

УДК 621.391

## МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЛОКОВ ПЛАНИРОВАНИЯ В НИСХОДЯЩЕМ КАНАЛЕ СВЯЗИ ТЕХНОЛОГИИ LTE

Гаркуша С.В.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники,  
Украина, 61166, г. Харьков, просп. Ленина, 14

### *Аннотация:*

*Приведены результаты разработки математической модели распределения частотно-временного ресурса нисходящего канала связи технологии LTE. Предложенная модель направлена на обеспечение гарантированного качества обслуживания пользователей беспроводной сети путем выделения пользовательской станции требуемой скорости передачи в нисходящем канале связи. Проведен сравнительный анализ предложенной модели с существующими методами распределения частотно-временного ресурса технологии LTE с точки зрения обеспечения общей производительности нисходящего канала связи, степени балансировки пропускной способности, а также вероятности выделения пользовательским станциям требуемой скорости передачи.*

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

### 1. Введение

В технологии LTE (Long-Term Evolution), разработанной 3GPP (3rd Generation Partnership Project), одним из эффективных путей повышения производительности и улучшения основных показателей качества обслуживания (Quality of Service, QoS) является использование принципов структурной и функциональной самоорганизации. Использование решений по самоорганизации позволяет эффективно реагировать на изменение состояния и условий функционирования беспроводной сети, которые могут быть продиктованы, например, выходом из строя или перегрузкой элементов сети, колебаниями поступающего в сеть трафика, динамикой изменения сигнально-помеховой обстановки и т.д. [1]

Высокий уровень самоорганизации может быть достигнут путем усовершенствования сетевых протоколов и механизмов, отвечающих за планирование доступных сетевых ресурсов. Поэтому принципы самоорганизации в технологии LTE могут быть положены на систему управления радиоресурсом (Radio Resource Management, RRM), а именно на планировщик (scheduler), который ответственен за планирование ресурсов для пользовательских станций (User Equipment, UE). К подобного рода ресурсам, прежде всего, относятся символы (временной ресурс) и частотные поднесущие (частотный ресурс). Необходимо заметить, что решение задачи RRM о выделении радиоресурсов в первую очередь основывается на требованиях к QoS. 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) [2-4].

Результатом решения задачи распределения частотного и временного ресурсов должно быть закрепление блоков планирования (Scheduling Block, SB) за пользовательскими станциями в нисходящем канале связи одного кадра, являющегося законченным «циклом»

передачи данных во временной области и передаваемого на протяжении 10 мс. Блок планирования является наименьшим структурным элементом, выделяемым одной UE и формируемый двумя соседними ресурсными блоками (Resource Block, RB) на одинаковых поднесущих (subcarrier) [5].

Таким образом, задача планирования частотного и временного ресурса в технологии LTE должна быть сформулирована как задача распределения SB между UE сети в зависимости от заявленной скорости передачи. При этом скорость передачи каждой UE зависит от числа выделенных SB.

## 2. Анализ методов планирования частотного и временного ресурсов

Так как в технологии LTE одним нисходящим каналом совместно пользуются несколько пользовательских станций, то существует необходимость в выборе механизма или метода планирования частотного и временного ресурсов для обеспечения доступа к среде передачи данных всем UE. Механизм планирования частотного и временного ресурсов, в свою очередь, используется планировщиком для выделения скорости передачи UE.

Информацию о параметрах радиоканала eNodeB получает от UE с использованием индикатора качества канала (Channel Quality Indicator, CQI). UE сообщает eNodeB полученный показатель CQI путем сопоставления измеренного значения отношения сигнал/шум (Signal-to-noise ratio, SNR) в соответствии с линейной функцией приведенной на рис. 1 [6].

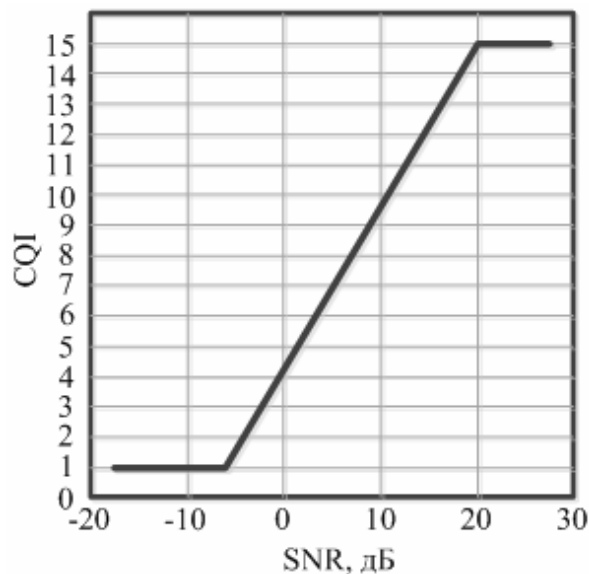


Рис. 1. Модель соотношения CQI-SNR

На основе полученного значения CQI для каждого RB производится подстройка скорости передачи данных пользовательских станций на выделенном частотно-временном ресурсе, путем использования адаптивной модуляции и кодирования (Adaptive Modulation and Coding). В табл. 1 приведены значения CQI используемые в технологии LTE, а также схемы модуляции и канального кодирования соответствующее этим значениям [6].

Как показал проведенный анализ известные методы распределения частотного и временного ресурсов в технологии LTE предполагают использование трех механизмов по предоставлению прав доступа к среде передачи данных [4, 7-12]:

- алгоритм пропорционального справедливого распределения обслуживания (Proportional Fair Scheduling);
- циклический алгоритм (Round Robin Scheduler);

- алгоритм максимального отношения мощности несущей к уровню помехи (Max C/I Ratio, Best CQI scheduling).

Таблица 1

Соответствие модуляции и канального кодирования значениям CQI

Индекс CQI	Модуляция	Битовая нагрузка символа	Скорость кода	Эффективность, бит/с/Гц
1	QPSK	2	78/1024	0,1523
2	QPSK	2	120/1024	0,2344
3	QPSK	2	193/1024	0,3770
4	QPSK	2	308/1024	0,6016
5	QPSK	2	449/1024	0,8770
6	QPSK	2	602/1024	1,1758
7	16 QAM	4	378/1024	1,4766
8	16 QAM	4	490/1024	1,9141
9	16 QAM	4	616/1024	2,4063
10	64 QAM	6	466/1024	2,7305
11	64 QAM	6	567/1024	3,3223
12	64 QAM	6	666/1024	3,9023
13	64 QAM	6	772/1024	4,5234
14	64 QAM	6	873/1024	5,1152
15	64 QAM	6	948/1024	5,5547

В работе были проанализированы методы распределения частотного и временного ресурсов, использующие алгоритм Round Robin Scheduler [4, 7, 8, 10-12]. 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. Как показано на рис. 2, выбор UE, которые получают доступ к частотно-временному ресурсу, осуществляется круговым образом, помещая запрос от каждой UE в очередь. Помещение запроса в очередь от новой UE производится по окончании цикла планирования.

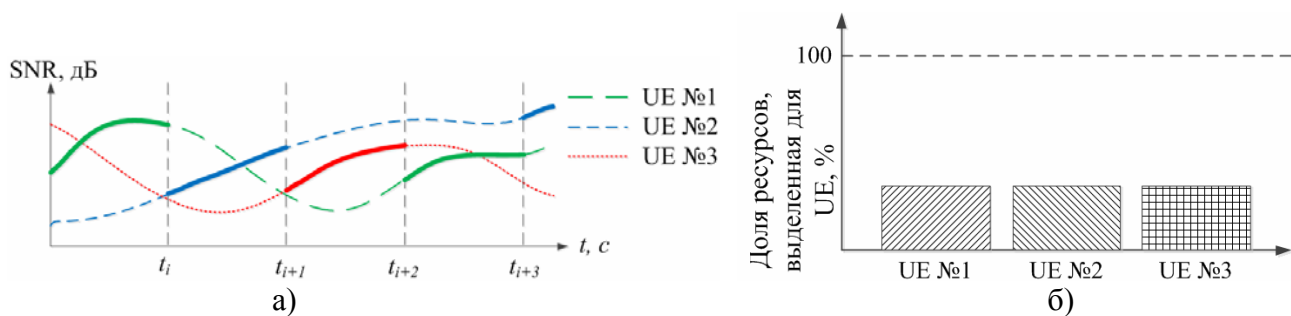


Рис. 2. Пример распределения ресурса алгоритмом Round Robin Scheduler

Проведенный анализ показал, что алгоритм Round Robin Scheduler позволяет производить передачу данных в определенный момент времени только одной UE. При этом скорость передачи данных выбранной пользовательской станции ограничивается фактическим значением SNR. Так если на выделенном частотно-временном ресурсе UE имеет низкое значение SNR, то и скорость передачи данных UE уменьшается.

Также были проанализированы методы [7, 10-12], 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 (рис. 3). Алгоритм Max C/I Ratio выбирает UE, у которой значение SNR является самым высоким. Если значения SNR нескольких UE одинаковы, то распределение частотно-временного ресурса будет производитьсякратно количеству UE.

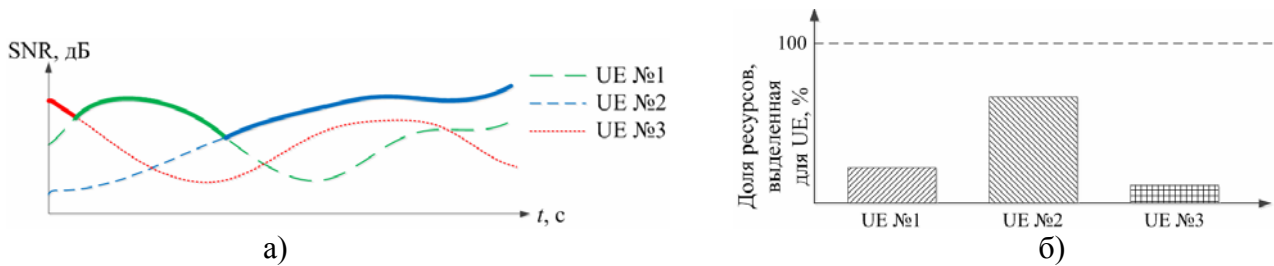


Рис. 3. Пример распределения ресурса алгоритмом Max C/I Ratio

В результате анализа установлено, что использование алгоритма Max C/I Ratio планировщиком имеет основной недостаток, пример которого приведен на рис. 4. Так на рис. 4 приведен случай когда один из пользователей сети находится рядом с eNodeB и его пользовательская станция принимает сигнал с более высокого качества (UE №2), чем UE любого другого пользователя. В данном случае планировщик будет производить выделение всего ресурса только UE №2 и, в том случае когда его буфер всегда полон (например, при загрузке больших файлов или видео), никакому другому UE не будет выделен доступ к передаче данных.

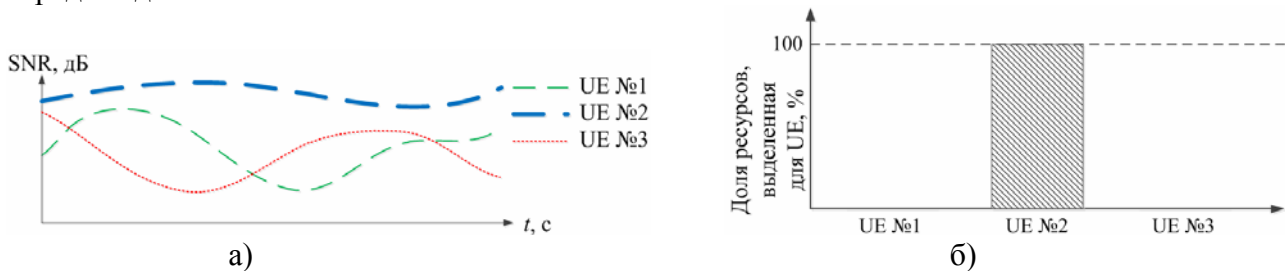


Рис. 4. Пример распределения ресурса алгоритмом Max C/I Ratio в случае когда одна из UE имеет высокое качество сигнала

Кроме того в работе проанализированы методы распределения частотного и временного ресурсов, использующие алгоритм пропорционального справедливого распределения обслуживания (Proportional Fair Scheduling) [7-12]. 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. Данный метод направлен на обеспечение высокой пропускной способности сети и обеспечение сбалансированного распределения частотных и временных ресурсов между UE.

Проведенный анализ показал, что основная идея алгоритма Proportional Fair Scheduling заключается в использовании данных о качестве канала связи, учитывая отношение фактического значения SNR каждой UE к среднему значению. Активная UE, которая будет производить передачу данных в определенный момент времени выбирается в соответствии с

выражением  $h = \arg \max_n \left\{ \frac{r_{n,i+1}}{\theta_{n,i}} \right\}$ . Среднее значение SNR имеет обозначение  $\theta_{n,i}$ , где  $n$  –

номер UE,  $i$  – номер временного интервала, а  $r_{n,i+1}$  указывает на ожидаемую скорость передачи данных для следующего временного интервала  $n$ -й UE. Из рассчитанных

значений, путем сравнения, планировщик производит выбор UE с самым высоким соотношением и планирует ее доступ к частотно-временному ресурсу в следующий интервал времени. Принцип работы механизма Proportional Fair Scheduling представлен на рис. 5.

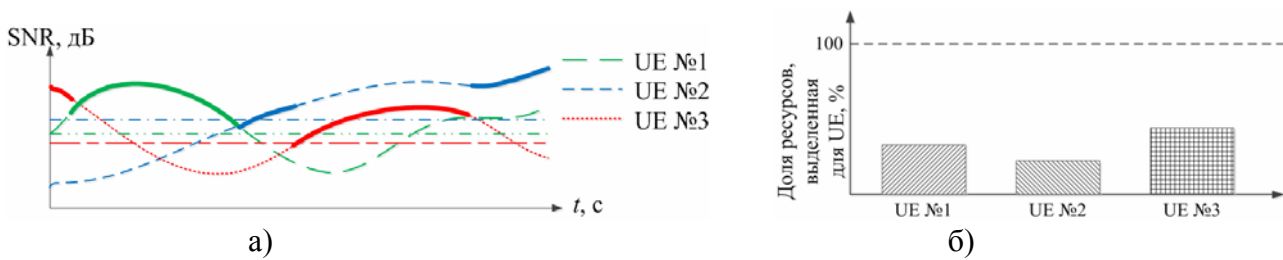


Рис. 5. Пример распределения ресурса алгоритмом Proportional Fair Scheduling

Анализ показал, что наиболее приемлемым механизмом для предоставления доступа к частотно-временному ресурсу технологии LTE 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.

Также в результате анализа установлено, что 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. Использование указанного класса обслуживания (Class of Service, CoS) обеспечивает доставку данных UE по мере возможностей без гарантий скорости передачи данных. При этом 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 задачи распределения SB.

Разработка математической модели планирования частотного и временного ресурсов нисходящего канала связи технологии LTE должна быть направлена на удовлетворение следующих требований:

- ориентация на эффективное использование частотного и временного ресурса;
- учёт требований по скорости передачи UE и качеству обслуживания;
- ориентация на преимущественно динамический характер решения задачи распределения частотно-временного ресурса;
- ориентация на максимизацию производительности сети в целом и на улучшение других показателей QoS;
- учёт технологических особенностей сети (режима работы, ширины канала, количества ресурсных блоков, конфигурации кадра);
- учёт территориальной удаленности станций (определяет выбор схемы модуляции и кодирования (Modulation and Coding Scheme, MCS) для передачи сигнала UE).

### 3. Исходные данные для задачи планирования частотного и временного ресурсов

Предлагаемая математическая модель направлена на применение в беспроводных сетях технологии LTE, использующих временное и частотное разделение каналов.

При разработке математической модели учитывается тот факт, что в качестве основной технологии доступа UE к частотному и временному ресурсам в технологии LTE выбран

множественный доступ с ортогональным частотным разделением сигналов (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA), основанный на мультиплексировании с ортогональным частотным разделением (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) [2, 3]. При этом наименьшей структурной единицей радиоресурса, которой можно управлять при решении задачи планирования является RB [2]. Каждый RB занимает 12 соседних OFDM поднесущих в частотной области и один слот (0,5 мс) во временной области, состоящий из шести или семи OFDM-символов (наименьшая структурная единица OFDM во временной области). Блок планирования, состоящий из двух соседних RB на одинаковых поднесущих передается на протяжении интервала времени передачи (Transmission Time Interval, TTI) равного 1 мс [5].

При разработке модели важно обеспечить адекватный учет особенностей структуры OFDMA-кадра, который формируется для режима временного разделения каналов (Time-division duplexing, TDD) и режима частотного разделения каналов (Frequency-division duplexing, FDD). В режиме TDD и FDD каждый кадр разбит на десять подкадров. В режиме FDD каждый подкадр нисходящего канала предназначен для передачи информации в нисходящем направлении. Как видно из рис. 6 в начале каждого подкадра передается служебная информация, занимающая от одного до трех OFDM-символов. Кроме того в нулевом и десятом подкадре два последних символа шести средних RB первого слота выделяются для передачи синхронизирующих сообщений. Также в нулевом подкадре первые четыре символа шести средних RB второго слота выделяются для передачи широковещательных сообщений.

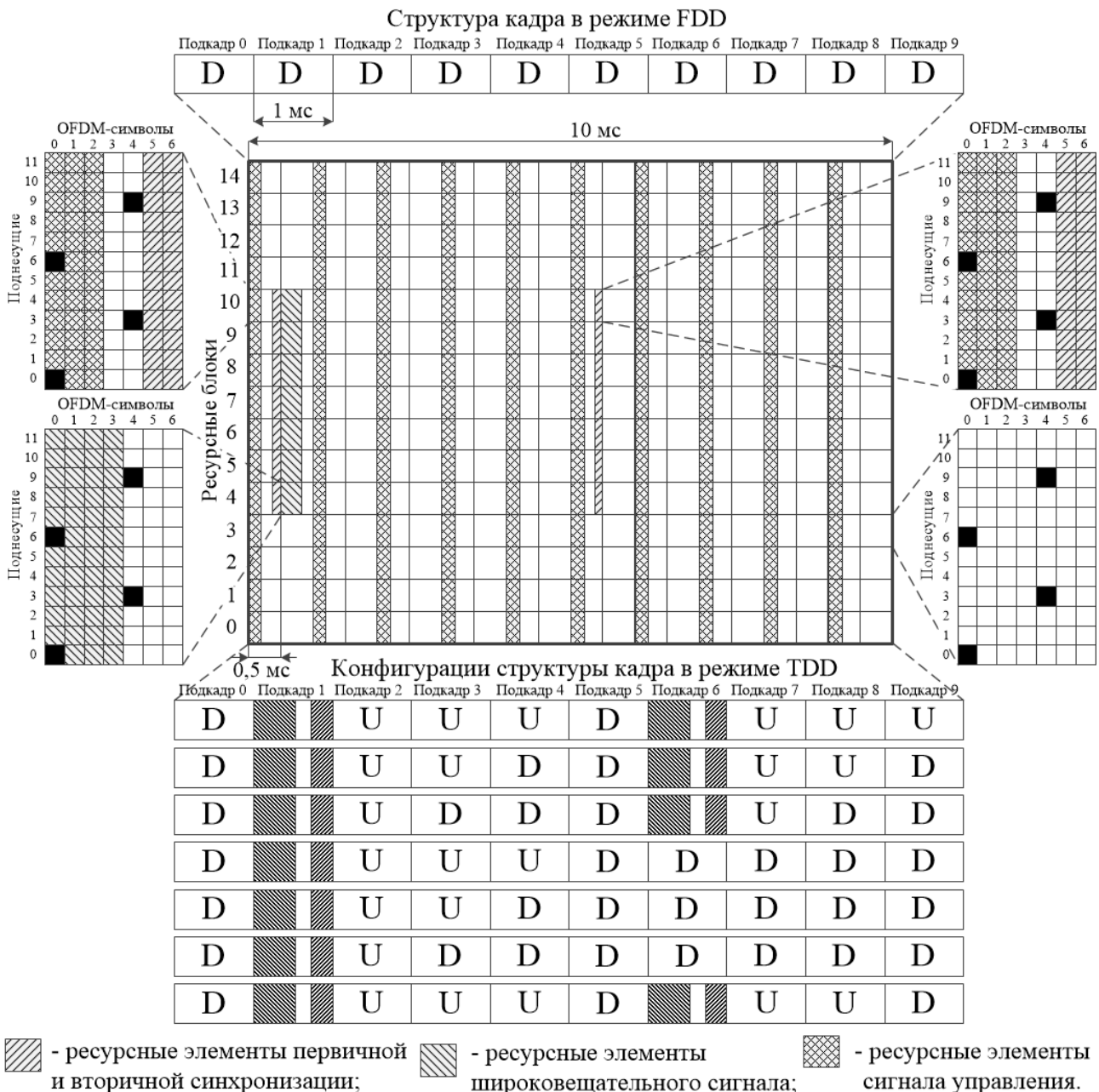


Рис. 6. Конфигурация кадра нисходящего канала

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 и определяется из табл. 2. В случае, если деление количества RB на параметр  $p$  не дает целочисленного значения, то крайняя RBG будет иметь размер меньший  $p$  [13].

Таблица 2

Зависимость размера RBG от общего количества формируемых RB

Количество формируемых RB, $N_{RB}^{DL}$	Размер RBG, $p$
$\leq 10$	1
11-26	2
27-63	3
64-110	4

При решении задачи распределения частотного и временного ресурсов необходимо учитывать конфигурацию кадра (табл. 3), так как подкадры нисходящего канала чередуются с подкадрами восходящего канала и подкадрами передачи служебной информации. Подкадры передачи служебной информации состоят из трех частей: DwPTS – поля передачи "вниз", GP – защитного интервала и UpPTS – поля передачи "вверх". Каждой UE для передачи данных выделяются RBG, формируемые из RB.

Таблица 3

Конфигурации кадра технологии LTE в режиме FDD и TDD

Режим разделения каналов	Конфигурация кадра	Номер подкадра									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TDD	0	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
	1	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
	2	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
	3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
	4	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
	5	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
	6	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D
FDD	7	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D

В предлагаемой модели предполагаются известными следующие исходные данные:

1)  $N$  – количество UE;  
 2)  $M$  – число RB, формируемых на протяжении передачи одного временного слота. В технологии LTE количество RB зависит от ширины частотного канала и может принимать значения: 6, 15, 25, 50, 75, 100;

3)  $K_s$  – число поднесущих для передачи данных в одном RB и одном SB. Данный параметр зависит от частотного разнеса между поднесущими  $\Delta f$  и должен удовлетворять условию  $K_s \Delta f = 180$  КГц.  $K_s$  может принимать значения 12 и 24, которые соответствуют частотному разнесу между поднесущими  $\Delta f$  в 15 КГц и 7,5 КГц;

4)  $N_{symp}^{RB}$  – количество символов, формирующих один ресурсный блок. Параметр  $N_{symp}^{RB} = 7$  в случае использования нормального циклического префикса (cyclic prefix, CP). Длительность нормального CP первого OFDM-символа составляет  $T_{CP}^1 = 5,2$  мкс, а со второго по шестой OFDM-символ –  $T_{CP}^{2-6} = 4,7$  мкс. При использовании расширенного CP ( $T_{CP} = 16,7$  мкс) RB состоит из шести OFDM-символов ( $N_{symp}^{RB} = 6$ );

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

6)  $T_{SB} = 1$  мс – время передачи одного SB;

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



- 8)  $N_{SF}^{RB}=2$  – количество RB, формируемых на одинаковых поднесущих выделяемых UE на протяжении передачи одного подкадра;
- 9)  $R_c^{n,m}$  – скорость кода, используемого при кодировании сигнала  $n$ -й UE на поднесущих  $m$ -го SB (табл. 1);
- 10)  $k_b^{n,m}$  – битовая загрузка символа  $n$ -й UE на поднесущих  $m$ -го SB (табл. 1);
- 11) вид разделения каналов – FDD или TDD, а также используемая конфигурация кадра (табл. 3);
- 12)  $R_{mpb}^n$  – требуемая скорость передачи данных, для  $n$ -й UE;
- 13)  $K$  – количество подкадров, используемых для передачи информации в нисходящем канале связи. При использовании режима FDD количество подкадров нисходящего канала связи равно общему количеству подкадров в кадре  $K=10$ . При использовании режима TDD количество подкадров нисходящего канала связи должно выбираться в соответствии с используемой конфигурацией кадра (табл. 3);
- 14)  $p$  – количество RB входящих в состав одной RBG (табл. 2).

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

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

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 результате этого матрица конфигураций нисходящего канала примет вид

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

#### 4. Математическая модель распределения ресурсных блоков в нисходящем канале связи

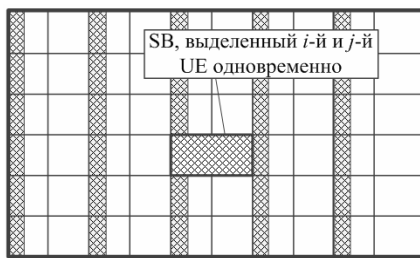
В ходе решения задачи распределения блоков планирования в рамках предлагаемой модели необходимо обеспечить расчет булевой управляющей переменной ( $x_{k,m}^n$ ), определяющей порядок распределения блоков планирования:

$$x_{k,m}^n = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-й блок планирования на } k\text{-м} \\ & \text{подкадре выделен } n\text{-й UE;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3)$$

Общее число управляющих переменных зависит от количества UE в сети, количества подкадров в кадре, а также количества SB, на протяжении передачи одного подкадра, и будет определяться выражением  $N \times M \times K$ . В результате расчета переменных (3) производится закрепление подкадров и распределение SB за пользовательскими станциями, на которых будут передаваться данные в нисходящем канале. Кроме того, 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 (рис. 7)

$$\sum_{n=1}^N x_{k,m}^n \leq 1 \quad (k = \overline{0, K-1}; m = \overline{0, M-1}). \quad (4)$$



а) условие (4) не выполняется

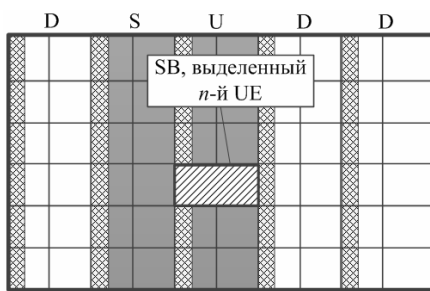


б) условие (4) выполняется

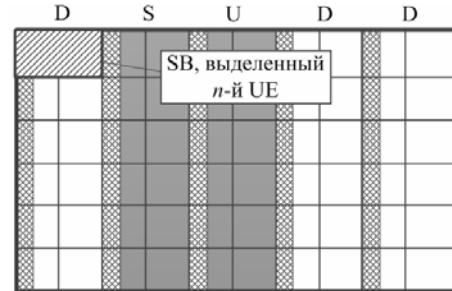
Рис. 7. Пример проверки условия закрепления  $m$ -го SB нисходящего канала связи на протяжении передачи  $k$ -го подкадра не более чем за одной UE

2) Условие выделения UE блоков планирования только нисходящего канала связи (рис. 8):

$$\frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=1}^N x_{k,m}^n}{M} \leq h_{l,k} \quad (k = \overline{0, K-1}; l - \text{используемая конфигурация кадра}). \quad (5)$$



а) условие (5) не выполняется



б) условие (5) выполняется

Рис. 8. Пример проверки условия выделения UE блоков планирования только нисходящего канала связи

3) Условие закрепления за  $n$ -й UE количества SB, обеспечивающего необходимую скорость передачи в нисходящем канале связи при используемой MCS (рис. 9):

$$\sum_{m=\frac{M}{2}-3}^{\frac{M}{2}+2} R_{SB}^0 x_{0,m}^n + \sum_{m=\frac{M}{2}-3}^{\frac{M}{2}+2} R_{SB}^5 x_{5,m}^n + \sum_{m=0}^{\frac{M}{2}-4} R_{SB}^{0-9} x_{0,m}^n + \sum_{m=\frac{M}{2}+3}^{M-1} R_{SB}^{0-9} x_{0,m}^n +$$

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

при  $n = \overline{1, N}$ ,  $l$  – используемая конфигурация кадра. В выражении (6) использованы следующие переменные:

$$R_{SB}^0 = \frac{\left( (N_{symp}^{RB} N_{SF}^{RB} - N_{PDCCH} - N_{PSS,SSS} - N_{PBCH}) K_s - N_{pilot} N_{SF}^{RB} \right) R_c^{n,m} k_b^{n,m}}{K T_{SF}} \quad \text{– пропускная}$$

способность SB, 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), используя  $N_{PSS,SSS}=2$  и  $N_{PBCH}=4$  символов соответственно (рис. 3) [14].

$$R_{SB}^5 = \frac{\left( (N_{symp}^{RB} N_{SF}^{RB} - N_{PDCCH} - N_{PSS,SSS}) K_s - N_{pilot} N_{SF}^{RB} \right) R_c^{n,m} k_b^{n,m}}{K T_{SF}} \quad \text{– пропускная способность SB,}$$

формируемых на пятом подкадре и передающих сигналы PSS и SSS.

$$R_{SB}^{0-9} = \frac{\left( (N_{symp}^{RB} N_{SF}^{RB} - N_{PDCCH}) K_s - N_{pilot} N_{SF}^{RB} \right) R_c^{n,m} k_b^{n,m}}{K T_{SF}} \quad \text{– пропускная способность SB,}$$

формируемых на всех подкадрах и содержащих из служебной информации только физический нисходящий канал управления (Physical Downlink Control Channel, PDCCH);  $N_{PDCCH}=3$  – количество символов в каждом подкадре, выделенных для передачи сигнала управления PDCCH;  $N_{pilot}=4$  – ресурсные элементы (Resource Element, RE), выделенные для передачи пилотных сигналов в одном RB. Причем для формирования одного RE используется одна поднесущая и один OFDM-символ.

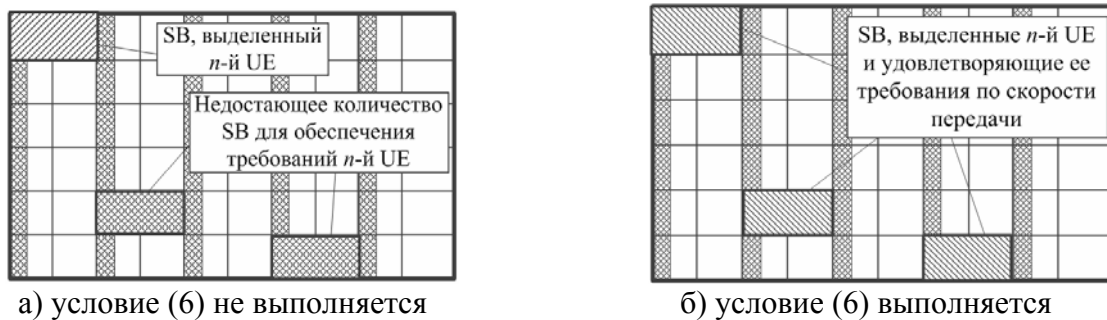


Рис. 9. Пример проверки условия закрепления за  $n$ -й UE количества SB, обеспечивающего необходимую скорость передачи

4) Условие объединения RB в RGB размеров, удовлетворяющих ширине используемого частотного канала (рис. 10):

$$x_{k,m}^n = \frac{1}{P} \sum_{z=\lfloor \frac{m}{p} \rfloor}^{\lfloor \frac{m}{p} \rfloor + 1} x_{k,z}^n \quad (n = \overline{1, N}; k = \overline{0, K-1}; m = 0, \lfloor \frac{M}{p} \rfloor p - 1); \quad (7)$$

$$x_{k,m}^n = \frac{1}{P} \sum_{z=\lfloor \frac{M}{p} \rfloor^p}^M x_{k,z}^n \quad (n = \overline{1, N}; k = \overline{0, K-1}; m = \lfloor \frac{M}{p} \rfloor p - 1, M), \quad (8)$$

где  $\lfloor \cdot \rfloor$  – процедура поиска наименьшего целого.

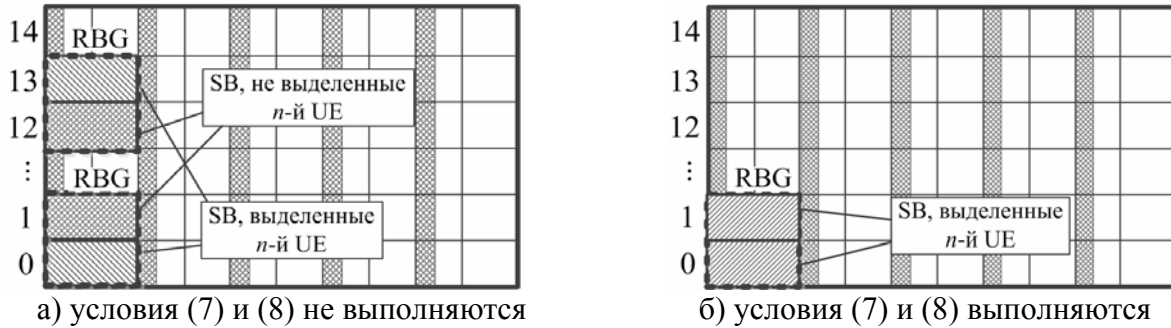


Рис. 10. Пример проверки условия объединения RB в RGB

Условие (8) используется для объединения блоков планирования крайней группы ресурсных блоков, размеры которой могут быть меньше  $p$ .

Расчет искоемых переменных (3) в соответствии с условиями-ограничениями (4)-(8) целесообразно осуществлять в ходе решения оптимизационной задачи, обеспечивая минимум или максимум предварительно выбранного критерия качества решения задачи распределения SB, объединения их в RBG и выделения пользовательским станциям беспроводной сети технологии LTE.

Задача распределения SB может быть решена с использованием критерия оптимальности, направленного на максимизацию общей производительности нисходящего канала связи. Таким образом, критерий оптимальности примет вид:

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

при учете условий-ограничений (4)-(8). Использование критерия оптимальности (9) совместно с условиями-ограничениями (4)-(8) направленно на обеспечение гарантированной скорости передачи с возможностью доступа к дополнительной (не гарантируемой) полосе пропускания, что в классах сервиса CoS соответствует подклассу В.

Сформулированная задача с математической точки зрения является задачей смешанного целочисленного нелинейного программирования – MINLP (Mixed Integer NonLinear Programming). В модели искоемые переменные  $x_{k,m}^n$  (3) являются булевыми. Переменная, используемая в критерии оптимальности (9), является целочисленной, ограничения на искоемые переменные (4)-(6) носят линейный, а ограничения (7) и (8) нелинейный характер.

Для решения сформулированной задачи распределения блоков планирования (4)-(9), представленной задачей смешанного целочисленного нелинейного программирования, известен ряд эффективных методов решения – округления (Rounding-off) [15], ветвей и границ (Branch-and-bound) [15, 16], последовательной линейризации (SLP) [17, 18],

штрафных функций (Penalty function) [17], множителей Лагранжа (Lagrangian relaxation) [18], имитации отжига (Simulated annealing) [19], а также генетический алгоритм (Genetic algorithm) и различные смешанные (гибридные) методы [18].

### 5. 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 (3)-(9) рассмотрим пример, при котором для распределения блоков планирования в нисходящем канале связи в качестве исходных данных были использованы следующие:

- 1) количество UE –  $N=5$ ;
- 2) число SB, формируемых на протяжении передачи одного временного слота –  $M=15$ ;
- 3) число поднесущих для передачи данных в одном RB и одном SB –  $K_s=12$ ;
- 4) количество символов, формирующих один ресурсный блок –  $N_{\text{symp}}^{\text{RB}}=7$ ;
- 5)  $T_{\text{SB}}=1$  мс – время передачи одного SB;
- 6) количество RB, формируемых на одинаковых поднесущих выделяемых UE на протяжении передачи одного подкадра –  $N_{\text{SF}}^{\text{RB}}=2$ ;
- 7) скорость кода, используемого при кодировании сигнала ( $R_c^{n,m}$ ), и битовая нагрузка символа ( $k_b^{n,m}$ ) пользовательских станций на ресурсных блоках соответствуют индексам CQI, приведенным в табл. 4. На рис. 11 приведены значения эффективности MCS сигналов UE для различных ресурсных блоков;
- 8) вид разделения каналов – TDD;
- 9) используемая конфигурация кадра – №1 (табл. 3);
- 10) количество подкадров, используемых для передачи информации в нисходящем канале связи –  $K=4$  (табл. 3);
- 11) количество SB, входящих в состав одной RBG –  $p=2$  (табл. 2).

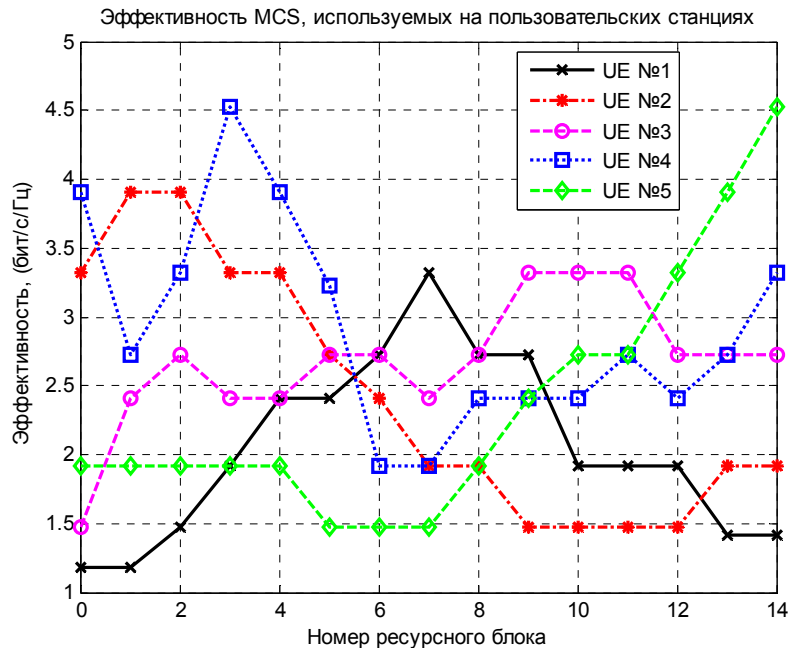


Рис. 11. Значения эффективности MCS сигналов UE для различных ресурсных блоков, используемых в примере

Таблица 4

Индексы CQI, соответствующие скоростям кода и битовым нагрузкам символов пользовательских станций

№ RB	Индекс CQI				
	UE №1	UE №2	UE №3	UE №4	UE №5
0	6	11	7	12	8
1	6	12	9	10	8
2	7	12	10	11	8
3	8	11	9	13	8
4	9	11	9	12	8
5	9	10	10	11	7
6	10	9	10	8	7
7	11	8	9	8	7
8	10	8	10	9	8
9	10	7	11	9	9
10	8	7	11	9	10
11	8	7	11	10	10
12	8	7	10	9	11
13	7	8	10	10	12
14	7	8	10	11	13

В качестве примера было получено решение сформулированной в работе оптимизационной задачи с использованием системы MatLab R2012b. При этом в была задействована программа minlpAssign пакета оптимизации TOMLAB. Для примера всем пользовательским станциям были установлены одинаковые требуемые скорости передачи, которые принимали значения  $R_{прб}^n = 0 \div 0,26$  Мбит/с. На рис. 12 показано как изменяется общая производительность нисходящего канала связи от требуемой скорости передачи.

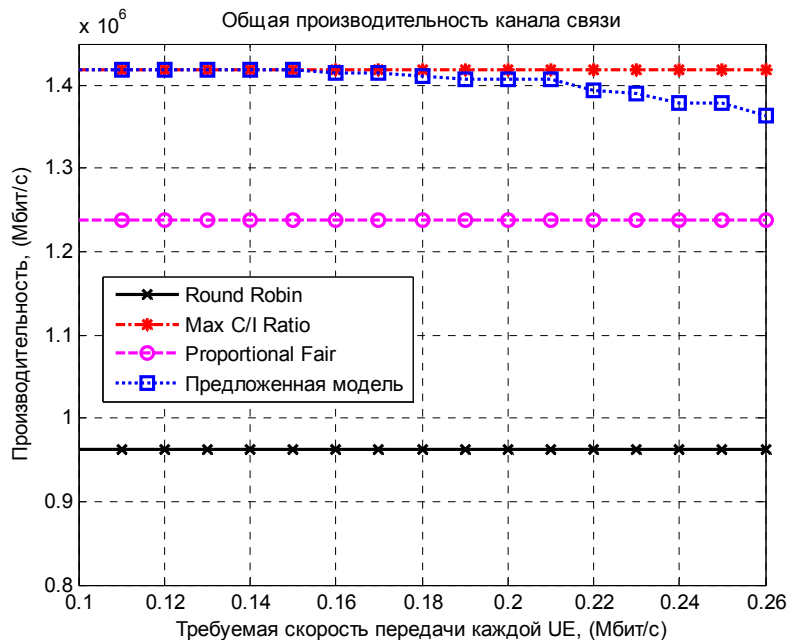


Рис. 12. Зависимость общей производительности нисходящего канала связи ввиду используемого метода распределения блоков планирования от требуемой скорости передачи

Как показали результаты моделирования (рис. 12) 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, 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 (3)-(9) на участке  $R_{mpб}^n = 0 \div 0,15$  Мбит/с имела максимальное значение, соответствующее методу Max C/I Ratio и составляла 1,4192 Мбит/с. На интервале  $R_{mpб}^n = 0,15 \div 0,26$  Мбит/с общая производительность уменьшилась на 3 % до значения 1,3641 Мбит/с.

На рис. 13 приведены результаты моделирования отображающие динамику изменения степени балансировки пропускной способности нисходящего канала между UE. Степень балансировки пропускной способности определялась в соответствии с выражением [20]

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

где  $R_n^i$  – скорость передачи, выделенная  $n$ -й UE на  $i$ -м интервале измерения,  $n = \overline{1, N}$ .

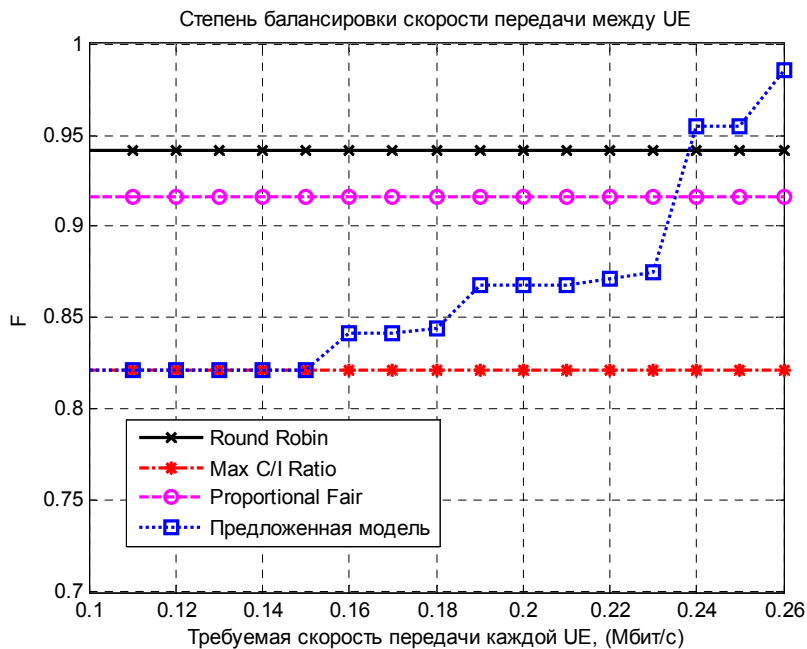
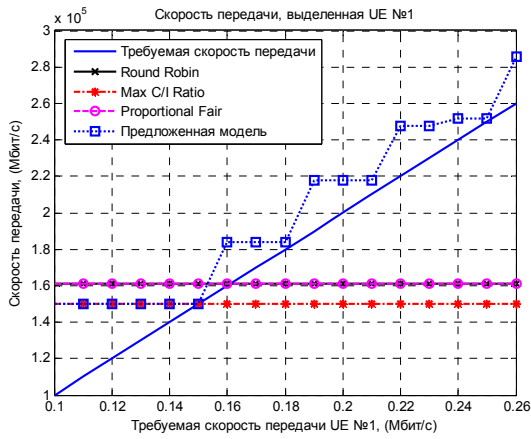


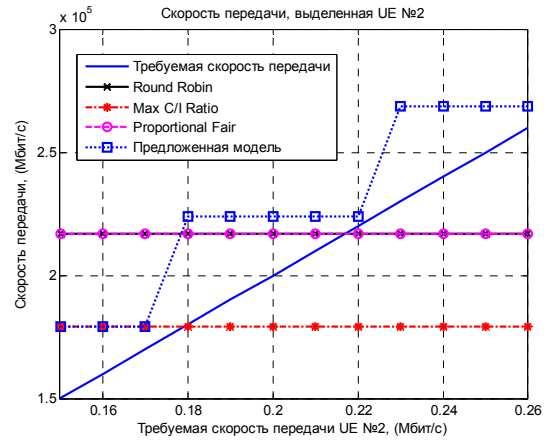
Рис. 13. Зависимость степени балансировки пропускной способности нисходящего канала связи ввиду используемого метода распределения блоков планирования от требуемой скорости передачи

Как показали результаты моделирования (рис. 13) 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 (3)-(9) на участке  $R_{mpб}^n = 0 \div 0,15$  Мбит/с имела минимальное значение, соответствующее методу Max C/I Ratio и составляла 0,8214. На интервале  $R_{mpб}^n = 0,15 \div 0,26$  Мбит/с степень балансировки пропускной способности увеличилась до значения 0,9859.

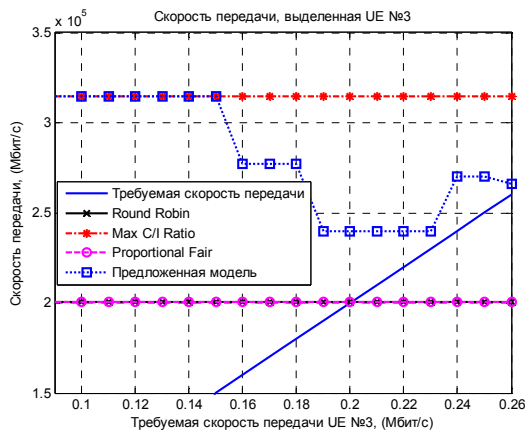
На рис. 14 показано, как изменяются скорости передачи, выделенные той или иной UE в рамках используемого метода распределения блоков планирования нисходящего канала в зависимости от требуемой скорости передачи.



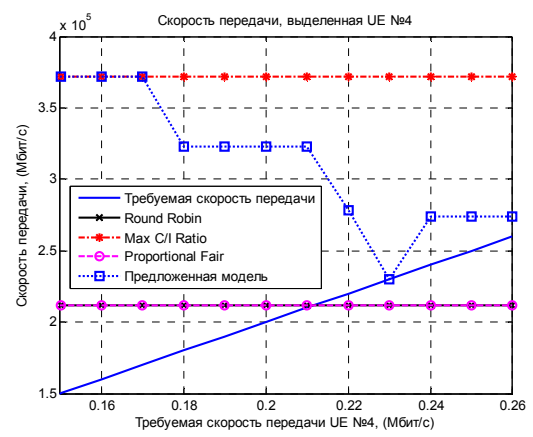
а)



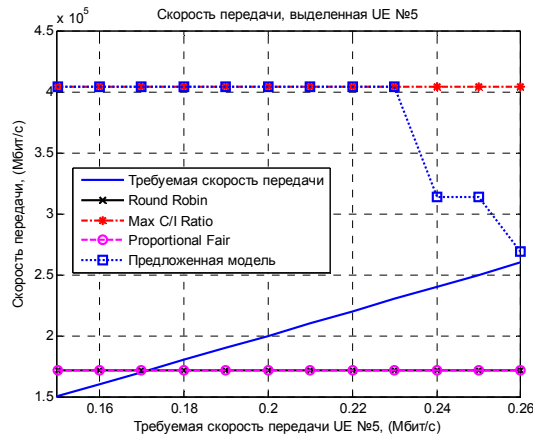
б)



в)



г)



д)

Рис. 14. Зависимость скорости передачи нисходящего канала связи пользовательских станций ввиду используемого метода распределения блоков планирования от требуемой скорости передачи

Как показали результаты моделирования (рис. 14) 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  $R_{треб}^n$ , а именно когда  $R_{треб}^n = 0 \div 0,15$  Мбит/с. Использование



предложенной модели (3)-(9) обеспечивает выделение требуемой скорости передачи UE на всем интервале измерения  $R_{\text{треб}}^n = 0 \div 0,26$  Мбит/с.

На рис. 15 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

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

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

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

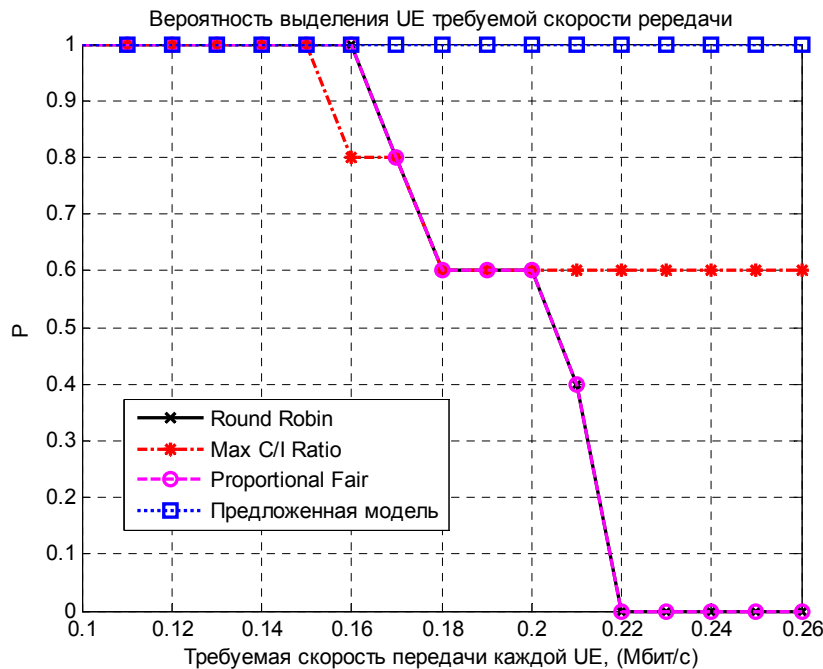


Рис. 15. Зависимость вероятности выделения UE требуемой скорости передачи ввиду используемого метода распределения блоков планирования от требуемой скорости передачи

### Выводы

Установлено, что одной из основных задач в беспроводной сети, функционирующей с использованием технологии LTE, является задача обеспечения требуемого качества обслуживания, в состав которой входит необходимость выделения пользовательским станциям сети необходимой скорости передачи в нисходящем канале связи. Также установлено, что одним из эффективных способов обеспечения 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. В результате проведенного анализа были определены недостатки известных методов, а также сформулированы требования к перспективным решениям задачи распределения блоков планирования между пользовательскими станциями.

На основании сформулированных требований, а также выявленных недостатков известных решений по распределению блоков планирования в нисходящем канале 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 учёте их территориальной удаленности (вида системы модуляции и кодирования).

Отмечено, что сформулированная задача по распределению блоков планирования нисходящего канала с точки зрения физики процессов, протекающих в беспроводной сети, относится к классу задач балансировки частотно-временных ресурсов – числа блоков планирования выделяемых пользовательским станциям, а с математической точки зрения – это задача смешанного целочисленного нелинейного программирования. Сравнительный анализ показал, что наилучшие показатели по производительности нисходящего канала связи обеспечивает метод Max C/I Ratio, а также предложенная модель (3)-(9). С точки зрения сбалансированного распределения пропускной способности нисходящего канала связи наилучшие показатели были у методов Round Robin и Proportional Fair, при условии низких требований к скорости передачи пользовательских станций. В условиях высоких требований к скорости передачи наиболее сбалансированное распределение пропускной способности нисходящего канала связи обеспечивает предложенная в статье модель (3)-(9).

Также проведенный анализ показал, что методы Max C/I Ratio, Round Robin и Proportional Fair эффективны лишь в условиях невысоких требований к скорости передачи (рис. 14 и рис. 15). В условиях высоких требований к скорости передачи пользовательских станций эффективной оказалась модель (3)-(9), обеспечивая каждой пользовательскому станции гарантированную скорость передачи с возможностью доступа к дополнительной (не гарантируемой) полосе пропускания, что в классах сервиса CoS соответствует подклассу B, тогда как другие методы не гарантируют выделения требуемой скорости передачи, что в классах сервиса CoS соответствует подклассу A.

### Литература

1. Гаркуша С.В. Разработка и анализ масштабируемой модели распределения подканалов в сети стандарта IEEE 802.16. Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил, 2012, Вип. 4, № 33, С. 68-74.
2. 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.
3. Ghosh A., Zhang J., Muhamed R., Andrews J. Cr. Fundamentals of LTE. USA: Prentice Hall, 2010, 464 p.
4. 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). Budapest: IARIA, 2011, Pp. 99-102.
5. Dahlman E., Parkvall S., Skold J., Beming P. 3G Evolution – HSPA and LTE for Mobile Broadband. Oxford: Academic Press, 2008, 608 p.
6. Mehlhruher C., Wrulich M., Ikuno J.C., Bosanska D., Rupp M. Simulating the long term evolution physical layer. 17th European Signal processing conference (EUSIPCO 2009). Glasgow: EURASIP, 2009, Pp. 1471-1478.
7. Tang Z. Traffic Scheduling for LTE Advanced. Linköping: Division of Communication Systems, 2010, 71 p.
8. 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, Vol. 2, No. 5, Pp. 678-681.
9. 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, Vol. 12, No. 1, Pp. 30-42.
  10. Hussain S. *Dynamic Radio Resource Management in 3GPP LTE*. Karlskrona: Blekinge Institute of Technology, 2009, 58 p.
  11. Østerbø O. Scheduling and Capacity Estimation in LTE. *Advances in electronics and telecommunications*, 2011, Vol. 2, No. 3, Pp. 31-42.
  12. 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, Pp. 107-124.
  13. 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.
  14. Ермолаев В.Т. Флакман А.Г. Теоретические основы обработки сигналов в системах мобильной радиосвязи. Нижний Новгород: НГУ им. И.Н. Лобачевского, 2010, 107 с.
  15. Зорич В.А. Математический анализ: ч. 1. М.: ФАЗИС, 1997, 512 с.
  16. Tawarmalani M. Global optimization of mixed-integer nonlinear programs: A theoretical and computational study. *Mathematical Programming*, 2004, Vol. 99, No. 3, Pp. 563-591.
  17. Alicherry M. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks. *International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*. Cologne: ACM, 2005, Pp. 58 – 72.
  18. Олифер В.Г. Искусство оптимизации трафика. *Журнал сетевых решений: LAN*, 2001, №12, С. 38-47.
  19. Олифер В.Г. *Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов*. СПб: Питер, 2005, 2-е изд, 864 с.
  20. Adibah M. R. H., Kumbesan S., Riyaj B., Leijia W. Modeling and simulation of packet scheduling in the downlink long term evolution system. *15th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2009)*. Shanghai: APCC, 2009, Pp. 68-71.
  21. Рисунков – 15, таблиц – 4.

---

Article received: 2013-03-30