

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ МОДЕЛІ РОЗПОДІЛУ ПІДКАНАЛІВ В НИЗХІДНОМУ КАНАЛІ ЗВ'ЯЗКУ ТЕХНОЛОГІЇ WiMAX

© Гаркуша С.В., 2016

Garkusha S.V.

Poltava University Economics and Trade, Poltava, Kovalya str., 3

RESULT OF THE DEVELOPMENT MODEL OF ALLOCATION SUBCHANNELS IN A DOWNLINK WiMAX

© Garkusha S.V., 2016

Found that one of the major problems in wireless network that operates using technology WiMAX, is the task of ensuring the required quality of service, which includes the need for a network user stations required transmission rate in the downlink. It is also found that one effective way of providing the required transmission rate in the WiMAX technology can be achieved by solving the problem of subchannel allocation in the downlink. In this connection, the existing mechanisms are analyzed subchannel allocation between user stations in a downlink wireless network that operates using the technology of WiMAX.

Based on the identified drawbacks of the known mechanisms of allocation of frequency resources in the downlink, a mathematical model presented near linear and nonlinear constraint equations. The novelty of the model lies in the formulation of the problem as a subchannel allocation problem of redistribution of the available bandwidth of WiMAX downlink channel for transmitting information in the direction of user stations, taking into account their territorial remoteness (type of modulation and coding).

Noted that the problem formulated distribution subchannels downstream channel from the point of view of the physics processes occurring in the wireless network, belongs to a class of problems balancing frequency resources - the number of subchannels allocated to user stations, and from a mathematical point of view - it is a nonlinear programming problem. Comparative analysis showed that the best performance on the downlink performance provides a method of Max C / I Ratio, as well as the proposed model. From the perspective of a balanced allocation of bandwidth downlink best results were in methods Round Robin and Proportional Fair, provided the requirements for low transmission rate of user stations. Given the high rate requirements the most balanced distribution of bandwidth downlink provides a model proposed in the article.

Also, the analysis showed that the methods of Max C / I Ratio, Round Robin and Proportional Fair are only effective in conditions of low transmission rate requirements . Given the high rate requirements of user stations proved effective the proposed model, providing each user station transmission speed guaranteed with access to additional (non -guaranteed) bandwidth that corresponds to classes of service CoS subclass B, whereas other methods do not guarantee to the desired rate that corresponds to classes of service CoS subclass A.

Keywords - WiMAX, wireless network, the allocations of subchannels, self-organization, the mathematical model.

Наведено результати розробки математичної моделі розподілу підканалів низхідного каналу зв'язку технології WiMAX. Запропонована модель спрямована на забезпечення гарантованої якості обслуговування користувачів безпроводової мережі шляхом виділення користувачьким станціям необхідної швидкості передачі в низхідному каналі зв'язку. Проведено порівняльний аналіз запропонованої моделі з існуючими методами розподілу радіоресурсу технології WiMAX з точки зору забезпечення загальної продуктивності низхідного

каналу зв'язку, ступеня сбалансованості швидкості передачі, а також ймовірності виділення для користувачьких станцій необхідної швидкості передачі.

Ключові слова - WiMAX, безпроводова мережа, математична модель, розподіл підканалів, самоорганізація.

Вступ

Одним з ефективних шляхів підвищення продуктивності і поліпшення основних показників якості обслуговування (Quality of Service, QoS) для систем, що використовують технологію WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), заснованої на стандарті IEEE 802.16 [1, 2], 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 і т.д. [3, 4]

Високий рівень самоорганізації може бути досягнутий шляхом удосконалення мережних протоколів і механізмів, що відповідають за розподіл доступних мережних ресурсів. Необхідно зауважити, що стандарт IEEE 802.16 не визначає механізми планування та розподілу ресурсів мережі, залишаючи право вибору за операторами зв'язку та виробниками (вендорами) обладнання. До подібного роду ресурсів, перш за все, відносяться мережний трафік (інформаційний ресурс), пропускні здатності каналів зв'язку (каналний ресурс), черги (буферний ресурс), а також частотні піднесущі (частотний ресурс), що особливо важливо для безпроводових мереж [3, 4].

Частотна піднесуща є первинною структурною одиницею OFDM, логічне об'єднання яких формує елемент частотного ресурсу, так звані підканали. Група підканалів в свою чергу формує частотний канал [5].

Більшість відомих рішень з розподілу частотного ресурсу направлена на вирішення завдання розподілу поднесущих. При цьому кількість піднесущих, що формують один частотний канал може бути різною і визначається шириною частотного каналу. Вибір тієї чи іншої ширини частотного каналу дозволяє визначити кількість підканалів, що формуються рівними наборами поднесущих. У результаті цього завдання розподілу частотного ресурсу, з урахуванням фіксованого закріплення поднесущих за підканалами, повинно зводитися до задачі розподілу підканалів між користувачькими станціями (КС) мережі.

У зв'язку з цим у статті пропонується математична модель розподілу підканалів в мережах із застосуванням масштабованого варіанту OFDMA. Врахування характеристик масштабованого варіанту OFDMA, в порівнянні з відомими рішеннями, дозволить проводити вибір необхідної ширини частотного каналу. Також це зробить можливим використання даної моделі в стандарті IEEE 802.16e. У свою чергу в запропонованій моделі завдання структурної самоорганізації розглядається як задача розподілу підканалів, що дозволило провести урахування технологічних особливостей безпроводової мережі, в порівнянні з відомими рішеннями, в яких вирішується завдання розподілу поднесущих.

Аналіз відомих рішень

У роботі були проаналізовані методи розподілу доступних ресурсів, що використовують алгоритм Round Robin Scheduler [6]. Використання алгоритму Round Robin Scheduler передбачає виділення в рівній мірі доступного ресурсу для кожної КС. У базовій реалізації, Round Robin Scheduler виділяє кожній КС часовий інтервал, в рамках якого ця КС отримує монопольний доступ до каналу. При цьому швидкість передачі даних КС обмежується фактичним значенням відношення сигнал/шум (signal to noise Ratio, SNR). Також були проаналізовані методи [7], що використовують алгоритм Max C/I Ratio, який надає доступний ресурс користувачьким станціям з найкращими значеннями SNR, не забезпечуючи справедливості розподілу цього ресурсу між КС. Крім того в роботі проаналізовано методи розподілу доступних ресурсів, що використовують алгоритм пропорційного справедливого розподілу обслуговування (Proportional Fair Scheduling) [8]. Проведений аналіз показав, що алгоритм Proportional Fair Scheduling сприяє КС, яка має високе значення SNR, одночасно забезпечуючи достатню кількість доступних ресурсів КС з гіршим значенням SNR.

Аналіз показав, що найбільш прийнятним механізмом для надання доступу до радіоресурсу технології WiMAX був би механізм, що включає в себе особливості Round Robin і Max C/I Ratio алгоритмів. Вибір алгоритму залежить від категорії і величини навантаження. Правильний вибір алгоритму для надання доступу особливо важливий при великому навантаженні.

Також в результаті аналізу встановлено, що використання алгоритму Proportional Fair Scheduling спрямоване на застосування для інтерактивного «best effort» класу даних для уникнення ситуації, при якій деякі КС ніколи не отримують доступ до радіоресурсу. Використання зазначеного класу обслуговування (Class of Service, CoS) забезпечує доставку даних користувачьких станцій по мірі можливостей без гарантій швидкості передачі даних. Підвищення якості обслуговування при плануванні радіоресурсу кожної КС має бути спрямоване на забезпечення гарантованої швидкості передачі з можливістю доступу до додаткової (не гарантованої) смуги пропускання. Проте жоден з проаналізованих механізмів не здатний забезпечити подібного CoS.

У результаті проведеного аналізу прийнято рішення про необхідність розробки математичної моделі планування частотного ресурсу в низхідному каналі зв'язку технології WiMAX, сформульованої як задача розподілу підканалів, для забезпечення гарантованої швидкості передачі користувачьким станціям.

Модель розподілу підканалів в безпроводовій мережі стандарту IEEE 802.16

У стандартах IEEE 802.16a і IEEE 802.16d використовується схема OFDMA з фіксованим «вікном» швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) розміром 2048 піднесущих, використовує робочу смугу каналу 20 МГц. У стандарті IEEE 802.16e застосовується масштабований варіант OFDMA, реалізований за рахунок зміни «вікна» ШПФ, що дозволяє варіювати робочою смугою каналу в межах від 1,25 МГц до 20 МГц [5]. Однак необхідно зауважити, що вибір ширини частотного каналу проводиться оператором зв'язку при проектуванні безпроводової мережі і не може бути змінений в процесі її функціонування. Тому далі в статті буде розглянуто масштабований варіант OFDMA, що використовується в стандарті IEEE 802.16e, з метою розробки рішення шляхом попереднього вибору ширини частотного каналу.

З урахуванням вищесказаного, у запропонованій моделі передбачаються відомими такі вихідні дані:

1) N – загальна кількість КС в мережі;

2) L – число підканалів, що використовується в залежності від обраної ширини частотного каналу. Для режиму повного використання піднесущих (Full Usage of Subcarriers, DL FUSC) кількість підканалів може приймати значення 2, 8, 16, 32, а для режиму «порціального» використання піднесущих (Partial Usage of Subcarriers, DL PUSC) – 3, 15, 30, 60;

3) $R_{необ}^n$ – необхідна швидкість передачі даних для обслуговування n -ї КС (Мбіт/с).

4) R^n – пропускна здатність одного підканалу, виділеного n -й КС.

У технології WiMAX тривалість кадру може змінюватися і приймати значення рівні 2; 2,5; 4; 5; 8; 10; 12,5; 20 мс. Виходячи з того, що корисна частина символу має фіксовану тривалість $T_b = 89,6$ мс, то кількість символів у кадрі буде приймати значення 19, 24, 39, 49, 79, 99, 124, 198, відповідно до вказаних тривалостей кадру. Крім того між символами існує захисний інтервал, який може приймати чотири значення щодо тривалості корисної частини символу: $T_g = T_b / 4 = 22,4$ 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.

Пропускна здатність підканалу n -ї користувачької станції (R^n) являє собою кількість переданих біт за одиницю часу (секунду) і може бути розрахована за формулою [9, 10]:

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

де R_c^n – швидкість коду, використовуваного при кодуванні сигналу n -ї КС (наприклад, для модуляції 16-QAM 1/2 параметр $R_c^n = 1/2$ [5]); k_b^n – бітове завантаження символу n -ї КС (наприклад, для модуляції 16-QAM параметр $k_b^n = 4$) [5]; K_s – число піднесущих для передачі даних на одному підканалі (для підрежиму DL FUSC $K_s = 48$, а для DL PUSC $K_s = 24$); $T_{RTG} = 105,7$ мкс –

тривалість інтервалу перемикавання з прийому на передачу (receive/transmit transition gap, RTG); $T_{TRG} = 60$ мкс – тривалість інтервалу перемикавання з передачі на прийом (transmit/receive transition gap, TRG) [1]; $BLER$ – ймовірність блокової помилки, одержувана за рахунок механізму HARQ (Hybrid automatic repeat request) [1].

У ході вирішення задачі розподілу підканалів в рамках запропонованої моделі необхідно забезпечити розрахунок керуючої змінної ($x_{n,l}$), яка визначає порядок розподілу підканалів. У відповідності з фізикою розв’язуваної задачі на керуючу змінну накладаються наступні обмеження:

$$0 \leq x_{n,l}, (n = \overline{1, N}, l = \overline{1, L}) \quad (2)$$

Загальне число керуючих змінних залежить від кількості користувачьких станцій у мережі у мережі, кількості підканалів і, відповідно, буде визначатися виразом $N \times L$. При розрахунку шуканих змінних $x_{n,l}$ необхідно виконати ряд важливих умов-обмежень:

1) Умова виділення n -й користувачькій станції швидкості передачі на l -му підканалі, що не перевищує пропускну здатність підканалу:

$$x_{n,l} \leq \frac{R_c^{n,l} k_b^{n,l} K_s (1 - BLER)}{(T_b + T_g + T_{RTG} + T_{TRG}) R_{необ}^n} \quad (n = \overline{1, N}, l = \overline{1, L}), \quad (3)$$

де R_c^n – швидкість коду, використовуваного при кодуванні сигналу n -ї користувачької станції на l -му підканалі; $k_b^{n,l}$ – бітова завантаження символу n -ї користувачької станції на l -му підканалі.

2) Умова задоволення вимог за швидкістю передачі для кожної користувальницької станції в низхідному каналі зв’язку при використуванні схеми модуляції і кодування (Modulation and Coding Scheme, MCS):

$$\sum_{l=1}^L x_{n,l} \geq 1 \quad (n = \overline{1, N}). \quad (4)$$

3) Умова закріплення підканалу тільки за однією користувачькою станцією:

$$\sum_{l=1}^L x_{n,l} x_{s,l} = 0 \quad (n, s = \overline{1, N}, n \neq s). \quad (5)$$

Розрахунок шуканих змінних (2) відповідно до умов-обмежень (3)-(5) доцільно здійснювати в ході вирішення оптимізаційної задачі, забезпечуючи мінімум або максимум попередньо обраного критерію якості вирішення задачі розподілу підканалів. Задача розподілу підканалів може бути вирішена з використанням критерію оптимальності, спрямованого на максимізацію загальної продуктивності низхідного каналу зв’язку. Таким чином, критерій оптимальності прийме вигляд:

$$\max \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N x_{n,l} \quad (6)$$

при врахуванні умов-обмежень (3)-(5). Використання критерію оптимальності (6) спільно з умовами-обмеженнями (3)-(5) спрямовано на забезпечення гарантованої швидкості передачі з можливістю доступу до додаткової (не гарантованої) смуги пропускання, що в CoS відповідає підкласу В.

Сформульована задача з математичної точки зору є задачею нелінійного програмування – NLP (NonLinear Programming). Змінна, що використовується в критерії оптимальності (6), є нецілочисельною, обмеження на шукані змінні (3) і (4) носять лінійний, а обмеження (5) – нелінійний характер.

Приклад рішення задачі розподілу підканалів

З метою аналізу рішень щодо розподілу підканалів в низхідному каналі зв’язку, одержуваних з використанням відомих методів, а також запропонованої моделі (2)-(6) розглянемо приклад, при якому для розподілу підканалів в низхідному каналі зв’язку в якості вихідних даних були використані наступні: кількість користувальницьких станцій – $N = 5$; кількість підканалів, сформованих в низхідному каналі зв’язку – $L = 15$; число піднесущих для передачі даних на одному підканалі – $K_s = 12$; швидкість коду, що використовується при кодуванні сигналу першої КС $R_c^1 = 2$

(QPSK), другої – $R_c^2=3$ (8-PSK), третьої – $R_c^3=5$ (32-QAM), четвертої – $R_c^4=2$ (QPSK), п'ятої – $R_c^5=5$ (32-QAM); бітове завантаження символу першої КС – $k_b^1=1/2$, другої – $k_b^2=1/2$, третьої – $k_b^3=1/4$, четвертої – $k_b^4=3/4$, п'ятої – $k_b^5=1/2$.

Як приклад було отримано рішення сформульованої в роботі оптимізаційної задачі з використанням системи MatLab R2012b. При цьому в була задіяна програма fmincon пакета оптимізації Optimization Toolbox. Для прикладу всім користувачьким станціям були встановлені однакові необхідні швидкості передачі, які приймали значення $R_{необ}^n = 0 \div 1,9$ Мбіт/с. На рис. 1 показано як змінюється загальна продуктивність низхідного каналу зв'язку від необхідної швидкості передачі.

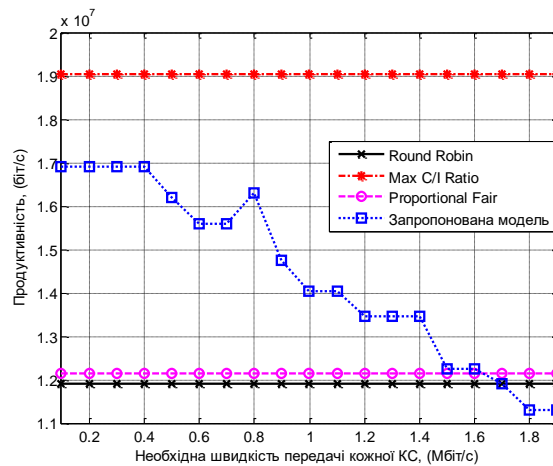


Рис. 1. Залежність загальної продуктивності низхідного каналу зв'язку в залежності від використовуваного способу розподілу підканалів та від необхідної швидкості передачі

Як показали результати моделювання (рис. 1) загальна продуктивність низхідного каналу зв'язку при використанні відомих методів протягом всього інтервалу вимірювання не змінювалася і становила для методу Round Robin – 1,205 Мбіт/с, методу Proportional Fair – 1,2 Мбіт/с, а для методу Max C/I Ratio – 1,91 Мбіт/с. Загальна продуктивність низхідного каналу зв'язку при використанні запропонованої моделі (2)-(6) на ділянці $R_{необ}^n = 0,1 \div 0,4$ Мбіт/с мала максимальне значення і становила 1,69 Мбіт/с. На інтервалі $R_{необ}^n = 0,4 \div 1,9$ Мбіт/с загальна продуктивність зменшилася на 33 % до значення 1,13 Мбіт/с.

На рис. 2 наведені результати моделювання, що відображають динаміку зміни ступеня балансування пропускної здатності низхідного каналу між користувачькими станціями. Ступінь балансування пропускної здатності визначалася відповідно з виразом [8]

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

де R_n^i – швидкість передачі, виділена n -й КС на i -му інтервалі вимірювання, $n = \overline{1, N}$.

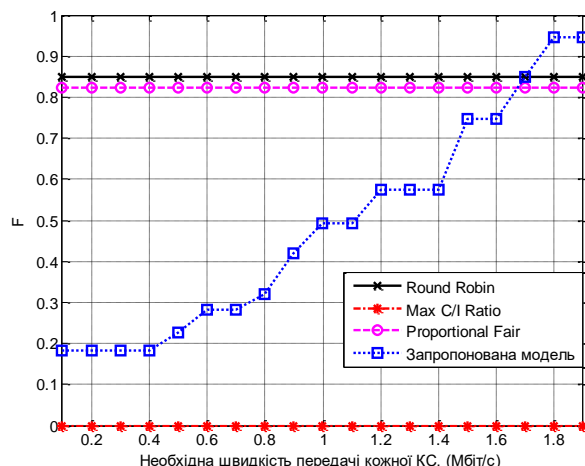


Рис. 2. Залежність ступеня балансування пропускної здатності нижнього каналу зв'язку в залежності від використовуваного способу розподілу підканалів та необхідної швидкості передачі

Як показали результати моделювання (рис. 2) ступінь балансування пропускної здатності нижнього каналу зв'язку при використанні відомих методів протягом всього інтервалу вимірювання не змінювалася і становила для методу Round Robin – 0,85, для методу Proportional Fair – 0,825, а для методу Max C/I Ratio – 0. Ступінь балансування пропускної здатності нижнього каналу зв'язку при використанні запропонованої моделі (2)-(6) на ділянці $R_{mp\delta}^n = 0,1 \div 0,4$ Мбіт/с мала мінімальне значення і становила 0,18. На інтервалі $R_{mp\delta}^n = 0,4 \div 1,9$ Мбіт/с ступінь балансування пропускної здатності збільшилася до значення 0,94.

На рис. 3 показано, як змінюються швидкості передачі, виділені тій чи іншій КС в рамках використовуваного способу розподілу підканалів нижнього каналу залежно від необхідної швидкості передачі.

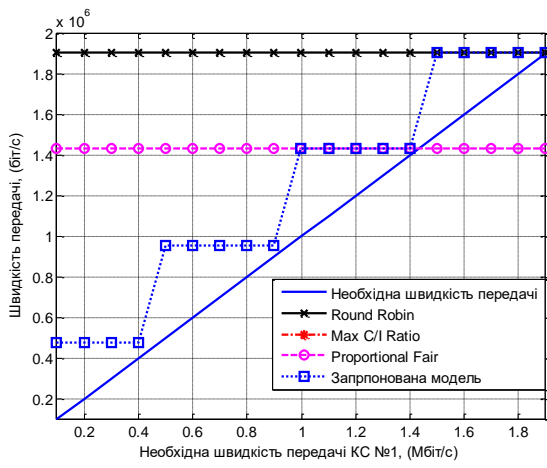
Як показали результати моделювання (рис. 3) методом Proportional Fair не забезпечується необхідна швидкість передачі для всіх користувацьких станцій починаючи з 1,4 Мбіт/с. При використанні методу Round Robin необхідна швидкість передачі для третьої КС не забезпечується починаючи зі значення $R_{mp\delta}^3 = 1,8$ Мбіт/с. Використання методу Max C/I Ratio дозволяє забезпечити необхідну швидкість передачі тільки одній (п'ятій) КС, що має найвище значення добутку бітового завантаження символу і швидкості кодування. Використання запропонованої моделі (2)-(6) забезпечує виділення необхідної швидкості передачі КС на всьому інтервалі вимірювання $R_{mp\delta}^n = 0,1 \div 1,9$ Мбіт/с.

На рис. 4 наведені результати розрахунку ймовірності виконання вимог по швидкості передачі, що виділяється всім КС. Ймовірність виконання вимог по швидкості передачі на i -му інтервалі вимірювання визначалася відповідно з виразом

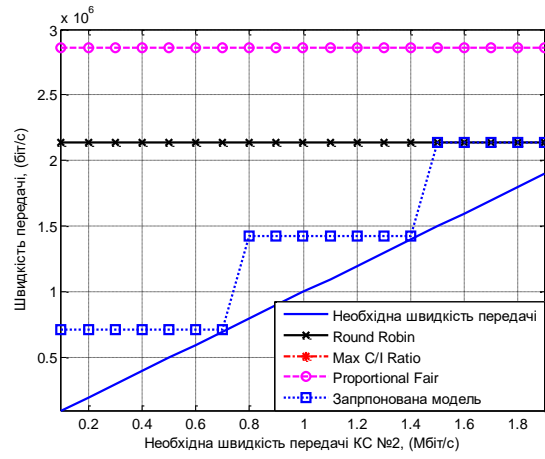
$$P^i = \frac{\sum_{n=1}^N Q_n^i}{N},$$

де $\sum_{n=1}^N Q_n^i$ – кількість КС, яким виділена необхідна швидкість передачі на i -му інтервалі

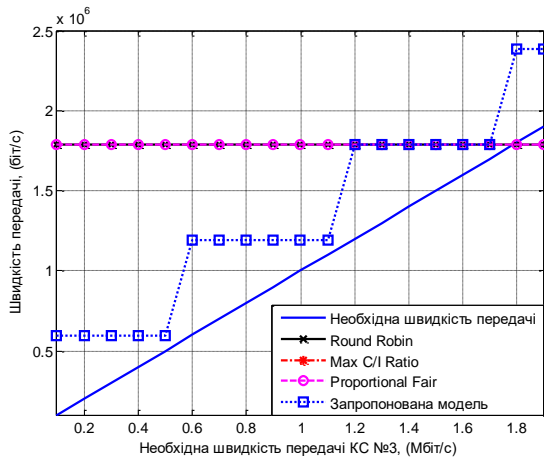
вимірювання, тобто $Q_n^i = \begin{cases} 0, & \text{если } R_n^i < R_{необ}^i; \\ 1, & \text{если } R_n^i \geq R_{необ}^i. \end{cases}$



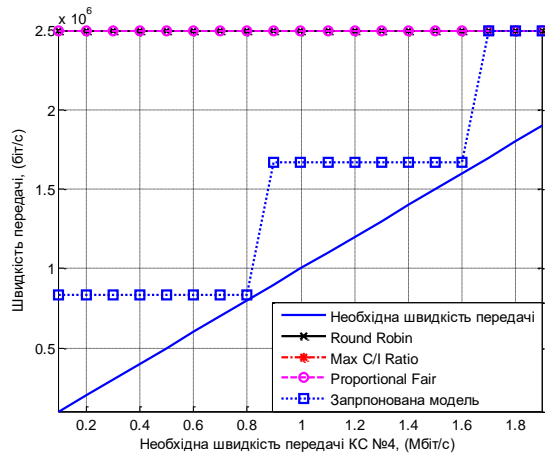
а)



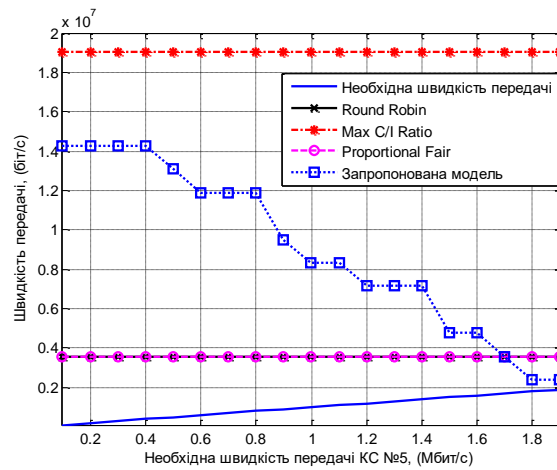
б)



в)



г)



д)

Рис. 3. Залежність швидкості передачі низхідного каналу зв'язку користувачьких станцій в залежності від використовуваного способу розподілу підканалів і від необхідної швидкості передачі

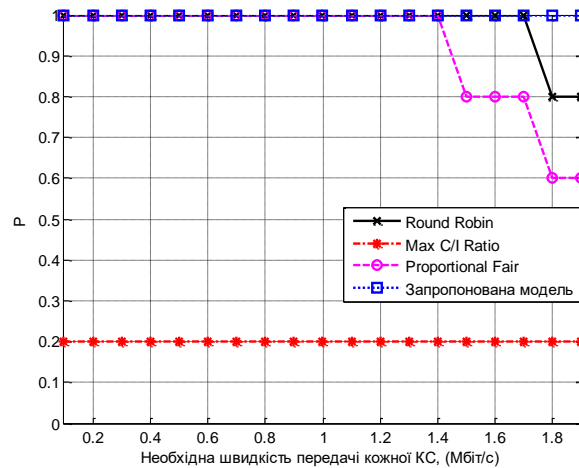


Рис. 4. Залежність ймовірності виділення КС необхідної швидкості передачі в залежності від використовуваного способу розподілу підканалів та від необхідної швидкості передачі

Висновки

Встановлено, що одним з основних завдань в безпроводовій мережі, що функціонує з використанням технології WiMAX, є завдання забезпечення необхідної якості обслуговування, до складу якої входить необхідність виділення користувачки станціям мережі необхідної швидкості передачі в низхідному каналі зв'язку. Також встановлено, що одним з ефективних способів забезпечення необхідної швидкості передачі в технології WiMAX є вирішення задачі розподілу підканалів в низхідному каналі зв'язку. У зв'язку з цим, проаналізовано існуючі механізми розподілу підканалів між користувачькими станціями в низхідному каналі зв'язку безпроводової мережі, що функціонує з використанням технології WiMAX.

На підставі виявлених недоліків відомих механізмів з розподілу частотних ресурсів в низхідному каналі запропоновано математичну модель, яка представлена рядом лінійних і нелінійних умов-обмежень. Новизна моделі полягає у формулюванні задачі розподілу підканалів, як задачі перерозподілу доступної пропускної здатності низхідного каналу технології WiMAX для передачі інформації в напрямку користувачьких станцій, при обліку їх територіальної віддаленості (виду системи модуляції та кодування).

Відзначено, що сформульована задача з розподілу підканалів низхідного каналу з точки зору фізики процесів, що протікають в безпроводовій мережі, відноситься до класу задач балансування частотних ресурсів – числа підканалів, виділяються для користувачьких станцій, а з математичної точки зору – це задача нелінійного програмування. Порівняльний аналіз показав, що найкращі показники по продуктивності низхідного каналу зв'язку забезпечує метод Max C/I Ratio, а також запропонована модель (2)-(6). З точки зору збалансованого розподілу пропускної здатності низхідного каналу зв'язку найкращі показники були у методів Round Robin і Proportional Fair, за умови низьких вимог до швидкості передачі користувачьких станцій. В умовах високих вимог до швидкості передачі найбільш збалансований розподіл пропускної здатності низхідного каналу зв'язку забезпечує запропонована в статті модель (2)-(6).

Також проведений аналіз показав, що методи Max C/I Ratio, Round Robin і Proportional Fair ефективні лише в умовах невисоких вимог до швидкості передачі. В умовах високих вимог до швидкості передачі користувачьких станцій ефективною виявилася модель (2)-(6), забезпечуючи кожній користувачькій станції гарантовану швидкість передачі з можливістю доступу до додаткової (не гарантованої) смуги пропускання, що в класах сервісу CoS відповідає підкласу B, тоді як інші методи не гарантують виділення необхідної швидкості передачі, що в класах сервісу CoS відповідає підкласу A.

1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, IEEE Std 802.16-2004, Oct. 1, 2004. 2. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems, IEEE Std 802.16e-2005, Feb. 28, 2006. 3. 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. 4. 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. 5. Генко И.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко А.В. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. – К.: «ЕКМО», 2009. – 672 с. 6. Sateesh G., Bheri P., Rajesh P., Rama Rao A. Analysis of the Packet Scheduling Algorithms of WiMAX // Proceedings on International Conference on Computer Science and Engineering, 2012. Pp. 106–110. 7. Mustapha R., Abuteir A., Samra Aiman Abu A. Deadline Maximum Signal to Interference Ratio Scheduling Algorithm for WiMAX // International Journal of Computer Applications. – 2012. – № 43(5). – P. 27-32. 8. Nie W., Wang H., Park J.H. Packet Scheduling with QoS and Fairness for Downlink Traffic in WiMAX Networks // Journal of Information Processing Systems. – 2011. – V. 7, № 2. – P. 261–270. 9. Гаркуша С.В. Модель распределения пропускной способности нисходящего канала связи технологии WiMAX с ограничением скорости передачи // Инфокоммуникационные технологии. – 2013. – Том 11, № 3. – С. 18-23. 10. 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.