

# Модель распределения слотов и формирования пакетов данных в нисходящем канале связи технологии WiMAX

С. В. Гаркуша

В статье предлагается математическая модель распределения слотов и формирования пакетов данных в нисходящем канале связи стандарта IEEE 802.16. Предложенная модель направлена на формирование одного пакета данных нисходящего канала для каждой пользовательской станции, что позволяет минимизировать количество служебных сообщений, передаваемых по используемому частотному каналу связи. Проведён анализ зависимости количества слотов, формирующих один пакет данных, от требуемой скорости передачи пользовательской станции, а также от вида схемы модуляции и кодирования.

*Ключевые слова:* WiMAX, распределение слотов, формирование пакетов данных, математическая модель, схема модуляции и кодирования.

## 1. Введение

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) представляет собой технологию беспроводной связи, которая обеспечивает широкополосный доступ (Wideband Access, WBA) к данным для фиксированных и мобильных пользовательских станций (ПС) на основе технологии доступа OFDMA (Orthogonal frequency-division multiple access) [1].

В технологии WiMAX 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. [2].

Высокий уровень самоорганизации может быть достигнут путём усовершенствования сетевых протоколов и механизмов, отвечающих за распределение доступных сетевых ресурсов. К подобного рода ресурсам, прежде всего, относятся сетевой трафик (информационный ресурс), пропускные способности каналов связи (канальный ресурс), очереди (буферный ресурс), символы (временной ресурс), а также частотные поднесущие (частотный ресурс), что особенно важно для беспроводных сетей [2]. Стандарт IEEE 802.16 определяет механизмы планирования и распределения ресурсов сети только для восходящих каналов связи (UpLink), оставляя право выбора за операторами связи и производителями оборудования в нисходящих каналах связи (DownLink) [3].

В рамках системы WiMAX, построенной на технологии OFDMA, существует возможность управления частотным и временным ресурсом. В качестве частотного ресурса выступают поднесущие, являющиеся первичной структурной единицей OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), а также подканалы, являющиеся наименьшей логической структурой OFDMA в частотной области и формирующиеся несколькими поднесущими. В качестве временного ресурса технологии OFDMA выступают слоты, являющиеся наи-

меньшей логической структурой, которые в частотной области всегда занимают один логический подканал, а во временной – от одного до трёх OFDM-символов (наименьшая структурная единица OFDM во временной области). Слоты, выделенные для передачи информации одному пользователю и объединённые в одну область, формируют пакет данных [4].

Результатом решения задачи распределения частотного и временного ресурсов должно быть формирование пакетов данных в нисходящем канале одного кадра, являющегося законченным «циклом» передачи данных во временной области и измеряемого интервалом между двумя соседними преамбулами.

Таким образом, задача распределения частотного и временного ресурсов в технологии WiMAX должна быть сформулирована как задача распределения слотов между ПС сети и соответствующего объединения их в пакеты данных в зависимости от заявленной скорости передачи и параметров QoS.

## 2. Анализ известных решений

Анализ известных решений [2, 5 – 20] показал, что повышение производительности технологии WiMAX и при сохранении QoS может быть обеспечено путём как отдельного, так и согласованного решения задач распределения частотного и временного ресурсов.

Варианты решений задачи распределения частотного ресурса приведены в работах [2, 5 – 14]. В работах [5 – 13] решается задача максимизации скорости передачи данных, выделяемой ПС сети, путём распределения поднесущих одного частотного канала. Недостатком формулировки задачи распределения частотного ресурса, как задачи распределения поднесущих, является неполный учёт технологических особенностей системы WiMAX, связанных с фиксированным закреплением количества поднесущих за подканалами частотного канала, определяемого стандартом IEEE 802.16 [21, 22].

В работах [2, 14] приведены варианты решения задачи распределения частотного ресурса в сети технологии WiMAX, как задачи распределения подканалов, с целью обеспечения необходимой производительности беспроводной сети и обеспечения QoS. Данный подход, в сравнении с [5 – 13], позволил более полно учесть технологические особенности системы WiMAX, связанные с формированием подканала набором поднесущих, а также выполнить учёт особенностей подрежимов, определяющих способ формирования «частотной структуры» подканала.

Подход, предложенный в [15], направлен на решение задачи распределения временного ресурса. В рамках данного решения производится выделение количества символов, кратного количеству символов, формирующих один слот, необходимого для передачи данных различным ПС с одинаковыми схемами модуляции и кодирования (Modulation and Coding Scheme, MCS). Данный подход позволяет обеспечить необходимую производительность сети и выполнить требования QoS. Недостатком указанного подхода, с учётом его ориентации на использование в системе с технологией OFDMA, является возможность управления только временным ресурсом, что соответствует технологии OFDM. Это, в свою очередь, может привести к неэффективному использованию пропускной способности канала связи в целом.

В работах [16 – 20] предложены подходы, направленные на совместное решение задачи распределения частотного и временного ресурсов, сформулированные как задача распределения слотов и формирования пакетов данных нисходящего канала связи. В работе [16] предложен подход, направленный на сортировку запросов от ПС по требуемой скорости передачи в порядке убывания, после чего выполняется расстановка слотов в пакете данных по подканалам слева направо и сверху вниз. Расстановка слотов начинается с запроса, имеющего наивысшие требования по скорости передачи данных, и заканчивается запросом с наименьшими требованиями. Недостатком данного решения является его эвристический

характер, так как поиск решения по удовлетворению требований одной ПС не учитывает требования оставшихся ПС. В работе [17] приведено решение по улучшению подхода, предложенного в [16], путём разбиения запросов от ПС, требующих высокой скорости передачи, на несколько пакетов данных. Недостатком указанного подхода является увеличение количества передаваемой служебной информации, определяемой числом сформированных пакетов. Увеличение количества передаваемой служебной информации, в свою очередь, приводит к уменьшению эффективной пропускной способности канала связи.

В работах [18 – 20] предложен подход, направленный на объединение запросов от ПС, использующих одинаковые схемы MCS, в так называемые области данных. При этом области данных наносятся на слоты кадра снизу вверх и справа налево. Такой подход позволяет минимизировать количество слотов для передачи служебной информации в нисходящем канале, именуемых картой нисходящего канала (Downlink MAP, DL-MAP), путём уменьшения количества так называемых информационных элементов карты нисходящего канала (Downlink MAP Information Element, DL-MAP\_IE), каждый из которых отвечает за формирование одного пакета данных. Недостатком указанного подхода является то, что ПС при приёме сигнала необходимо выполнить восстановление всей области данных для выделения собственных данных. Необходимость выполнения восстановления влечёт за собой увеличение времени по обработке служебной информации, что способствует снижению производительности беспроводной сети.

Также в результате анализа установлено, что использование подходов, предложенных в работах [16 – 20], направлено на применение для интерактивного «best effort» класса данных во избежание ситуации, при которой некоторые ПС никогда не получают доступ к частотно-временному ресурсу. Использование указанного класса обслуживания (Class of Service, CoS) обеспечивает доставку данных ПС по мере возможностей без гарантий скорости передачи данных. Повышение качества обслуживания при распределении частотно-временного ресурса каждой ПС должно быть направлено на обеспечение гарантированной скорости передачи с возможностью доступа к дополнительной (не гарантируемой) полосе пропускания. Однако ни один из проанализированных подходов не способен обеспечить подобного CoS.

На основе недостатков известных решений [2, 5 – 20] сформулированы требования к перспективным решениям задачи распределения слотов и формирования пакетов данных в нисходящем канале технологии WiMAX:

- ориентация на эффективное использование частотного и временного ресурса;
- учёт требований по скорости передачи ПС и качеству обслуживания;
- минимизация количества служебных данных, передаваемых по каналу связи;
- ориентация на преимущественно динамический характер решения задачи распределения слотов и формирования пакетов данных;
- ориентация на максимизацию производительности сети в целом и на улучшение других показателей QoS;
- учёт технологических особенностей сети (режима работы, ширины канала, количества подканалов, длительности кадра);
- учёт территориальной удалённости станций (определяет выбор MCS для передачи сигнала ПС).

На основании проведённого анализа, а также сформулированных требований, в статье предлагается единая модель, в которой описывается совместная процедура распределения как частотного, так и временного ресурсов. Предложенная модель представлена в виде решения задачи распределения слотов и формирования их в пакеты данных нисходящего канала связи технологии WiMAX с учётом показателей качества обслуживания (требуемой скорости передачи ПС) и территориальной удалённости пользовательских станций сети (MCS для передачи сигнала ПС).

### 3. Исходные данные для задачи распределения слотов и формирования пакетов данных в нисходящем канале связи

Предлагаемая математическая модель направлена на применение в беспроводных широкополосных сетях стандартов IEEE 802.16a и IEEE 802.16d, использующих схему OFDMA с фиксированным «окном» быстрого преобразования Фурье (БПФ) размером 2048 поднесущих и рабочей полосой канала 20 МГц [3].

На рис. 1 показана подробная структура OFDMA-кадра для режима временного дуплекса (Time-division duplexing, TDD), используемого в лицензируемых и нелицензируемых диапазонах частот. Каждый кадр разбит на два подкадра. Подкадр нисходящего канала содержит преамбулу, заголовок управления кадром (Frame Control Header, FCH), DL-MAP и карту восходящего канала (Uplink MAP, UL-MAP), пакеты данных (DL-пакеты) адресованные разным ПС, а также интервал переключения с приёма на передачу (receive/transmit transition gap, RTG) и интервал переключения с приёма на передачу (transmit/receive transition gap, TRG). Каждой ПС для передачи данных в подкадре нисходящего и восходящего канала выделяются пакеты данных (DL-пакеты и UL-пакеты соответственно), формируемые из слотов.

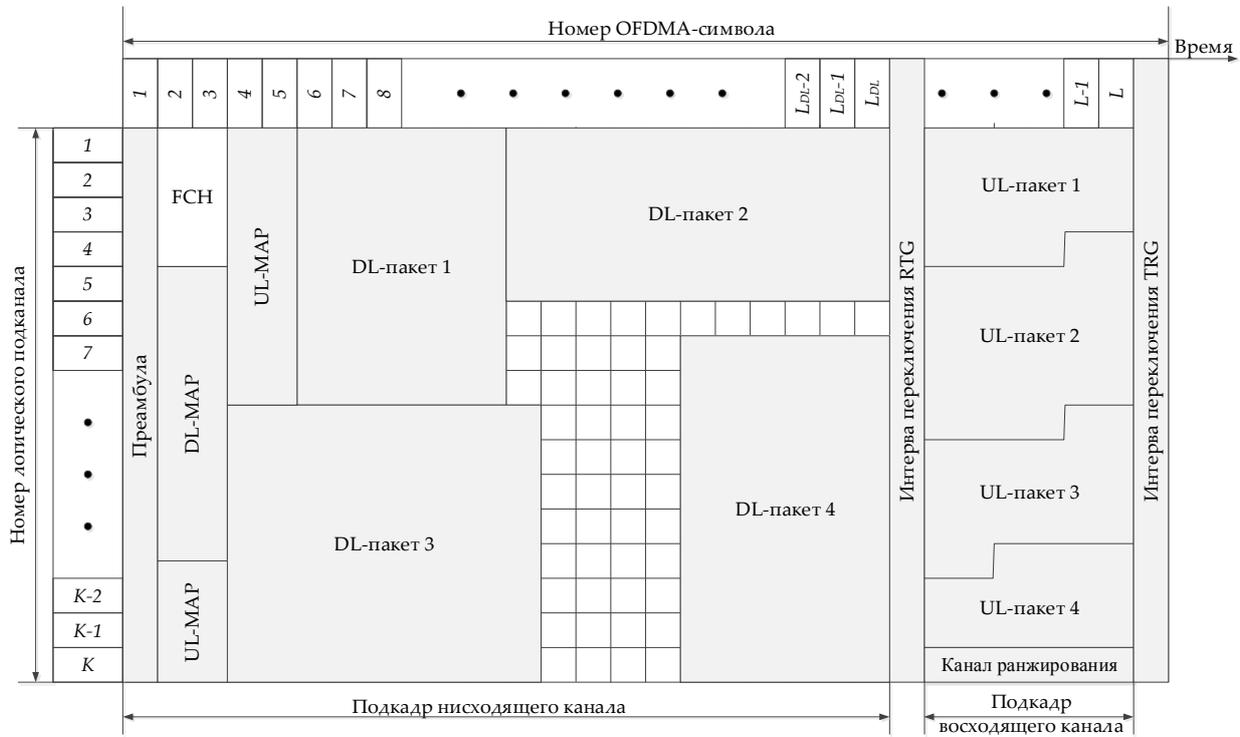


Рис. 1. Структура OFDMA-кадра в режиме TDD

В предлагаемой модели предполагаются известными следующие исходные данные:

- 1)  $N$  – количество пользовательских станций в беспроводной сети;
- 2)  $K$  – количество подканалов в частотном канале, определяемое используемым подрежимом и составляющее для DL FUSC – 32 подканала, а для DL PUSC – 60 подканалов;
- 3)  $L$  – количество символов в кадре. Необходимо заметить, что в технологии WiMAX длительность кадра может изменяться и принимать значения, равные 2; 2.5; 4; 5; 8; 10; 12.5; 20 мс. Исходя из того, что полезная часть символа имеет фиксированную длительность  $T_b = 89.6$  мс, количество символов в кадре будет принимать значения 19, 24, 39, 49, 79, 99, 124, 198, соответственно указанным длительностям кадра. Кроме того, между символами существует защитный интервал, который может принимать четыре значения относительно длительности полезной части символа:  $T_g = T_b / 4 = 22.4$  мс;  $T_g = T_b / 8 = 11.2$  мс;

$T_g = T_b / 16 = 5.6$  мс;  $T_g = T_b / 32 = 2.8$  мс. В результате этого точная длительность кадра может быть рассчитана как  $(T_b + T_g)L$ ;

4)  $R_{\text{треб}}^n$  – требуемая скорость передачи данных для обслуживания  $n$ -й ПС (Мбит/с);

5)  $BLER$  – вероятность блоковой ошибки, получаемая за счёт механизма HARQ (Hybrid automatic repeat request) [1];

6)  $S$  – количество символов, формирующих один слот. Размер слота зависит от используемого подрежима [1, 3] и может принимать значения: для DL FUSC – один OFDMA-символ на одном подканале; DL PUSC – два OFDMA-символа на одном подканале; UL PUSC – три OFDMA-символа на одном подканале; AMC – 6, 3 или 2 OFDMA-символа на одном подканале;

7) виды MCS, в зависимости от территориальной удалённости ПС;

8) количество слотов на одном подканале нисходящего канала для передачи полезной информации

$$M = \left\lfloor \frac{UL - L_{\text{треб}}}{S} \right\rfloor, \quad (1)$$

где  $\lfloor \cdot \rfloor$  – операция округления до ближайшего целого в меньшую сторону,

$U$  – отношение количества символов в нисходящем канале к общему количеству символов в кадре (отношение количества символов в нисходящем канале к количеству символов в восходящем канале изменяется в пределах от 3:1 до 1:1 для поддержки различных профилей трафика [1]),

$L_{\text{треб}}$  – количество символов для передачи преамбулы (равно единице).

В предлагаемой математической модели также производится учёт объёма служебной информации, передаваемой в рамках одного кадра, состоящей из фиксированной и переменной частей. Фиксированная часть состоит из преамбулы и FCH. Переменная часть включает в себя DL-MAP и UL-MAP, которые содержат информационные элементы нисходящего канала связи (DL-MAP\_IE) и информационные элементы восходящего канала связи (Uplink MAP Information Element, UL-MAP\_IE) соответственно. Каждому пакету пользовательских данных в нисходящем канале связи соответствует один DL-MAP\_IE, а каждому пакету в восходящем канале связи – один UL-MAP\_IE. Фиксированные и переменные части имеют следующие размеры [23]:

- DL-MAP – 88 бит;
- DL-MAP\_IE – 60 бит;
- UL-MAP – 48 бит;
- UL-MAP\_IE – 52 бит.

С целью более качественного восстановления служебной информации на приёмной стороне в технологии WiMAX используется число повторений фиксированных и переменных частей, принимающее значения  $w=2$ ,  $w=4$  и  $w=6$  [22]. В результате этого количество слотов, необходимых для передачи служебной информации, будет рассчитываться следующим образом [23]:

$$Q_{\text{DL-MAP}} = \left\lceil \frac{88 + 60N}{SR_c^{\text{MAP}} k_b^{\text{MAP}} K_s} \right\rceil w; \quad (2)$$

$$Q_{\text{UL-MAP}} = \left\lceil \frac{48 + 52N}{SR_c^{\text{MAP}} k_b^{\text{MAP}} K_s} \right\rceil w, \quad (3)$$

где в числителе – общее количество бит служебной информации; в знаменателе – количество бит служебной информации, передаваемой в рамках одного слота,  $\lceil \cdot \rceil$  – операция округле-

ния до ближайшего целого в большую сторону;  $R_c^{\text{MAP}}$  – скорость кода, используемая при кодировании сигнала служебной информации;  $k_b^{\text{MAP}}$  – битовая загрузка символа, используемая при кодировании сигнала служебной информации;  $K_s$  – число поднесущих для передачи данных в одном подканале (для передачи служебных сообщений используется подрежим DL PUSC, в результате чего  $K_s=24$ ). При этом необходимо учитывать, что в технологии WiMAX для модуляции и кодирования служебных сообщений используется схема модуляции и кодирования QPSK 1/2. В результате этого в выражении (2) и (3) будут использоваться параметры  $R_c^{\text{MAP}} = 2$  и  $k_b^{\text{MAP}} = 1/2$ .

Общее количество слотов, предназначенных для передачи служебной информации, может быть рассчитано из выражения

$$Q = Q_{\text{DL-MAP}} + Q_{\text{UL-MAP}} + Q_{\text{FCH}}, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{FCH}}=4$  – количество слотов для передачи заголовка управления кадром.

#### 4. Математическая модель распределения слотов по пакетам данных в нисходящем канале связи

В ходе решения задачи распределения слотов и формирования пакетов данных, для передачи полезной информации каждой ПС сети в нисходящем канале связи, в рамках предлагаемой модели необходимо обеспечить расчёт булевой управляющей переменной ( $x_{k,m}^n$ ), определяющей порядок распределения слотов:

$$x_{k,m}^n = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-й слот на } k\text{-м подканале выделен } n\text{-ой ПС;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (5)$$

Общее число управляющих переменных зависит от количества ПС в сети, количества используемых подканалов, а также от количества слотов, формируемых на одном подканале нисходящего канала, и будет определяться выражением  $N \times K \times M$ . В результате расчёта переменных (5) производится закрепление подканалов и распределение слотов за ПС, на которых будут передаваться данные в нисходящем канале. Кроме того, при расчёте искомых переменных  $x_{k,m}^n$  необходимо выполнить ряд важных условий-ограничений:

1) Условие закрепления  $k$ -го подканала на протяжении передачи  $m$ -го слота не более чем за одной ПС (рис. 2)

$$\sum_{n=1}^N x_{k,m}^n \leq 1 \quad (k = \overline{1, K}; m = \overline{1, M}); \quad (6)$$

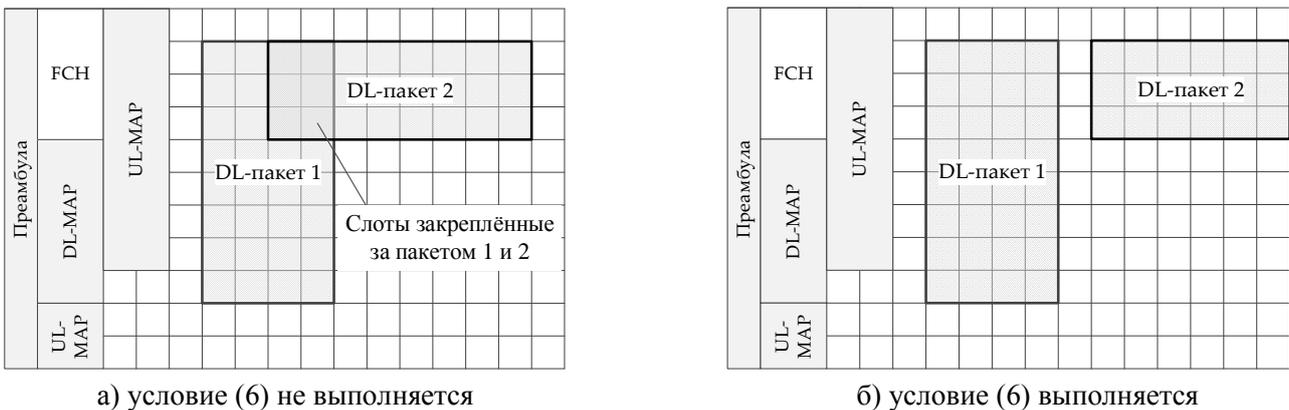


Рис. 2. Пример проверки условия (6)

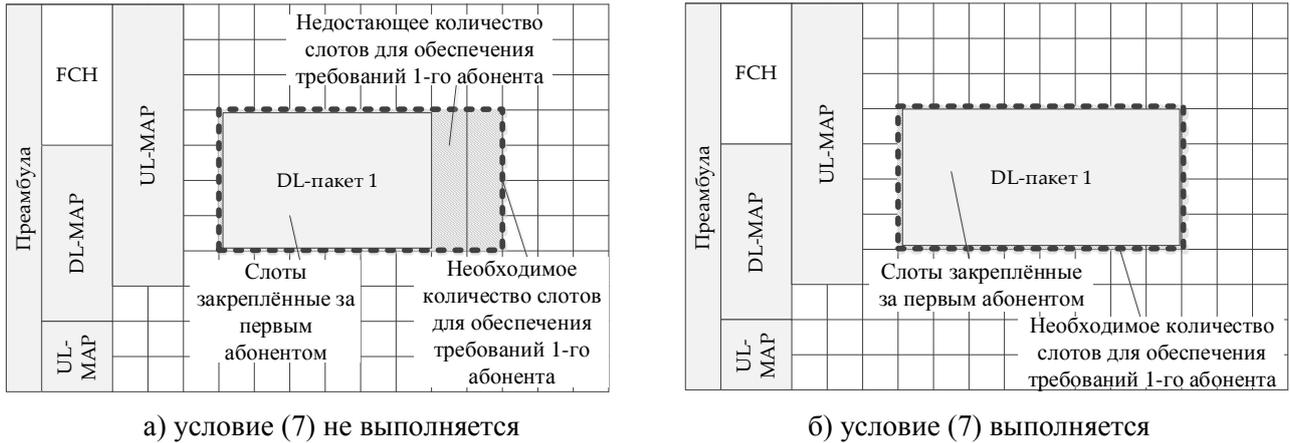
2) Условие закрепления за  $n$ -й ПС количества слотов, обеспечивающего необходимую скорость передачи при используемой MCS (рис. 3)

$$R_S^n \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K x_{k,m}^n \geq R_{\text{треб}}^n \quad (n = \overline{1, N}), \quad (7)$$

где  $R_S^n = \frac{SR_c^n k_b^n K_s (1 - BLER)}{(T_b + T_g)L + T_{\text{RTG}} + T_{\text{TRG}}}$  – пропускная способность слота, закрепленного за  $n$ -й

ПС, которая зависит от используемой MCS и представляет собой количество переданных бит за время, равное длительности слота [24];  $R_c^n$  – скорость кода, используемого при кодировании сигнала  $n$ -й ПС (например, для модуляции 16-QAM 1/2 параметр  $R_c = 1/2$  [3]);  $k_b^n$  – битовая загрузка символа  $n$ -й ПС (например, для модуляции 16-QAM параметр  $k_b^n = 4$ );

$K_s$  – число поднесущих для передачи данных в одном подканале (для подрежима DL FUSC  $K_s = 48$ , а для DL PUSC  $K_s = 24$ );  $\Delta f \approx 11.16$  КГц – частотный разнос между поднесущими;  $T_{\text{RTG}} = 105.7$  мкс – длительность интервала RTG;  $T_{\text{TRG}} = 60$  мкс – длительность интервала TRG [1].



а) условие (7) не выполняется

б) условие (7) выполняется

Рис. 3. Пример проверки условия закрепления за  $n$ -й ПС количества слотов, обеспечивающего необходимую скорость передачи при заданной MCS

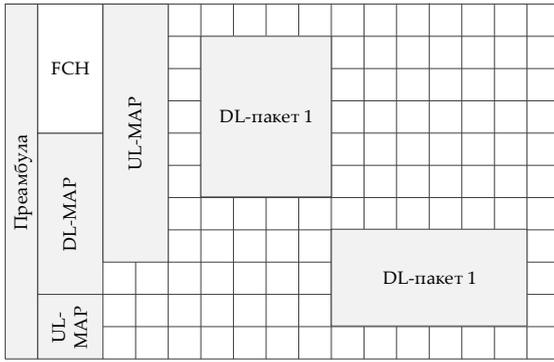
3) Условия формирования одного пакета для  $n$ -й ПС (рис. 4)

$$x_{k,i}^n x_{k,z}^n (i - z + 1) - \sum_{u=z}^i x_{k,u}^n \leq 0, \quad (8)$$

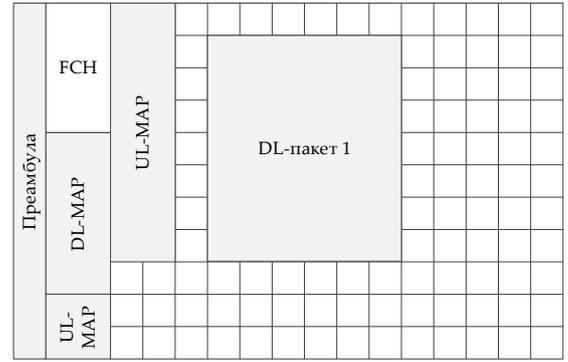
при ( $z = \overline{1, M - 1}$ ;  $i = \overline{2, M}$ ;  $n = \overline{1, N}$ ;  $k = \overline{1, K}$ ;  $i > z$ );

$$x_{j,m}^n x_{r,m}^n (j - r + 1) - \sum_{s=r}^j x_{s,m}^n \leq 0, \quad (9)$$

при ( $r = \overline{1, K - 1}$ ;  $j = \overline{2, K}$ ;  $n = \overline{1, N}$ ;  $m = \overline{1, M}$ ;  $j > r$ ).



а) условия (8) и (9) не выполняются



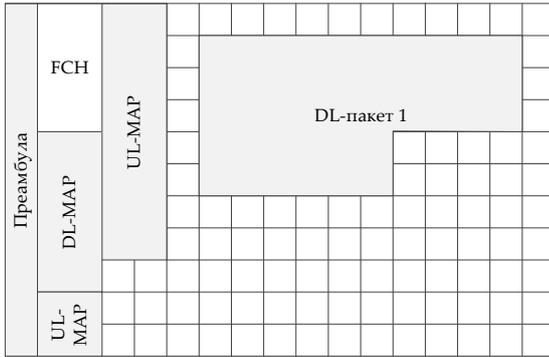
б) условия (8) и (9) выполняются

Рис. 4. Пример проверки условий формирования одного пакета для  $n$ -й ПС

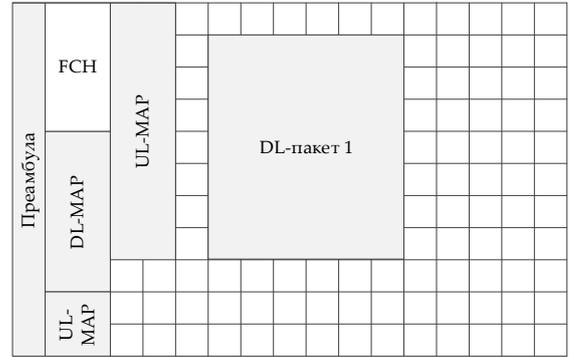
4) Условие формирования пакетов «прямоугольной формы» (рис. 5)

$$x_{k,m}^n \sum_{d=1}^M x_{k,d}^n \sum_{b=1}^K x_{b,m}^n = x_{k,m}^n \sum_{g=1}^K \sum_{h=1}^M x_{g,h}^n, \quad (10)$$

при  $(n = \overline{1, N}; k = \overline{1, K}; m = \overline{1, M})$ .



а) условие (10) не выполняется



б) условие (10) выполняется

Рис. 5. Пример проверки условия формирования пакетов «прямоугольной формы»

5) Условия резервирования необходимого количества слотов для передачи служебной информации (рис. 6)

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{k,m}^n = 0, \quad (11)$$

при  $(m = \overline{1, m_{\text{служ}} - 1}, \lceil Q/K \rceil \geq 1)$ ;

$$\sum_{n=1}^N x_{k, m_{\text{служ}}}^n = 0, \quad (12)$$

при  $(k = \overline{1, k_{\text{служ}}}, \lceil Q/K \rceil \geq 1)$ ;

$$\sum_{n=1}^N x_{k,1}^n = 0, \quad (13)$$

при  $(k = \overline{1, k_{\text{служ}}}, \lceil Q/K \rceil < 1)$ ,

где  $m_{\text{служ}} = \lceil Q/K \rceil$  – количество слотов, выделенных для передачи служебных сообщений, занимающих всю ширину частотного канала (располагаются в начале кадра после преамбулы);  $k_{\text{служ}} = Q - K(m_{\text{служ}} - 1)$  – количество слотов, выделенных для передачи служебной информации, занимающих лишь часть ширины частотного канала.

Условия (11) и (12) используются в случае, если количество слотов, необходимое для передачи служебной информации, превышает или равно числу подканалов в частотном канале  $\lceil Q/K \rceil \geq 1$ . Также условие (11) позволяет произвести резервирование всех подканалов на протяжении передачи количества слотов равного  $m_{\text{служ}}$  для передачи служебной информации. Условия (12) и (13) резервируют лишь часть подканалов  $k_{\text{служ}}$  на протяжении длительности одного слота.

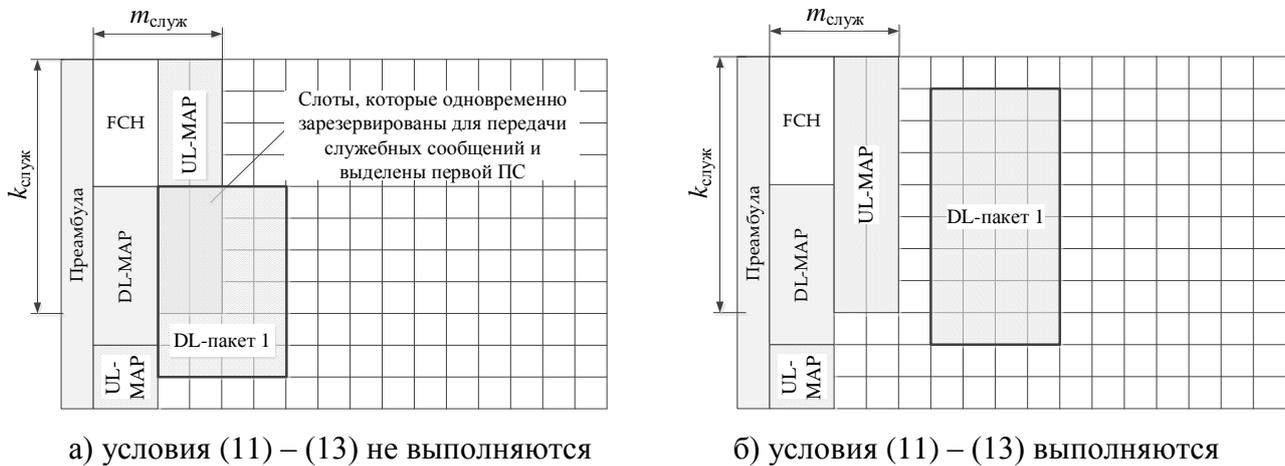


Рис. 6. Пример проверки условий резервирования необходимого количества слотов для передачи служебной информации

Расчёт искомых переменных (5) в соответствии с условиями-ограничениями (6) – (13) целесообразно осуществлять в ходе решения оптимизационной задачи, обеспечивая минимум или максимум предварительно выбранного критерия качества решения задачи распределения слотов и формирования пакетов передачи данных ПС беспроводной сети стандартов IEEE 802.16a и IEEE 802.16d.

Задача распределения слотов и формирования пакетов данных ПС может быть решена с использованием критерия оптимальности, направленного на экономию частотного и временного ресурсов, а также уменьшения времени нахождения ПС в активном состоянии, что позволит снизить энергопотребление ПС. Таким образом, критерий оптимальности примет вид:

$$\min \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M x_{k,m}^n, \tag{14}$$

при учёте условий-ограничений (6) – (13).

Сформулированная задача с математической точки зрения является задачей смешанного целочисленного нелинейного программирования – MINLP (Mixed Integer NonLinear Programming). В модели искомые переменные  $x_{k,m}^n$  (5) являются булевыми. Переменная, используемая в критерии оптимальности (14), является целочисленной, ограничения на искомые переменные (6), (7), (11) – (13) носят линейный, а ограничения (8) – (10) – нелинейный характер.

## 5. Пример решения задачи распределения слотов между пакетами данных в прямом канале связи технологии WiMAX

С целью анализа получаемых решений распределения слотов между пакетами данных в нисходящем канале в рамках предложенной модели (5) – (13) рассмотрим пример решения поставленной задачи. В примере рассматривалась беспроводная сеть технологии WiMAX, использующая схему OFDMA с фиксированным «окном» БПФ, конфигурация которой приведена на рис. 7.

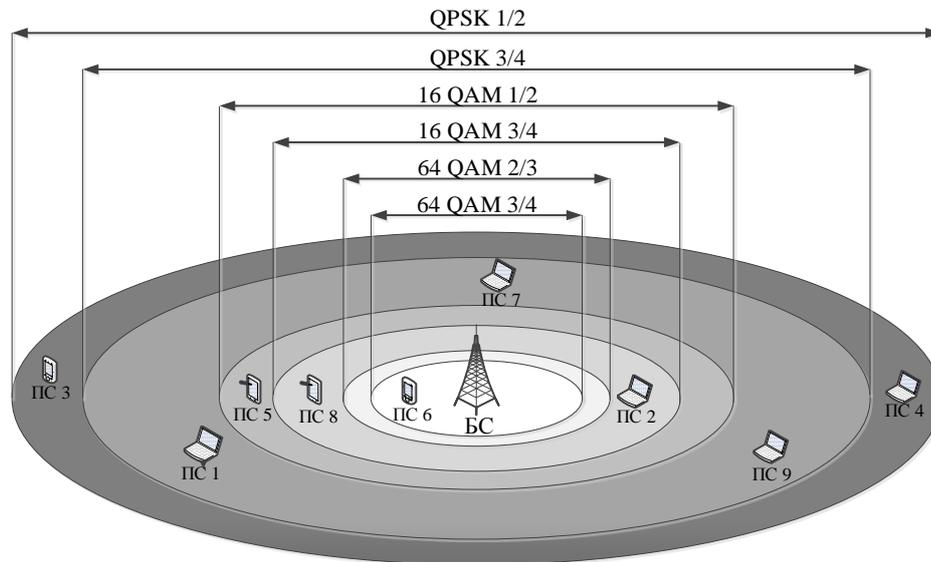


Рис. 7. Пример конфигурации беспроводной сети стандарта IEEE 802.16

При решении задачи распределения слотов между пакетами данных в нисходящем канале в качестве исходных данных были использованы следующие:

- количество пользовательских станций –  $N = 9$ ;
- используемый подрежим OFDMA – DL PUSC;
- количество подканалов в одном канале –  $K = 60$  (определяется подрежимом OFDMA);
- количество поднесущих для передачи данных на один подканал –  $K_s = 24$  (определяется подрежимом OFDMA);
- частотный разнос между поднесущими –  $\Delta f \approx 11.16$  КГц;
- вид MCS сигнала (рис. 7) ПС 1 – QPSK 3/4, ПС 2 – 16 QAM 3/4, ПС 3 – QPSK 1/2, ПС 4 – QPSK 1/2, ПС 5 – 16 QAM 1/2, ПС 6 – 64 QAM 3/4, ПС 7 – QPSK 3/4, ПС 8 – 16 QAM 3/4, ПС 9 – QPSK 3/4;

- требуемая скорость передачи для обслуживания каждой ПС (Мбит/с) –  $R_{трб}^1 = 1.5$ ;
- $R_{трб}^2 = 1.25$ ;  $R_{трб}^3 = 2.15$ ;  $R_{трб}^4 = 1.75$ ;  $R_{трб}^5 = 0.2$ ;  $R_{трб}^6 = 0.25$ ;  $R_{трб}^7 = 1.5$ ;  $R_{трб}^8 = 0.5$ ;  $R_{трб}^9 = 1$ ;
- вероятность блоковой ошибки –  $BLER = 0$ ;
- длительность кадра – 5 мс;
- длительность защитного интервала относительно длины полезной части символа –  $T_g = T_b / 8 = 11.2$  мс;
- количество символов в кадре –  $L = 49$ , в результате чего точная длительность кадра составляет  $(T_b + T_g)L = 4.9392$  мс;
- количество символов, формирующих один слот –  $S = 2$  (определяется подрежимом OFDMA);

– отношение длительности нисходящего канала к длительности восходящего канала – 3:1 ( $U = 3/4$ ).

Используя исходные данные и выражение (1), можем определить, какое количество слотов будет формироваться в рамках подканала прямого канала:

$$M = \left\lfloor \frac{UL - L_{\text{пр}}}{S} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{\frac{3}{4} \cdot 49 - 1}{2} \right\rfloor = 18.$$

В качестве примера было проведено решение сформулированной в работе оптимизационной задачи, для чего была использована система MatLab R2012b, в рамках которой была задействована программа minlpAssign пакета оптимизации TOMLAB. Пример решения задачи распределения слотов между пакетами данных в нисходящем канале для рассматриваемого примера возможной конфигурации беспроводной сети (рис. 7) представлен на рис. 8.

Как видно из полученного решения (рис. 8), в нисходящем канале формируется девять пакетов данных (DL-пакетов). Количество слотов в каждом пакете данных удовлетворяет требованиям по скорости передачи пользовательских станций.

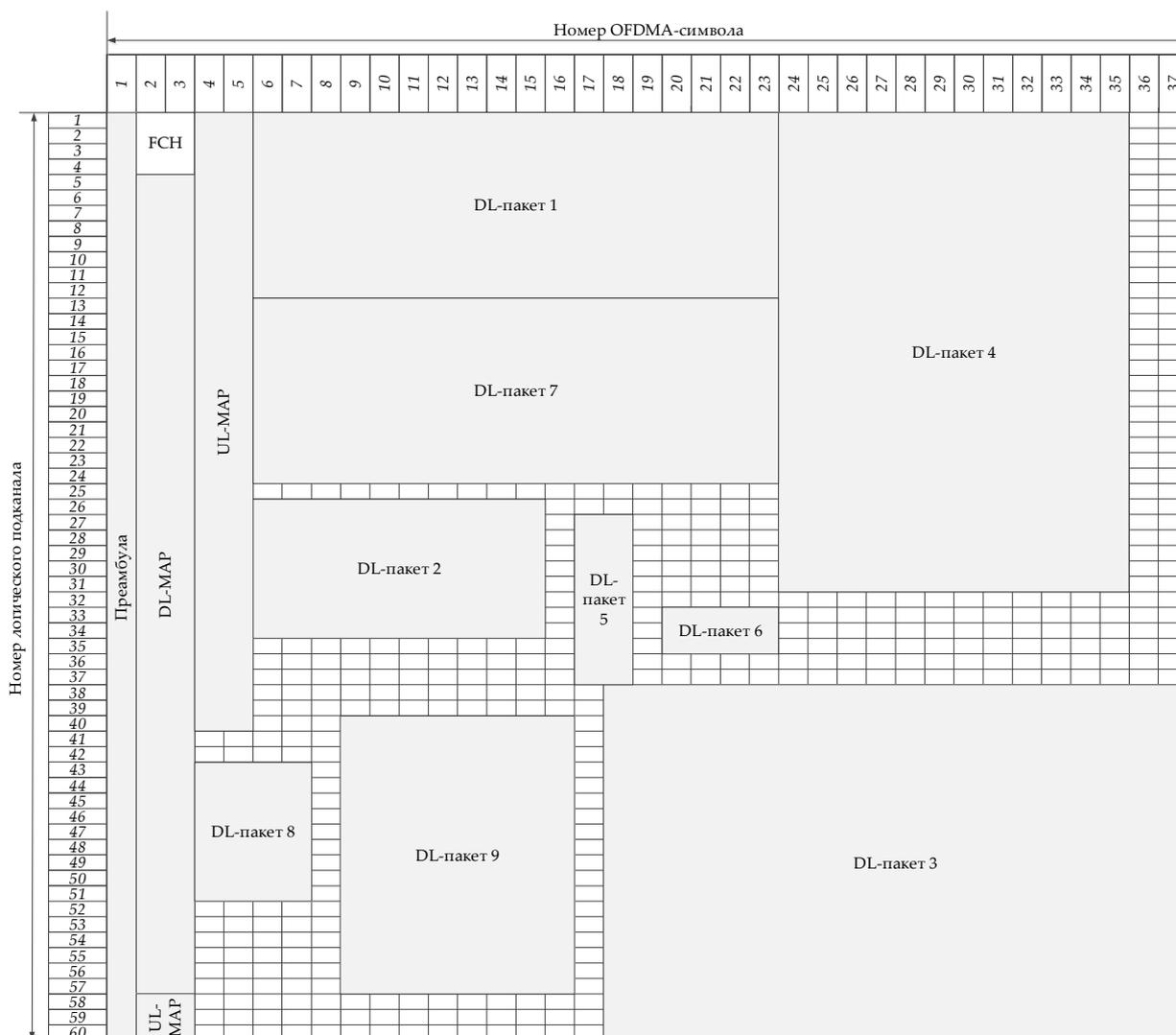


Рис. 8. Пример решения задачи распределения слотов между пакетами данных в нисходящем канале

В результате анализа решений задачи распределения слотов и формирования пакетов данных установлено, что увеличение требуемой скорости передачи при использовании одинаковых MCS приводит к прямо пропорциональному увеличению количества слотов, входя-

щих в состав пакета данных. Кроме того, увеличение битовой загрузки символа и увеличение скорости кодирования, с одной стороны, приводит к прямопропорциональному уменьшению количества слотов, формирующих пакет данных, но, с другой стороны, приводит к сокращению дальности связи (рис. 7).

Проведён анализ зависимости количества слотов нисходящего канала, необходимых для передачи служебной информации, от числа ПС беспроводной сети и количества пакетов данных, формируемых для передачи полезной информации каждой ПС (рис. 9).

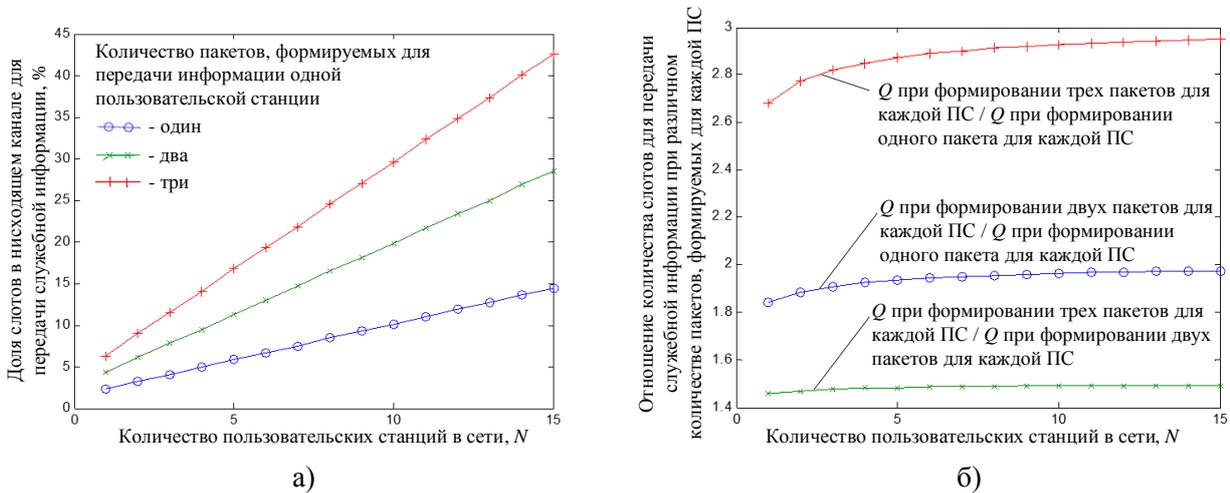


Рис. 9. Зависимость доли слотов нисходящего канала, необходимых для передачи служебной информации, от числа ПС беспроводной сети и количества пакетов данных, формируемых для передачи полезной информации каждой ПС

В результате анализа установлено, что использование условий (8) и (9), обеспечивающих формирование одного пакета данных для каждой ПС, позволяет минимизировать количество служебной информации, передаваемой в нисходящем канале связи, так как формирование каждого дополнительного DL-пакета приводит к формированию DL-MAP\_UE.

Проанализирована зависимость отношения количества слотов, выделяемых одной ПС, к общему количеству слотов, доступных для передачи полезной информации ( $H$ ), от требуемой скорости передачи ПС (рис. 10).

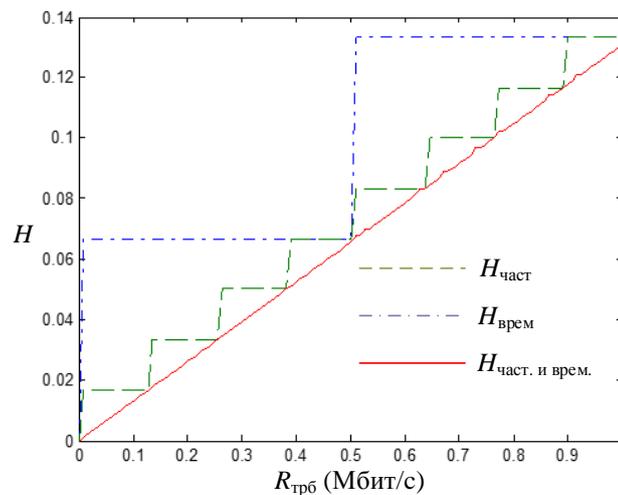


Рис. 10. Зависимость отношения количества слотов, выделяемых одной ПС, к общему количеству слотов, доступных для передачи полезной информации ( $H$ ), от требуемой скорости передачи ПС

На рис. 10 показано, какая доля слотов от общего количества слотов, доступных для передачи полезной информации, выделяется одной ПС при решении задачи совместного распределения частотного и временного ресурсов ( $H_{\text{част. и врем.}}$ ), задачи распределения частотного ресурса ( $H_{\text{част.}}$ ) и задачи распределения временного ресурса ( $H_{\text{врем.}}$ ). Зависимости, представленные на рис. 10, имеют скачкообразный характер. Наличие скачков объясняется необходимостью выделения очередного подканала (в случае решения задачи распределения частотного ресурса) или последовательности символов, кратной количеству символов в слоте (в случае решения задачи распределения временного ресурса), при увеличении требуемой скорости передачи ПС.

Кроме того, в результате анализа установлено, что задача совместного распределения частотного и временного ресурсов имеет более высокую эффективность использования пропускной способности нисходящего канала технологии WiMAX, по сравнению с задачей распределения частотного и задачей распределения временного ресурсов. На рис. 11 показано, во сколько раз ( $B$ ) можно уменьшить количество слотов, выделяемых ПС при решении задачи совместного распределения частотного и временного ресурсов, по сравнению с задачей распределения частотного ( $B_{\text{част.}}$ ) и задачей распределения временного ( $B_{\text{врем.}}$ ) ресурсов, в зависимости от требуемой скорости передачи ПС.

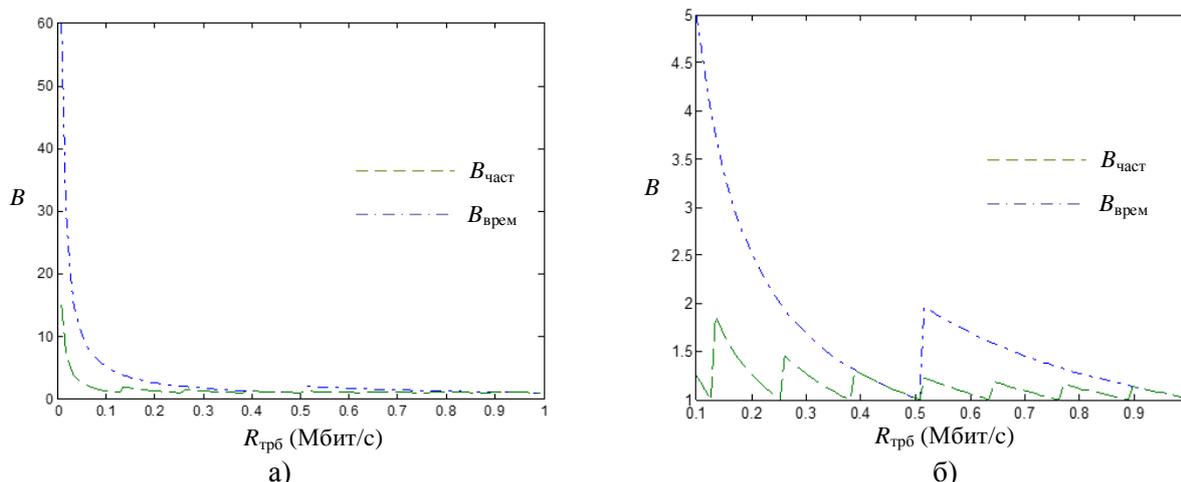


Рис. 11. Выигрыш задачи совместного распределения частотного и временного ресурса в эффективности использования пропускной способности нисходящего канала технологии WiMAX

Скачкообразный характер зависимостей на рис. 11 соответствует скачкообразному характеру зависимостей на рис. 10.

В результате анализа установлено, что наиболее эффективного решения задачи распределения слотов и формирования пакетов данных можно добиться путём её формулировки как задачи совместного распределения частотного и временного ресурсов.

## 6. Заключение

Установлено, что одной из основных задач в беспроводной сети WiMAX является задача обеспечения необходимого качества обслуживания, в состав которой входит необходимость выделения пользовательским станциям сети необходимой скорости передачи в нисходящем канале связи. Обеспечение необходимой скорости передачи в технологии WiMAX может быть достигнуто путём решения задачи распределения слотов между пакетами данных одно-

го кадра в нисходящем канале связи. В связи с этим проанализированы существующие подходы по распределению слотов между пакетами данных в нисходящем канале связи беспроводной сети технологии WiMAX. В результате проведенного анализа были определены недостатки известных решений, а также сформулированы требования к перспективным решениям задачи распределения слотов между пакетами данных.

На основании сформулированных требований, а также недостатков известных решений по распределению слотов между пакетами данных в нисходящем канале, предложена математическая модель, представленная рядом линейных и нелинейных условий-ограничений. Новизна модели состоит в формулировке задачи распределения слотов между пакетами данных как задачи балансировки доступной пропускной способности нисходящего канала технологии WiMAX для передачи полезной информации в направлении пользовательских станций, при учёте их территориальной удалённости (вида системы модуляции и кодирования). Рост производительности сети также обуславливался снижением количества служебной информации, передаваемой по нисходящему каналу связи, что достигалось путём выделения для каждой пользовательской станции лишь одного пакета данных.

Отмечено, что сформулированная задача по распределению слотов между пакетами данных нисходящего канала с точки зрения физики процессов, протекающих в беспроводной сети, относится к классу задач балансировки частотно-временных ресурсов – числа слотов в пакетах данных, а с математической точки зрения – это задача смешанного целочисленного нелинейного программирования (Mixed Integer NonLinear Programming, MINLP). В качестве примера было проведено решение сформулированной в работе оптимизационной задачи, для чего была использована система MatLab R2012b, в рамках которой была задействована программа `minlpAssign` пакета оптимизации TOMLAB. В результате анализа решений было установлено, что увеличение скорости передачи приводит к увеличению количества слотов, формирующих пакет данных. Кроме того, увеличение битовой загрузки символа и увеличение скорости кодирования, с одной стороны, приводит к уменьшению количества слотов, формирующих пакет данных, но, с другой стороны, приводит к сокращению дальности связи.

В результате анализа предложенной модели установлено, что использование условий (8) и (9), обеспечивающих формирование одного пакета данных для каждой ПС, позволяет минимизировать количество служебной информации, передаваемой в нисходящем канале связи (рис. 9). Однако разбиение одного DL-пакета на несколько пакетов меньших размеров для каждой ПС может способствовать более плотному их размещению в нисходящем канале.

Также проведенный анализ показал, что задача совместного распределения частотного и временного ресурсов имеет более высокую эффективность использования пропускной способности нисходящего канала технологии WiMAX, по сравнению с задачей распределения частотного и задачей распределения временного ресурсов (рис. 10 и рис. 11).

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

## Литература

1. *Andrews J.G., Ghosh A., Muhamed R.* Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, 2007. 449 p.
2. *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.

3. *Shabani A.H., Beg M.T., Khade A.A.-H.* Survey of Down Link Data Allocation Algorithms in IEEE 802.16 WiMAX // International Journal of Distributed and Parallel Systems. 2012. V. 55, № 6. P. 197-207.
4. *Генко И.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко А.В.* Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. К.: «ЕКМО», 2009. 672 с.
5. *Niyato D., Hossain E.* Adaptive fair subcarrier/rate allocation in multirate OFDMA networks: Radio link level queuing performance analysis // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2006. V. 55, № 6. P. 1897-1907.
6. *Letaief K., Zhang Y.* Dynamic multiuser resource allocation and adaptation for wireless systems // IEEE Wireless Communications Magazine. 2006. V. 13, № 4. P. 38–47.
7. *Ergen M., Coleri S., Varaiya P.* QoS aware adaptive resource allocation techniques for fair scheduling in OFDMA based broadband wireless access systems // IEEE Transactions on Broadcasting. 2003. V. 49, № 4. P. 362–370.
8. *Jang J., Lee K.* Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2003. V. 21, № 2. P. 171–178.
9. *Rhee W., Cioffi J.* Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation // Proceeding of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2000). 2000. V. 2. P. 1085-1089.
10. *Cai J., Shen X., Mark J.* Downlink resource management for packet transmission in OFDM wireless communication systems // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2005. V. 4, № 4. P. 1688-1703.
11. *Seong K., Yu D., Kim Y., Cioffi J.* Optimal resource allocation via geometric programming for OFDM broadcast and multiple access channels // Proceeding of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '06). 2006. P. 1-5.
12. *Mehrjoo M., Awad M.K., Shen X.S.* Resource Allocation in OFDM-Based WiMAX // CRC Press, Wireless Networks and Mobile Communications: WiMAX network planning and optimization. 2009. P. 113-131.
13. *Zhang Y., Letaief K.* Multiuser adaptive subcarrier-and-bit allocation with adaptive cell selection for OFDM systems // IEEE Transaction on Wireless Communications. 2004. V. 3, № 5. P. 1566-1575.
14. *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.
15. *Ohseki T., Morita M., Inoue T.* Burst construction and packet mapping scheme for OFDMA downlinks in IEEE 802.16 systems // IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM). 2007. P. 4307-4311.
16. *Lodi A., Martello S., Monaci M.* Two-dimensional packing problems: A survey // European Journal Operational Research. 2002. V. 141. P. 242-252.
17. *Ben-Shimol Y., Kitroser I., Dinitz Y.* Two-dimensional mapping for wireless OFDMA systems // IEEE Transactions on Broadcasting. 2006. V. 52, № 3. P. 388-396.
18. *Jin X., Zhou J., Hu J., Shi J., Sun Y., Dutkiewicz E.* An Efficient Downlink Data Mapping Algorithm for IEEE802.16e OFDMA Systems // IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM). 2008. P. 5233-5237.
19. *Sheu S.T., Tsai M.H., Tsai T.-Y., Tsai Y.-H.* Condensed Downlink MAP Structures for IEEE 802.16e Wireless Metropolitan Area Networks (MANs) // Vehicular Technology Conference. 2010. P. 237-244.
20. *Kim J.Y., Cho D.-H.* Piggybacking Scheme of MAP IE for Minimizing MAC Overhead in the IEEE 802.16e OFDMA Systems // Vehicular Technology Conference. 2007. P. 284-288.
21. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems, IEEE Std 802.16-2009, 2009. 2094 p.
22. Fundamentals of WiMAX: A Technology Primer. Telesystem Innovations Inc, 2010. 35 p.

23. *So-In C., Jain R., Tamimi A.-K.* Capacity Evaluation for IEEE 802.16e Mobile WiMAX // Journal of Computer Systems, Networks, and Communications. 2010. P. 1-12.
24. *Ермолаев В.Т. Флакман А.Г.* Теоретические основы обработки сигналов в системах мобильной радиосвязи. Нижний Новгород: НГУ им. И.Н. Лобачевского, 2010. 107 с.

*Статья поступила в редакцию 01.02.2013;  
переработанный вариант — 23.04.2013*

### **Гаркуша Сергей Владимирович**

к.т.н., доц., докторант кафедры телекоммуникационных систем Харьковского национального университета радиоэлектроники (61166, Харьков, просп. Ленина, 14), тел. (+38050) 913-72-87, e-mail: sv.garkusha@mail.ru.

### **Slot allocation model and data burst scheduling in downlink WiMAX technology**

#### **S. Garkusha**

The article proposes a mathematical model of slots distribution and data packets scheduling in the communication downlink channel IEEE 802.16. Suggested model aims at the formation of one packet of data downlink channel for each user's station, enabling to minimize the number of office messages transmitted over used frequency communication channel. Dependence of the number of slots forming a single data packet on the speed of user's station transmission and the type of modulator circuit and coding is considered.

*Keywords:* WiMAX, distribution slot, scheduling of data packages, mathematical model, modulation and coding system.