

УДК 621.391

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО РЕСУРСА НИСХОДЯЩЕГО КАНАЛА LTE ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ RAT 1



[А.М. Аль-Дулайми](#)

Университет Аль-Фарахиди, Ирак



[С.В. ГАРКУША](#)

Полтавский университет экономики и торговли



[М.Х. Аль-Дулайми](#)

Университетский колледж Аль-Рафидаин, Ирак

*Abstract – A research on the previously proposed method for allocation of time-frequency resource of the LTE downlink has been conducted. The method is based on the solution of the optimization problem on the allocation of resource blocks in the downlink LTE technology, which corresponds to the RAT 1 scheme. The advantage of the method is that the allocation of resource blocks of the downlink LTE is carried out in a balanced manner taking into account the signal-interference environment, type and level of bandwidth requirements. The results of the comparative analysis confirmed the effectiveness of this method. A number of numerical examples have shown that using the method allows to increase the bandwidth of the LTE network from 16-20% to 33-47% compared to the known solutions presented by the Max C/I Ratio, Round Robin and Proportional Fair algorithms. The article offers recommendations for the practical implementation of the proposed solution and presents a variant of the multi-level functional architecture for the block of allocation of the time-frequency resource of the downlink LTE network.*

*Анотація – Проведено дослідження раніше запропонованого методу розподілу частотно-часового ресурсу нисхідного каналу LTE, який відповідає схемі RAT 1. Результати порівняльного аналізу підтвердили ефективність даного методу. На ряді числових прикладів показано, що використання методу дозволяє підвищити пропускну здатність мережі LTE від 16-20% до 33-47% у порівнянні з відомими рішеннями, представленими алгоритмами Max C/I Ratio, Round Robin і Proportional Fair.*

*Аннотация – Проведено исследование ранее предложенного метода распределения частотно-временного ресурса нисходящего канала LTE, соответствующего схеме RAT 1. Результаты сравнительного анализа подтвердили эффективность данного метода. На ряде численных примеров показано, что использование метода позволяет повысить пропускную способность сети LTE от 16-20% до 33-47% по сравнению с известными решениями, представленными алгоритмами Max C/I Ratio, Round Robin и Proportional Fair.*

## Введение

Технология LTE занимает ведущее место на рынке телекоммуникаций и рассматривается как эффективное решение при построении телекоммуникационных сетей четвертого поколения (4G). По мнению разработчиков технология LTE обеспечивает высокий уровень энергоэффективности решений, широкую функциональность и роуминг; поддерживает взаимодействие с другими радиотехнологиями доступа; обеспечивает улучшенные пиковые скорости передачи данных и более высо-

кие показатели безопасности системы в целом для предоставления пользователям новых сервисов и служб [1, 2].

При этом эффективность использования технологии LTE зависит не только от величины доступной в нисходящем канале связи (DownLink) пропускной способности, но и от механизмов распределения этого ресурса на базовой станции (eNodeB) между запросами отдельных пользовательских станций (User Equipment, UE) [3-8]. Формирование пропускной способности нисходящего канала связи LTE и дальнейшее управление ею, в свою очередь, во многом зависит от порядка распределения частотного и временного ресурса, к которому относятся поднесущие, ресурсные блоки, символы, слоты, подкадры, кадры и др. Основным недостатком существующих средств управления сетевым ресурсом нисходящего канала связи в технологии LTE является то, что они основываются преимущественно на учете лишь параметров сигнално-помеховой обстановки, например, отношения «сигнал-шум» (Signal-to-Noise Ratio, SNR), от значения которого зависит выбор схемы адаптивной модуляции и кодирования сигналов.

Однако обеспечение мультисервисного доступа с помощью технологии LTE подразумевает необходимость более полного и согласованного учета состояния радиосети: параметров сигнално-помеховой обстановки, объемов доступного канального ресурса (ширины канала, числа поднесущих и ресурсных блоков) и поддерживаемых типов его распределения, требований пользователей к типу и уровню качества обслуживания, а также обеспечения максимально возможных показателей эффективности сети на основе оптимального управления канальным ресурсом. Наиболее полно удовлетворить перечисленные требования можно, лишь обладая адекватными математическими моделями и методами управления сетевым ресурсом нисходящего канала LTE, на которых бы в дальнейшем основывались соответствующие технологические решения. В этой связи возникает актуальная задача, которая заключается в оптимизации процесса распределения сетевого ресурса нисходящего канала технологии LTE на основе усовершенствования соответствующих математических моделей и методов [9-19]. Целью данной статьи является исследование ранее предложенного в работах [9, 10] метода распределения частотно-временного ресурса нисходящего канала LTE и проведение сравнительного анализа полученных результатов с технологическими алгоритмами, которые используются на практике

## **I. МЕТОД РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО РЕСУРСА НИСХОДЯЩЕГО КАНАЛА LTE, СООТВЕТСТВУЮЩИЙ СХЕМЕ RAT 1.**

В соответствии со стандартами 3GPP [3-8] при реализации первого типа распределения ресурсов (RAT 1) ресурсные блоки (RBs) объединяются в группы ресурсных блоков (RBGs). Кроме того, при использовании RAT 1 все множество ресурсных блоков делится на несколько непересекающихся подмножеств (subsets), число которых ( $N_{RB}^{DL}$ ) определяется размером RBG через параметр  $P$  [9, 10]:

$$P = \begin{cases} 1, & \text{при } N_{RB}^{DL} \leq 10; \\ 2, & \text{при } N_{RB}^{DL} = 11 \div 26; \\ 3, & \text{при } N_{RB}^{DL} = 27 \div 63; \\ 4, & \text{при } N_{RB}^{DL} = 64 \div 110. \end{cases} \quad (1)$$

Для определения количества ресурсных блоков в подмножествах при использовании технологии LTE предложено использовать следующее выражение [9, 10]:

$$N_{RB}^{RBGsubset}(p) = \begin{cases} \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P^2} \right\rfloor P + P, \\ \text{при } p < \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P} \right\rfloor \bmod P; \\ \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P^2} \right\rfloor P + (N_{RB}^{DL} - 1) \bmod P + 1, \\ \text{при } p = \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P} \right\rfloor \bmod P; \\ \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P^2} \right\rfloor P, \\ \text{при } p > \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P} \right\rfloor \bmod P, \end{cases} \quad (2)$$

где  $N_{RB}^{RBGsubset}(p)$  – мощность  $p$ -го подмножества (subset);  $p$  – текущее количество ресурсных блоков RB в подмножестве, для которого выполняется расчет мощности ( $p = \overline{0, P-1}$ );  $N_{RB}^{DL}$  – количество ресурсных блоков RB, формирующихся при передаче одного временного слота. В технологии LTE количество ресурсных блоков зависит от ширины полосы пропускания частотного канала и может иметь значения 6, 15, 25, 50, 75 и 100.

В рассматриваемом методе предполагаются известными следующие исходные данные:

$N$  – количество пользовательских станций;

$K_s$  – количество поднесущих для передачи данных в одном ресурсном блоке. Этот параметр зависит от частного разнесения между поднесущими  $\Delta f$  и должен удовлетворять условию  $K_s \Delta f = 180$  кГц.  $K_s$  может быть равен 12 и 24, которые соответствуют частотному разнесению между поднесущими  $\Delta f$  в 15 кГц и 7,5 кГц соответственно;

$N_{sym}^{RB}$  – количество символов, формирующих один ресурсный блок;

$T_{RB} = 0,5$  мс – время передачи одного ресурсного блока;

$T_{SF} = 1$  мс – время передачи одного подкадра;

$N_{SF}^{RB}=2$  – количество RB, которые формируются на одинаковых поднесущих и выделяются пользовательской станции на протяжении передачи одного подкадра;

$R_c^n$  – скорость кода, который используется при кодировании сигнала  $n$ -й пользовательской станции;

$k_b^n$  – битовая загрузка символа  $n$ -й UE; тип разделения каналов (частотное или временное – FDD/TDD), а также конфигурация используемого кадра;

$R_{req}^n$  – требуемая битовая скорость передачи данных для  $n$ -й UE;

$K$  – количество подкадров, используемых для передачи информации в нисходящем канале;

$M = \max(N_{RB}^{RBsubset})$  – максимальный размер подмножеств ресурсных блоков.

При решении задачи управления частотно-временным ресурсом, а фактически распределения пропускной способности нисходящего канала технологии LTE, с использованием RAT 1 в рамках предлагаемого метода необходимо провести расчет булевых управляющих переменных ( $x_n^{m,p}$ ), которые определяют порядок распределения ресурсных блоков:

$$x_n^{m,p} = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-й RB } p\text{-го подмножества выделяется } n\text{-ой UE;} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (3)$$

где  $m = \overline{0, M-1}$ ;  $p = \overline{0, P-1}$ ;  $n = \overline{1, N}$ .

В общем случае при определении искомым переменных  $x_n^{m,p}$  необходимо выполнить ряд условий, определяемых физическим смыслом решаемой технологической задачи:

1. Условие выделения каждого ресурсного блока не более одной пользовательской станции:

$$\sum_{n=1}^N x_n^{m,p} \leq 1, \quad (m = \overline{0, M-1}, p = \overline{0, P-1}). \quad (4)$$

2. Условие выделения  $n$ -й пользовательской станции ресурсных блоков только одного подмножества, которое вводится с целью учета требований 3GPP-стандартов относительно использования RAT 1:

$$x_n^{m,p} M + \sum_{\substack{j=0, t=0, \\ j \neq p, t \neq m}}^{P-1, M-1} x_n^{t,j} \leq M \quad \text{при } m = \overline{0, M-1}; p = \overline{0, P-1}; n = \overline{1, N}. \quad (5)$$

3. Условие предоставления заданного уровня QoS по пропускной способности  $n$ -й пользовательской станции, которое обеспечивается путем выделения необходимого числа ресурсных блоков в нисходящем канале связи:

$$\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{p=0}^{P-1} x_n^{m,p} r_{n,m}^p \geq \delta_n R_{req}^n, \quad (n = \overline{1, N}), \quad (6)$$

где  $r_{n,m}^p = \frac{N_{symb}^{RB} N_{SF}^{RB} K_S R_c^n K_b^n K}{10T_{SF}}$  – пропускная способность, выделяемая  $m$ -м RB  $p$ -го

подмножества  $n$ -й пользовательской станции, при

$$\delta_n = \begin{cases} 1, & \text{если для } n\text{-й UE необходимо гарантированное обслуживание;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Для обеспечения оптимальной балансировки выделяемого каждой пользовательской станции числа ресурсных блоков в модель введены дополнительные условия-ограничения на управляющие переменные  $x_n^{m,p}$ :

$$\frac{(Pr_n + 1)}{(CQI_n + 1)} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{p=0}^{P-1} r_{n,m}^p x_n^{m,p} \geq \beta \cdot R_{req}^n, \quad (n = \overline{1, N}), \quad (7)$$

где  $\beta$  также является управляющей переменной, характеризующей нижнее пороговое значение степени удовлетворения запросов пользователей относительно требуемого уровня качества обслуживания QoS по битовой скорости передачи (Bit Rate).

На введенную переменную накладываются следующие ограничения:

$$\beta \geq 0. \quad (8)$$

С целью повышения качества обслуживания в LTE сети при решении задачи балансировки количества ресурсных блоков RB, выделяемых пользовательским станциям UE, необходимо максимизировать нижнее пороговое значение степени удовлетворения запросов пользователей относительно требуемого уровня качества обслуживания QoS по битовой скорости передачи, т.е.

$$\max_{x, \beta} \beta. \quad (9)$$

Таким образом, в основу рассматриваемого метода распределения частотно-временного ресурса сети LTE положено решение оптимизационной задачи по распределению ресурсных блоков в нисходящем канале технологии LTE, которая соответствует схеме RAT 1. Достоинством метода является то, что выделение ресурсных блоков нисходящего канала LTE осуществляется сбалансированно с учетом сигнально-помеховой обстановки, приоритета пользовательских станций, типа и уровня требований к пропускной способности, обеспечивает балансировку количества ресурсных блоков, выделяемых пользовательским станциям, в нисходящем канале связи LTE сети. Критерием оптимальности выступал максимум нижнего порога выделяемой пропускной способности каждой пользовательской станции (9), а в качестве ограничений при решении оптимизационной задачи выступают условия (3)-(8). Сформулированная оптимизационная задача принадлежит к классу задач смешанного целочисленного линейного программирования (MILP) вследствие того, что переменные (3) являются булевыми, а переменная балансировки (8) должна принимать положительные вещественные значения. Целевая функция (9) и ограничения (1)-(8) описываются линейными зависимостями.

## II. Сравнительный анализ предложенного метода и основных известных алгоритмов по показателю пропускной способности

Для оценки эффективности предложенного метода распределения частотно-временного ресурса нисходящего канала связи LTE проведем сравнительный анализ получаемых на его основе решений с решениями, получаемыми с помощью известных алгоритмов Max C/I Ratio, Round Robin (RR), Proportional Fair (PF).

Как известно, алгоритм Max C/I Ratio ориентирован на выделение доступного частотно-временного ресурса нисходящего канала LTE пользовательским станциям с наилучшими значениями SINR (Signal to Integer and Noise Ratio) [14, 15]. Алгоритм Round Robin Scheduler предполагает выделение всего доступного частотно-временного ресурса для каждой UE равномерно в карусельном режиме. Алгоритм Proportional Fair Scheduling, в свою очередь, осуществляет распределение доступного частотно-временного ресурса нисходящего канала LTE пропорционально значениям SINR в направлении множества UE [14, 15].

Для проведения сравнительного анализа в качестве исходных принимались следующие данные с учетом пяти различных исследуемых случаев:

- количество пользовательских станций UE – 4 ( $N = 4$ );
- ширина полосы пропускания канала 3 МГц;
- количество ресурсных блоков RB – 15 ( $N_{RB}^{DL} = 15$ );
- битовые скорости передачи, требуемые для каждой пользовательской станции UE  $R_{req}^1, R_{req}^2, R_{req}^3, R_{req}^4$  (Мбит/с), указаны в соответствующем столбце табл. 1;
- приоритеты пользовательских станций UE ( $Pr_1, Pr_2, Pr_3, Pr_4$ ) также изменялись для различных условий распределения ресурсных блоков, принимая значения 1 и 2;
- значения параметра CQI указаны для каждого рассматриваемого случая в табл. 1;
- все пользовательские станции UE с типом обслуживания «негарантированная битовая скорость передачи» (Non GBR);
- количество ресурсных блоков в подмножествах  $M = \max(N_{RB}^{RBsubset}) = 8$  ( $0 \div 7$ );
- матрицы скоростей передачи, которые обеспечивают ресурсные блоки для подмножеств  $0 \div 1$  и пользовательских станций UE  $1 \div 4$ :

$$\|r_{n,k}^0\| = \begin{vmatrix} 0,1 & 0,3 & 0,2 & 0,5 & 0,4 & 0,7 & 0,1 & 0,3 \\ 0,6 & 0,7 & 0,7 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,6 & 0,7 \\ 0,8 & 0,9 & 0,7 & 0,1 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 \\ 0,1 & 0,3 & 0,2 & 0,5 & 0,4 & 0,7 & 0,1 & 0,3 \end{vmatrix}, \text{ та } \|r_{n,k}^1\| = \begin{vmatrix} 0,1 & 0,3 & 0,2 & 0,5 & 0,4 & 0,7 & 0,1 & 0 \\ 0,6 & 0,7 & 0,7 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,6 & 0 \\ 0,8 & 0,9 & 0,7 & 0,1 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0 \\ 0,1 & 0,3 & 0,2 & 0,5 & 0,4 & 0,7 & 0,1 & 0 \end{vmatrix}.$$

Результаты расчетов для каждого примера приведены в табл. 1 с указанием порядка распределения пропускной способности нисходящего канала LTE для всех

пользовательских станций, номеров используемых подмножеств, а также количества и порядковых номеров выделяемых ресурсных блоков.

Таблица 1. Процедура выделения ресурсных блоков пользовательским станциям при изменении битовой скорости, приоритета и CQI

№	UE	$R_{req}$	$Pr$	CQI	$R_{all}$	Subset	Количество и номера используемых RB
1	UE1	1	1	1	2,4	0	6(1,4,5,8,9,13)
	UE2	1	1	1	2,6	1	4(2,3,6,14)
	UE3	1	2	1	1,6	0	2(0,12)
	UE4	1	2	1	1,6	1	3(7,10,11)
2	UE1	1	1	2	2,6	0	8(0,1,4,5,8,9,12,13)
	UE2	1	1	1	1,3	1	3(2,7,14)
	UE3	1	2	2	1,6	1	2(3,6)
	UE4	1	2	1	1,1	1	2(10,11)
3	UE1	1	1	1	1,1	1	3(6,7,10)
	UE2	1	1	2	2,2	1	4(2,3,11,14)
	UE3	1	2	3	1,7	0	2(12,13)
	UE4	1	2	4	2,2	0	6(0,1,4,5,8,9)
4	UE1	1	2	3	1,2	1	2(7,12)
	UE2	1	2	3	1,3	1	2(6,14)
	UE3	2	2	3	2,3	1	3(2,3,10)
	UE4	2	2	3	2,4	0	7(0,1,5,8,9,12,13)
5	UE1	1	2	4	1,2	1	2(7,11)
	UE2	2	2	4	2,1	1	4(2,6,10,14)
	UE3	2	1	4	4,1	0	5(0,1,9,12,13)
	UE4	0,5	1	4	1,1	0	3(4,5,8)

Далее условимся, что в рамках рассматриваемого случая для всех пяти расчетных примеров при использовании алгоритмов Max C/I Ratio, Round Robin (RR), Proportional Fair (PF) результаты распределения ресурсных блоков будут одинаковы, т.к. в данном случае не учитываются такие параметры, как требования по скорости, приоритет запросов пользовательских станций и значение CQI.

Результаты соответствующих расчетов приведены в табл. 2 – табл. 4.

Таблица 2. Результат выделения ресурсных блоков пользовательским станциям при использовании алгоритма Max C/I Ratio

UE	$R_{all}$ , Мбит/с	Subset	Количество и номера используемых RB
UE1	1,6	1	3(11,12,13)
UE2	2,6	1	4(8,9,10,14)
UE3	5,4	0	7(0,1,2,4,5,6,7)
UE4	0,5	0	1(3)

При этом, сравнивая результаты выделения пропускной способности нисходящего канала LTE при помощи предложенного метода и алгоритма Max C/I Ratio

(табл. 2), можно сделать вывод, что только в одном из пяти рассматриваемых случаев этот алгоритм удовлетворяет всем исходным требованиям, включая приоритет (пятый расчетный пример). В остальных случаях требования ни по выделяемой пропускной способности, ни по приоритету не выполняются. Кроме того, наибольшая пропускная способность нисходящего канала выделялась пользовательской станции с низшим приоритетом.

При использовании алгоритма Round Robin результат выделения пропускной способности нисходящего канала пользовательским станциям (табл. 3) не удовлетворяет требованиям по качеству обслуживания ни в одном из рассматриваемых расчетных примеров согласно процедуре выделения ресурсных блоков пользовательским станциям при изменении битовой скорости, приоритета и CQI.

Таблица 3. Результат выделения ресурсных блоков пользовательским станциям при использовании алгоритма Round Robin

UE	$R_{all}$ , Мбит/с	Subset	Количество и номера используемых RB
UE 1	0,575	1	7(8,9,10,11,12,13,14)
UE 2	0,975	0	8(0,1,2,3,4,5,6,7)
UE 3	1,375	0	8(0,1,2,3,4,5,6,7)
UE 4	0,575	1	7(8,9,10,11,12,13,14)

В свою очередь алгоритм Proportional Fair позволяет обеспечить выделение ресурса нисходящего канала LTE (табл. 4), удовлетворяющее требованиям по пропускной способности, только лишь в первых трех и пятом рассматриваемых расчетных примерах, а согласно требованиям по приоритетам – только в пятом примере.

Таблица 4. Результат выделения ресурсных блоков пользовательским станциям при использовании алгоритма Proportional Fair

UE	$R_{all}$ , Мбит/с	Subset	Количество и номера используемых RB
UE 1	1,2	0	2(3,5)
UE 2	2,6	1	4(8,9,10,14)
UE 3	4,7	0	6(0,1,2,4,6,7)
UE 4	1,6	1	3(11,12,13)

На рис. 1 –рис. 5 представлены результаты распределения пропускной способности нисходящего канала LTE для всех пяти расчетных примеров. Проведем анализ выигрыша при распределении пропускной способности нисходящего канала LTE, получаемого при использовании предложенной модели по сравнению с основными известными алгоритмами с низким QoS-требованием по пропускной способности (от 0,5 до 1 Мбит/с).



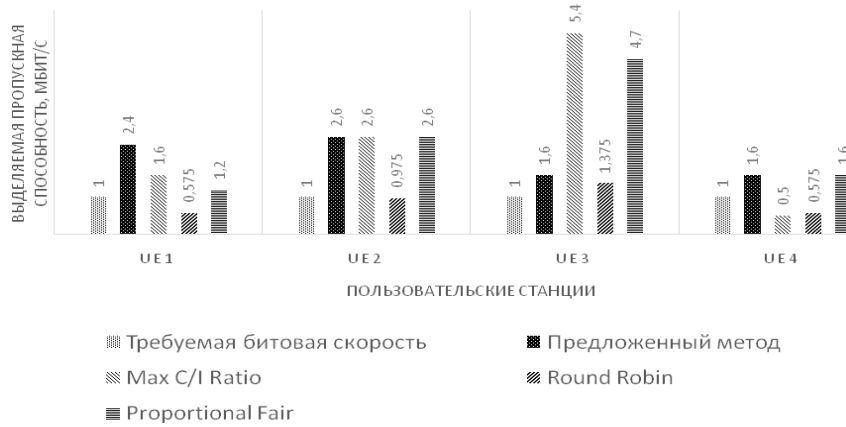


Рис. 1. Результаты распределения пропускной способности для первого расчетного примера

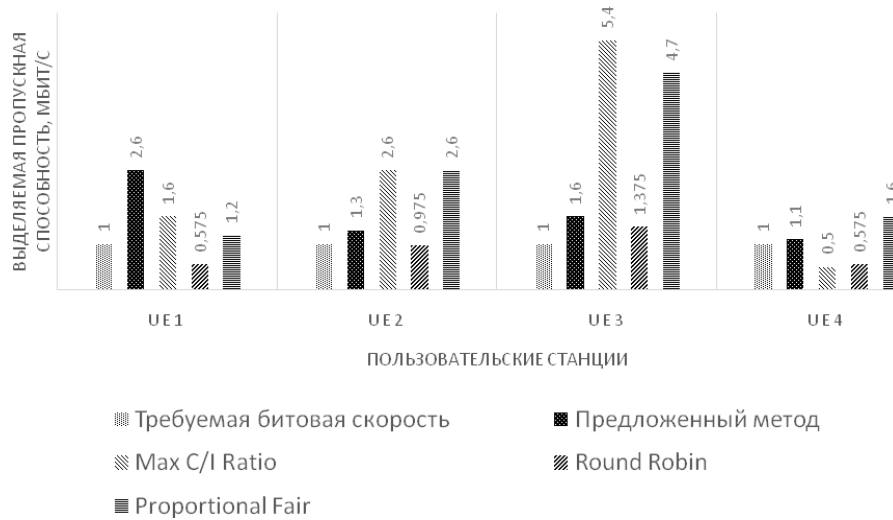


Рис. 2. Результаты распределения пропускной способности для второго расчетного примера

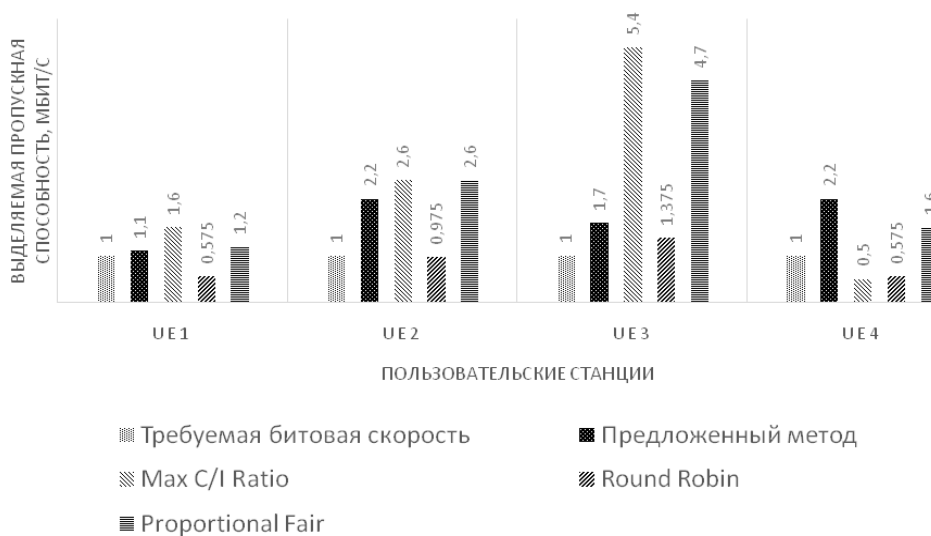


Рис. 3. Результаты распределения пропускной способности для третьего расчетного примера

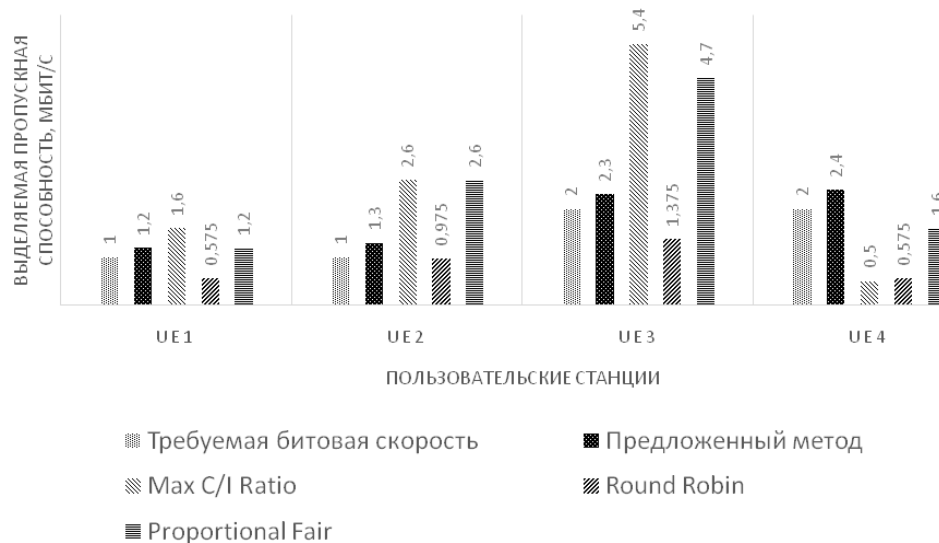


Рис. 4. Результаты распределения пропускной способности для четвертого расчетного примера

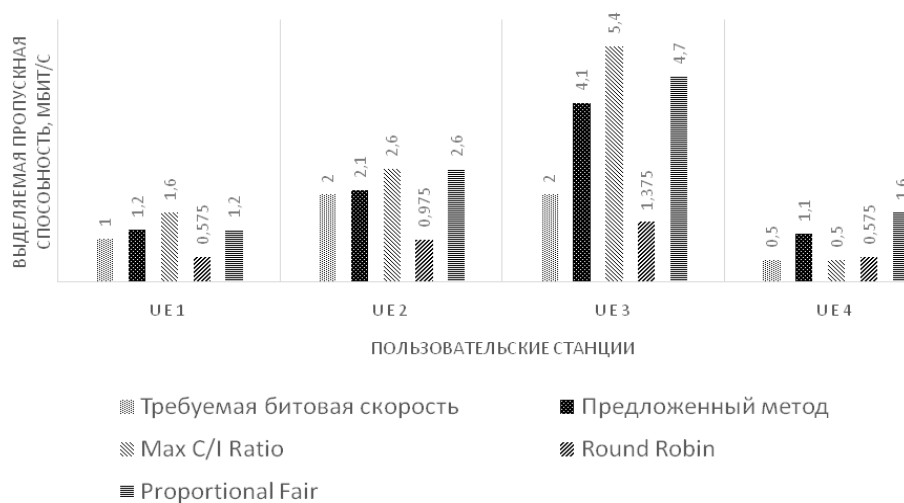


Рис. 5. Результаты распределения пропускной способности для пятого расчетного примера

Результаты сравнительного анализа сведены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты расчета выигрыша при распределении пропускной способности нисходящего канала LTE при использовании предложенного метода по сравнению с известными алгоритмами

	UE	$R_{req}$ , Мбит/с	Выделение ресурсных блоков пользовательским станциям, $R_{all}$ , Мбит/с				Выигрыш по пропускной способности, раз		
			Метод	MaxC/IRatio	RR	PF	$\Delta$ MaxC/IRatio	$\Delta$ RR	$\Delta$ PF
1	UE1	1	2,4	1,6	0,575	1,2	1,5	4,17	2
	UE2	1	2,6	2,6	0,975	2,6	1	2,67	1
	UE3	1	1,6	5,4	1,375	4,7	0,3	1,16	0,34
	UE4	1	1,6	0,5	0,575	1,6	3,2	2,78	1
Среднее значение выигрыша							1,5	2,7	1,1
2	UE1	1	2,6	1,6	0,575	1,2	1,6	4,5	2,17
	UE2	1	1,3	2,6	0,975	2,6	0,5	1,3	0,5
	UE3	1	1,6	5,4	1,375	4,7	0,3	1,16	0,34
	UE4	1	1,1	0,5	0,575	1,6	2,2	1,9	0,69
Среднее значение выигрыша							1,15	2,23	0,92
3	UE1	1	1,1	1,6	0,575	1,2	0,69	1,91	0,92
	UE2	1	2,2	2,6	0,975	2,6	0,85	2,26	0,85
	UE3	1	1,7	5,4	1,375	4,7	0,3	1,24	0,36
	UE4	1	2,2	0,5	0,575	1,6	4,4	3,83	1,38
Среднее значение выигрыша							1,56	2,3	0,87
4	UE1	1	1,2	1,6	0,575	1,2	0,75	2,1	1
	UE2	1	1,3	2,6	0,975	2,6	0,5	1,3	0,5
	UE3	2	2,3	5,4	1,375	4,7	0,43	1,67	0,49
	UE4	2	2,4	0,5	0,575	1,6	4,8	4,17	1,5
Среднее значение выигрыша							1,62	2,3	0,87
5	UE1	1	1,2	1,6	0,575	1,2	0,75	2,1	1
	UE2	2	2,1	2,6	0,975	2,6	0,8	2,2	0,8
	UE3	2	4,1	5,4	1,375	4,7	0,76	2,98	0,87
	UE4	0,5	1,1	0,5	0,575	1,6	2,2	1,9	0,7
Среднее значение выигрыша							1,13	2,3	0,84

Согласно табл. 5., предложенная модель приводит к выигрышу по пропускной способности в сравнении с известными алгоритмами: от 1,13 до 1,62 раза для алгоритма Max C/I Ratio и от 2,23 до 2,7 – для Round Robin, что графически показано на рис. 6.

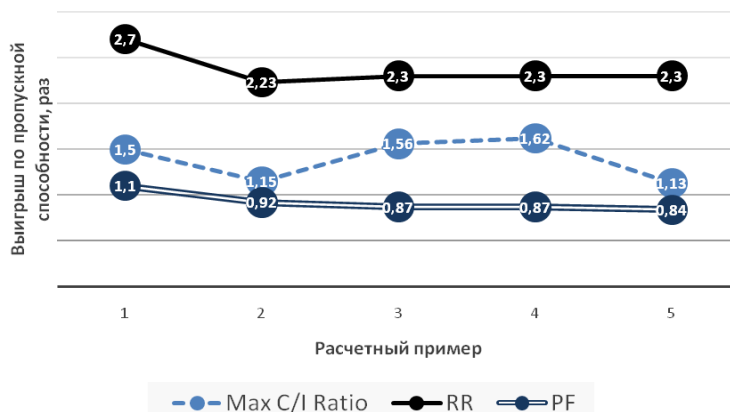


Рис. 6. Оценка выигрыша по пропускной способности нисходящего канала LTE при использовании предложенной модели по сравнению с известными алгоритмами (случай низких QoS-требований)

При сравнении результатов использования предложенной модели и Proportional Fair выигрыш по пропускной способности наблюдался лишь в некоторых случаях (до 1,1 раза). Это объяснялось тем, что канального ресурса в сети LTE было достаточно для удовлетворения QoS-требований станций вне зависимости от значений приоритета запросов пользователей.

Несколько другая наблюдалась ситуация, когда выдвигались QoS-требования, соизмеримые с пропускной способностью нисходящего канала связи LTE сети (для приведенного примера это соответствует  $R_{req} = 1,4 \div 1,6$  Мбит/с). В этом случае, выигрыш по пропускной способности предложенной модели по отношению к известным методам для различных расчетных примеров представлен на рис. 7. Следует отметить, что при этом выигрыш по сравнению с алгоритмом PF составил от 1,16 до 1,2 раза.

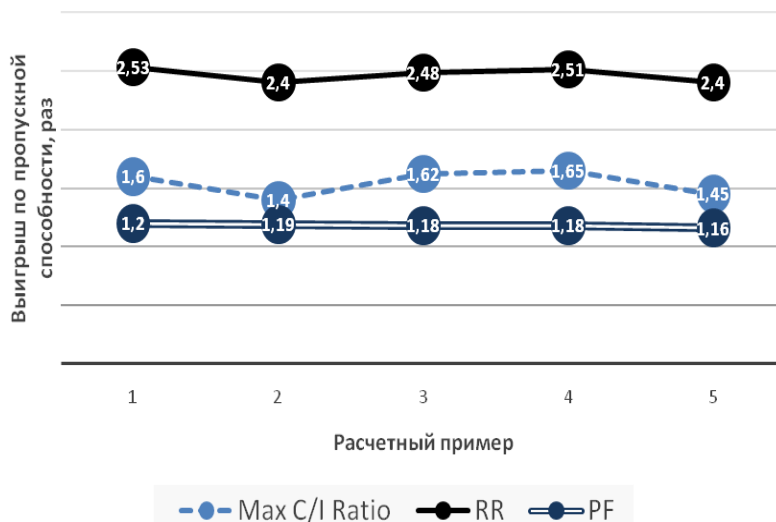


Рис. 7. Оценка выигрыша по пропускной способности нисходящего канала LTE при использовании предложенной модели по сравнению с известными алгоритмами (случай QoS-требований, соизмеримых с пропускной способностью нисходящего канала LTE)

Рассмотрим третий случай, когда QoS-требования UE превышали возможности нисходящего канала LTE, что в рамках рассматриваемого примера соответствовало ситуации, когда  $R_{req} \geq 1,7$  Мбит/с. В этом случае выигрыш по сравнению, например, с алгоритмом PF составил от 1,33 до 1,47 раза, благодаря учету в явном виде требований по скорости, приоритетов запросов пользовательских станций и CQI (рис. 8). При этом наибольший выигрыш предложенного решения обеспечивался в условиях высокой дифференциации значений приоритета, QoS-требований запросов пользователей и индикаторов CQI, что определяет предпочтительную область использования предложенных решений.

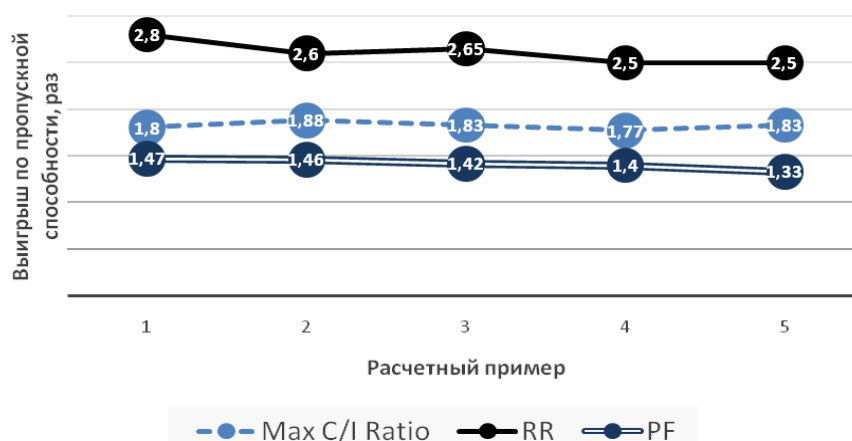


Рис. 8. Оценка выигрыша по пропускной способности нисходящего канала LTE при использовании предложенной модели по сравнению с известными алгоритмами (случай QoS-требований, превышающих пропускную способность нисходящего канала LTE)

### III. Рекомендации по практическому использованию рассмотренного метода распределения частотно-временного ресурса нисходящего канала LTE

С точки зрения полученных решений по оценке эффективности и основываясь на анализе перспективных решений в этой области [20-23] на рис. 9 представлен вариант функциональной архитектуры блока распределения частотно-временного ресурса нисходящего канала LTE сети, основанного на практической реализации и комбинированном использовании рассмотренного метода распределения ресурсных блоков. В рамках представленной архитектуры выделяется несколько функциональных уровней, отвечающих за решение отдельных подзадач, связанных с распределением ресурса нисходящего канала LTE, а именно:

- входной уровень;
- уровень классификации и маркировки трафика;
- уровень распределения ресурса;
- уровень планирования ресурса;
- уровень пользовательских станций UE.

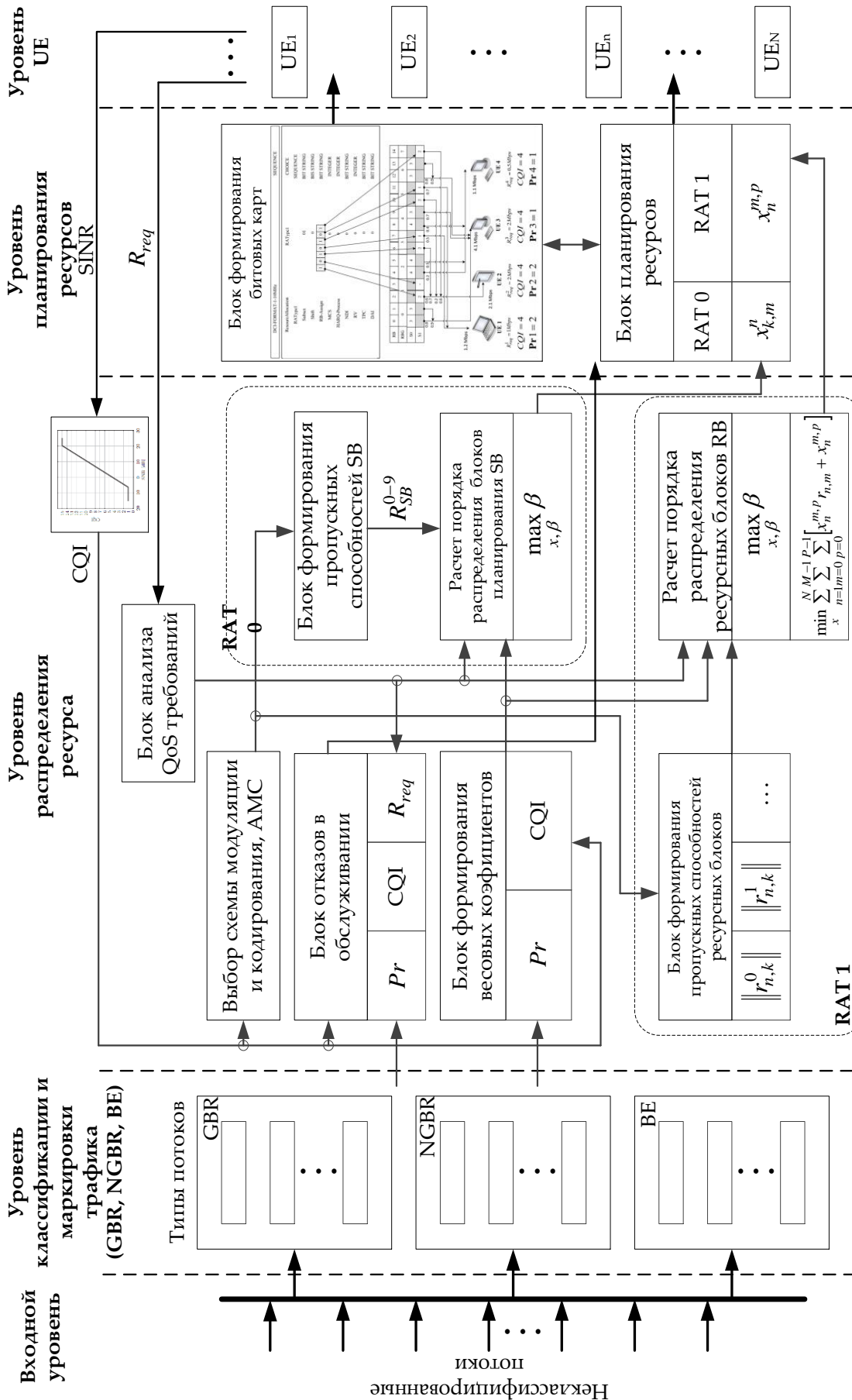


Рис. 9. Функциональная архитектура подсистемы управления частотно-временным ресурсом нисходящего канала LTE, основанного на реализации предложенных решений

При этом входной уровень отвечает за прием агрегированного трафика, представленного множеством неклассифицированных потоков, которые в дальнейшем должны передаваться пользовательским станциям. Основной задачей второго уровня является классификация и маркировка поступающих потоков. Решение этих задач осуществляется так, что потоки разделяются на две большие группы гарантированного GBR и негарантированного NonGBR обслуживания. Результаты этой классификации определяют значения параметров  $\delta_n$  для выражения (6).

Кроме того, в рамках классифицированных групп потоков осуществляется их разбиение на отдельные сервисные потоки (например, Conversational Voice, Conversational Video, Live Streaming, сигнализация IMS и др.). В соответствии с результатами проведенной классификации осуществляется маркировка потоков путем установления значений приоритета (Pr), а также формируются требования к уровню качества обслуживания.

Предлагается на уровне распределения ресурса произвести анализ поступающей на него информации от пользовательских станций (числа станций, значения индикатора CQI), а также от уровня классификации и маркировки (количество потоков, приоритетов и уровня QoS требований). Результаты анализа используются для

- выбора схемы модуляции и кодирования;
- формирования весовых коэффициентов, используемых при балансировке ресурса в выражении (7);
- расчета пропускных способностей ресурсных блоков (при RAT 1);
- принятии решения об отказе в обслуживании пользовательским станциям.

За решение перечисленных задач в архитектуре, представленной на рис. 9, отвечают соответствующие функциональные блоки уровня распределения ресурса. Кроме того, на этом уровне определяется порядок распределения частотно-временного ресурса нисходящего канала LTE, представленного ресурсными блоками (при RAT 1). Подобный порядок представлен управляющими переменными ( $x_n^{m,p}$ ) методика расчета которых зависит как от типа LTE сети (корпоративная или операторская), так и от числа подмножеств распределения (subset) при реализации RAT 1.

Эти переменные всецело определяют ход функционирования блока планирования ресурса соответствующего уровня. В случае, когда планировщику не удастся обеспечить заданный уровень гарантированного качества обслуживания запросам, поступающим с пользовательских станций, то станции или станциям, вносящим перегрузку в сеть, формируется отказ в обслуживании. Номера этих станции определяет предыдущий уровень на основе анализа приоритета запроса, QoS-требований и индикатора CQI. Предлагаемая функциональная архитектура может быть реализована в виде соответствующего алгоритмическо-программного и аппаратного обеспечения базовых станций (eNodeB) LTE сети.

## Выводы

Таким образом, в данной работе проведено исследование ранее предложенного метода распределения частотно-временного ресурса нисходящего канала LTE. В основу метода положено решение оптимизационной задачи по распределению ресурсных блоков в нисходящем канале технологии LTE, которая соответствует схеме RAT 1. Достоинством метода является то, что выделение ресурсных блоков нисходящего канала LTE осуществляется сбалансировано с учетом сигнально-помеховой обстановки, приоритета пользовательских станций, типа и уровня требований к пропускной способности.

В ходе сравнения с ранее известными решениями предложенный метод управления частотно-временным ресурсом нисходящего канала LTE показал свою эффективность, особенно в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки, наличия разнородных требований к типу и уровню качества обслуживания. Это проявилось в повышении качества обслуживания запросов пользователей LTE сети по пропускной способности от 16-20% до 33-47% по сравнению с известными решениями, представленными алгоритмами Max C/I Ratio, Round Robin и Proportional Fair. Кроме того, в работе показано, что предлагаемый метод управления частотно-временным ресурсом обеспечил наибольшую эффективность в условиях QoS-требований запросов пользователей, соизмеримых или превышающих пропускную способность нисходящего канала LTE. При низких QoS-требованиях пользователей, т.е. при избытке канального ресурса, целесообразно использовать ранее известные решения, отличающиеся простотой своей практической реализации.

Также в статье были предложены рекомендации с точки зрения практической реализации предложенного решения и представлен вариант многоуровневой функциональной архитектуры блока управления частотно-временным ресурсом нисходящего канала LTE сети, основанного на комбинированном использовании предложенных моделей и метода распределения блоков планирования и ресурсных блоков. Предлагаемая функциональная архитектура может быть реализована в виде соответствующего алгоритмическо-программного и аппаратного обеспечения базовых станций (eNodeB) LTE сети.

## Список литературы:

1. Вишневецкий В. Технология сотовой связи LTE – почти 4G / В. Вишневецкий, А. Красилов, И. Шахнович // Электроника НТБ. – М.: 2009. – Вып. № 1. – С. 62-72.
2. Dahlman E. 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. Second Edition / E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold. – Academic Press, 2013. – 544 p.
3. 3GPP TS 36.213 V12.4.0 (2015-02). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 12). Valbonne, France, 2015. – 227 p.



4. 3GPP TS 36.211 V13.0.0 (2016-01). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 13). Valbonne, France, 2015. – 143 p.
5. 3GPP TS 23.203 V12.6.0 (2014-09). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Policy and charging control architecture (Release 12). Valbonne, France, 2014. – 221 p.
6. 3GPP TS 36.211 V13.0.0 (2015-12); 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 13). Valbonne, France, 2015. – 117 p.
7. 3GPP TS 23.203 V13.6.0 (2015-12); 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Policy and charging control architecture (Release 13). Valbonne, France, 2015. – 188 p.
8. Гепко И.А. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития / И.А. Гепко, В.Ф. Олейник, Ю.Д. Чайка, А.В. Бондаренко // – К.: «ЕКМО», 2009. – 672 с.
9. Гаркуша С. В. Модель распределения блоков планирования в нисходящем канале связи технологии LTE / С. В. Гаркуша // Грузинский электронный научный журнал: Компьютерные науки и телекоммуникации. – 2013. – Вып. 3 (39). – С. 76-94.
10. Аль-Дулайми А.М.Х., Евдокименко М.А. Математическая модель и метод сбалансированного управления частотно-временным ресурсом в сети LTE [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2016. – № 1 (18). – С. 72 - 90. – Режим доступа до журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2016/1/1/161\\_aldulaimi\\_cqi.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2016/1/1/161_aldulaimi_cqi.pdf).
11. Osterbo O. Scheduling and Capacity Estimation in LTE / O. Osterbo // Advances in electronics and telecommunications. – 2011. – Vol. 2, No. 3. – P. 31-42.
12. Galinina O. 5G Multi-RAT LTE-WiFi Ultra-Dense Small Cells: Performance Dynamics, Architecture, and Trends / O. Galinina, A. Pyattaev, S. Andreevy, M. Dohler, Y. Koucheryavy // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2015. – Vol. 33, Issue 6. – P. 1224-1240.
13. Wu S.-J. A Novel Packet Scheduling Scheme for Downlink LTE System / S.-J. Wu, L. Chu // 2011 Seventh International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP), 14-16 Oct. 2011. – P. 25-28.
14. Kawser M.T. Performance Comparison between Round Robin and Proportional Fair Scheduling Methods for LTE / M. T. Kawser, H. M. A. B. Farid, A. R. Hasin, A. M. J. Sadik, I. K. Razu // International Journal of Information and Electronics Engineering. – 2012. – V. 2, № 5. – P. 678–681.
15. Kausar R. Packet Scheduling Architecture with Service Specific Queue Sorting and Adaptive Time Domain Scheduling Algorithms for LTE-Advanced Networks / R. Kausar // International Journal on Advances in Networks and Services Volume 4, Number 3 & 4, 2011. – 2011. – P. 244-256.
16. Wang X. et al. Coordinated scheduling and network architecture for lte macro and small cell deployments / X. Wang, B. Mondal, E. Visotsky, A. Ghosh // 2014 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). – IEEE, 2014. – P. 604-609.
17. Kausar R. An intelligent scheduling architecture for mixed traffic in LTE-advanced / R. Kausar, Y. Chen, K. K. Chai // 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications-(PIMRC). – IEEE, 2012. – P. 565-570.

18. *Ameigeiras P.* et al. 3GPP QoS-based scheduling framework for LTE //EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2016. – №. 1. – P. 1-14.
19. *Bendaoud F.* Survey on scheduling and radio resources allocation in LTE / F. Bendaoud, M. Abdennebi, F. Didi // International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN) Vol.6, No.1, March 2014. – P. 17-29.
20. *Sesia S.* LTE - the UMTS long term evolution / S. Sesia, I. Toufik, M. Baker. – John Wiley, 2015. – 752 p.
21. The LTE network Architecture: a comprehensive tutorial // Strategic Whitepaper: Lucent, 2009. – 26 p.
22. *Tseng S.C.* A field-tested QoS scheduler for diverse traffic flows over mobile networks / S.C. Tseng, C. W. Huang, T. L. Lu, C. T. Chiang, W.H. Wei // Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), 2015 24th. – IEEE, 2015. – P. 138-142.
23. *Mukherjee A.* et al. System architecture and coexistence evaluation of licensed-assisted access LTE with IEEE 802.11 / A. Mukherjee, J. Cheng, S. Falahati, L. Falconetti, A. Furu // 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW). – IEEE. – 2015. – P. 2350-2355.