

УДК 621.391

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА НИСХОДЯЩЕГО КАНАЛА WiMAX С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMULINK



[А.В. ЛЕМЕШКО](#)

Харьковский национальный университет радиоэлектроники



[Х.Д.К. Ал-Джанаби](#)

Аль-нисур университетский колледж, Ирак



[А.В. ОЛЕНИЧ, С.А. ГАЛАЙБА](#)

Харьковский национальный университет Воздушных Сил  
имени Ивана Кожедуба

*Abstract – The analysis of the method of balanced allocation of the frequency subchannels in a WiMAX downlink is carried out, which is based on the solution of the optimization problem of mixed integer linear programming related to maximizing the lower bound of satisfying the requirements for the allocated subscriber stations bandwidth based on their priority. The constraints were the conditions for allocating each subchannel to no more than one subscriber station and conditions for ensuring a balanced allocation of frequency subchannels to subscriber stations in accordance with their priorities. To evaluate the performance and the effectiveness of the considered method of channel resource allocation in WiMAX technology, the MATLAB Simulink package was used, which is represented by the block diagram of the downlink simulation model of the IEEE 802.16 Physical Layer. Using a downlink simulation model of the Physical Layer of the IEEE 802.16 standard, a comparative analysis of the proposed method and the previously known methods of Maximum Sum Rate (MSR), Maximum Fairness (MF), Proportional Fairness (PF), and Round Robin (RR) Scheduler was conducted. It is shown that the use of the proposed solutions allows increasing the level of Quality of Service of user requests for bandwidth on average from 12-16% compared with MF, PF and up to 20-34% compared with MSR and RR. The proposed method provided the highest efficiency with an increase in the number of subscriber stations, the number of frequency subchannels and an increase in heterogeneity in models and service priorities, as well as the requirements regarding the Quality of Service level.*

*Анотація – З використанням імітаційної моделі низхідного каналу зв'язку фізичного рівня стандарту IEEE 802.16 пакета MATLAB Simulink проведено порівняльний аналіз методу збалансованого розподілу частотних підканалів і раніше відомих методів: Maximum Sum Rate (MSR), Maximum Fairness (MF), Proportional Fairness (PF) і Round Robin (RR) Scheduler. Показано, що використання запропонованих рішень дозволяє підвищити рівень якості обслуговування запитів користувачів за пропускною здатністю в середньому від 12-16% у порівнянні з методами MF, PF і до 20-34% - у порівнянні з методами MSR і RR.*

*Аннотация – С использованием имитационной модели нисходящего канала связи физического уровня стандарта IEEE 802.16 пакета MATLAB Simulink проведен сравнительный анализ метода сбалансированного распределения частотных подканалов и ранее известных методов: Maximum Sum Rate (MSR), Maximum Fairness (MF), Proportional Fairness (PF) и Round Robin (RR) Scheduler. Показано, что использование предложенных решений позволяет повысить уровень качества обслуживания запросов пользователей по пропускной способности в среднем от 12-16% по сравнению с методами MF, PF и до 20-34% – по сравнению с методами MSR и RR.*

## Введение

Технология IEEE.802.16 WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) занимает одно из лидирующих мест в рейтинге беспроводных технологий. Именно ее использование нацелено на обеспечение высокоскоростного доступа как фиксирован-

ным, так и мобильным абонентам [1-3]. Но несмотря на постоянное совершенствование данной технологии стандарта, основным сдерживающим фактором внедрения новых телекоммуникационных сервисов в WiMAX-сетях является их невысокая по сравнению с проводными технологиями производительность. В этой связи в новых спецификациях стандарта IEEE 802.16 находят свое применение перспективные разработки, связанные с использованием технологии, различных методов расширения спектра сигнала; технологий интеллектуальных или фазированных антенных решеток; организационных мероприятий по изменению территориального местоположения базовых станций; более эффективных схем модуляции и кодирования сигналов; методов поляризации, пространственно-временной обработки и др.

Наряду с перечисленными решениями на практике все чаще повышение производительности WiMAX-сетей основывается на эффективном использовании и распределении частотного и временного ресурса, предоставляемого технологиями физического уровня OSI. При этом важную роль в процессе сбалансированного распределения ресурса нисходящего канала технологии WiMAX играет учет приоритета запросов пользовательских станций. Чем выше приоритет запроса, тем больший объем ресурса должен выделяться станции в данный текущий момент времени. В свою очередь политики назначения приоритетов должны адекватно отображать важность того или иного приложения, а также уровень их требований к уровню качества обслуживания по множеству показателей.

Целью данной статьи является исследование ранее предложенного в работах [3, 4] метода сбалансированного распределения частотных подканалов в нисходящем канале WiMAX и проведение сравнительного анализа полученных результатов с технологическими алгоритмами, которые используются на практике, на основе пакета имитационного моделирования MATLAB/Simulink.

## **I. Метод распределения частотных подканалов в нисходящем канале WiMAX**

В основу исследуемого метода [3, 4] положена оптимизационная задача сбалансированного распределения частотных подканалов в нисходящем канале WiMAX, в рамках которой предполагаются известными следующие исходные данные:

- 1) ширина используемого частотного канала изменяется в пределах от 1,25 МГц до 20 МГц;
- 2) выбранный режим использования подканалов (FUSC, PUSC, OPUSC, OFUSC или TUSC);
- 3)  $N$  – общее число пользовательских станций в сети;
- 4)  $L$  – множество возможных значений числа подканалов в зависимости от ширины частотного канала. Например, для режима DL FUSC  $L = \{2, 8, 16, 32\}$ , а для режима DL PUSC  $L = \{3, 15, 30, 60\}$ ;
- 5)  $K$  – выбранное количество подканалов, используемых в нисходящем канале связи;

- 6)  $R_{\text{треб}}^n$  – требуемая пропускная способность для обслуживания  $n$ -й пользовательской станции (Мбит/с);
- 7)  $R^{n,k}$  – пропускная способность, которую обеспечивает выделение  $k$ -го подканала  $n$ -й пользовательской станции ( $n = \overline{1, N}$ ,  $k = \overline{1, K}$ );
- 8)  $BLER$  – вероятность блоковой ошибки, получаемая гибридной системой автоматических перезапросов (Hybrid automatic repeat request, HARQ).

Пропускная способность ( $R^{n,k}$ ), которую обеспечивает выделение  $k$ -го подканала  $n$ -й пользовательской станции (Subscriber Station, SS), представляет собой количество переданных бит за единицу времени (секунду), исключая пилотные биты, и может быть рассчитана из выражения:

$$R^{n,k} = \frac{R_c^{n,k} k_b^{n,k} K_s (1 - BLER)}{(T_b + T_g + T_{TRG} + T_{TRG})}, \quad (1)$$

где  $R_c^{n,k}$  – скорость кода используемого при кодировании сигнала  $k$ -го подканала, выделенного для  $n$ -й пользовательской станции;

$k_b^{n,k}$  – битовая загрузка символа  $k$ -го подканала, выделенного для  $n$ -й пользовательской станции;

$K_s$  – число поднесущих, используемых для передачи данных в одном подканале;

$T_b = 89,6$  мкс – длительность полезной части символа;

$T_g$  – длительность защитного интервала между символами, который может принимать четыре значения относительно длительности полезной части символа:

$T_g = T_b / 4 = 22,4$  мкс,  $T_g = T_b / 8 = 11,2$  мкс,  $T_g = T_b / 16 = 5,6$  мкс и  $T_g = T_b / 32 = 2,8$  мкс;

$T_{TRG} = 105,7$  мкс – длительность интервала переключения с передачи на прием (Transmit/Receive Transition Gap, TRG);

$T_{RTG} = 60$  мкс – длительность интервала переключения с приема на передачу (Receive/Transmit Transition Gap, RTG);

По аналогии с подходом, предложенным в работах [4-12], пусть в рамках рассматриваемого метода в ходе решения задачи распределения подканалов между пользовательскими станциями сети необходимо обеспечить расчет булевой управляющей переменной ( $x_n^k$ ):

$$x_n^k = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-й подканал выделен } n\text{-й пользовательской станции;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

С точки зрения физики моделируемого процесса число переменных (2), регламентирующих процесс выделения подканалов пользовательским станциям, составляет  $N \cdot K$ . Переменные (2) полностью определяют порядок распределения подканалов нисходящего канала связи WiMAX технологии между станциями пользователей. В связи с этим при расчете искомым управляющих переменных (2) необходимо выполнить ряд важных условий.

Условия выделения  $k$ -го подканала не более чем одной пользовательской станции имеет следующий вид:

$$\sum_{n=1}^N x_n^k \leq 1, \quad (k = \overline{1, K}). \quad (3)$$

Важное место в структуре предлагаемого решения играют условия обеспечения качества обслуживания по показателям производительности. Поскольку в сети WiMAX должны поддерживаться одновременно несколько типов архитектур обеспечения QoS (best effort, DiffServ и IntServ) для потоков различных приложений и служб [13-15], то это определяет необходимость введения условий:

$$\sum_{k=1}^K x_n^k R^{n,k} \geq \delta_n R_{\text{треб}}^n, \quad (n = \overline{1, N}), \quad (4)$$

где

$$\delta_n = \begin{cases} 1, & \text{если для } n\text{-й SS необходимо обеспечить гарантии} \\ & \text{по выделяемой пропускной способности;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Левая часть выражений (4) определяет суммарный объем выделенной  $n$ -й пользовательской станции пропускной способности нисходящего канала связи WiMAX ( $R_{\text{выд}}^n$ ), зависящий от числа выделенных частотных подканалов и их характеристик (1). В правой части неравенства записаны QoS-требования пользователей данной станции. Кроме того, значение  $\delta_n = 1$  отображает вариант реализации политики гарантированного обслуживания, основанной на резервировании канального ресурса. Варианты, при которых  $\delta_n = 0$ , моделируют случаи предоставления сервиса Best Effort (обслуживание по возможности) или дифференцированного обслуживания (DiffServ).

Важным дополнением выражений (4) являются условия обеспечения сбалансированного выделения частотных подканалов пользовательским станциям в соответствии с их приоритетами:

$$\frac{R_{\text{выд}}^n}{(Pr_n + 1)R_{\text{треб}}^n} \geq \beta, \quad (n = \overline{1, N}), \quad (5)$$

где

$$R_{\text{выд}}^n = \sum_{k=1}^K x_n^k R^{n,k}, \quad (n = \overline{1, N}), \quad (6)$$

$Pr_n$  – это величина приоритета  $n$ -й пользовательской станции, определяемого, например, типом предоставляемого сервиса (табл. 1);  $\beta$  – управляющая переменная,

которая характеризует нижний динамически управляемый порог удовлетворения требований всех пользовательских станций сети по пропускной способности.

Таблица 1. Вариант соответствия типов сервисов и приоритетов в сети WiMAX

Тип сервиса (сервисный класс WiMAX)	Назначаемый приоритет
ErtPS	4
UGS	3
rtPS	2
nrtPS	1
BE	0

В общем случае имеет место условие

$$\beta \geq 0. \quad (7)$$

Для выбора наиболее предпочтительного варианта решения задачи распределения частотных подканалов важно располагать критериями оптимальности получаемых решений. Подобный критерий должен адекватно отражать физический смысл решаемой технологической задачи, а также способствовать получению искомым результатов в реальном масштабе времени и с заданной точностью. В этой связи, решение задачи сбалансированного распределения частотных подканалов в нисходящем канале WiMAX в рамках предложенного метода может быть представлено в виде решения оптимизационной задачи с критерием

$$\max_{x, \beta} \beta, \quad (8)$$

при этом условия (2)-(7) выступают в качестве линейных ограничений.

Использование критерия (8) способствует сбалансированному выделению числа подканалов пользовательским станциям WiMAX сети с учетом их приоритета ( $Pr_n$ ) и количественных требований к уровню QoS ( $R_{nпрб}^n$ ) ввиду введенных в метод условий (5). Сформулированная оптимизационная задача, основанная на критерии (8), относится к классу задач смешанного целочисленного линейного программирования (Mixed Integer Linear Programming, MILP), т.к. в основном искомые переменные (2) являются булевыми, а одна переменная (7) – положительная вещественная; критерии оптимальности (8) и ограничения (2)-(7), которые накладываются на управляющие переменные, определяя связь между ними, носят линейный характер.

## II. Описание схемы экспериментального исследования на основе пакета имитационного моделирования MATLAB/Simulink

Для исследования метода распределения ресурса нисходящего канала WiMAX (1)-(8) был выбран пакет Simulink. Данный пакет имитационного моделирования позволяет использовать уже готовые, хорошо апробированные библиотеки про-

грамм и блоков имитации для моделирования средств цифровой связи различных телекоммуникационных технологий, отнесенных к различным уровням OSI. Немаловажным также является то, что пакет Simulink интегрирован в среду MATLAB, поддерживая очень удобный, эргономичный графический интерфейс как ввода исходных данных и настройки имитационной модели, так и визуализации, анализа и обработки получаемых результатов исследования.

В рамках проводимого исследования предложенного метода была использована имитационная модель нисходящего канала связи стандарта IEEE 802.16 WiMAX, представленная на рис. 1.

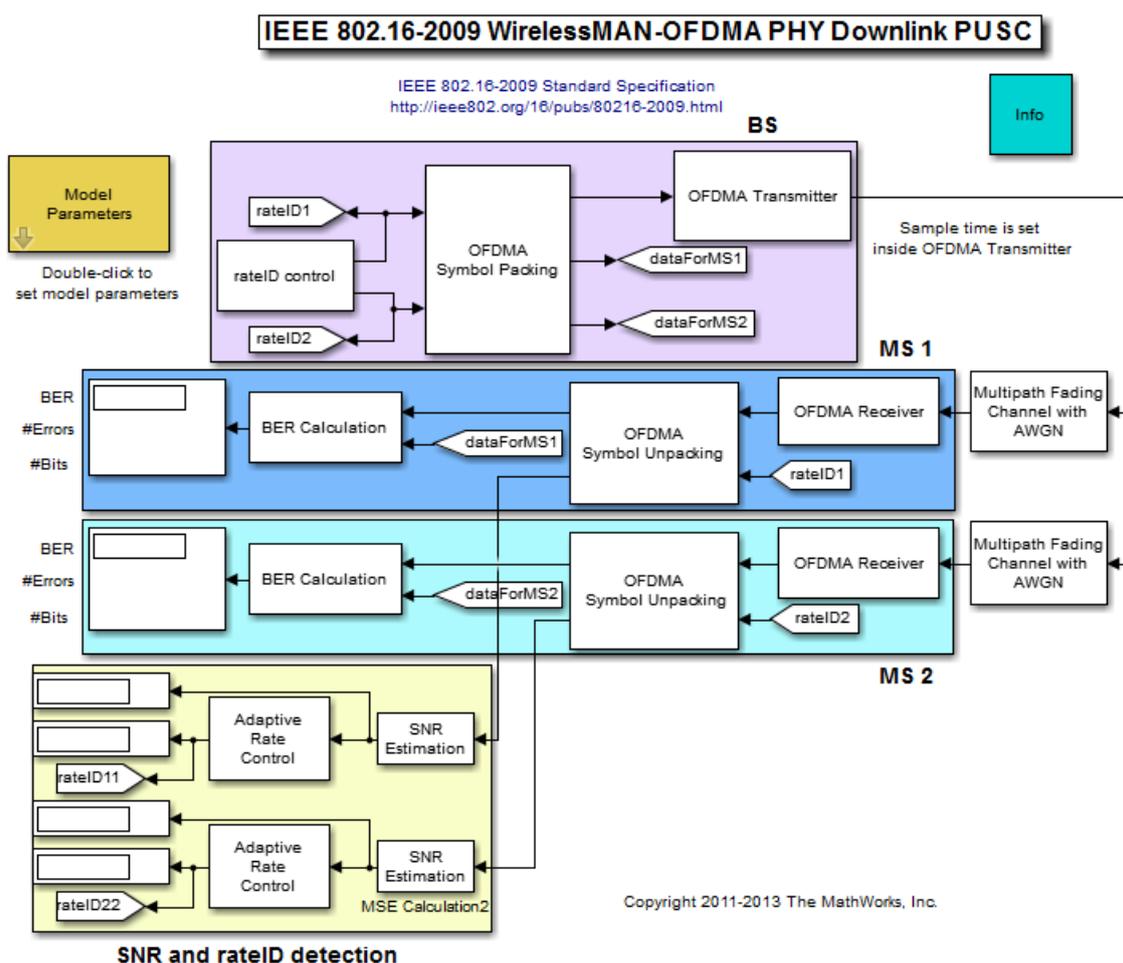


Рис. 1. Блок-схема имитационной модели нисходящего канала связи физического уровня стандарта IEEE 802.16 в пакете Simulink

Необходимый порядок распределения подканалов, который рассчитывался с помощью подпрограмм `intlinprog` и `fmincon` пакета Optimization Toolbox, задавался через модуль OFDMA Symbol Packing. Процесс передачи сформированных пакетов регулировался с помощью настройки блока OFDMA Transmitter. Прежде чем имитируемый сигнал поступал в приемник той или иной пользовательской станции (OFDMA Receiver), он «зашумлялся» в соответствии с параметрами

сигнально-помеховой обстановки (аддитивный белый гауссовский шум и многолучевое замирание канала), задаваемыми в блоке Multipath fading channel with AWGN.

В рамках исследуемой модели (рис. 1) блок имитации работы базовой станции BS отвечает за формирование пакетов данных путем адаптивно выбранной MCS и заданного порядка распределения подканалов, а работа технологических средств физического уровня с точки зрения обмена данными от базовой станции к двум мобильным станциям будет воспроизводиться в режиме DL PUSC (табл. 2).

Таблица 2. Порядок распределения поднесущих подрежима DL PUSC для режима OFDMA

Ширина полосы канала (МГц)	1,25	2,5	5	10	20
Количество поднесущих	128	256	512	1024	2048
Число поднесущих для передачи данных на один подканал	24	Не используется	24	24	24
Количество подканалов (коэффициент масштабирования)	3		15	30	60
Общее количество поднесущих, используемых для передачи данных	72		360	720	1440
Общее количество пилотных поднесущих	12		60	120	240
Количество поднесущих в нижнем защитном интервале	11		46	92	184
Количество поднесущих в верхнем защитном интервале	10		45	91	183

Нисходящий и восходящий каналы разделяются интервалами переключения. Длительность интервала переключения с передачи на прием (transmit/receive transition gap, TTG) составляет  $T_{TTG} = 105,7$  мкс, а интервала переключения с приема на передачу (receive/transmit transition gap, RTG)  $T_{RTG} = 60$  мкс [3].

В результате полученные на приемной стороне OFDMA-пакеты распаковывались и отправлялись в модуль BER calculation, с помощью которого оценивался коэффициент битовых ошибок и число принятых бит.

С точки зрения цели проводимых исследований, ключевую роль в блоке BS играл модуль OFDMA Symbol Packing (рис. 2), на который возлагались функции по моделированию процессов формирования OFDMA-пакетов, распределения частотного ресурса (подканалов) между двумя пользовательскими станциями.

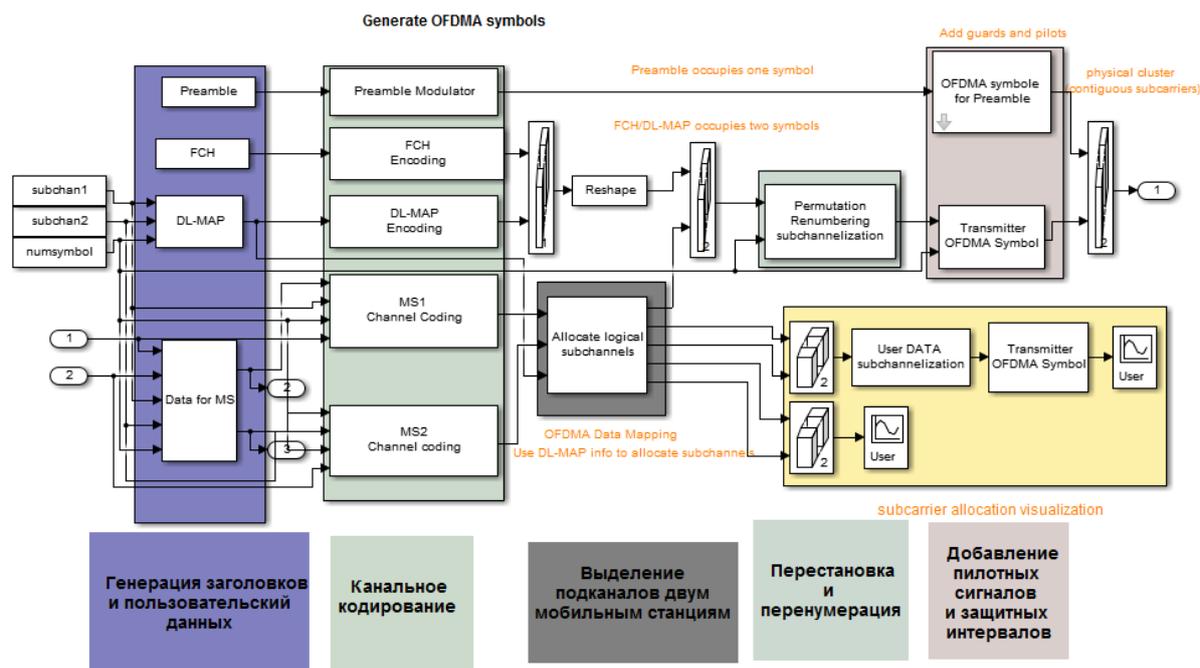


Рис. 2. Блок-схема модуля OFDMA Symbol Packing блока BS

Модуль OFDMA Symbol Packing состоит из пяти частей (рис. 2), имеющих такие названия:

- генерация заголовков и пользовательских данных;
- канальное кодирование;
- выделение подканалов;
- перестановка и перенумерация;
- добавление пилотных и защитных интервалов.

Тип реализованной схемы модуляции и кодирования сигналов согласно стандарта IEEE 802.16 осуществляется за счет установки идентификатора RateID (табл. 3).

Таблица 3. Соответствие параметра RateID типу схемы адаптивного кодирования и модуляции

RateID	Вид модуляции и скорость сверточного кодера
0	QPSK 1/2
1	QPSK 3/4
2	16-QAM 1/2
3	16-QAM 3/4
4	64-QAM 1/2
5	64-QAM 2/3
6	64-QAM 3/4

В соответствии с поддерживаемым режимом (PUSC) стандарта IEEE 802.16 первичный частотный ресурс был представлен 1024 поднесущими, из которых для передачи пользовательских данных использовались лишь 720 поднесущих, а остальные

были зарезервированы для пилотных сигналов и для защитных интервалов. Эти поднесущие были псевдослучайным образом сгруппированы в 30 подканалов (0÷29), каждый из которых образовывался 24 поднесущими.

В ходе использования описанной имитационной модели пакета Simulink была возможность задавать следующее множество параметров в блоке Block Parameters (рис. 3):

- количество информационных OFDM символов в каждом burst от 4 до 10;
- номер сегмента в режиме PUSC, от 0 до 3;
- порядок распределения подканалов двум пользовательским станциям, диапазон которого задается следующим образом: [start1 end1; start2 end2];
- ширина канала 1,25; 2,5; 5; 10; 20 МГц;
- циклический префикс (1/4, 1/8, 1/16, 1/32);
- пороговые значения отношения сигнал/шум для адаптивного изменения скорости модуляции и кодирования.

В первом случае первой станции выделялось 6 подканалов, второй станции – 24 (рис. 3 а), тогда как во втором случае первой станции – 21 подканал, а второй – 9 (рис. 3 б). На рис. 4 и рис. 5 показан результирующий порядок выделения подканалов и поднесущих первой и второй пользовательским станциям для первого и второго случая.

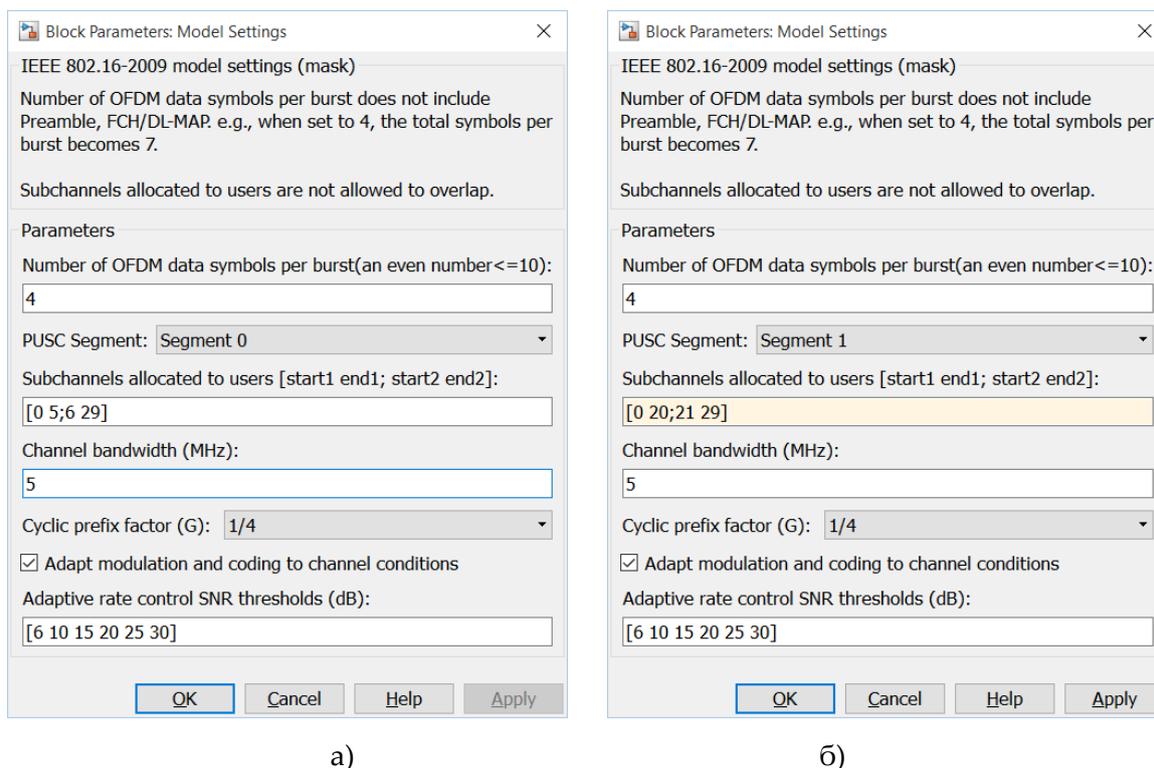


Рис. 3. Примеры задаваемых данных в Block Parameters

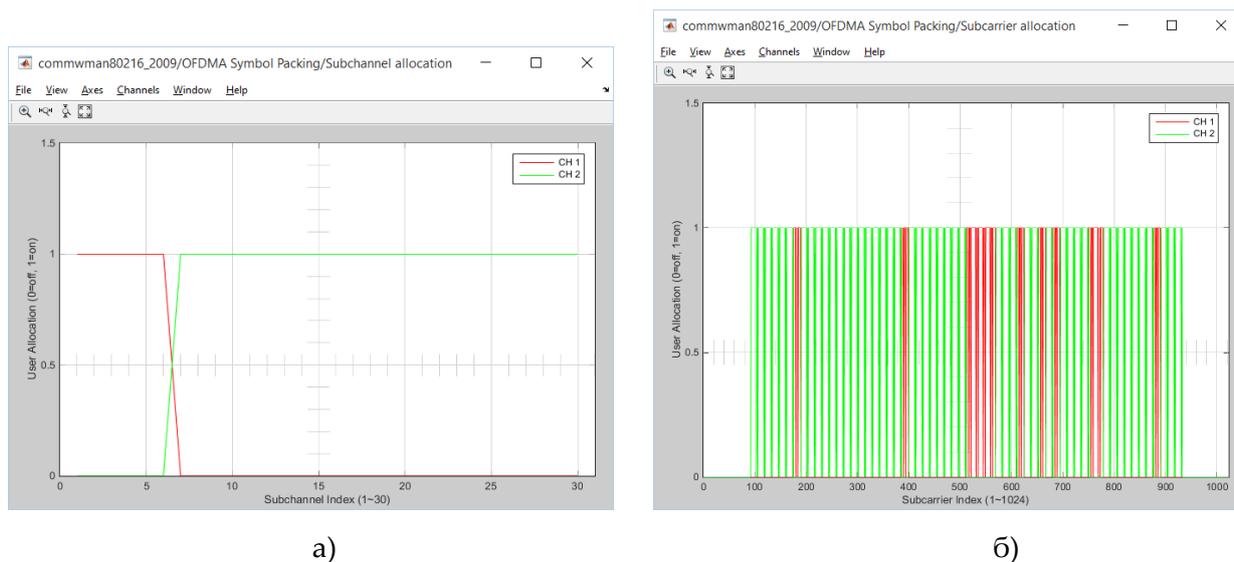


Рис. 4. Результирующий порядок выделения подканалов (а) и поднесущих (б) первой и второй пользовательским станциям для первого случая

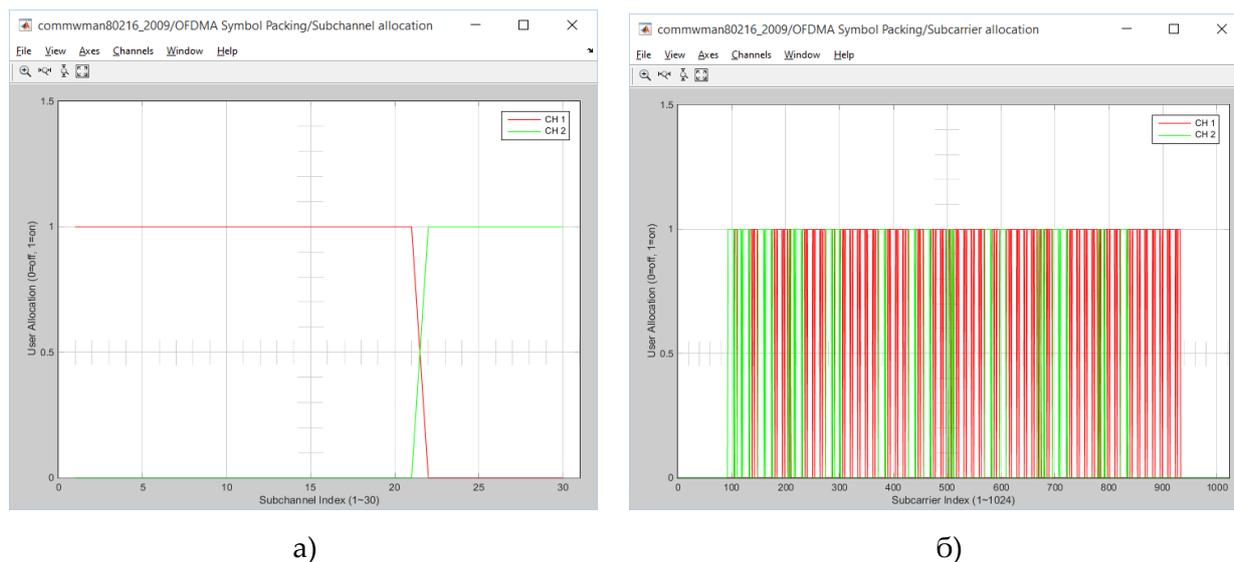


Рис. 5. Результирующий порядок выделения подканалов (а) и поднесущих (б) первой и второй пользовательским станциям для второго случая

Количественные результаты сравнения двух вариантов распределения подканалов и поднесущих, отображаемые в модуле SNR and rateID detection, показаны на рис. 6.

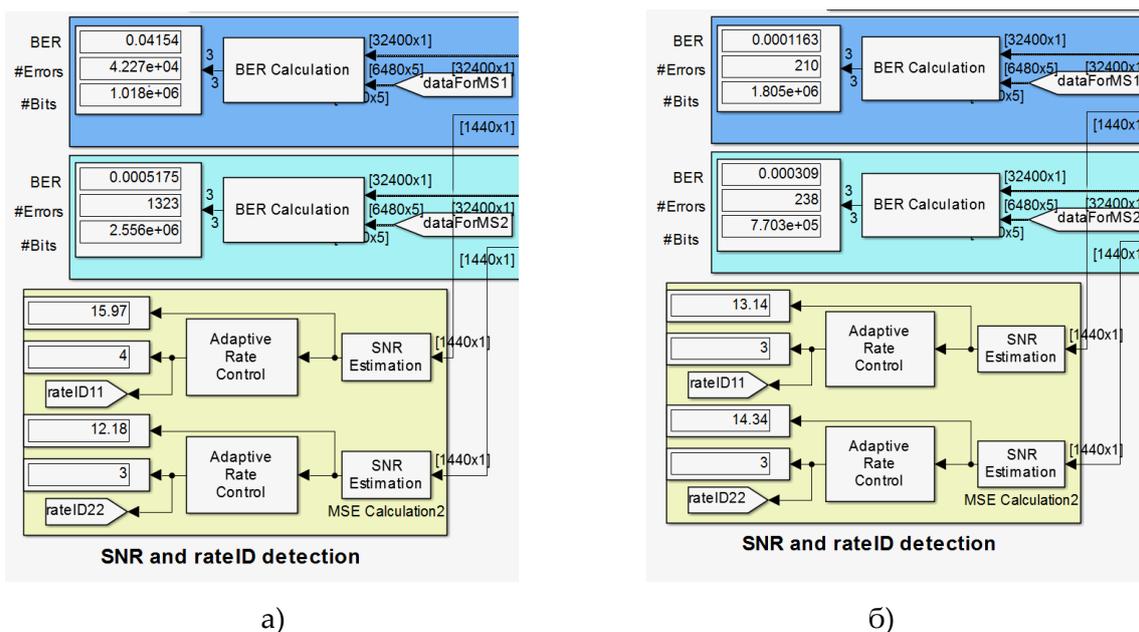


Рис. 6. Количественные результаты сравнения рассмотренных вариантов распределения подканалов и поднесущих для первого (а) и второго (б) случаев, отображаемые в модуле SNR and rateID detection

На рис. 6 указаны номер идентификатора `rateID` и отношение сигнал/шум для текущего времени. Хотя в первом рассмотренном случае первой пользовательской станции и было выделено в 4 раза меньше частотного ресурса, чем второй станции, но величина выделенной пропускной способности отличалась всего в 2,5 раза (рис. 6). Это объяснялось тем, что при передаче данных первой станции использовалась более скоростная схема модуляции и кодирования (`rateID=4`, 64-QAM 1/2). Перераспределение подканалов в пользу второй станции – 2:1, привело к увеличению выделяемой пропускной способности приблизительно в 2,3 раза, т.к. в этом случае обе станции использовали схему 16-QAM 3/4 (`rateID=3`).

Таким образом, изменяя ширину канала и порядок распределения подканалов между станциями пользователей (рис. 3), с помощью пакета Simulink можно отследить, как это скажется на результирующей пропускной способности, которая будет выделена данным станциям на физическом уровне (рис. 6). Исследование проводилось для множества исходных данных, отличающихся величинами ширины канала, параметрами шума, числом подканалов, количеством пользовательских станций и моделями обслуживания запросов пользователей.

### III. Сравнительный анализ предложенного метода и известных решений распределения подканалов в нисходящем канале WiMAX

Эффективность предложенного метода сравнивалась по показателям пропускной способности, выделяемой пользовательским станциям сети, с такими методами распределения частотных подканалов, как:

- метод обеспечения максимальной скорости передачи (Maximum Sum Rate, MSR);
- метод максимальной справедливости (Maximum Fairness, MF);
- метод пропорциональной справедливости (Proportional Fairness, PF);
- метод кругового обслуживания (Round Robin, RR).

В ходе сравнительного анализа оценивалось влияние на результирующую пропускную способность, выделяемую SS, уровня QoS-требований, т.е. загруженности сети, ширины нисходящего канала WiMAX и, как следствие, числа доступных к распределению частотных подканалов. Для примера результаты анализа будут продемонстрированы для двух вариантов исходных данных:

- вариант 1: ширина канала 5 МГц, распределяются восемь подканалов между тремя станциями;
- вариант 2: ширина канала 10 МГц распределяются шестнадцать подканалов между тремя станциями.

В ходе проведенного анализа сосредоточимся на реализации модели обслуживания DiffServ, основанной на приоритетах, что наиболее полно соответствует мультисервисному характеру сети WiMAX.

При первом варианте исходных данных на рис. 7 показана динамика выделения с помощью сравниваемых методов пропускной способности нисходящего канала шириной 5 МГц трем станциям, имеющим, для примера, нулевые приоритеты запросов к обслуживанию (best effort). На этом и последующих рисунках предлагаемый в работе метод распределения сетевого ресурса нисходящего канала WiMAX обозначен как «Метод».

Как видно из рис. 7, предложенный метод обеспечивает выполнение QoS-требований всех станций при  $R_{trб}^1 \leq 2$  Мбит/с. Из сравниваемых методов лишь метод обеспечения максимальной скорости передачи смог одновременно предоставить гарантии обслуживания, но лишь до  $R_{trб}^1 \leq 1,7$  Мбит/с (рис. 7 а), т.е. предложенный метод позволил повысить производительность сети на 17%. Оставшиеся методы не смогли обеспечить заданный уровень обслуживания одновременно трем пользовательским станциям ни при одной комбинации требований. Кроме того, важно отметить, что сравниваемые методы в отличие от предлагаемого метода не обеспечивают адаптацию решений к изменению QoS-требований станций сети, что является несомненно их основным недостатком.

Пусть второй и третьей станциям необходимо обеспечить гарантии качества обслуживания, причем  $R_{trб}^2 = R_{trб}^3 = 1$  Мбит/с, а первой – дифференцированное обслуживание при  $P_{r1} = 3$  (рис. 8). Тогда, как показано на рис. 8, ввиду снижения уровня QoS-требований второй и третьей станциям их запросы будут гарантированно удовлетворены всеми сравниваемыми методами. При этом предложенный метод выделил первой станции (рис. 8 а) 2,5 Мбит/с, что на 35% лучше метода PF, на 56% лучше метода MSR, на 72,5% лучше метода MF и на 92% лучше метода RR. Это объ-

ясняется тем, что сравниваемые методы с избытком выделяли частотные подканалы второй и третьей станциям (рис. 8 б и 8 в).

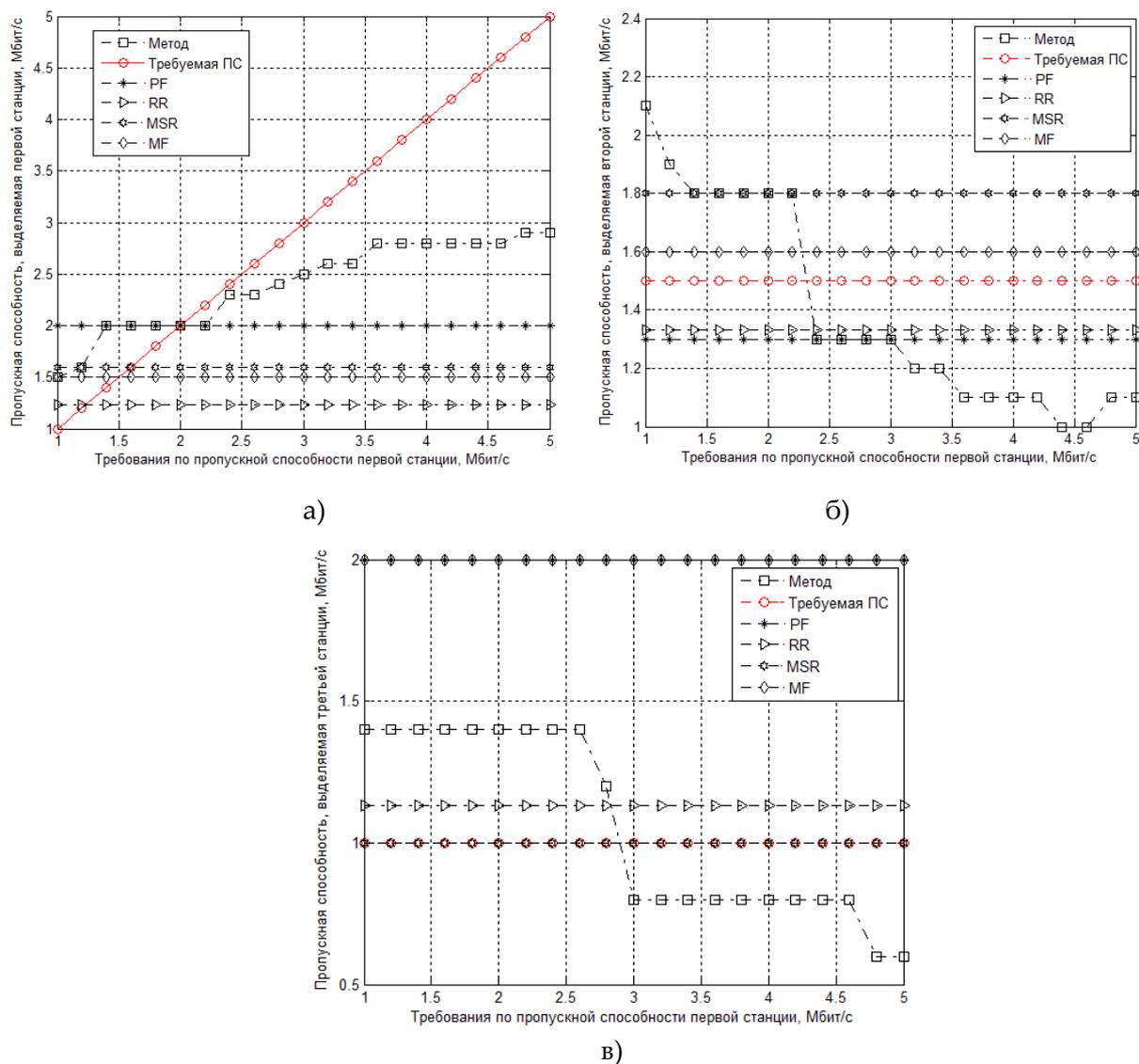


Рис. 7. Динамика выделения с помощью сравниваемых методов пропускной способности нисходящего канала шириной 5МГц трем станциям, имеющим нулевые приоритеты запросов к обслуживанию

При дальнейшем увеличении приоритета запросов первой станции ( $P_{r1} = 5$ ) предложенный метод обеспечивал строго необходимый уровень качества обслуживания второй и третьей станциям, что позволило по сравнению с другими методами повысить выигрыш по выделяемой пропускной способности первой станции и производительности WiMAX-сети в целом дополнительно на 8%.

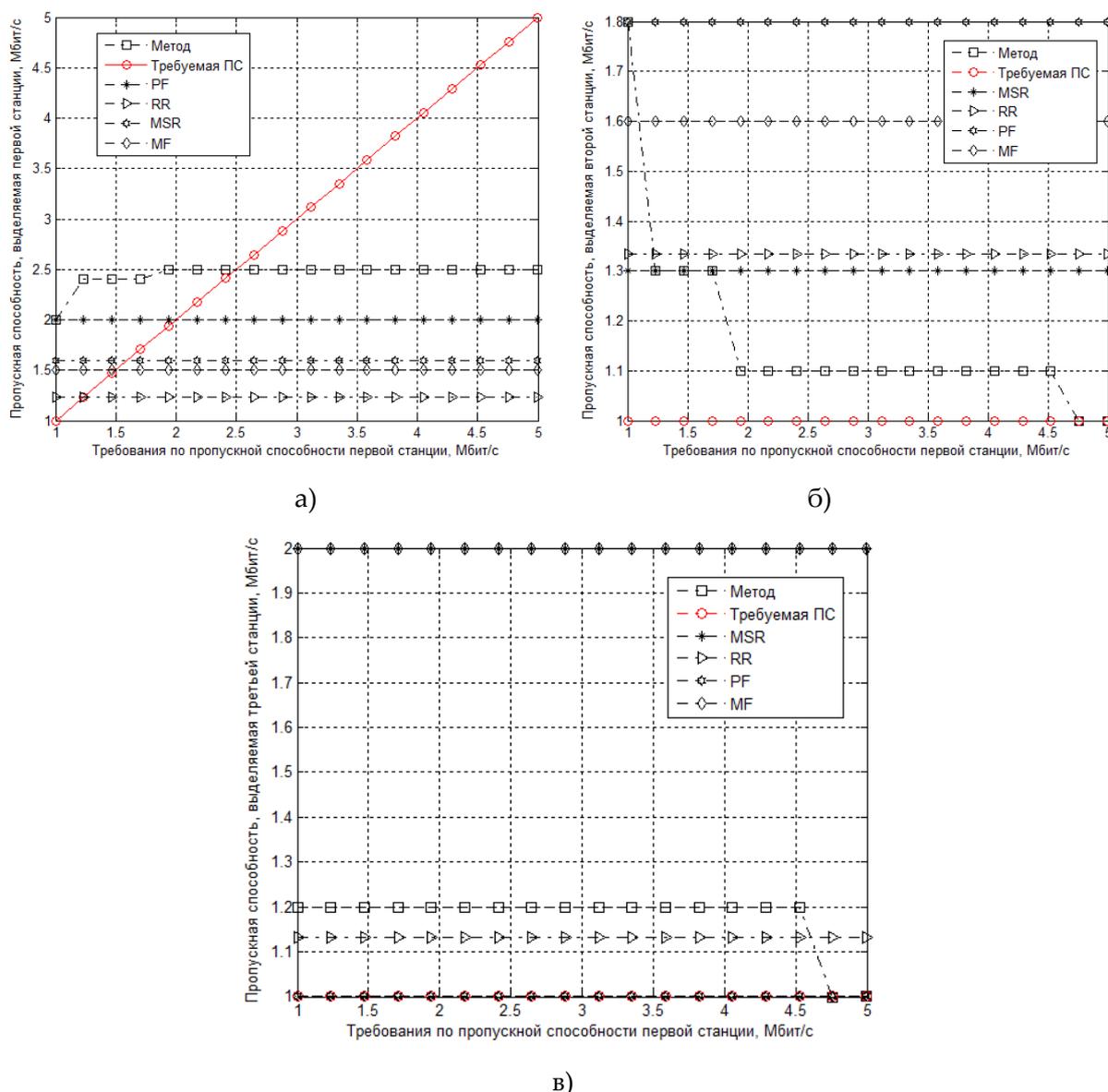


Рис. 8. Динамика выделения с помощью сравниваемых методов пропускной способности нисходящего канала шириной 5МГц трем станциям с различными типами обслуживания

Если первая станция имела приоритет, равный 1, то предложенный метод обеспечивал выделение первой станции 2,25 Мбит/с, что сопровождалось снижением выигрыша по пропускной способности в среднем на 11% по сравнению со случаем, когда первая станция имела третий приоритет.

Подобная ситуация наблюдалась и при втором варианте исходных данных, в рамках которого ширина канала составляла 10 МГц, а необходимо было распределить шестнадцать подканалов между тремя пользовательскими станциями. В первом случае также все станции имели нулевой приоритет обслуживания. Это привело к тому, что лишь предложенный метод и методы максимальной и пропорциональной справедливости смогли обеспечить заданный уровень обслуживания всем трем станциям (рис. 9).

При этом предложенный метод обеспечил выделение первой станции 4,3 Мбит/с, метод PF – 4 Мбит/с, а метод MF – 3,5 Мбит/с (рис. 9 а) при выполнении QoS-требований второй и третьей станций (рис.9 б и в). Таким образом, предложенный в работе метод позволил повысить производительность WiMAX-сети на 7,5% по сравнению с методом PF и на 22,8% по сравнению с методом MF. В случае, когда первая SS будет иметь более высокий приоритет, например, второй, это приведет к перераспределению подканалов предложенным методом (рис. 10), т.к. другие сравниваемые методы к изменению приоритетов запросов пользователей не чувствительны. В итоге, предложенный метод обеспечил заданный уровень качества обслуживания всех трех станций уже при  $R_{треб}^1 = 4,5$  Мбит/с, что на 12,5% больше по сравнению с методом PF и на 28,5% больше по сравнению с методом MF.

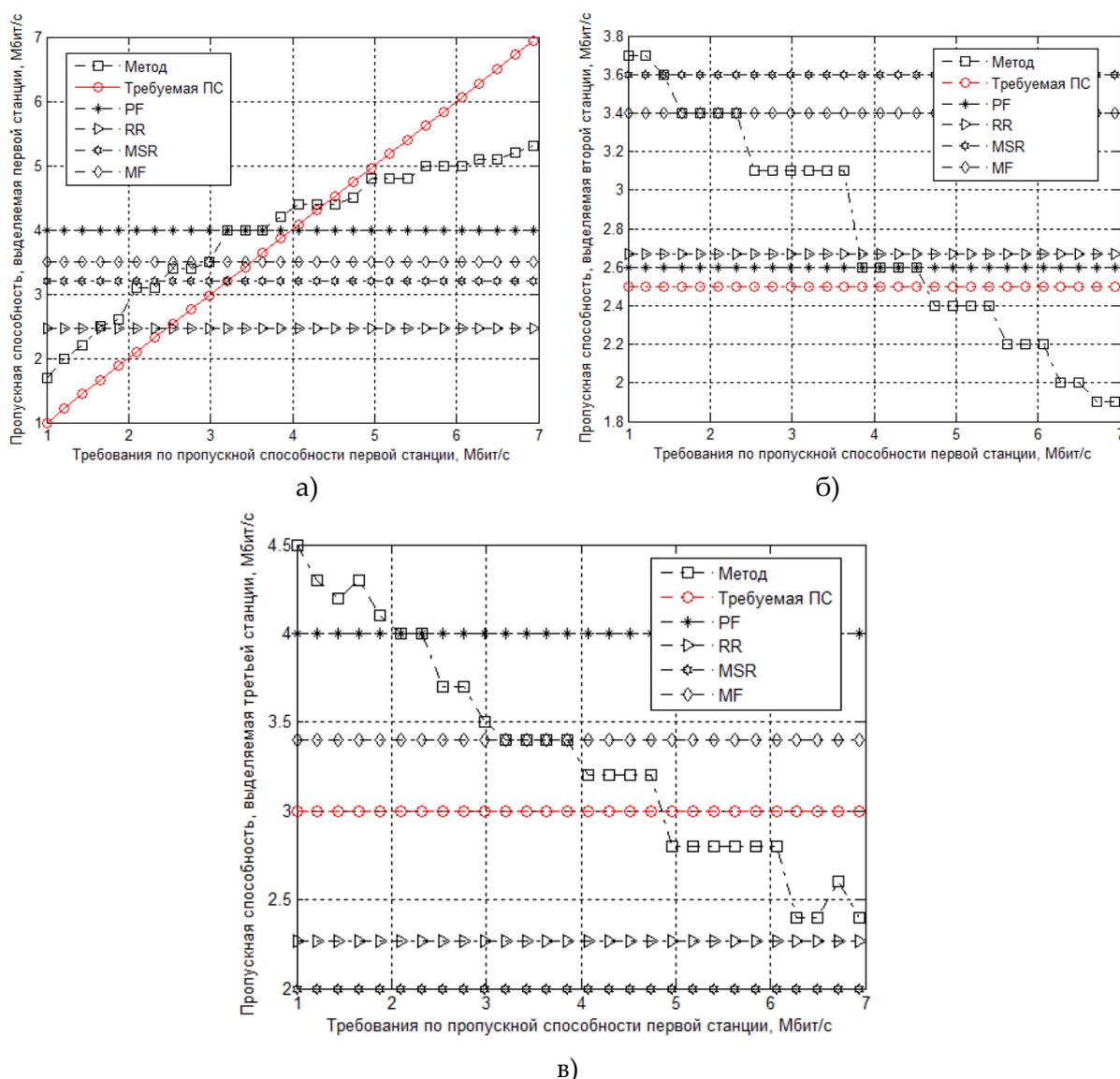


Рис. 9. Динамика выделения с помощью сравниваемых методов пропускной способности нисходящего канала шириной 10МГц трем станциям, имеющим нулевые приоритеты запросов к обслуживанию

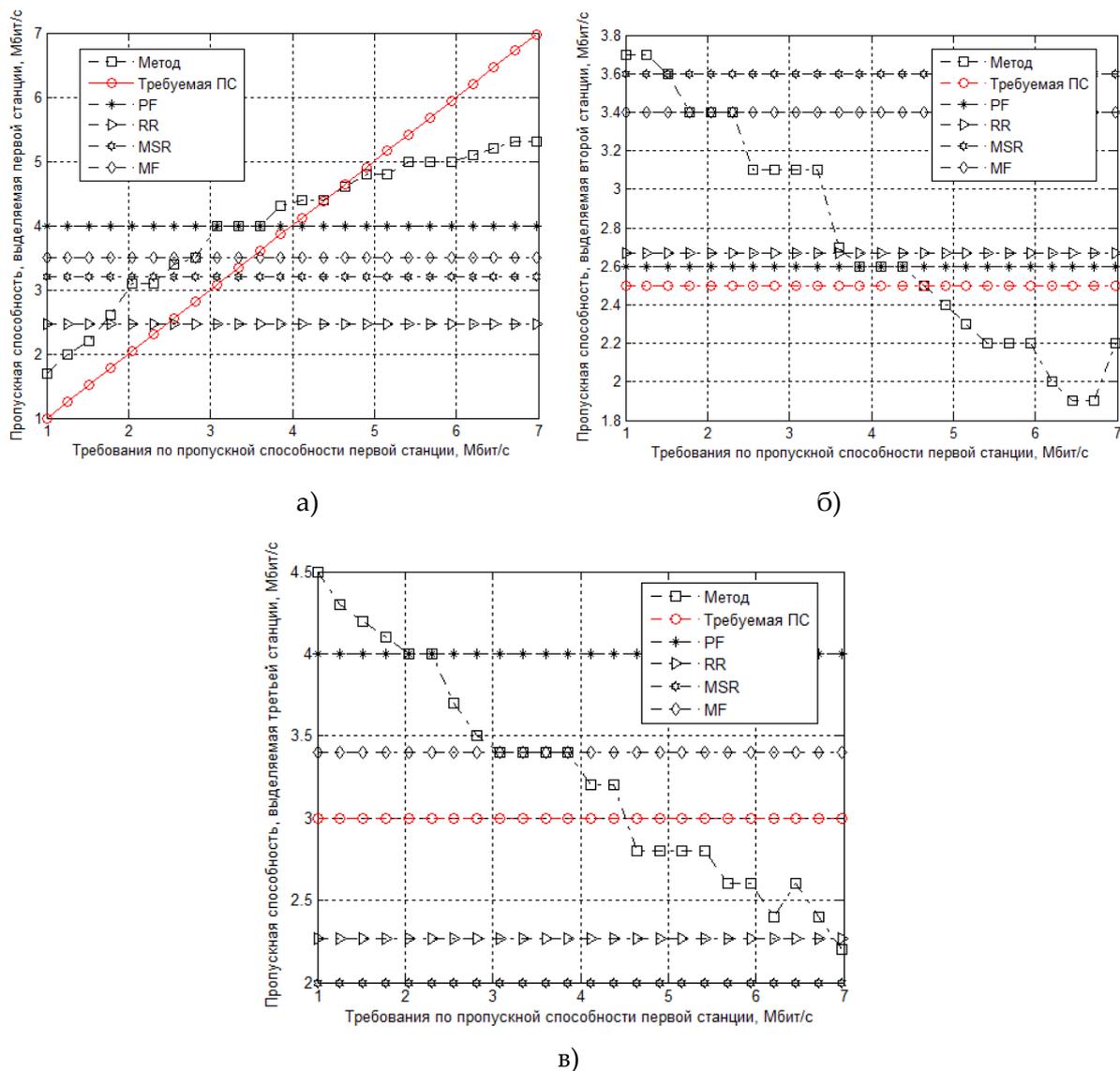


Рис. 10. Динамика выделения с помощью сравниваемых методов пропускной способности нисходящего канала шириной 10МГц трем станциям, при повышении приоритета запросов первой станции

Подводя итог проведенным исследованиям, стоит выделить, что в зависимости от ширины канала, числа подканалов, типа обслуживания и уровня QoS-требований предложенный метод позволил повысить уровень качества обслуживания запросов пользователей по пропускной способности в среднем по сравнению с методом пропорциональной справедливости (PF) на 12-15%, с методом максимальной справедливости (MF) – на 14-16%, с методом обеспечения максимальной скорости передачи (MSR) – на 20-25%, а с методом кругового обслуживания (RR) – на 30-34%.

## Выводы

Таким образом, в статье рассмотрен метод сбалансированного распределения частотных подканалов в нисходящем канале WiMAX. В основу метода положена оптимизационная модель сбалансированного выделения числа подканалов пользовательским станциям с учетом их приоритета и количественных требований к выделяемой пропускной способности, которая представлена системой линейных условий (2)-(7), описывающих процесс распределения подканалов в нисходящем канале WiMAX. Для выбора наиболее предпочтительного варианта распределения подканалов сформулирован критерий оптимальности получаемых решений, использование которого способствует обеспечению балансировки ресурсов (8).

Для оценки работоспособности и эффективности метода распределения ресурса нисходящего канала технологии WiMAX было проведено экспериментальное исследование с помощью пакета имитационного моделирования Simulink. Для этого в данном пакете была обоснована к применению блок-схема имитационной модели нисходящего канала связи физического уровня стандарта IEEE 802.16, с помощью которой можно задавать параметры нисходящего канала и выбранной схемы модуляции и кодирования, число и характеристики подканалов, а также оценивать влияние изменений в численных значениях перечисленных параметров на пропускную способность физического уровня, выделяемую той или иной SS.

Кроме того, был проведен сравнительный анализ предложенного метода и ранее известных методов (Maximum Sum Rate, Maximum Fairness, Proportional Fairness Scheduling и Round Robin Scheduler). Показано, что использование предложенных решений позволяет повысить уровень качества обслуживания запросов пользователей по пропускной способности в среднем от 12-16% по сравнению с методами MF, PF и до 20-34% – по сравнению с методами MSR и RR. Наибольшую эффективность предложенный метод обеспечивал с увеличением числа станций, количества частотных подканалов и роста разнородности в моделях и приоритетах обслуживания, а также уровня QoS-требований.

## Список литературы:

1. *Andrews J.G. Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking / J.G. Andrews; A. Ghosh; R. Muhamed. – Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, 2007. – 496 p.*
2. *Вишневский В.М. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G / В.М. Вишневский, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – Техносфера, 2009. – 453 с.*
3. *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.*
4. *Гаркуша С. В. Разработка и анализ модели распределения подканалов в сети стандарта IEEE 802.16 // Вісник національного університету «Львівська політехніка»: Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2012. – № 738. – С. 177-185.*

5. Гаркуша С. В. Разработка и анализ масштабируемой модели распределения подканалов в сети стандарта IEEE 802.16 / С. В. Гаркуша // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. – 2012. – Вип. 4 (33). – С. 68-74.

6. Лемешко О. В., Гаркуша С.В. Модель превентивного обмеження швидкості передачі низхідного каналу зв'язку технології WiMAX в умовах перевантажень // Вісник національного університету «Львівська політехніка»: Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2013. – № 766. – С. 132-138.

7. Гаркуша С. В. Модель распределения пропускной способности нисходящего канала связи технологии WiMAX с ограничением скорости передачи // Инфокоммуникационные технологии. – 2013. – Т. 11, № 3. – С. 18-23.

8. Puranik S. R. A Survey and Analysis on Scheduling Algorithms in IEEE 802.16e (WiMAX) Standard / S.R. Puranik, M. Vijayalakshmi, L. Kulkarni // International Journal of Computer Applications. – 2013. – Vol. 79(12). – P. 1-10.

9. Jakimovski K. Priority Based Uplink Scheduling Scheme for WiMAX Service Classes / K. Jakimovski, T. Janevski // Information Technology and Computer Science. – 2013. – Vol. 8. – P. 66-74.

10. Garkusha S. Slot Allocation Model and Data Burst Scheduling in Downlink WiMAX Technology / S. Garkusha, Ahmed H. Abed // IEEE 2013 12th International Conference "The Experience of Designing and Application of Cad Systems in Microelectronics" (CADSM), 2013. – P. 97-100.

11. Lemeshko A.V. Model time-frequency resource allocation WiMAX aimed at improving the electromagnetic compatibility / A.V. Lemeshko, S.V. Garkusha // 2013 IX International Conference "Antenna Theory and Techniques" (ICATT), 2013. – P. 175-177.

12. Garkusha S. Analysis Results of WIMAX Dowlink Traffic Management Model In Congestion Conditions / S. Garkusha, Yu. Andrushko, O. Lemeshko // International Conference "World Telecommunications Congress" (WTC), 2014. – P. 1-4.

13. Bayan A.F. A scalable QoS scheduling architecture for WiMAX multi-hop relay networks / Bayan A.F., Wan T.C. // 2nd International Conference on Education Technology and Computer, 2010. – P. 326-331.

14. Oktay M. A real-time scheduling architecture for IEEE 802.16 – WiMAX systems / M. Oktay, H.A. Mantar // IEEE 9th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII), 2011. – P. 189-194.

15. Seyedzadegan M. IEEE 802.16: WiMAX overview, WiMAX architecture / M. Seyedzadegan, M. Othman // International Journal of Computer Theory and Engineering. – 2013. – Vol. 5, N. 5. – P. 784-787.