

ОПТИМІЗАЦІЯ КЛЮЧОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ З МІЖРІВНЕВОЮ ВЗАЄМОДІЄЮ

Національний авіаційний університет

drovvlad47@gmail.com

Вступ

Контроль, розподіл та управління радіо ресурсами у безпроводових інформаційно-комунікаційних мережах мають вирішальне значення внаслідок природних обмежень частотно-енергетичного ресурсу за умов великого числа користувачів та мультимедійного характеру мережного трафіку. Ці завдання розв'язуються за допомогою спеціальних модулів управління радіо ресурсами – планувальників (*schedulers*). Щоб забезпечити потрібну якість сервісу (*Quality of Service, QoS*), адаптація до умов передачі по каналу повинна бути реалізована на всіх рівнях стека протоколів. Ключове питання, яке виникає, полягає в тому, чи можуть бути реалізовані методи адаптації на кожному рівні незалежно, у відповідності з класичним підходом до проектування вузлів в моделі взаємодії відкритих систем (*Open System Interconnection Reference Model, OSI*), або оптимізація повинна здійснюватися спільно на декількох рівнях стека протоколів (міжрівнева оптимізація).

Незалежна (локальна) адаптація на кожному з рівнів моделі *OSI* здійснюється послідовно. Відповідно, термін досягнення оптимального або хоча би близького до нього рішення у результаті являє собою суму усіх термінів локальної адаптації. Крім того, відомо, що час опрацювання мережної інформації на кожному з локальних рівнів моделі *OSI* є різним: чим вище рівень, тим більший час потрібний на опрацювання мережної інформації.

Оскільки до планувальників пред'являються високі вимоги стосовно швидко-

сті розв'язання завдань оптимального розподілу ресурсів (аж до вимоги роботи у реальному часі) з прийнятною якістю, задовольнити цим вимогам можна завдяки застосуванню методів розподіленого опрацювання службової інформації, зокрема, міжрівневої (*cross-layer*) оптимізації. Основним принципом міжрівневої оптимізації є комплексне рішення задачі ефективного використання обмеженого числа радіо ресурсів, що враховує ряд першорядних чинників: підвищення пропускної спроможності; забезпечення рівнодоступності – справедливого (*fair*) поділу ресурсів між користувачами; досягнення необхідної або, принаймні, найкращої можливої якості обслуговування.

Переваги міжрівневого підходу безпосередньо пов'язані з принципами функціонування безпроводової мережі. Характеристики безпроводових каналів зв'язку впливають на всі рівні стека мережних протоколів, і тому всі рівні реагують на зміну стану каналу. Крім того, існує тісний зв'язок між протоколами різних рівнів. Наприклад, на фізичному рівні параметри приймача (ширина смуги пропускання, амплітудно-частотна та фазочастотна характеристики тощо) можуть бути налаштовані динамічно реагувати на зміни завад; на каналному рівні потужність, швидкість і спосіб кодування також можуть адаптуватися, щоб мінімізувати рівень завад; на рівні *MAC* адаптивне планування може бути реалізовано на основі поточного рівня завад і поточної якості лінії зв'язку; адаптивна маршрутизація (для спеціальних мереж) або м'яка естафетна передача обслуговування (в стільникових системах)

можуть бути реалізовані у відповідь на поточний рівень завад і розподіл навантаження в мережі; на прикладному рівні можна визначити м'яку *QoS*, де вимоги до *QoS*-додатків динамічно коригуються в залежності від поточних рівнів завад.

Всі перераховані вище протоколи адаптації реагують і впливають на рівень завад і розподіл ресурсів у мережі. Як наслідок, для ефективного використання мережі протоколи адаптації кожного рівня повинні бути інтегрованими, щоб можна було використовувати взаємозалежності між рівнями.

Інтеграція різних методів адаптації на різних рівнях, зокрема, взаємодія між кодуванням джерела і каналу і взаємодія між протоколами каналного рівня і протоколом управління транспортного рівня (*TCP*) має вирішальне значення для продуктивності безпроводових мереж.

Міжрівнева оптимізація алгоритмів управління ресурсами для різних мережних сценаріїв здійснюється з урахуванням різних показників продуктивності. Для мереж *AdHoc* та сенсорних мереж маршрутизація з енергозбереженням базується на взаємозв'язку і взаємозалежності між усіма рівнями стека протоколів, рівно як і між усіма мережними вузлами.

Розробка міжрівневих протоколів розширює можливості мережі по адаптації: інформація про ефективність може передаватися між рівнями для оптимальної реакції на зміни умов передачі. Інтегрований адаптивний протокол повинен, як і раніше, мати ієрархічну структуру, оскільки зміни в мережі відбуваються в різних часових масштабах: наприклад, зміни в досягнутому відношенні сигнал/завада в лінії (*Signal-to-Interference Ratio, SIR*) дуже швидкі, порядку мікросекунд для високошвидкісної мобільності, в той час як зміни в трафіку користувачів набагато повільніше: від десятків до сотень мілісекунд. Швидкість адаптації для конкретного протоколу визначається його місцем розташування в стеку протоколів. Однак обмін ін-

формацією між рівнями і спільна оптимізація можуть значно поліпшити продуктивність системи.

Аналіз літературних джерел

Однією з ключових проблем у наданні мультимедійних послуг через безпроводову мережу зі стаціонарними та мобільними абонентами є підтримка якості обслуговування (*Quality of service, QoS*). За наявності мобільних абонентів ця проблема дедалі ускладнюється. Комунікаційні канали можуть потерпати від непередбачуваних розривів з'єднань; вони є зашумленими, нестабільними, мають обмежені інформаційні та енергетичні ресурси. Якщо у мережах зі стаціонарними абонентами циркулює мультимедійний трафік класу *Triple Play* (мова, відео, дані) з доволі складними статистичними характеристиками, то при наявності мобільних абонентів мультимедійну інформацію вже треба відносити до класу *Quadruple Play* (мова, відео, дані плюс інформація мобільних абонентів). Статистичні характеристики мультимедійного трафіку мобільних абонентів значно ускладнюються навіть у порівнянні з відповідними характеристиками трафіку *Triple Play*.

У численних науково-дослідних роботах та практичних розробках запропоновано різні методи підтримки *QoS* для мультимедійних застосунків на різних рівнях безпроводових мереж. На рівні застосунків моделі *OSI* нові мультимедійні системи перетворення даних адаптуються до змін мережних умов, таких як пропускна спроможність та якість зв'язку. На мережному рівні розробляються протоколи обміну, які є мало чутливими до мобільності абонентів та раптовими розривами з'єднань. На рівні каналу передачі даних протоколи контролю доступу до середовища модифікуються таким чином, щоб можна було підтримувати резервування та забезпечити гарантії якості. Аналогічно, механізми корекції помилок можуть захищати від нестаціонарних помилок передачі по безпроводових каналах (найчастіше, по радіоканалу). На фізичному рівні схеми модуля-

ції, контролю потужності передачі та чутливості приймачів також розробляються з орієнтацією на *QoS*.

У більшості монографій, статей, матеріалів конференцій, технічних доповідей [1-4,6-8,18,20] обговорюються механізми мережного рівня, тобто оцінки резервування ресурсів та контроль прийому викликів в рамках єдиної системи управління радіоресурсами для підтримки мультимедійних програм у безпроводових мережах різного масштабу та призначення, з різними вимогами *QoS*, такими як пропускна здатність, затримка/джитер та пріоритетність потоку. Схеми контролю прийому викликів дозволяють надавати належну якість сервісу *QoS* як існуючим, так і новим викликам [4,5]. Схеми резервування ресурсів [7] використовуються для надання необхідних ресурсів певним викликам високого пріоритету. З іншого боку, від мережі потрібно скористатися усіма перевагами обміну ресурсами між потоками трафіку, щоб досягти найкращого використання каналів. Однак досягнення правильного балансу між цими двома суперечливими критеріями є великою проблемою [14].

Іншою проблемою є надання мультимедійних послуг через мобільну безпроводову мережу з підтримкою наскрізної якості сервісу (*End-to-EndQoS*) при передаванні інформації через безпроводову мережу з її особливою специфікою, про яку вже коротко згадувалося вище: зашумленість каналів, затримки та джитер, раптові розриви та відновлення з'єднань тощо. Тут можна додати також проблему прихованих вузлів та множинного доступу з виключенням колізій, що об'єктивно приводить до додаткових затримок доставки даних.

Хоча проблема забезпечення наскрізної якості сервісу безумовно визнається авторами практично усіх монографій та статей, конкретні розв'язки задач оптимізації наскрізної якості сервісу в мережах з багатьма транзитними ділянками у доступних нам джерелах майже не зустрічаються. Винятками можуть служити роботи

[13,15,19], але й там вирази у замкненій формі для використання при розробці практичних алгоритмів та програм не наводяться.

Останнім часом у технічній літературі, зокрема, в літературі з мережних систем стало поняття так званої "функції корисності" (*Utility Function*), яке широко застосовувалося в економіці та економетриці. Наприклад, у роботах [1,16-18,23] поняття функції корисності, по суті, формально ототожнюється з поняттям якості сервісу *QoS*. У роботі [24], мабуть, уперше відмічено, що енергетична складова *QoS* розглядається як така, що безпосередньо ув'язана з відповідною енергетичною складовою функції корисності. У роботі [25] уведено поняття так званої мережної функції корисності, яка начебто характеризує наскрізну якість сервісу. Однак ніяких конструктивних підходів до аналізу та застосування мережної функції корисності для оптимізації наскрізної якості сервісу не наводиться. Єдиним виправданням для застосування мережної функції корисності вважається те, що остання являється інтуїтивно прозорою завдяки можливості її нормування (на відміну від *QoS* з такими незрозумілими для авторів параметрами, як затримка та втрати при доставці). У той же час в літературі [26-30] наводиться дуже довершені та наочні методи чисельного аналізу та вибору метрик для розрахунків та нормування *QoS*, в тому числі наскрізної *QoS*.

Однак проблему управління якістю сервісу треба розглядати більш широко. Справа в тому, що для будь-якої інформаційно-обчислювальної або інформаційно-комунікаційної мережі як складної інформаційної системи якість сервісу є комплексною характеристикою, яка включає декілька ключових параметрів. Головною вимогою до мережі є виконання її основної функції – забезпечення користувачам потенційної можливості доступу до ресурсів всіх термінальних вузлів, об'єднаних в мережу, причому доступ має бути забезпечений без затримки (або з прийнятною для користувача затримкою). Всі інші вимоги

– продуктивність, надійність, сумісність, керованість, захищеність, розширюваність і масштабованість – пов'язані з якістю виконання цієї основної задачі.

Математичні моделі якості сервісу в сучасних мережах необхідно будувати з урахуванням взаємного зв'язку та взаємної залежності ключових параметрів як компонентів цієї багатомірної комплексної характеристики. Згадані проблеми у доступних нам джерелах розглянуті недостатньо повно, тому дана стаття є спробою закрити (хоча б частково) цю прогалину.

Модель якості сервісу в безпроводовій мережі

У літературі по безпроводовому зв'язку поняття якості сервісу тісно пов'язують з корисністю [24]. Функція корисності – це міра задоволеності, яку відчуває користувач, використовуючи продукт чи послугу. Встановлюючи мінімальне співвідношення сигнал-завада для мовного трафіку, корисність умовно представляють як ступінчасту функцію відношення сигнал-завада.

Характеристики системи вважаються неприйнятними (корисність = 0), коли відношення сигнал-завада $q_{sn} = \frac{2E_s}{N_0}$ нижче цільового рівня q_0 . Коли $q_{sn} > q_0$, припускається, що функція корисності f_u є прийнятною та постійною (корисність = 1). За таких умов алгоритми управління потужністю будуються з тих міркувань, що немає сенсу намагатися необмежено нарощувати співвідношення сигнал/ завади плюс шуми, (Signal-to-Interference-Plus-Noise-Ratio – SINR) вище заданого цільового рівня.

Як локальна якість сервісу на окремій транзитній ділянці, так і наскрізна якість сервісу (*End-to-EndQoS*) є більш широкими поняттями, ніж функція корисності. Основними параметрами *QoS* є затримка, втрати та ймовірність помилок. До цих параметрів додаються інші параметри, що не мають принципового характеру. На-

приклад, для мовного трафіку важлива низька затримка, а помилки передачі є припустимими до певного рівня. Навпаки, трафік даних мало чутливий до затримок, але має високу чутливість до помилок.

У мережах з мультимедійним трафіком (*TriplePlay*, *QuadruplePlay*) необхідно застосовувати підходи, засновані на багатовимірній наскрізній *QoS*. Вона включає триплет якості такого виду:

- пропускна спроможність, від якої прямо залежить швидкість передачі та (опосередковано) затримка доставки з її варіаціями;
- максимально припустиме число втрат пакетів та повторних передач;
- імовірність бітових помилок (*BitErrorRatio* – BER).

Пріоритет тих чи інших параметрів *QoS* міняється в залежності від динамічних змін параметрів трафіку.

На рис.1 зображені графіки нормованих функцій якості сервісу та корисності. Для мультимедійного трафіку, який є самоподібним за визначенням, спостерігаються імовірнісні розподіли інтенсивності з так званими "важкими хвостами". У математичному сенсі це відповідає більший імовірності малих значень щільності розподілів. Тому при збільшенні середньої інтенсивності функція якості сервісу мультимедійного трафіку наростає повільніше, ніж у випадку простішого (пуасонівського) трафіку.

У будь-якому випадку якість сервісу є функціоналом профілю навантаження на мережу: локальна *QoS* – навантаження на транзитну ділянку, що розглядається, наскрізна *QoS* – навантаження на весь маршрут від відправника до отримувача.

Цифрова мережа є дискретною системою. Безпроводова мережа з випадковим доступом, строго кажучи, представляє собою складну систему з випадковими параметрами. Задача оптимізації якості сервісу такої мережі є задачею цілочисельного стохастичного програмування.

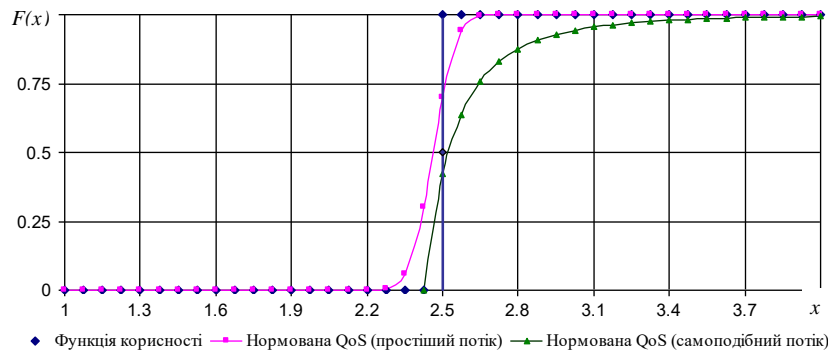


Рис. 1. Якість сервісу та функція корисності, нормовані відносно SINR

Аргументами функціоналу якості сервісу на каналному (MAC) підрівні та мережному (IP) рівні мережі є як детерміновані, так випадкові параметри мережного навантаження:

- I_{tr} – інтенсивність трафіку;
- L_m – довжина повідомлення;
- P_{rt} – пріоритет повідомлення;
- MAC_{adr}, IP_{adr} – адреси каналного (MAC) підрівня та мережного (IP) рівня відповідно.

$$QoS_{MAC,IP} = \Psi \{ I_{tr}, L_m, P_{rt}, MAC_{adr}, IP_{adr} \} \quad (1)$$

Параметри мережного навантаження на транспортному рівні визначаються наступними параметрами потоку трафіку:

- \hat{I}_{tr} – середня інтенсивність трафіку;
- L_m – середня довжина повідомлення;
- P_{rt} – випадковий пріоритет повідомлення;
- TCP_{adr} – адреса транспортного (TCP) рівня.

У результаті отримуємо функціонал наскрізної якості сервісу на транспортному рівні:

$$QoS_{TCP} = \Psi \{ \hat{I}_{tr}, L_m, P_{rt}, TCP_{adr} \}. \quad (2)$$

Нехай $\delta\tau_l$ – максимальний період локальної стаціонарності інтенсивності

$$QoS_{e2e} \{ \beta_1 C_{th}, \beta_2 \hat{\tau}_l, \beta_3 f_{err} \} = \Psi \{ \alpha_1 \hat{I}_{tr}, \alpha_2 L_m, \alpha_3 P_{rt}, \alpha_4 TCP_{adr}, \alpha_5 MAC_{adr}, \alpha_6 IP_{adr} \}, \quad (4)$$

трафіку. Враховуючи, що для унімодальних розподілів інтенсивності трафіку на інтервалі спостереження

$$T_{srch} >> \hat{L}_m, T_{srch} > \frac{\Delta \hat{I}_{tr}}{\delta\tau_l},$$

оцінки середніх значень інтенсивності трафіку та довжини повідомлення \hat{I}_{tr}, \hat{L}_m є ефективними та незміщеними [1,2,12-14], можна замінити ними істинні значення I_{tr}, L_m . Функціонал наскрізної якості сервісу (на мереженезалежних рівнях моделі OSI) стає лінійною комбінацією функціоналів (1) та (2):

$$QoS_{e2e} = \Psi \{ \alpha_1 \hat{I}_{tr}, \alpha_2 L_m, \alpha_3 P_{rt}, \alpha_4 TCP_{adr}, \alpha_5 MAC_{adr}, \alpha_6 IP_{adr} \} \quad (3)$$

де $\alpha_i, 1 \leq i \leq 6, \sum_{i=1}^6 \alpha_i = 1$ – вагові коефіцієнти, що підбираються шляхом проведення тестів продуктивності мережного обладнання.

Нарешті, для забезпечення норм на QoS у відповідності до рекомендацій Y.1564-201602-III – паспортизація потоку трафіку – зазвичай використовують наступні параметри (ключовий триплет якості сервісу):

- пропускна спроможність C_{th} ;
- затримка передачі τ_{it} та її розподіл $w(\tau_{it})$;
- середня кількість бітових помилок у потоці \hat{f}_{err} .

Тоді узагальнений функціонал наскрізної якості сервісу QoS_{gen} приймає остаточний вид:

де $\beta_j, 1 \leq j \leq 3, \sum_{j=1}^3 \beta_j = 1$ – вагові коефіцієнти, що підбираються з тих же міркувань, що й коефіцієнти α_i ; \hat{t}_{it} – математичне сподівання затримки передачі.

У результаті функціонал наскрізної якості сервісу матиме десятивимірний простір станів навіть для одного потоку трафіку та при обмеженні параметрів розподілу затримки передачі лише двома моментами: математичним сподіванням \hat{t}_{it} та дисперсією σ_{it}^2 . При невизначеній кількості транзитних ділянок, потоків трафіку, вимірів триплету якості сервісу задача набуває надполіноміальної (NP) складності.

Введемо умови знаходження рішення задачі оптимізації функціоналу (4), визначеного на підмножинах потоків трафіку N_{Tf} та параметрів розподілу затримки передачі N_{Trdl} .

1. Оскільки мережа, по якій доставляються повідомлення, є складною системою за визначенням, для будь-яких підмножин $N_{Tf}, N_{Trdl} \subseteq N_{Glob}$ виконується нерівність

$$QoS_{e2e} \{N_{Tf}\} + QoS_{e2e} \{N_{Trdl}\} \leq (N_{Tf} \cap N_{Trdl}) + QoS_{e2e} (N_{Tf} \cup N_{Trdl}), \quad (5)$$

тобто функціонал (4) є супермодулярним.

2. Під складністю розуміється велике число елементів та процесів, які протікають у системі. Має місце ефект нормалізації, отже, для аналізу системи справедливо використовувати гаусівське наближення, а функціонали виду (4) вважати унімодальними.

Методи оптимізації наскрізної якості сервісу

Найбільш перспективним підходом до розв'язання цієї проблеми є використання методів теоретичного аналізу та оптимізації наскрізної якості сервісу на підґрунті результатів моделювання потоків мультимедійного мережного трафіку. Задачі пошуку оптимального маршруту в мережі з N вузлами є задачами цілочисельного програмування, тісно пов'язаними з проблемами комбінаторної та дискретної

математики. Якщо ж розглядати математичну суть, вони відносяться до класичної задач про потоки в мережах [27] як різновид квадратичних задач розміщення [29,30].

Проведемо порівняльний аналіз точних та наближених алгоритмів цілочисельного (або дискретного) програмування, базуючись на роботах [26,27].

Одним з перших точних алгоритмів розв'язання задачі цілочисельного програмування є метод послідовних розрахунків. Цей метод заснований на властивості супермодулярності цільової функції, завдяки чому відкидаються явно неперспективні множини припустимих рішень. Цей метод доволі простий, але потребує строгої опуклості числового аргументу на функціоналах. Крім того, він придатний лише для задач малої розмірності. Тому його можливості є вельми обмеженими.

Більш потужними точними методами розв'язання задач про потоки в мережах є симплекс-метод Данцига, метод гілок та границь, метод релаксацій Лагранжа та ін. Продуктивність цих методів залежить від того, наскільки великою є відмінність між цілочисельним рішенням та рішенням відповідної задачі математичного програмування ("розрив двоїстості"). Іншими словами, величина розриву двоїстості є мірою обчислювальної складності задачі.

Якщо ж брати на увагу імовірнісний характер деяких параметрів потоків у мережах, неминуче приходиться задіювати наближені методи. Наприклад, замість класичного методу гілок та границь використовують його стохастичний аналог – метод стохастичних гілок та границь. Тут треба відмітити, що квадратична задача розміщення у її стохастичному варіанті, по-перше, є однією з найбільш трудомістких задач у цій області, а по-друге, точні методи її розв'язання принципово мають надполіноміальну складність [26]. Природно, точні методи оптимізації наскрізної якості сервісу в безпроводових мережах з випадковим доступом мають суто теоретичне значення. Тому треба застосовувати

наближені методи, які на даний час є фактично єдиним способом розв'язання проблеми.

На цей час найбільш розвиненими наближеними методами є евристичні та

метаевристичні методи локального пошуку [28,29]: табу-пошук, імітація відпалу, генетичні алгоритми тощо. Розглянемо умовну схему розташування вузлів мережі з множинним доступом (рис.3).

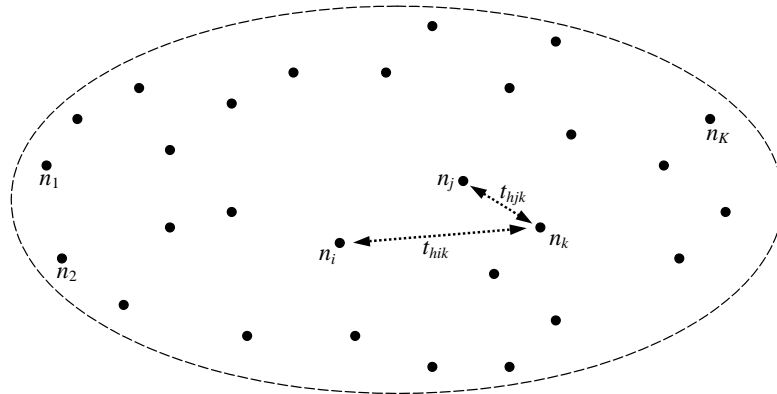


Рис. 3. Схема розташування вузлів безпроводової мережі. Вузол n_1 – джерело; вузол n_k – отримувач

Теоретично кожен вузол мережі може встановлювати з'єднання з будь-яким іншим вузлом. Максимальна кількість з'єднань N_{\max} у мережі визначається числом сполучень C_K^2 :

$$N_{\max} = C_K^2 = \frac{K!}{2!(K-2)!} = \frac{K!}{2} \cdot \frac{1}{(K-2)!} \quad (5)$$

На практиці кількість можливих з'єднань N_{pos} визначається енергетичним ресурсом E_r пари вузлів $\{n_i, n_j\}$. У свою чергу, енергетичний ресурс залежить від потужностей передавальних пристроїв $T_{\Sigma i}, T_{\Sigma j}$, характеристик антенних пристроїв G_i, G_j , чутливостей приймальних пристроїв P_{reci}, P_{recj} та безлічі інших параметрів, які входять у рівняння дальності зв'язку, а також від висоти підвісу антен, умов розповсюдження тощо. Багато цих параметрів є принципово випадковими (наприклад, внутрішні шуми приймачів), інші мають адитивні випадкові складові. Крім того, енергетичний ресурс автономних мережних вузлів також повільно зменшується внаслідок розрядження джерел живлення. Радіотехнічні аспекти організації безпроводових мереж з множинним доступом та великою кількістю транзитних ділянок достатньо докладно розглянуті у роботах [8,13,14].

Причини виникнення випадковостей при організації обміну даними у безпроводових мережах неможливо ані врахувати, ані усунути. Тому задача розрахунку кількості можливих з'єднань N_{pos} є статистичною за визначенням.

Для спрощення розглянемо задачу забезпечення наскрізної якості сервісу (*e2e QoS*) при обміні даними між джерелом (першим термінальним вузлом) та отримувачем (K -м термінальним вузлом). Вважаємо, що маршрут доставки даних R_{1K} містить M транзитних ділянок та обраний оптимальним чином за триплетом $\{T_{TPutm}, L_{tcm}, P_{jittm}\}, 1 \leq m \leq M$. На m -й транзитній ділянці T_{TPutm} – пропускна спроможність, від якої залежить швидкість передачі даних; L_{tcm} – затримка передачі даних.

Цільова функція задачі оптимізації маршруту доставки даних R_{1K} є функціоналом деякого комплексного критерію:

$$R_{1K} = \Psi(T_{TPut}, L_{tc}, P_{Jit}) \xrightarrow[\substack{E[T_{TP\Sigma}] \rightarrow \max \\ L_{tc\Sigma} \rightarrow \min \\ P_{Jit\Sigma} \rightarrow \min}]{R_{1K \text{ opt}}} \quad (6)$$

де $E[T_{TP\Sigma}]$ – математичне очікування пропускної спроможності на маршруті від джерела даних (перший термінальний

вузол) до вузла призначення (M -й термінальний вузол); $L_{t_{\Sigma}}$ – сумарна затримка на маршруті; $P_{j_{it\Sigma}}$ – максимальне значення імовірності виникнення джитеру на маршруті.

Іншими словами, при виборі оптимального маршруту треба враховувати пропускну спроможність, сумарну затримку та джитер на кожній транзитній ділянці. Загальна мета процесу оптимізації полягає у визначенні маршруту з мінімальним числом транзитних ділянок, що покривають необхідну область із забезпеченням заявленої якості сервісу. Функціонал (6) також логічно вважати супермодулярним та уні-модальним.

У роботі розроблений алгоритм розв'язання квадратичної задачі про призначення, заснований на класичній схемі з локальним пошуком для поліпшення отриманих рішень. У даній реалізації в якості локального методу використаний метод табу-пошуку, як один з найбільш успішних методів розв'язання квадратичної задачі про призначення [28,29]. Для прискорення роботи алгоритму застосована технологія локальної оптимізації з апостеріорною корекцією.

Нехай у зоні дії безпроводової мережі є множина M потенціально можливих точок розміщення вузлів. Вартість передавання даних C_m через m -й вузол пов'язана з кожним варіантом формування транзитної ділянки h_{cjk} . Також задано множину контрольних точок (КТ) $p_i, i = 1, \dots, N$. Кожна КТ розглядається як деякий центроїд, де циркулює певний обсяг трафіку v_i і де гарантується задана якість сервісу (у першу чергу – ключовий триплет "пропускну спроможність – затримка – кількість бітових помилок"). Необхідна кількість одночасних активних з'єднань для i -ї КТ, що позначається C_{ni} , виявляється функцією потрібного обсягу трафіку, тобто $g_i = \psi(d_i)$. Розмірність або число ступенів свободи завдання планування є фактичним визначенням функції Ψ . Вона може відповідати середньому числу

активних з'єднань або кількості одночасних з'єднань з ймовірністю P_{di} , не вище заданої величини.

Також вважається відомим обсяг переданих даних. Нехай $f_{ij}, 0 \leq f_{ij} \leq 1$, є певний коефіцієнт обсягу переданих даних між i -ю КТ, $1 \leq i \leq n$, і обраною в зоні КТ точкою розміщення j -го вузла, $1 \leq j \leq m$. Матрицею коефіцієнтів поліпшення $R = \|r_{ij}\|, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$ характеризується порівняльна ступінь відповідності обраних моделей передавання.

У задачі розміщення КТ необхідно вибрати підмножину варіантів розміщення в межах множини M , і розставити контрольні точки до доступних мережних вузлів, беручи до уваги очікуваний обсяг трафіку та необхідну якість сервісу за критерієм норми QoS :

$$\|QoS\| = \left(|w_{th} C_{th}|^2 + |w_{lt} \tau_{lt}|^2 + |w_{err} f_{err}|^2 \right)^{1/2},$$

де w_{th}, w_{lt}, w_{err} – коефіцієнти масштабування та нормування триплету якості сервісу.

Визначимо наступні класи рішень:

$y_j = 1$, якщо мережний вузол знаходиться у зоні j -ї КТ; (7a)

$y_j = 0$ в іншому випадку (7б)

для усіх $j \in M$, та $x_{ij} = 1$, якщо j -та КТ пов'язана з i -м мережним вузлом; (8a)

$x_{ij} = 0$ в іншому випадку. (8б)

З урахуванням базового функціоналу (6) та припустимих класів рішень (7)-(8) сформулюємо модель цілочисельного комбінаторного програмування, яка представляє собою класичну задачу мінімізації витрат мережного ресурсу

$$\min \left(\sum_{j=1}^m c_j y_j + \mu \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u_i \frac{1}{r_{ij}} x_{ij} \right) \quad (9)$$

за умовою нормування

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \quad i \in N \quad (10)$$

та додаткових обмеженнях

$$x_{ij} \leq y_j; \quad x_{ij}, y_j \in \{0;1\}; \quad i \in N, j \in M \quad (11)$$

Перший доданок цільової функції відповідає загальній вартості передавання даних по маршруту. Оскільки $1/r_{ij}$ є функція, пропорційна випромінюваній потужності від i -ї КТ, пов'язаної з j -м мережним вузлом, другим доданком описується чергова КТ, для якої загальна потужність випромінювання мінімальна. Оскільки критерії пошуку мінімуму за обома складовою суперечливі, вводиться деякий коефіцієнт компромісу $0 \leq \mu \leq 1$. Умова (10) є гарантією, що кожна i -та КТ асоціюється з єдиним мережним вузлом. Обмежуюча умова (11) означає, що КТ задані тільки для тих точок, де на даний момент є мережні вузли. Відзначимо, що, оскільки змінні є бінарними, в кожному допустимому рішенні всі активні з'єднання можуть бути віднесені тільки до однієї БС.

Враховуючи величезну ресурсоемність задач комбінаторної оптимізації, можна запропонувати наближені методи, про які вже згадувалося раніше, зокрема, евристичні алгоритми. При їх застосуванні можна отримати рішення з прийнятною точністю за доступний для огляду час і з прийнятними потреб ресурсами. Тут необхідно враховувати наступні фактори. По-перше, швидкість збіжності алгоритму сильно залежить від вдалого вибору початкового наближення. По-друге, точність отриманого рішення залежить не тільки від точності завдання вихідних даних, але і від детальності їх подання. Може трапитися, що при зайвої деталізації статистичних характеристик мереж виникнуть додаткові локальні мінімуми цільової функції, що призведе до підвищення ризику заціклення на одному з них. Ці питання носять системний характер. Вони розглянуті в подальших дослідженнях.

Основні елементи алгоритму

1. Набір параметрів, що оптимізуються. У нашому випадку це число мережних вузлів, потужності сигналу на входах приймачів мобільних і стаціонарних вузлів, пропускна спроможність каналів.

2. Пробне і поточне рішення. Це елементи пошуку та порівняння поточних результатів рішення.

3. Кроки пошуку, які характеризують процес генерації пробних рішень, пов'язаних з поточним станом пошуку.

4. Набір можливих напрямів кроку пошуку – набір пробних рішень, близьких до поточного рішенням. У розглянутій задачі частина аргументів є неперервними величинами, отже, безліч пробних рішень може прагнути до нескінченності. Для практичної реалізації алгоритму оперують на підмножині з обмеженим числом пробних рішень.

5. Обмеження на деякі кроки пошуку, які виявилися невдалими. Заборонені кроки запам'ятовуються і в подальшому не застосовуються. Ефективність рішення (швидкість збіжності, відсутність заціклення на локальних екстремумах) безпосередньо залежить від числа виявлених невдалих кроків. Розмір списку заборонених кроків пов'язаний з розмірністю завдання. У деяких джерелах вказується, що досить ефективним є найпростіший вибір розміру списку близько 7. При практичної апробації найкращі результати були отримані при розмірі списку близько $n/3$, де n – розмірність задачі. Для завдань забезпечення наскрізної якості сервісу розмір списку зазвичай не перевищує 25%-35% від розмірності задачі.

6. Критерій подолання – правило ігнорування заборони. Якщо за результатами поточної проби заборонений крок призводить до вирішення з кращого цільовою функцією, ніж та, що була отримана на тому ж кроці, цей крок приймається. Гнучкість процедури пошуку дещо підвищується.

7. Критерій зупинки – умова, при якому процес пошуку припиняється. Це може бути перевищення допустимого числа ітерацій після останньої зміни найкращого рішення або перевищення максимально допустимого числа ітерацій.

Висновки

1. При вирішенні завдань забезпечення якості сервісу безпроводових мереж

з випадковим доступом необхідно врахувати не тільки розмір зони покриття, але і якість сервісу, яка, зокрема, залежить як від загального числа користувачів, так і від числа користувачів в кожному осередку зони покриття.

2. Евристичні алгоритми комбінаторної оптимізації при своїй відносній простоті є досить ефективними для вирішення завдань забезпечення наскрізної якості сервісу. Модифікації алгоритму з урахуванням специфіки предметної області дозволяють підвищити ефективність пошуку транзитних ділянок, на яких досягається економія частотно-енергетичного ресурсу.

3. Додатковий вигравш в точності розрахунків і, як наслідок – в економії потрібного числа мережних вузлів та транзитних ділянок можна отримати завдяки врахуванню радіотехнічних аспектів управління частотними, енергетичними та територіальними ресурсами мереж.

4. У подальшому планується розробити адаптивний алгоритми управління ресурсами для оптимізації якості сервісу в безпроводових мережах з випадковим доступом до мобільних абонентів, дослідити їх характеристики економічності, надійності та швидкодії.

Література

1. *Comaniciu C.* Wireless networks: multiuser detection in cross-layer design / Cristina Comaniciu, Narayan B. Mandayarn, H. Vincent Poor. – Springer Science+Business Media, Inc., 2005. – 202 p.

2. *Sarangapani J.* Wireless Ad Hoc and Sensor Networks: Protocols, Performance, and Control / – CRC Press, Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742, 2007. – 514 p.

3. *Shariat M., Quddus A.U., Ghorashi S.A., Tafazolli R.* Scheduling as an Important Cross-Layer Operation for Emerging Broadband Wireless Systems // IEEE Commun. Surveys Tuts. – 2009. – V. 11, №. 2. – P. 74-86.

4. *Vegesna S.R.* IP Quality of Service. – Pearson Education, Cisco Press, 2019, 221 River Street, Hoboken, NJ 07030. – 368 p.

5. *Chandra I.* Optimization of QoS parameters using scheduling techniques in heterogeneous network // I. Chandra, K. Helen Prabha, N. Sivakumar. – Personal and Ubiquitous Computing, Springer-Verlag London Ltd, 2018. – 8 p

6. *Lin X., Shroff N., Srikant R.* A Tutorial on Cross-Layer Optimization in Wireless Networks // IEEE J. Sel. Areas Commun. 2006. – V. 24. – № 8. – P. 1452-1463.

7. *Hossain E.* Radio Resource Management in Wireless Networks: An Engineering Approach, 1st Edition / Ekram Hossain, Mehdi Rasti, Long Bao Le. – Cambridge University Press, 2017. – 431 p.

8. *Zhang R.* Resource Management for Multimedia Services in High Data Rate Wireless Networks / Ruonan Zhang, Lin Cai, Jianping Pan. – Springer, 2017. – 145 p.

9. Radio Resource Management White Paper – Cisco, 2018. – [Електронний ресурс.] Режим доступу: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/controller/technotes/8-1/mobility_express/b_RRM_White_Paper/

10. *Amiri C.A.* WQLB: WiMAX QoS Aware Load Balancing Protocol. // Amiri C. A., Aghdam, S. M. – 2012 IEEE 12th International Conference on Computer and Information Technology. – P. 615-622.

11. *Hasan M.Z.* Optimized Quality of Service for Real-Time Wireless Sensor Networks Using a Partitioning Multipath Routing Approach. // Mohammed Zaki Hasan, Tat-Chee Wan. – Hindawi Publishing Corporation, Journal of Computer Networks and Communications, 2013. – 18 p.

12. *Гайдамака Ю.В.* Модели и методы анализа показателей эффективности функционирования мультисервисных и одноранговых сетей // Дисс. докт. физ-мат. наук. – М.: РУДН, 2017. – 235 с.

13. *Lozovanu D.* Optimization of Stochastic Discrete Systems and Control on Complex Networks: Computational Networks. / Dmitrii Lozovanu, Stefan Pickl. – Springer International Publishing, Switzerland, 2015. – 400 p.

14. *Liu Q.* Stochastic Control and Filtering over Constrained Communication Networks / Qinyuan Liu, Zidong Wang, Xiao He. – Springer Nature Switzerland AG, 2019. – 222 p.
15. *Szigeti T.* End-to-End QoS Network Design, 2nd ed. / Tim Szigeti, Robert Barton, Christina Hattingh, Kenneth Briley, Jr. – Cisco Press, 800 East 96th Street, Indianapolis, IN 46240, 2013. – 1090 p.
16. *Khan S.* Exponential utility function-based criteria for network selection in heterogeneous wireless networks // Shoaib Khan, Mian Ilyas Ahmad, Farhan Hussain. – Electronic Letters. – 2018. – V. 54. – №. 8. – P. 529-531.
17. *Vigneri L.* Large-Scale Network Utility Maximization: Countering Exponential Growth with Exponentiated Gradients // Luigi Vigneri, Georgios Paschos, Panayotis Mertikopoulos. – INFOCOM 2019 – IEEE International Conference on Computer Communications, Apr 2019, Paris, France. – P. 1630-1638.
18. *Sinha A.* Network Utility Maximization with Heterogeneous Traffic Flows // Abhishek Sinha, Eytan Modiano. - IEEE 16th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt), Shanghai, China, 24 May 2018. – 8 p.
19. *Pateromichelakis E.* End-to-End QoS Optimization for V2X Service Localization // Emmanouil Pateromichelakis, Chan Zhou, Prajwal Keshavamurthy, Konstantinos Samdanis. – 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Waikoloa, HI, USA, 2019. – 6 p.
20. *Kasgari A.T.Z.* Stochastic optimization and control framework for 5G network slicing with effective isolation. // Ali Taleb Zadeh Kasgari, Walid Saad. – 2018 52nd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), IEEE, Princeton, NJ, USA, 21-23 March 2018. – 6 p.
21. *Zadeh K.A.T.* Brain-Aware Wireless Networks: Learning and Resource Management // Ali T. Zadeh K., Walid Saad, Merouane Debbah. – IEEE 2017 51st Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 29 Oct.-1 Nov. 2017. – 5 p.
22. *Liotou E.* QoE-SDN APP: A Rate-guided QoE-aware SDN-APP for HTTP Adaptive Video Streaming // Eirini Liotou, Konstantinos Samdanis, Emmanouil Pateromichelakis, Nikos Passas, Lazaros Merakos. – IEEE Journal on Selected Areas in Communications, March 2018. – V. 36. – Iss. 3. – P. 598-615.
23. *Jurdak R.* Wireless Ad Hoc and Sensor Networks: A Cross-Layer Design Perspective. – Springer Science+Business Media, LLC., 2007. – 264 p.
24. *Goodman D.* Power Control for Wireless Data. // D. Goodman, N. Mandayam. – 1999 IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC'99), San Diego, CA, USA. – IEEE Xplore, 2002. – 9 p.
25. *Fiedler M.* The Network Utility Function: A Practicable Concept for Assessing Network Impact on Distributed Services // Markus Fiedler, Stefan Chevul, Olaf Radtke, Kurt Tutschku, Andreas Binzenhofer. – Report No. 355 April 2005. – 10 p. – [Электронный ресурс.] Режим доступа: <https://www.diva-potal.org/smash/get/diva2:837754/FULLTEXT01.pdf>
26. *Papadimitriou C.H., Steiglitz K.* Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity, 2nd ed. Dover Publication, Inc., 31 East 2nd Street, Mineola, N.Y. 11501, 1998. – 491 p.
27. *Ford L. R.* Flows in Networks. / L.R. Ford Jr., D. R. Fulkerson - Princeton University Press; Revised edition, 2010. – 216 p.
28. *Gendreau M., Potvin J.-I.* Handbook of Metaheuristic, 3rd ed. – Springer International Publishing AG, 2019. – 604 p.
29. *Pardalos P.* Handbook of Combinatorial Optimization, 2nd Ed. / Panos M. Pardalos, Ding-Zhu Du, Ronald L. Graham (Eds.) – Springer Science+Business Media New York, 2013. – 3409 p.
30. *Floudas C.* Encyclopedia of Optimization, 2nd Ed. / C. A. Floudas and P. M. Pardalos (Eds.). – Springer Science+Business Media, LLC, 2009. – 4646 p.

Дрововозов В.І., Аль-Шаммарі Ахмед Аршед, Толстікова О.В.

ОПТИМІЗАЦІЯ КЛЮЧОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ З МІЖРІВНЕВОЮ ВЗАЄМОДІЄЮ

До основних завдань оптимізації безпроводових мереж відноситься оптимізація розподілу обмеженого числа радіоресурсів між користувачами. Різні типи пакетного трафіку, що передається по мережі, припускають динамічне виділення ресурсів користувачам. Рішенням завдань планування ресурсів, призначення пріоритетів доступу в залежності від типів трафіку з заданими вимогами до якості обслуговування займаються модулі управління радіо ресурсами, звані планувальниками (schedulers). До планувальників пред'являються високі вимоги стосовно швидкості розв'язання завдань розподілу ресурсів з прийнятною якістю. Задовольнити цим вимогам можна завдяки застосуванню міжрівневого (cross-layer) підходу до розв'язання задачі розподілу ресурсів.

Планувальники, в свою чергу, розробляються на базі алгоритмів, що отримуються в результаті рішення різного роду завдань оптимізації радіоресурсів. Відомі на сьогоднішній день завдання міжрівневої оптимізації, наприклад, завдання мінімізації потужності або завдання максимізації швидкості передачі, фактично мають на увазі оптимізацію деякої функції корисності (Utility Function), яка описує той чи інший рівень задоволеності користувачів для певної схеми розподілу радіоресурсів при деяких обмеженнях. У статті досліджено алгоритм міжрівневої оптимізації, призначений для максимізації функції корисності в різних умовах - алгоритм локального пошуку з апостеріорною корекцією. Для розглянутого алгоритму сформульовані завдання максимізації функції корисності і умови оптимальності їх розв'язання.

Drovovozov V.I., Al-Shammari Ahmed Arshed, Tolstikova O.V.

OPTIMIZATION OF KEY CHARACTERISTICS OF WIRELESS NETWORKS WITH INTERLEVEL INTERACTION

The main tasks of wireless network optimisation include optimising the distribution of a limited number of radio resources between users. Different types of packet traffic transmitted over the network involve the dynamic allocation of resources to users. The solution of tasks of resource planning, assignment of priorities of access depending on types of traffic with the set requirements to quality of service are engaged in modules of management of radio resources called schedulers. Planners have high demands on the speed of resource allocation with acceptable quality. These requirements can be met by using a cross-layer approach to solving the problem of resource allocation. Planners, in turn, are developed on the basis of algorithms obtained as a result of solving various problems of optimisation of radio resources. Currently known cross-layer optimisation tasks, such as power minimization tasks or transmission speed maximization tasks, actually involve the optimisation of a utility function that describes a layer of user satisfaction for a particular radio allocation scheme under certain constraints. The article investigates algorithm of cross layer optimisation, designed to maximize the utility function in different conditions - the local search algorithm with a posterior correction. For the considered algorithm the problems of maximization of the utility function and the conditions of asymptotic optimality of their solution are formulated.