планирования в нисходящем канале связи. В связи с этим проанализированы существующие механизмы распределения блоков планирования между пользовательскими станциями в нисходящем канале связи беспроводной сети, функционирующей с использованием технологии LTE.

На основании выявленных недостатков известных решений предложена математическая модель, представленная рядом линейных и нелинейных условий-ограничений. Новизна модели состоит в формулировке задачи распределения блоков планирования как задачи перераспределения доступной пропускной способности нисходящего канала технологии LTE для передачи информации в направлении пользовательских станций при учете их территориальной удаленности (вида системы модуляции и кодирования).

Сравнительный анализ показал, что в условиях высоких требований к скорости передачи пользовательских станций использование модели (1)–(7), по сравнению с известными методами, позволяет на 5–20% повысить степень балансировки пропускной способности нисходящего канала связи (рис. 2, а), а также на 40–100% повысить вероятность выделения пользовательским станциям требуемой скорости передачи (рис. 2, б). При этом производительность нисходящего канала связи, в условиях высоких требований к скорости передачи, на 3% меньше производительности, получаемой с использованием метода Max C/I Ratio, и на 10–42% больше производительности с использованием методов Round Robin и Proportional Fair.

Использование предложенной модели направлено на обеспечение каждой пользовательской станции гарантированной скорости передачи в нисходящем канале связи с возможностью доступа к дополнительной (негарантируемой) полосе пропускания. Это в классах сервиса соответствует подклассу В CoS, тогда как другие методы не гарантируют выделения требуемой скорости передачи, что в классах сервиса CoS соответствует подклассу А.

Литература

1. 3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 11). – Valbonne, France: Sophia Antipolis, 2012. – 108 p.
2. Ghosh A., Zhang J., Muhamed R., Andrews J. Cr. Fundamentals of LTE. – Prentice Hall, USA, 2010. – 464 p.
3. Iosif O., Banica I. On the Analysis of Packet Scheduling in Downlink 3GPP LTE System // The Fourth International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service (CTRQ 2011). – 2011. – P. 99–102.
4. Dahlman E., Parkvall S., Skold J., Beming P. 3G Evolution – HSPA and LTE for Mobile Broadband. – Academic Press, 2008. – 608 p.
5. Kawser M.T., Farid H.M.A.B., Hasin A.R., Sadik A.M.J., Razu I.K. Performance Comparison between Round Robin and Proportional Fair Scheduling Methods for LTE // International Journal of Information and Electronics Engineering. – 2012. – V. 2. – № 5. – P. 678–681.
6. Galaviz G., Covarrubias D.H., Andrade A.G., Villarreal S. A resource block organization strategy for scheduling in carrier aggregated systems // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2012. – P. 107–124.

7. Girici T., Zhu C., Agre J.R., Ephremides A. Proportional Fair Scheduling Algorithm in OFDMA-Based Wireless Systems with QoS Constraints // Journal of communications and networks. – 2010. – V. 12. – № 1. – P. 30–42.
8. 3GPP TS 36.213. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 11). – Valbonne, France: Sophia Antipolis, 2012. – 104 p.
9. Ермолаев В.Т. Флакман А.Г. Теоретические основы обработки сигналов в системах мобильной радиосвязи. – Нижний Новгород: НГУ им. И.Н. Лобачевского, 2010. – 107 с.
10. Adibah M.R.H., Kumbesan S., Riyaj B., Leijja W. Modeling and simulation of packet scheduling in the downlink long term evolution system // Proceedings of 15th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2009). – 2009. – P. 68–71.

Гаркуша Сергей Владимирович

– Харьковский национальный университет радиоэлектроники, кандидат технических наук, докторант; Полтавский университет экономики и торговли, доцент, sv.garkusha@mail.ru

Василенко Юрий Александрович

– Филиал ЗАО «Киевстар Дж.Эс.ЭМ», г. Харьков, зам. директора, tks2006@ukr.net