

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.391

О.В. Лемешко, С.В. Гаркуша

Харківський національний університет радіоелектроніки

## МОДЕЛЬ ПРЕВЕНТИВНОГО ОБМЕЖЕННЯ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ НИЗХІДНОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ ТЕХНОЛОГІЇ WIMAX В УМОВАХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ

© Лемешко О.В., Гаркуша С.В., 2013

O.V. Lemeshko, S.V. Garkusha

Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Lenina av., 14

## MODEL OF DOWNLINK PREVENTIVE TRANSFER RESTRICTIONS FOR WIMAX TECHNOLOGY IN THE OVERLOAD STATE

© Lemeshko O.V., Garkusha S.V., 2013

Paper depicts that one of the main challenges in wireless networks WiMAX is the task of ensuring the required service quality, which involves the separation of user stations network of guaranteed rate in the downlink. Providing guaranteed transmission rate in the WiMAX technology can be achieved by solving bandwidth allocation downlink. Therefore, existing approaches to analyze the distribution of bandwidth downlink wireless WiMAX technology whereby determined that they use the principle of Best Effort. The quality of service is not guaranteed, and between user stations distributed all of the available bandwidth. The result is a mathematical model, the novelty of which is the possibility of pre-emptive rate limiting, a dedicated service flows user stations in the downlink WiMAX technology by using a linear-quadratic objective function that organizes the fair management of requests based on the relative priorities. In the course of solving the problem of scheduling data packets for transmission service flows of all user stations in the downlink of the proposed model it is necessary to perform a number of important constraint equations: the condition securing a sub-channel for the transmission of one slot for no more than one user station, the condition of adopting a one user station the number of slots, providing the required transmission rate used by the system modulation and coding, the condition of formation of a single packet of data for each user station, the condition of the formation of the packages "rectangular", terms and conditions for the required number of slots for the transmission of official information. The model proposed is directed to the allocation of each user station guaranteed bit rate in the absence of overload downlink as well as the preventive rate limiting allocated for user station overload conditions. Furthermore the proposed mathematical model addresses the problem of distribution slots between data packets as problems balancing the available bandwidth of WiMAX downlink channel for transmitting payload towards subscriber stations, taking account of the form of modulation and coding. As a result, decision analysis found that the service requests from the service flows user stations is realized on the basis of so-called absolute priority. Thus, in the case where the programming service flow requests from subscriber stations exceed bandwidth downlink preventive restriction mostly experienced service request from a low priority flow. Request transmission rate of the service stream with a

higher priority on preventive ogrnaichenie rate experienced in a lesser degree. When using a linear objective function restriction preventive tests first service request from a low priority flow until the complete denial of access. When using a linear-quadratic objective function in the case of overload failures relate to maintain all service flows with high priority to a lesser extent, and in higher concentrations - low priority.

**Key words:** WiMAX, capacity allocation, mathematical model, denial of service, the transmission rate.

Запропоновано математичну модель розподілу пропускної здатності низхідного каналу зв'язку технології WiMAX. Новизна запропонованої моделі полягає в можливості превентивного обмеження швидкості передачі, виділеної сервісним потокам користувачьких станцій в низхідному каналі зв'язку технології WiMAX шляхом використання лінійно-квадратичної цільової функції, організуючою справедливе управління запитами на основі відносних пріоритетів. Запропонована модель спрямована на виділення кожній користувачькій станції гарантованої швидкості передачі в умовах відсутності перевантаження низхідного каналу зв'язку, а також на превентивне обмеження швидкості передачі, виділеної для користувачької станції в умовах перевантаження. Проаналізовано вплив пріоритетів запитів швидкості передачі, що використовуються в моделі, на характер можливих відмов.

**Ключові слова:** WiMAX, розподіл пропускної здатності, математична модель, відмови в обслуговуванні, швидкість передачі.

### Вступ

У технології WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), організованої за стандартом IEEE 802.16, одним з ефективних шляхів підвищення продуктивності і поліпшення основних показників якості обслуговування (Quality of Service, QoS) є використання принципів структурної та функціональної самоорганізації. Використання рішень з самоорганізації дозволяє ефективно реагувати на зміну стану та умов функціонування безпроводової мережі, які можуть бути продиктовані, наприклад, виходом з ладу або перевантаженням елементів мережі, коливаннями трафіку, що надходить в мережу, динамікою зміни сигнально-завадової обстановки тощо. Чисельні значення окремих показників QoS, одним з яких є гарантована швидкість передачі даних, багато в чому визначають ефективність виконання завдання управління трафіком [1, 2].

У результаті проведеного аналізу встановлено, що технологія WiMAX має можливість надання мультисервісного доступу (VoIP телефонія, IPTV, керування машинами та агрегатами, забезпечення роботи корпоративних програмних систем, мультимедійні послуги тощо). При цьому для виконання завдань диференціації сервісів, пріоретизації трафіку і підтримки QoS в технології WiMAX використовується механізм, званий підрівнем конвергенції (Convergent Sublayer, CS), що являє собою програмний інтерфейс канального рівня до мережного рівня безпроводової мережі. Основним завданням, розв'язуванім CS, є фільтрація в загальному мережному трафіку так званих сервісних потоків (Service Flow, SF) шляхом надання кожному SF на підрівні MAC канального рівня мережі необхідного QoS.

В умовах гетерогенності і мультипротокольності сучасних технологій безпроводового зв'язку (ТБС), а особливо у разі перевантаження та обмеженості частотних і часових ресурсів, на перше місце виходить проблема підвищення рівня узгодженості розв'язків задач розподілу пропускної здатності низхідного каналу зв'язку між користувачькими станціями (Subscriber Station, SS) та обмеження інтенсивності трафіку, що надходить у мережу. Враховуючи мультисервісний характер сучасних ТБС, відмови в обслуговуванні повинні стосуватися передусім низькопріоритетного трафіку.

У результаті аналізу було встановлено, що відомі методи розподілу пропускної здатності низхідного каналу зв'язку в технології WiMAX використовують принцип Best Effort. При цьому якість надаваних послуг не є гарантованою, а між SS розподіляється вся доступна пропускна

здатність [2]. Однак у технології WiMAX крім Best Effort підтримується декілька класів обслуговування (Class of Service, CoS), серед яких Not Real Time, Real Time, Extended Real Time, Unsolicited Grant Service, орієнтованих на виділення гарантованої пропускної здатності [2, 3].

У роботі [4, 5] наведена модель планування пакетів даних, яка спрямована на розв'язання задачі розподілу пропускної здатності низхідного каналу зв'язку технології WiMAX. Основною особливістю цієї моделі є те, що для кожної SS виділено гарантовану швидкість передачі даних в умовах відсутності перевантаження. При цьому основним недоліком моделі є відсутність можливості врахування пріоритетів користувачьких станцій, а також пріоритетів сервісних потоків. Тому метою роботи є удосконалення раніше запропонованої моделі [4, 5] шляхом використання в ній лінійно-квадратичної цільової функції, що дає змогу облікувати пріоритети і має можливість обмежувати запити на швидкість передачі в умовах перевантаження.

Отже, актуальною науковою і практичною задачею є розробка та дослідження математичних моделей і методів розподілу пропускної здатності низхідного каналу технології WiMAX, що гарантують виділення користувачьким станціям і їх сервісним потокам необхідної пропускної здатності, які могли б бути покладені в основу перспективних технологічних рішень.

### Модель пріоритетного формування пакетів у низхідному каналі технології WiMAX

Під час розв'язання задачі планування пакетів даних для передачі сервісних потоків всіх користувальницьких станцій у низхідному каналі зв'язку в межах запропонованої моделі необхідно забезпечити розрахунок булевої керуючої змінної ( $x_{k,m}^n$ ), яка визначає порядок розподілу слотів:

$$x_{k,m}^n = \begin{cases} 1, & \text{якщо } m\text{-й слот на } k\text{-му підканалі виділений } n\text{-й SS;} \\ 0, & \text{в протилежному випадку.} \end{cases} \quad (1)$$

Також вводиться величина  $a^n$ , що модулює частку відмов у виділенні необхідної пропускної здатності [6]. Вектор шуканих параметрів з урахуванням (1) зручно подати у формі

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x_{k,m}^n \\ \dots \\ a^n \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Координатами вектора  $\mathbf{r}$  є множина змінних  $x_{k,m}^n$ , де  $n = \overline{1, N}$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $k = \overline{1, K}$ , і ряду параметрів  $a^n$ , де  $n = \overline{1, N}$ . При цьому множина змінних  $x_{k,m}^n$  визначатиметься виразом  $N \times M \times K$ , де  $N$  – загальна кількість сервісних потоків, що передаються усіма SS,  $M$  – кількість слотів на одному підканалі низхідного каналу для передавання корисної інформації,  $K$  – кількість підканалів в частотному каналі.

Відповідно до результатів розрахунку змінних (2) виконується закріплення підканалів та розподіл слотів за сервісними потоками користувачьких станцій, на яких будуть передаватися дані у низхідному каналі. При розрахунку вектора шуканих параметрів  $\mathbf{r}$  необхідно виконати такі важливі умови-обмеження:

1) умова закріплення  $k$ -го підканалу протягом передачі  $m$ -го слота не більше ніж за одним сервісним потоком

$$\sum_{n=1}^N x_{k,m}^n \leq 1 \quad (k = \overline{1, K}; m = \overline{1, M}); \quad (3)$$

2) умова закріплення за  $n$ -м сервісним потоком кількості слотів, що забезпечує необхідну пропускну здатність за схеми модуляції і кодування (Modulation and Coding Scheme, MCS), використовуваної відповідною SS

$$R_S^n \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K x_{k,m}^n \geq R_{\text{необ}}^n (1 - a^n) \quad (n = \overline{1, N}), \quad (4)$$

де  $R_S^n = \frac{SR_C^n k_b^n K_s (1 - BLER)}{(T_b + T_g)L + T_{RTG} + T_{TRG}}$  – пропускна здатність одного слоту, закріпленого за  $n$ -м

сервісним потоком, яка залежить від MCS, використовуваної відповідною SS, і являє собою кількість переданих біт за час, що дорівнює тривалості слота [7];  $R_C^n$  – швидкість коду, використовуваного під час кодування сигналу  $n$ -го мережного потоку відповідної SS;  $k_b^n$  – бітове завантаження символу  $n$ -го сервісного потоку відповідної SS;  $K_s$  – кількість піднесучих для передачі даних в одному підканалі;  $T_{RTG} = 105,7$  мкс – тривалість інтервалу перемикавання з приймання на передавання (receive/transmit transition gap, RTG);  $T_{TRG} = 60$  мкс – тривалість інтервалу перемикавання з передавання на приймання (transmit/receive transition gap, TRG) [8];

3) умови формування одного пакета для  $n$ -го сервісного потоку відповідної SS, що дозволяє мінімізувати кількість слотів, виділених для передавання службової інформації

$$x_{k,i}^n x_{k,z}^n (i - z + 1) - \sum_{u=z}^i x_{k,u}^n \leq 0, \text{ при } (z = \overline{1, M - 1}; i = \overline{2, M}; n = \overline{1, N}; k = \overline{1, K}; i > z); \quad (5)$$

$$x_{j,m}^n x_{r,m}^n (j - r + 1) - \sum_{s=r}^j x_{s,m}^n \leq 0, \text{ при } (r = \overline{1, K - 1}; j = \overline{2, K}; n = \overline{1, N}; m = \overline{1, M}; j > r); \quad (6)$$

4) умова формування пакетів “прямокутної форми”, відповідно до технологічних особливостей сімейства стандартів IEEE 802.16, що використовують OFDMA

$$x_{k,m}^n \sum_{d=1}^M x_{k,d}^n \sum_{b=1}^K x_{b,m}^n = x_{k,m}^n \sum_{g=1}^K \sum_{h=1}^M x_{g,h}^n, \text{ при } (n = \overline{1, N}; k = \overline{1, K}; m = \overline{1, M}); \quad (7)$$

5) умови резервування необхідної кількості слотів для передавання службової інформації

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{k,m}^n = 0, \text{ при } (m = \overline{1, m_{\text{служ}} - 1}, \lceil Q/K \rceil \geq 1); \quad (8)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{k, m_{\text{служ}}}^n = 0, \text{ при } (k = \overline{1, k_{\text{служ}}}, \lceil Q/K \rceil \geq 1); \quad (9)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{k,1}^n = 0, \text{ при } (k = \overline{1, k_{\text{служ}}}, \lceil Q/K \rceil < 1), \quad (10)$$

де  $m_{\text{служ}} = \lceil Q/K \rceil$  – кількість слотів, виділених для передавання службової інформації, що займають всю ширину частотного каналу (розташовуються спочатку кадру після преамбули);  $k_{\text{служ}} = Q - K(m_{\text{служ}} - 1)$  – кількість слотів, виділених для передавання службової інформації, які займають лише частину ширини частотного каналу.

За виконання умов (8)–(10) резервують слоти для передавання службової інформації. Крім того, умови (8) і (9) використовуються у разі, якщо кількість слотів, необхідна для передавання службової інформації, перевищує або дорівнює кількості підканалів у частотному каналі  $\lceil Q/K \rceil \geq 1$ . Також умова (8) дозволяє резервувати всі підканали протягом передавання кількості слотів, що дорівнює  $m_{\text{служ}}$ , для передавання службової інформації. Умови (9) і (10) резервують лише частину підканалів  $k_{\text{служ}}$  протягом тривалості одного слоту.

Відповідно з фізикою задачі (1)–(10), що розв’язується, на координати  $\mathbf{a}^n$  вектора  $\mathbf{X}$  накладаються такі обмеження [6]:

$$0 \leq \mathbf{a}^n \leq 1 \quad (11) \quad \text{або} \quad \mathbf{a}^n \in \{0, 1\}, \quad (12)$$

якщо на основі угоди про рівень послуг, що надаються (Service Level Agreement, SLA), допускається (11) або не допускається (12) часткове обмеження необхідної швидкості передавання.

Розрахунок шуканих змінних (2) відповідно до умов-обмежень (3)–(12) доцільно здійснювати в ході розв'язання оптимізаційної задачі, забезпечуючи мінімум лінійно-квадратичної цільової функції [6]:

$$\min_X \left[ \frac{1}{2} \mathbf{X}^t H \mathbf{X} + C^t \mathbf{X} \right], \quad (13)$$

що характеризує відносні вартості розподілу пропускних здатностей на етапі планування пакетів даних, а координати вектора  $\mathbf{C}$  і матриці  $H$  можна подати так:

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} c_{k,m}^n \\ \dots \\ c^n \end{bmatrix} \quad (k = \overline{1, K}; m = \overline{1, M}; n = \overline{1, N}), \quad (14)$$

$$H = \left\| \begin{array}{cccccc} m c_{11}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m c_{12}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m c_{k,m}^n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m c^n \end{array} \right\|. \quad (15)$$

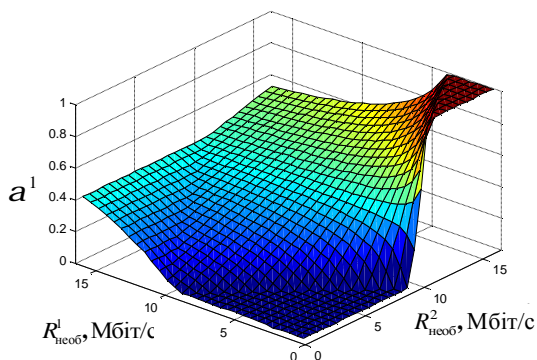
Координати вектора  $\mathbf{C}$  визначають величину питомого штрафу за використання слотів низхідного каналу зв'язку ( $c_{k,m}^n$ ) і за обмеження в обслуговуванні трафіків користувачів ( $c^n$ ), за умови, що  $c_{k,m}^n \ll c^n$ ;  $m$  – коефіцієнт, що визначає у скільки разів координати діагональної матриці  $H$  більші (менші) від координат вектора  $\mathbf{C}$ .

#### Аналіз впливу пріоритетів сервісних потоків на характер відмов

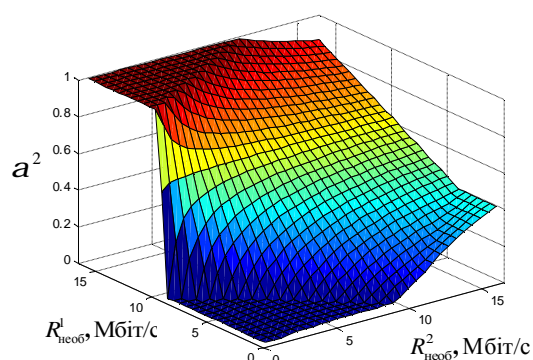
Проаналізовано процес планування пакетів даних низхідного каналу при спільному обслуговуванні двох сервісних потоків, що скеровуються однією користувальницькою станцією, з різними пріоритетами, які задаються шляхом зміни значення відношення  $\Delta C = c_{k,m}^n / c^n$ . У ході дослідження встановлено, що характер можливих відмов під час використання запропонованої моделі (1)–(11), (13)–(15) залежить, по-перше, від кількості користувацьких станцій і використовуваної цими станціями MCS. По-друге, від відношення вартостей за завантаженість низхідного каналу зв'язку ( $c_{k,m}^n$ ) до вартості за обмеження в обслуговуванні трафіків користувачів ( $c^n$ ).

Під час розв'язання задачі планування пакетів даних у низхідному каналі вихідними даними були використані такі: кількість сервісних потоків –  $N = 2$ ; використовуваний підрежим OFDMA – DL FUSC; кількість підканалів в одному каналі –  $K = 32$  (визначається підрежимом OFDMA); кількість піднесучих для передачі даних на один підканал –  $K_s = 48$  (визначається підрежимом OFDMA); частотний рознос між поднесучими –  $\Delta f \approx 11,16$  КГц; вид MCS сигналу SS – 16 QAM 1/2; необхідна швидкість передачі ( $R_{\text{необ}}$ ) для обслуговування кожної SS змінювалася в межах 0–16 Мбіт/с; ймовірність блокової помилки –  $BLER = 0$ ; тривалість кадру – 5 мс; тривалість захисного інтервалу щодо довжини корисної частини символу –  $T_g = T_b / 8 = 11,2$  мс; кількість символів у кадрі –  $L = 49$ ; кількість символів, що формують один слот –  $S = 2$  (визначається підрежимом OFDMA); відношення тривалості низхідного каналу до тривалості висхідного каналу – 3:1 ( $U = 3/4$ ).

Так на рисунку наведені залежності частки відмов у виділенні необхідної пропускної здатності високопріоритетного ( $a^1$ ) і низькопріоритетного ( $a^2$ ) сервісних потоків, відповідно, від їх запитів на необхідну швидкість передачі при використанні моделі (1)–(11), (13)–(15).



а) відмови високопріоритетного запиту



б) відмови низькопріоритетного запиту

*Залежність частки відмов у виділенні необхідної пропускної здатності високопріоритетного ( $a^1$ ) і низькопріоритетного ( $a^2$ ) сервісних потоків від їх запитів на необхідну швидкість передачі ( $R^1_{необ}$ ,  $R^2_{необ}$ )*

Під час використання лінійно-квадратичної цільової функції в моделі (1)–(11), (13)–(15) організовується справедливе управління на основі відносних пріоритетів, тобто у разі можливого перевантаження відмови в обслуговуванні стосуються всіх сервісних потоків, при цьому меншою мірою високопріоритетного (рис. 1, а), більшою – низькопріоритетного (рис. 1, б). При цьому в межах моделі закладена можливість налаштування як ступеня превентивності обмеження трафіку, що надходить в мережу, шляхом зміни відношення вагових коефіцієнтів, так і ступеня процентного співвідношення величини можливих відмов в обслуговуванні високопріоритетного трафіку щодо низькопріоритетного шляхом зміни значення множника  $m$  діагональної матриці  $H$ .

### Висновки

Встановлено, що однією з основних задач в безпроводовій мережі WiMAX є задача забезпечення необхідної якості обслуговування, яка полягає у виділенні для користувацьких станцій мережі гарантованої швидкості передачі в низхідному каналі зв'язку. Забезпечення гарантованої швидкості передачі в технології WiMAX може бути досягнуто шляхом розв'язання задачі розподілу пропускної здатності низхідного каналу зв'язку. У зв'язку з цим проаналізовано наявні підходи щодо розподілу пропускної здатності низхідного каналу зв'язку безпроводової мережі технології WiMAX, внаслідок чого встановлено, що всі вони використовують принцип Best Effort.

У результаті була запропонована математична модель, новизна якої полягає в можливості превентивного обмеження швидкості передачі, виділеної сервісним потокам користувацьких станцій у низхідному каналі зв'язку технології WiMAX шляхом використання лінійно-квадратичної цільової функції, що організовує справедливе управління запитами на основі відносних пріоритетів. Крім того, запропонована математична модель спрямована на розв'язання задачі розподілу слотів між пакетами даних як задачі балансування доступної пропускної здатності низхідного каналу зв'язку технології WiMAX для передавання корисної інформації в напрямку користувацьких станцій, під час обліку виду системи модуляції та кодування.

У результаті аналізу розв'язків встановлено, що обслуговування запитів від сервісних потоків користувацьких станцій реалізується на основі так званих абсолютних пріоритетів. Так, коли сума запитів від сервісних потоків користувацьких станцій перевищувала пропускну здатність низхідного каналу зв'язку, превентивне обмеження в більшому обсязі відчував запит від низькопріоритетного сервісного потоку. Запит на швидкість передавання від сервісного потоку з вищим пріоритетом превентивне обмеження на швидкість передавання відчував меншою мірою.

При цьому величина можливих відмов в обслуговуванні високопріоритетного трафіку щодо низькопріоритетного задається зміною відношення вагових коефіцієнтів, а також ступеня процентного співвідношення величини можливих відмов в обслуговуванні, а саме значення множника  $\mathbf{m}$  діагональної матриці  $\mathbf{H}$ .

1. Вегешина Ш. *Качество обслуживания в сетях IP. Пер. с англ.* – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 512 с. 2. Васильев В. Г. *Технология фиксированного широкополосного беспроводного доступа WiMAX стандарта IEEE 802.16-2004.* – К: UNIDATA, 2009. – 112 с. 3. Крупский А. С., Бойченко И. В. *Алгоритм планирования QoS с учетом фрагментации пакетов // Доклады ТУСУРа. № 1 (25), Ч. 2, 2012.* – С. 203–207. 4. Garkusha S., Ahmed H. *Abed Slot Allocation Model and Data Burst Scheduling in Downlink WiMAX Technology // Proc. of “12th International Conference the Experience of Designing and Application of Cad Systems in Microelectronics” CADSM’2013. Polyana, 2013.* – P. 97–100. 5. Гаркуша С.В. *Модель планирования пакетов данных в технологии WiMAX // Труды Северо-Кавказского филиала Московс. техн. ун-та связи и информатики.* – Ростов-на-Дону: ПЦ “Университет” СКФ МТУСИ, 2013. – С. 74–77. 6. Лемешко А.В. *Результаты исследования модели управления трафиком с учётом задаваемых приоритетов для многопродуктового и многополюсного случаев // Проблемы телекоммуникаций. № 2 (2), 2010.* – С. 33–41. 7. 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. 8. Ермолаев В.Т. Флакман А.Г. *Теоретические основы обработки сигналов в системах мобильной радиосвязи.* – Н. Новгород: НГУ им. И.Н. Лобачевского, 2010. – 107 с.