

УДК 621.396

О.Ю. Стрюк, О.О. Лаврут, Я.В. Янсонс

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації  
Національного технічного університету України «КПІ», Полтава

## МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СПРАВЕДЛИВОГО РІВНЯ СПРИЙНЯТТЯ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ АБОНЕНТІВ MESH-РАДІОМЕРЕЖІ

Проведено аналіз сприйняття якості обслуговування (PQoS) як цільової функції задачі мережного керування. Визначена задача забезпечення справедливого рівня PQoS абонентів mesh-радіомережі. Пропонується алгоритм вирішення сформульованої задачі у mesh-радіомережі із централізованим керуванням.

**Ключові слова:** mesh-радіомережі, керування ресурсами радіомереж, сприйняття якості обслуговування (PQoS), справедливий рівень PQoS.

### Вступ

Mesh-мережі – це новий перспективний принцип побудови широкосмугових радіомереж, відмінною особливістю якого є самоорганізація архітектури мережі, що забезпечує реалізацію наступних можливостей [1]:

– використання безпроводових транспортних каналів при побудові мережі за топологією «кожен з кожним»;

– масштабування мережі (зміна площі зони покриття і щільності інформаційного забезпечення) у режимі самоорганізації;

– стійкість мережі до втрати (відмови) окремих елементів;

– зменшення вартості розгортання мережі.

Незважаючи на великий потенціал mesh-мереж та наявні приклади практичного втілення mesh-технологій у стандартах побудови безпроводових мереж (для мереж масштабу Wireless Metropolitan Area Networks (WMAN) – 802.16j, Wireless Local Area Network (WLAN) – 802.11s, Wireless Personal Area Networks (WPAN) – 802.15.4), залишається ряд проблем, що перешкоджають їх широкому розповсюдженню. Одним з найбільш критичних факторів, які впливають на розвиток mesh-мереж, є складність забезпечення для кожного з користувачів mesh-мережі заданого рівня якості обслуговування (QoS, Quality of Service) – визначеної у рекомендації ITU – T P.800 як «сукупний ефект характеристик мережного сервісу, який визначає ступінь задоволеності споживача даного сервісу». Механізми і протоколи забезпечення QoS, які розроблені і застосовуються у проводових мережах, як правило, не можуть напряму використовуватись у радіо- або гібридних проводових – радіомережах з огляду на характеристики безпроводових засобів зв'язку [2 – 4]:

– радіолінії мають обмежену смугу пропускання, високу інтерференцію між каналами, довшу затримку і більш високе значення варіації затримки

доставки пакету в порівнянні із сучасними кабельними системами, що потребує застосування більш складних механізмів QoS;

– нестабільність радіоліній внаслідок інтерференції і мобільності користувачів вимагають використання адаптивних засобів QoS;

– деградації продуктивності mesh-мережі із багатоскачковим принципом передавання при збільшенні її масштабів.

– диверсність і комплексність технологій безпроводового радіодоступу потребують впровадження різних механізмів QoS у різних сегментах мережі й ускладнюють функціональну сумісність між цими механізмами.

### Основний матеріал

**1. Обґрунтування вибору сприйняття якості обслуговування як інтегрального показника якості обслуговування.** Протягом останніх десяти років була розроблена концептуальна модель координаційної – крос-рівневої (cross-layer) архітектури систем оперативного керування радіомережами [5, 6]. Крос-рівнева архітектура побудови системи оперативного керування радіомережі передбачає координацію та інтеграцію рівнів еталонної взаємодії відкритих систем (OSI) за цілями і функціями керування та інтелектуалізацію процесів прийняття рішення. Основні труднощі при побудові координаційної архітектури керування радіомережею – це визначення необхідних параметрів, які будуть використовуватись між рівнями OSI та функціями керування, які дозволяють отримати користувальницьку та (або) мережеву, зонову оптимізацію [6].

Однією із прикладних задач мережного керування, пов'язаних із забезпеченням QoS, при вирішенні якої використовується крос-рівневий підхід, є задача максимізації корисності мережі (network utility maximization). Вперше задача максимізації корисності мережі сформульована у роботі F.Kelly [7]. Методи вирішення задачі максимізації корисності mesh-мереж

запропоновані у роботах [8 – 10]. Задача максимізації корисності mesh-мережі, яка складається з  $E$  – ресурсних елементів, і в якій створено  $F$  – інформаційних потоків, полягає у пошуку такого вектору розподілу ресурсів mesh-мережі, який задовольняє (1)

$$\mathbf{x}^* = \arg \max_{\{\mathbf{x}_f\} \in \Omega} \left( \sum_{f \in F} U_f(\mathbf{x}_f) \right) \quad (1)$$

за умови

$$\mathbf{R} \times \mathbf{x} \leq \mathbf{C}, \quad \mathbf{x} \geq 0,$$

де  $\mathbf{x}_f$  – ресурси мережі, виділені інформаційному потоку  $f$ ;  $U_f(\{\mathbf{x}_f\})$  – значення функції корисності для інформаційного потоку  $f$  при виділенні йому  $\mathbf{x}_f$  ресурсів мережі;  $\Omega$  – множина можливих варіантів розподілу ресурсів між інформаційними потоками у мережі;  $\mathbf{R} = (R_{ef})_{|E| \times |F|}$  – матриця розподілу ресурсів елементів мережі між інформаційними потоками у мережі;  $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_f, f \in F)$  – вектор ресурсів, які виділяються інформаційним потокам;  $\mathbf{C} = (C_e, e \in E)$  – вектор місткостей ресурсних елементів мережі.

За умови опуклості функції корисності  $U_f(\{\mathbf{x}_f\})$ , вирішення задачі (1) задовольняє умовам пропорційно справедливого, та максимінно справедливого розподілу ресурсів мережі між інформаційними потоками. Однак ні пропорційно ні максимінно справедливий розподіл ресурсів не забезпечує виконання умови справедливого розподілу ресурсів між інформаційними потоками у мережі при якому для будь-якої пари інформаційних потоків виконується умова

$$U_i(\mathbf{x}_i) = U_j(\mathbf{x}_j), \quad i \neq j, \quad i, j \in F.$$

При побудові координаційних моделей максимізації корисності мережі – складний характер взаємних зв'язків між параметрами мережі, неоднозначність їх впливу на якість обслуговування, визначає нетривіальність визначення значень цільової функції оптимізації як функції декількох змінних. Тому в моделях максимізації корисності mesh-мережі [8 – 10] цільова функція задається як функція, що залежна від однієї змінної – пропускну здатності.

У якості інтегрального показника при оцінюванні оптимальності координаційного керування у радіомережі, безпосередньо пов'язаного з її основним призначенням – забезпеченням передавання інформації із заданою якістю, що враховує як вплив параметрів мережі, так і вплив прикладного програмного забезпечення, – може бути використане сприйняття користувачем якості інформаційної послуги [11].

Сприйняття якості обслуговування (PQoS – perceived quality of service) – це оцінка якості інформаційного сервісу з точки зору сприйняття користувачем як споживачем послуг даного сервісу. Рекомендація ITU-T P.830 встановлює для оцінювання якості сприйняття користувача п'ятибальну шкалу MOS (Mean Opinion Score – середнє значення експертних оцінок). Протягом останніх років були розроблені та пройшли міжнародну верифікацію методи об'єктивного оцінювання PQoS для:

- служб передавання мови, рекомендації ITU-T G.107, P.563, P.862;
- служб передавання відео, рекомендація ITU-T J.247;
- служб трансляції аудіо, рекомендація ITU-T BS.1387;
- служб передавання даних, рекомендації ITU-T G.1030, G.1040.

Наявність об'єктивних методів оцінювання PQoS дозволяє автоматизувати процедуру визначення PQoS як величини, залежної від широкого спектру показників мережі. Для кожної з функціонуючих у мережі інформаційних служб можуть бути визначені значення багатовимірної масиви значень PQoS –  $\{q_i\}$ , залежні від виділених ресурсів, параметрів мережі, з урахуванням функціональності прикладного програмного забезпечення (кінцевого абонентського обладнання), яке реалізовує дану послугу

$$\{q_i\} = F(\{R_i\}, \{p\}, \{E_i\}),$$

де  $q_i$  – значення PQoS за шкалою MOS для інформаційної служби  $i$ ,  $i \in 1, \dots, m$ ;  $m$  – кількість інформаційних служб, які функціонують у мережі;  $\{R_i\}$  – множина значень ресурсів мережі, що виділені інформаційній службі  $i$ ;  $\{p\}$  – множина показників, які характеризують мережу;  $\{E_i\}$  – множина факторів, що відображають вплив на PQoS особливостей реалізації прикладного програмного забезпечення, і (або) кінцевого абонентського обладнання.

На рис. 1 наведені залежності PQoS від:

- ресурсів мережі – смуги пропускання;
- показників мережі – імовірність втрати пакету, затримка доставки пакетів;
- особливостей реалізації прикладного програмного забезпечення – тип і швидкість інформаційного потоку, метод кодування.

У [14] доведена ефективність використання PQoS у якості показника при вирішенні задачі максимізації корисності mesh-радіомережі на основі показників PQoS. Метою представленої роботи є розробка методу забезпечення справедливого рівня сприйняття якості обслуговування абонентів mesh-радіомережі.

**2. Постановка задачі координаційної оптимізації для забезпечення справедливого рівня PQoS абонентів mesh-радіомережі.** При побудові mesh-радіомереж масштабу WMAN використовується структура mesh-мережі на основі ретрансляції (рис. 2). Дана структура стандартизована для побудови mesh-мереж у технології WiMAX – стандарт IEEE 802.16j [15], для технології LTE – розглядається як перспективний варіант [16]. Мережа складається з наступних мережних пристроїв: базова станція (БС), релейна станція (ретранслятор, РС), абонентська станція (АС). РС може функціонувати у прозорому або у непрозорому режимах. У прозорому режимі РС транслює лише дані і не транслює преамбули і поля керування. АС керується безпосередньо БС. При цьому АС логічно ніяк не взаємодіє з РС (не знає про її існу-

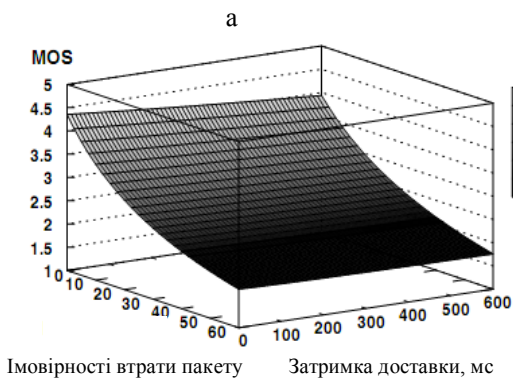
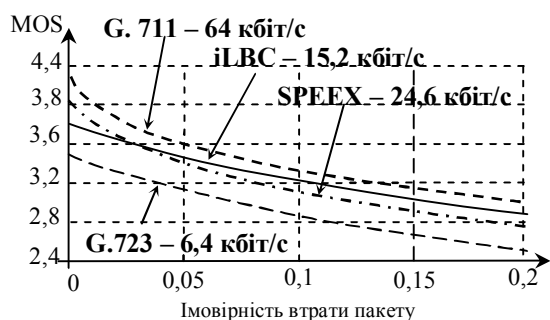


Рис. 1. Залежність PQoS від:  
 а – імовірності втрати пакету для різних кодеків мови [12];  
 б – імовірності втрати пакету і затримки доставки пакетів для кодеку мови SPEEX (24,6 кбіт/с) [13]

вання). У непрозорому режимі РС передає не лише дані, а й преамбулу, а також і всі керуючі повідомлення. По відношенню до АС релейна станція виглядає як БС, абонентська станція фізично і логічно з'єднана з РС. Релейні станції можуть бути стаціонарними, номадичними (пересувний ретранслятор) і мобільними. Зв'язок між базовими станціями забезпечується із використанням надійних і високопродуктивних мережних технологій, здатних гарантувати необхідний рівень QoS. Основними причинами зменшення рівня QoS у mesh-радіомережах на основі РС є обмеженість радіоресурсу, нестабільність радіоліній і мобільність абонентів у зоні обслуговування БС і РС станцій.

Найбільш вагомим ресурсом mesh-радіомережі є пропускна спроможність радіоінтерфейсів базових та релейних станцій [17], тому оптимізаційна задача, рішення якої пропонується, зосереджена забезпеченні справедливого рівня PQoS у mesh-радіомережі за рахунок керування розподілом пропускної спроможності, кодування аудіовізуальних даних зі зміною швидкістю і з урахуванням рівня завадостійкості каналів між мережними пристроями. Вирішення

запропонованої задачі забезпечує справедливе використання радіоресурсу mesh-мережі.

**2.1. Початкові припущення.** Оптимізаційна задача вирішується, виходячи із припущення про реалізацію в технології побудови радіомережі наступних методів забезпечення інформаційного обміну і керування мережею:

- релейні станції функціонують у непрозорому режимі, для зв'язку між елементами мережі використовується однаковий радіоінтерфейс, режим керування mesh-мережею централізований;
- наявність механізмів класифікації, маршрутизації та відокремленої обробки інформаційних потоків, керування чергами, планування передавання;
- детермінований доступ до радіоканалу з можливістю виділення кожному інформаційному потоку певного значення пропускної спроможності з дискретністю  $\Delta R$ ; наявність зворотного службового зв'язку між базовою станцією і мобільними абонентами з можливістю отримання інформації про рівень завадостійкості радіоканалу на приймальній стороні;
- можливість транскодування аудіовізуальних даних - зміни в реальному часі швидкості кодування та (або) формату представлення даних базовою станцією і абонентськими пристроями.

Аналіз наведених припущень показує, що всі зазначені механізми, крім транскодування, реалізовані в сучасних технологіях побудови mesh-радіомереж [15, 16]. Сучасні методи кодування аудіовізуальних даних передбачають можливість кодування зі змінною швидкістю без істотної зміни формату представлення даних, що створює умови для здійснення операції транскодування в реальному часі як у базових станціях, так і в абонентському обладнанні [18].

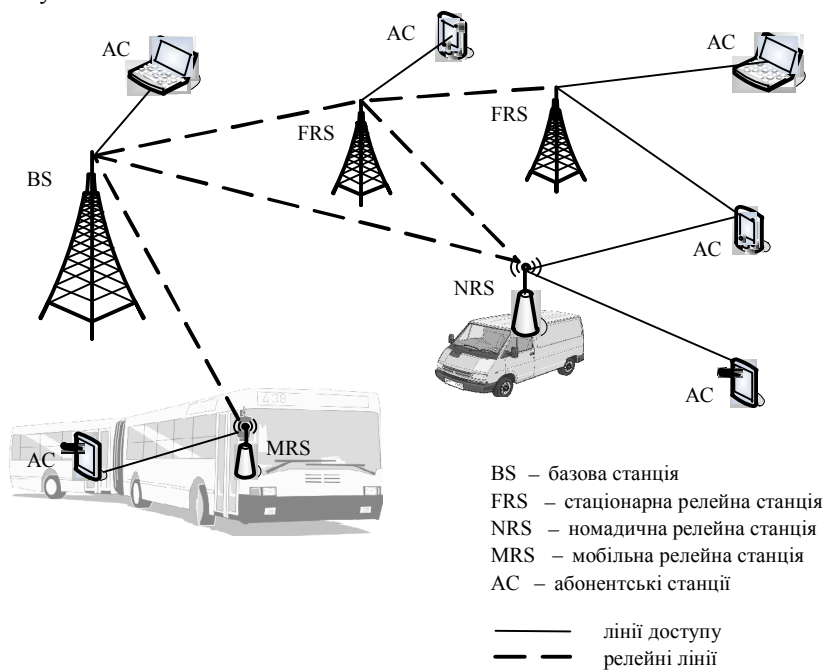


Рис. 2. Варіант структури мережі IEEE 802.16

**2.2. Вихідні дані.** При вирішенні оптимізаційної задачі використовуються наступні вихідні дані:  $m$  – кількість РС у mesh-мережі;  $R$  – значення пропускної спроможності радіоінтерфейсів БС, РС, АС, біт/с;  $\Delta r$  – шаг зміни смуги пропускання, яка може виділятися БС або РС для інформаційних потоків – ресурсний елемент, біт/с;  $k$  – кількість інформаційних потоків, які конкурують за доступ; способи кодування інформації в інформаційних потоках; маршрути проходження інформаційних потоків у mesh-мережі;  $p_i$  – середня імовірність втрати пакету для кожного інформаційного потоку,  $i \in 1, \dots, k$ ; масив значень PQoS по шкалі MOS в залежності від швидкості потоку, імовірності втрати пакету для кожного з інформаційних потоків та обраного способу кодування (характеристик прикладної реалізації послуги)

$$\{q_i(r_i, p_i, E_i)\} = \{q_i(\Delta r, p_i, E_i), q_i(2\Delta r, p_i, E_i), \dots, q_i(B_i \Delta r, p_i, E_i)\},$$

де  $B_i = \lfloor R_i^{\max} / \Delta r \rfloor$ ;  $R_i^{\max}$  – максимально необхідна смуга пропускання для інформаційного потоку  $i$ , біт/с.

**2.3. Необхідно** – знайти такий вектор розподілу пропускної спроможності між інформаційними потоками у mesh-мережі, при якому виконується

$$q_1(r_1, p_1, E_1) = \dots = q_k(r_k, p_k, E_k) \quad (2)$$

за умови

$$\Delta R \times r \leq C,$$

де  $r^* = (r_i, i = 1, \dots, k)$  – вектор розподілу пропускної спроможності між інформаційними потоками, який забезпечує вирішення задачі (2);  $\Delta R = (\Delta R_{ji})_{|m+1| \times |k|}$  – матриця розподілу пропускної спроможності радіоінтерфейсів БС і РС mesh-мережі між інформаційними потоками;  $\tilde{N} = (R_j, j = 1, \dots, m+1)$  – вектор пропускної спроможності радіоінтерфейсів БС і РС mesh-мережі.

Множина можливих значень вектору розподілу пропускної спроможності відповідає стандартному набору швидкостей передавання, і в силу цього є дискретною, компоненти рішення повинні відповідати цій дискретній множині. Оскільки кожному з фіксованих дискретних значень  $r_i$ , може відповідати неперервне значення PQoS, обмежене лише діапазоном від 1 до 5, отримати точне аналітичне рішення задачі (2) є неможливим.

Для вирішення задачі забезпечення справедливого рівня PQoS у mesh-мережі, пропонується використовувати дискретну множину  $\{r'_{i,s}(q'_{i,s}, p_i, E_i)\}$ , значення якої визначаються за наступним правилом

$$r'_{i,s}(q'_{i,s}, p_i, E_i) = n \Delta r,$$

якщо  $q_i((n-1)\Delta r, p_i, E_i) < q'_{i,s} \leq q_i(n\Delta r, p_i, E_i)$ ,

де  $q'_{i,s}$  – значення PQoS для інформаційного потоку  $i$ , квантоване з кроком

$$\Delta q, s = 1 \dots 5/\Delta q; n = 1 \dots R/\Delta r.$$

**2.4. Визначення.** Розподіл пропускної спроможності між інформаційними потоками у mesh-мережі  $\{r'_{i,s}\}^*$  вважається PQoS – справедливим, якщо виконується

$$q'_{1,s} = q'_{2,s} = \dots = q'_{k,s} = s \Delta q, \quad (3)$$

за умови  $\Delta R \times \{r'_{i,s}\}^* \leq C$ .

Рішення оптимізаційної задачі (3) може бути отримано із використанням поетапної ітераційної процедури. Вибір даного методу рішення обумовлений:

– адитивним характером цільової функції оптимізації;

– залежністю рішення про виділення частки пропускної спроможності, яке приймається в кожному із циклів процедури, лише від величини нерозподіленої (вільної) пропускної спроможності.

Для вирішення задачі (3) пропонується алгоритм, найближчим прототипом якого є алгоритм, запропонований у роботі [19]. Оригінальний алгоритм використовувався для вирішення задачі забезпечення справедливого рівня PQoS у сегменті «базова станція – мобільний абонент».

**3. Алгоритм забезпечення справедливого рівня PQoS абонентів mesh-радіомережі.** Алгоритм координаційної оптимізації для забезпечення справедливого рівня PQoS у mesh-радіомережі ініціалізується БС у випадку необхідності перерозподілу ресурсів mesh-мережі при початку (закінченні) сеансу зв'язку, або з заданою періодичністю, яка, згідно умови стохастичної стійкості алгоритмів керування розподілом ресурсів мережі [20], має відповідати співвідношенню:

$$T_r \approx T_c < T_s, \quad (4)$$

де  $T_r$  – середній час, необхідний для здійснення розподілу ресурсів;  $T_c$  – інтервал кореляції зміни параметрів мережі;  $T_s$  – середня тривалість сеансів зв'язку.

У кожному циклі роботи алгоритму визначається:

– чергове дискретне значення PQoS –  $s \Delta q$ ;

– для кожного з інформаційних потоків при дійсному рівні  $p_i$  та встановленій реалізації послуги на прикладному рівні визначається  $r'_{i,s}(q'_{i,s}, p_i, E_i)$  (детальне описання цієї складової наведено у [19]).

Оскільки під витратним ресурсом розуміється смуга пропускання радіоінтерфейсів БС та РС, то витрати ресурсів mesh-радіомережі обчислюються за наступним виразами:

– для маршрутів, які проходять лише через РС

$$C = 2n\gamma \Delta r;$$

– для маршрутів, які проходять через РС та БС

$$C = 2n\gamma \Delta r + \gamma \Delta r,$$

де  $n$  – кількість РС, через які проходить маршрут інформаційного потоку у mesh-мережі;  $\gamma$  – кількість ресурсних елементів, які виділяються інформаційному потоку,  $\gamma = \lfloor r'_{i,s} / \Delta r \rfloor$ .

Середня імовірність втрати пакету –  $p_i$  для маршруту передавання інформаційного потоку визначається наступним чином. Для маршрутів, які створюються,  $p_i$  визначається аналітичними методами, на основі інформації про імовірність виникнення помилки у радіоканалах, з яких складається маршрут. Для маршрутів, які вже існують,  $p_i$  може визначатись як аналітично, так і на основі статистичної інформації мережних протоколів (наприклад, RTP, SIP).

В радіоінтерфейсах PC, через які проходить потік, для нього виділяється частка пропускної спроможності  $2\Delta g$ , у радіоінтерфейсі BC –  $\Delta g$ .

Виконання алгоритму закінчується у випадку надання кожному з інформаційних потоків максимально необхідної смуги пропускання  $R_i^{max}$  (якщо mesh-мережа функціонує у недовантаженому режимі), або у випадку вичерпання ресурсів радіо інтерфейсів, через які проходять інформаційні потоки, для яких  $r_i < R_i^{max}$ .

Результатами виконання алгоритму є вектор розподілу пропускної спроможності між інформаційними потоками, який забезпечує вирішення задачі (3), та матриця розподілу пропускної спроможності радіоінтерфейсів BC і PC mesh-мережі між інформаційними потоками.

**4. Приклад вирішення задачі забезпечення справедливого рівня PQoS абонентів mesh-радіомережі.** Розглянемо приклад вирішення сформульованої задачі. Структура mesh-мережі, яка розглядається у прикладі, наведена на рис. 3. Прийmemo наступні значення вихідних даних:

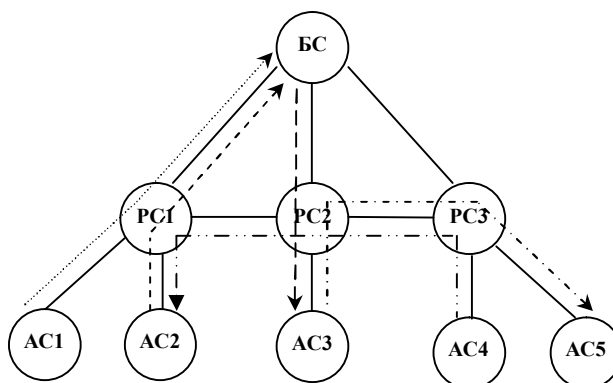
$R$  – максимальне значення пропускної спроможності радіоінтерфейсів мережних пристроїв – 72 кбіт/с;

$\Delta g$  – крок зміни смуги пропускання, яка може виділятися базовою станцією для інформаційних потоків – 4 кбіт/с;

$k$  – кількість інформаційних потоків – 5;

– типи і способи кодування інформації в інформаційних потоках, маршрут передавання інформаційного потоку у мережі, середня імовірність втрати пакету для кожного інформаційного потоку:

- інф. потік 1 – передавання мови із використанням кодеру SPEEX, AC1-PC1-BC,  $p_1 = 0,33$ ;
- інф. потік 2 – передавання даних із використанням протоколу FTP, AC2-PC1-BC,  $p_2 = 0,15$ ;
- інф. потік 3 – передавання даних із використанням протоколу FTP, AC3-PC2-PC3-AC5,  $p_3 = 0,36$ ;



- Радіоканали
- ..... Інф. потік 1
- Інф. потік 2
- Інф. потік 3
- Інф. потік 4
- Інф. потік 5

Рис. 3. Структура та інформаційні потоки mesh-мережі, яка розглядається у прикладі

- інф. потік 4 – передавання мови із використанням кодеру SPEEX, BC-PC2-AC3,  $p_4 = 0,1$ ;
- інф. потік 5 – передавання даних із використанням протоколу FTP, AC4-PC3-PC2-PC1-AC5,  $p_5 = 0,23$ ;

Значення PQoS по шкалі MOS, у залежності від виділеної смуги пропускання й імовірності втрати пакету для кожного з інформаційних потоків (отримані із використанням методики, наведеної у [21]), смуга пропускання радіоінтерфейсів, необхідна для забезпечення заданої швидкості інформаційного потоку, представлені у табл. 1.

Результати вирішення задачі забезпечення справедливого рівня PQoS абонентів mesh-радіомережі із використанням запропонованого алгоритму, наведені у табл. 2.

Таблиця 1

Значення PQoS і витрати ресурсів для інформаційних потоків у мережі

| Смуга пропускання, кбіт/с |                                 | 4    | 8    | 12   | 16   | 20   | 24   | 28   |
|---------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Інф. потік 1              | Значення PQoS                   | 1,76 | 2,01 | 2,22 | 2,39 | 2,45 | 2,45 | 2,51 |
|                           | Витрата ресурсів мережі, кбіт/с | 12   | 24   | 36   | 48   | 60   | 72   | 84   |
| Інф. потік 2              | Значення PQoS                   | 1,16 | 2,38 | 3,1  | 3,59 | 3,95 | 4,29 | 4,56 |
|                           | Витрата ресурсів мережі, кбіт/с | 12   | 24   | 36   | 48   | 60   | 72   | 84   |
| Інф. потік 3              | Значення PQoS                   | 1    | 1,89 | 2,59 | 3,1  | 3,47 | 3,79 | 4,07 |
|                           | Витрата ресурсів мережі, кбіт/с | 16   | 32   | 48   | 64   | 80   | 96   | 112  |
| Інф. потік 4              | Значення PQoS                   | 2,33 | 3    | 3,13 | 3,4  | 3,47 | 3,47 | 3,52 |
|                           | Витрата ресурсів мережі, кбіт/с | 12   | 24   | 36   | 48   | 60   | 72   | 84   |
| Інф. потік 5              | Значення PQoS                   | 1,05 | 2,15 | 2,92 | 3,42 | 3,8  | 4,12 | 4,39 |
|                           | Витрата ресурсів мережі, кбіт/с | 24   | 48   | 72   | 96   | 120  | 144  | 168  |

Таблиця 2

## Результати виконання алгоритму

| Інформаційний потік                              |    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|--|----|------|------|------|------|------|
| Смуга пропускання, кбіт\с                        |    | 16   | 8    | 12   | 4    | 12   |
| Значення PQoS                                    |    | 2,39 | 2,38 | 2,59 | 2,33 | 2,92 |
| Використання пропускної спроможності БС, кбіт\с  | 28 | 16   | 8    | –    | 4    | –    |
| Використання пропускної спроможності РС1, кбіт\с | 72 | 32   | 16   | 24   | –    | –    |
| Використання пропускної спроможності РС2, кбіт\с | 56 | –    | –    | 24   | 8    | 24   |
| Використання пропускної спроможності РС3, кбіт\с | 48 | –    | –    | 24   | –    | 24   |

Для оцінювання результатів використання запропонованого методу пропонуються наступні показники:

1. Стандартне відхилення значень PQoS інформаційних потоків у мережі

$$STD = \sqrt{\sum_{i=1}^k (q_i - q_{cp})^2 / k},$$

де  $q_i$  – значення PQoS, забезпечене потоком  $i$ ;  $q_{cp}$  – середнє значення PQoS інформаційних потоків у мережі.

2. Індекс справедливості розподілу ресурсів JFI (Jain fairness index) [22] (абсолютно справедливому розподілу відповідає  $JFI = 1$ )

$$JFI = \left( \sum_i q_i \right)^2 / k \times \left( \sum_i q_i^2 \right).$$

У результаті роботи запропонованого методу у наведеному прикладі будуть отримані наступні значення показників:  $STD = 0,24$ ;  $JFI = 0,993$ .

Для порівняння - при використанні справедливого (рівного) розподілу пропускної спроможності у mesh-мережі, наведеної в якості прикладу:  $STD = 0,39$ ;  $JFI = 0,985$ . При забезпеченні справедливого рівня корисності у mesh-мережі, із використанням в якості значень функції корисності значень PQoS як функції залежної лише від смуги пропускання, виділеної потоку (без урахування впливу на якість сприйняття імовірності втрати пакету), показники справедливості PQoS складатимуть:  $STD = 0,42$ ;  $JFI = 0,98$ .

**5. Математичне моделювання запропонованого методу забезпечення справедливого рівня PQoS абонентів mesh-радіомережі.** Для експериментальної перевірки ефективності використання запропонованого методу із використанням системи комп'ютерної математики Matlab створена математична модель алгоритму забезпечення справедливого рівня PQoS абонентів mesh-радіомережі.

У математичній моделі використовується структура mesh-радіомережі, яка складається з БС та трьох РС.

Радіозв'язність між БС та РС відповідає наведеної на рис. 3.

Кожна РС взаємодіє з 20 АС.

Вихідні дані мають наступні значення:

$R$  – максимальне значення пропускної спроможності радіоінтерфейсів мережних пристроїв – 2048 кбіт\с;

$\Delta r$  – крок зміни смуги пропускання, яка може виділятися базовою станцією для інформаційних потоків – 4 кбіт\с;

$k$  – кількість інформаційних потоків – 60;

Кожна з АС формує інформаційний потік одного з 2 класів (клас потоку при кожному запуску алгоритму обирається випадково):

– передавання мови із використанням кодексу SPEEX – мінімальна швидкість потоку 4 кбіт\с, максимальна – 28 кбіт\с;

– передавання даних – мінімальна швидкість потоку 4 кбіт\с, максимальна – 28 кбіт\с.

Напрямки інформаційних потоків задаються наступним чином – 60% інформаційних потоків, які проходять через РС, спрямовані до БС, по 20% інформаційних потоків спрямовано до абонентів інших двох РС. В якості маршрутів використовуються маршрути з мінімальною кількістю переприйомів. Імовірність втрати пакету для кожного з радіоканалів у mesh-мережі задається при кожному запуску алгоритму як випадкове значення з рівномірним законом розподілу у діапазоні 0,02 – 0,3.

На рис. 4 наведена кумулятивна функція розподілу значення індексу справедливості JFI як випадкової величини, визначеної при 300 запусках описаної математичної моделі, для запропонованого методу забезпечення справедливого рівня PQoS абонентів mesh-радіомережі, забезпечення справедливого рівня PQoS на основі значень функції корисності, і при використанні справедливого розподілу пропускної спроможності мережі.

На рис. 5 наведена кумулятивна функція розподілу значення стандартного відхилення STD як випадкової величини, визначеної при 300 запусках описаної математичної моделі, для запропонованого

методу забезпечення справедливого рівня PQoS абонентів mesh-радіомережі, забезпечення справедливого рівня PQoS на основі значень функції корисності, і при використанні справедливого розподілу пропускну́ї спроможності мережі.

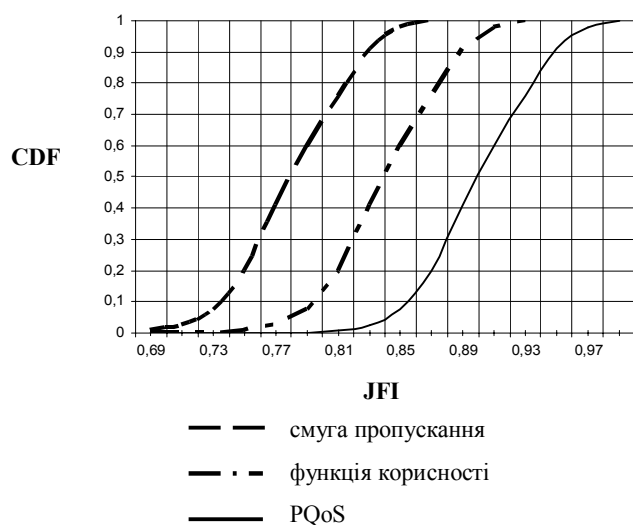


Рис. 4. Індекс справедливості PQoS при використанні різних методів керування розподілом ресурсів мережі

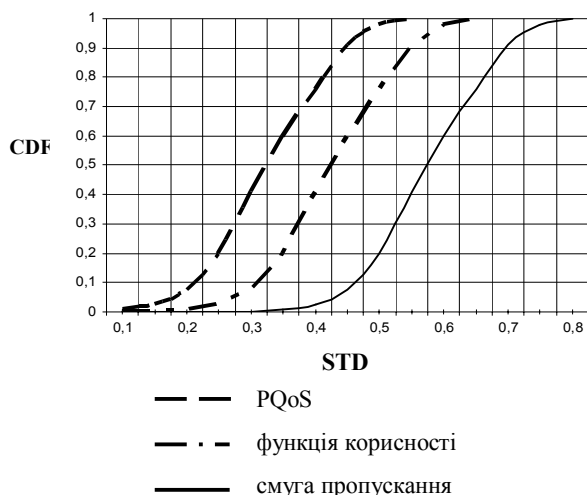


Рис. 5. Стандартне відхилення значень PQoS при використанні різних методів керування розподілом ресурсів мережі

Аналіз рис. 4 та 5 показує, що розподіл ресурсів мережі на основі показників PQoS дозволяє досягти переваги у рівномірності сприйняття якості обслуговування, у порівнянні із розподілом ресурсів мережі на основі значень функції корисності та при рівномірному розподілі пропускну́ї спроможності.

На рис. 6 наведена кумулятивні функції розподілу часу виконання алгоритму, який реалізує запропонований метод, як випадковій величині отриманої при 200 запусках математичної моделі при 30, 60 і 90 інформаційних потоках у мережі.

Аналіз отриманих часових показників підтверджує порівняно низьку обчислювальну складність запропонованого алгоритму, а також дозволяє зробити висновок про можливість виконання умови (4), з огляду на те, що для радіомереж УКХ діапазону інтервал кореляції зміни параметрів мережі під впливом повільних згасань і мобільності користувачів дорівнює одиницям – десяткам секунд.

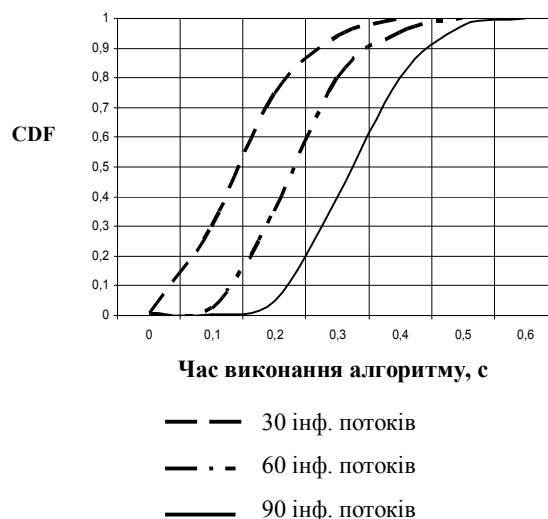


Рис. 6. Час виконання запропонованого алгоритму у системі Matlab при різних кількості інформаційних потоків

## Висновки

У статті доведена можливість і перспективність використання значення сприйняття якості обслуговування (PQoS) в якості показника в задачах мережного керування. Запропоновано метод забезпечення справедливого рівня PQoS абонентів mesh-радіомережі.

Запропонований метод відрізняється від відомих використанням у якості цільової функції оптимізації – PQoS, залежної від пропускну́ї спроможності, рівня завадостійкості та способу реалізації інформаційної послуги.

Результати, яких дозволяє досягти запропонований метод, перевищують результати стандартних та відомих перспективних методів забезпечення справедливого рівня якості обслуговування у mesh-радіомережах.

Під час подальших досліджень передбачається розширення переліку ресурсів радіомережі, керування якими забезпечує вирішення задачі забезпечення справедливого рівня PQoS абонентів mesh-радіомережі, а також реалізація запропонованого методу у радіомережах зі структурою Ad Hoc.

## Список літератури

1. Бунин С.Г. Перспективи беспроводных ячеистых сетей / С.Г. Бунин, А.И. Миночкин, В.А. Романюк // Зв'язок. – 2007. – № 5. – С. 20-24.

2. Минович А.И. Управление качеством обслуживания в мобильных радиосетях / А.И. Минович, В.А. Романюк // Зв'язок. – 2005. – № 8. – С. 17-23.
3. Wireless quality of service : techniques, standards, and applications / Edited by M. Maode, M.K. Denko, Y. Zhang. – Auerbach Publications, 2009. – 372 p.
4. Ganz A. Multimedia Wireless Networks: Technologies, Standards, and QoS / A. Ganz, Z. Ganz, K. Wongthavarawat. – Prentice Hall PTR, 2003. – 352 p.
5. Adaptation and cross layer design in wireless networks / Edited by M. Ibnkahla. – CRC Press. – 2009. – 526 p.
6. Романюк В.А. Архитектура системы оперативного управления тактичными радиомережами / В.А. Романюк // Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ «КПІ». – 2009. – № 3. – С. 70-76.
7. Kelly F. Charging and rate control for elastic traffic / F. Kelly // European Transactions on Telecommunications. – 1997. – № 8 – P. 33-37.
8. Xue Y. Optimal Resource Allocation for Wireless Mesh Networks / Y. Xue, Y. Cui, K. Nahrstedt // Wireless Mesh Networks. Architectures and Protocols. – Springer. – 2008. – P. 143-166.
9. Wang B. QoS-aware fair rate allocation in wireless mesh networks / B. Wang, M. Mutka // Computer Communications. – 2008. – V. 31, I. 7. – P. 1276-1289.
10. Dionysiou T. Utility-based channel assignment and topology control in wireless mesh networks / T. Dionysiou, V.A. Siris, G. Stamatakis // World of Wireless Mobile and Multimedia Networks: 2010 IEEE International Symposium. – Montreal, 2010. – P. 1-9.
11. Батлер Ю.В. О качестве услуг в IP-сетях / Ю.В. Батлер, В.Ф. Михайлов // Зв'язок. – 2006. – № 6. – С. 2-6.
12. Joint Network and Rate Allocation for Simultaneous Wireless Applications / D. Jurca, W. Kellerer, E. Steinbach, S. Khan, S. Thakolsri, P. Frossard // 2007 IEEE International Conference on Multimedia & Expo (ICME 2007), 2007. – P. 931-934.
13. Quality assessment of interactive voice applications / M. Valera, A. da Silva, E. Souza, R. Leao, G. Rubino // Computer Networks. – 2008. – № 6 (52). – P. 1179-1192.
14. Стрюк О.Ю. Метод максимізації корисності Mesh-радіомережі на основі показників сприйняття якості обслуговування абонентів / О.Ю. Стрюк // Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення: збірник матеріалів

п'ятої науково-технічної конференції. – Полтава: ВІПІ НТУУ «КПІ», 2010. – С. 44-49.

15. Вишневицкий В.М. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G / В.М. Вишневицкий, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2009. – 472 с.
16. Schoenen R. Multihop Extensions to Cellular Networks - the Benefit of Relaying for LTE / R. Schoenen // Long Term Evolution: 3GPP LTE Radio and Cellular Technology. – CRC Press, 2009. – P. 266 – 303.
17. Resource management in wireless networking / Edited by M. Cardei, I. Cardei, D-Z. Du. – Springer, 2005. – 716 p.
18. Multimedia Transcoding in Mobile and Wireless Networks / Edited by M. Ashraf, A. Ibrahim. – IGI Global, 2009. – 439 p.
19. Стрюк О.Ю. Метод розподілу пропускної спроможності базової станції радіомережі для забезпечення справедливого рівня інтегральної якості обслуговування абонентів / О.Ю. Стрюк, О.О. Лаврут // Системи управління навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НІУ, 2009. – Вип. 4 (12). – С. 179-185.
20. Chiang M. Stochastic network utility maximization / M. Chiang // European Transactions on Telecommunications. – 2008. – 00:1-22.
21. Стрюк А. Ю. Методика оценки оптимальности распределения ресурсов инфокоммуникационных сетей на основе показателя воспринимаемого качества обслуживания / А.Ю. Стрюк, И.Н. Пономарёв, А.В. Соловьёва // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – Х.: НАКУ «ХАІ», 2009. – № 6 (40). – С. 20-25.
22. Resource allocation in multiuser multicarrier wireless systems with applications to LTE / W. Freitas, R. Lima, R. Santos, F. Cavalcanti // Optimizing wireless communication systems. – Springer, 2009. – P. 187-232.

Надійшла до редколегії 19.10.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Краснобаев, Харьковський національний технічний університет ім. П. Василенко, Харків.

#### МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ СПРАВЕДЛИВОГО УРОВНЯ ВОСПРИЯТИЯ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ АБОНЕНТОВ MESH-РАДИОСЕТИ

А.Ю. Стрюк, А.А. Лаврут, Я.В. Янсонс

Проведен анализ восприятия качества обслуживания (PQoS), как целевой функции задачи сетевого управления. Сформулирована задача обеспечения справедливого уровня PQoS абонентов mesh-радиосети. Предложен алгоритм решения сформулированной задачи в mesh-радиосети с централизованным управлением.

**Ключевые слова:** mesh-радиосети, управление ресурсами радиосетей, восприятие качества обслуживания (PQoS), справедливый уровень PQoS.

#### PERCEIVED QUALITY OF SERVICE FAIR BANDWIDTH ALLOCATION IN THE MESH RADIO NETWORK

O.J. Striyuk, O.O. Lavrut, Y.V. Yansons

Presented the analyses of perceived quality of service (PQoS) as the objective function of network management. The objective function for PQoS fairness in mesh radio network is defined. Presents an algorithm of the centralized bandwidth allocation in the mesh radio network.

**Keywords:** mesh radio networks, resource management in wireless networking, perceived quality of service (PQoS), PQoS fairness.