

DOI: 10.18372/2310-5461.62.18707
УДК 629.735.051:004.7(045)

І. В. Пампуха, канд. техн. наук, доцент
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
orcid.org/0000-0002-4807-3984
e-mail: pamp@ukr.net;

А. А. Скрипниченко
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
orcid.org/0000-0003-4184-6830
e-mail: skriptrak@ukr.net

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ ТА УСУНЕННЯ КОНФЛІКТІВ У БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖАХ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Вступ

Збільшення ефективності мережі неминує супроводжується зростанням вимог до її провідних технічних характеристик (ключових параметрів), а внаслідок природних обмежень мережного ресурсу, природно, виникають технічні та організаційні конфлікти.

Щоб конкретизувати цю проблему, розглянемо її з позицій системного підходу.

Конфлікти різної природи виникають при розробці тих чи інших методів обміну даними між мережними вузлами та опрацювання інформації у мережних вузлах:

- моделювання автономних сегментів та/або мережі в цілому – виникають конфлікти між адекватністю та складністю моделі;

- вибір та аналіз системи – виникають конфлікти між ефективністю та вартістю;

- забезпечення енергоефективності та завадозахищеності на фізичному рівні еталонної моделі ISO – виникають суперечності між щільністю розташування вузлів, зоною дії мережі та якістю обслуговування (Quality of Service – QoS);

- прокладання маршрутів від відправника до отримувача на мережному рівні еталонної моделі ISO – виникають конфлікти між справедливістю та оптимальністю.

Наприклад, намагання досягти 100 % адекватності потребує створення моделі, абсолютною ідентичною реальному об'єкту – до усіх вузлів, елементів та зв'язків між ними, підсистем енергопостачання, генерації сигналів та зняття даних тощо. Іншими словами, створена за такою вимогою модель системи буде представляти, по суті, дублікат об'єкту, а задача моделювання просто лишається змістовного сенсу.

Відповідно, при побудові довільної технічної, інформаційної або будь-якої іншої системи за

критерієм «ефективність/вартість» можна було б намагатися якнайбільше знизити вартість. Оскільки вартість знаходиться у знаменнику, обране співвідношення, здавалося б, буде необмежено зростати. Більш того, при зниженні вартості до нуля воно прагнучиме до нескінченності. Однак здоровий глузд підказує, що при цьому й саме система буде відсутня. Знову ж таки задача лишається сенсу.

Такі ж міркування справедливі для усіх різновидів конфліктів, що виникають у наукових дослідженнях, включаючи згадані енергоефективність та завадозахищеність, справедливість та оптимальність тощо.

Єдино можливим засобом розв'язку конфліктів є системний підхід:

- аналіз асимптотичної поведінки процесу розвитку конфлікту, вибір простору прийнятних рішень з відкиданням свідомо безглузких варіантів;

- обирання раціональних компромісів між суперечливими сторонами конфлікту.

Саме такий підхід розглянуто у представленій роботі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У літературі запропоновано та проаналізовано різноманітні критерії вибору технологій доступу, такі як співвідношення сигнал/(завади плюс шуми), тобто Signal-to-Noise-and-Interference-Ratio, SINR [3], навантаження мережі, вимоги якості обслуговування (Quality of Service – QoS) [69], переваги та політики користувача [3, 5, 6] і т.д. Зазвичай порівняльна продуктивність різних методів вибору технологій доступу аналізується методами комп'ютерного моделювання з включенням стаціонарних та мобільних користувачів в зону покриття службової підмережі WLAN [7, 8]. Хоча окремі пропозиції щодо аналітичного підходу до оцінки алгоритмів вибо-

ру RAT і представлені у деяких роботах теоретичного та прикладного характеру [8, 13], вичерпні аналітичні оцінки ефективності алгоритмів вибору RAT у доступних нам джерелах не виявлені.

Постановка проблеми

Не розглядаються наступні проблеми, притаманні саме БП мережам:

- конфлікти між адекватністю та складністю моделі мережі;
- суперечності між щільністю розташування вузлів, зоною дії мережі та якістю обслуговування;
- конфлікти між ефективністю та вартістю мережі;
- конфлікти між справедливістю та оптимальністю при розподілі ресурсів та виборі множини маршрутів [1] – проблему поставлено, але остаточне її розв'язання не наведено;
- конфлікти між надлишковістю множини маршрутів та перевантаженістю мережного трафіку [17].

Метою статті є спроба частково заповнити прогалину у дослідженнях, зокрема, розглянути методи розв'язання останніх двох конфліктів.

Усунення конфліктів між справедливістю та оптимальністю розподілу ресурсів

Необхідно чітко визначати різницю між маршрутизацією, коли системі доводиться робити вибір певного маршруту прямування, і пересиланням – дією, що відбувається при отриманні пакета [1, 4, 5]. Можна уявити маршрутизатор як пристрій, в якому функціонують два процеси. Один з них обробляє пакети, що надходять, і вибирає для них за таблицею маршрутизації вихідну лінію.

Такий процес називається пересиланням (*forwarding*). Другий процес відповідає за заповнення та оновлення таблиць маршрутизації. Саме це є функцією алгоритму маршрутизації.

У безпроводових мережах, що розглядаються, обсяг трафіку, який обслуговується, не обмежується априорі розподілом фіксованих маршрутів, але за умовчанням обмежується рівнем завад у зоні обслуговування. Це дозволяє гнучко використовувати радіо ресурси залежно від умов поширення та розподілу джерел завад, але робить проблему планування радіомережі складнішою, оскільки з оцінки системи покриття має бути визначена як потужність сигналу, так і якість сервісу загалом. Питання аналізу складності алгоритмів маршрутизації та вибору алгоритму з прийнятною (не вище поліноміальною) складністю розглянуті нижче.

Незалежно від того, чи окремо вибираються маршрути для кожного пакета, що відправляється, або ж тільки один раз для з'єднання, бажано, щоб алгоритм вибору маршруту мав певні властивості – коректність, простоту, надійність, стійкість, справедливість та ефективність. Коректність і простота навряд чи вимагають коментарів, а потреба в надійності не така очевидна з першого погляду. Під час роботи великої мережі постійно відбуваються якісь відмови апаратури та зміни топології. Алгоритм маршрутизації повинен уміти справлятися із змінами топології мережі та інтенсивності трафіку без необхідності призупинення всіх завдань на всіх хостах. Якщо мережа перезавантажувалась би при кожному виходу маршрутизатора з ладу, часові характеристики доставляння трафіку були б абсолютно непридатними, особливо для мереж реального часу та критичного застосування.

Алгоритм маршрутизації повинен також мати стійкість. Існують алгоритми вибору маршруту, які ніколи не сходяться до фіксованого набору шляхів, незалежно від того, як довго вони працюють. Стійкий алгоритм повинен досягати стану рівноваги та залишатися у ньому. Але він також повинен швидко знаходити цей набір шляхів, оскільки з'єднання може бути перервано до того, як буде досягнуто рівноваги.

Такі цілі, як справедливість та ефективність, можуть здаватися очевидними, проте вони часто виявляються взаємовиключними [1, 6].

Очевидно, потрібен компроміс між справедливим виділенням трафіку всім станціям та оптимальним використанням каналу у глобальному сенсі. При появі швидкої та дешевої транзитної ділянки маршруту (так буває, хоч і нечасто), всі користувачі розраховуватимуть маршрут так, щоб ця ділянка обов'язково входила до цього маршруту. Відповідно виникає перевантаження, і маршрут перестає бути оптимальним.

Для запобігання таким ситуаціям необхідно, крім оптимального маршруту, розраховувати запасні маршрути, менші за величиною цільової функції. Якщо оптимальний маршрут перевантажений, система управління мережею переводить "підшефних" абонентів на один з інших запасних маршрутів.

Для усунення таких конфліктів треба, у першу чергу, розробляти відповідні моделі мобільності абонентів.

Ключові параметри ефективності моделей мобільності

Під моделлю мобільності абонента безпроводової телекомунікаційної мережі розуміють його координати, швидкість та прискорення руху.

Крім того, до моделі мобільності абонентів входить співвідношення сигнал/завади S_{IR} , яке пов'язано з координатами через класичне рівняння зв'язку. Гарантія якості сигналу означає, що потужність сигналу S_{IR} перевищує мінімально припустиме значення S_{IRmin} , яке задається в залежності від вимог до якості послуг зв'язку, які розглядаються (наприклад, голос, відео, пакетна передача даних). Співвідношення S_{IR} запишемо у наступному вигляді [6]:

$$S_{IR} = S_F \frac{P_r}{k_{ort} P_{int} + P_{ext} + P_n}, \quad (1)$$

де P_r – потужність сигналу, що приймається; P_{int} – сумарна потужність взаємних завад при розповсюдженні сигналу всередині даної зони дії; k_{ort} – коефіцієнт втрати ортогональності сигнальних кодів при багатошляховому розповсюдженні сигналу ($0 \leq k_{ort} \leq 1$); P_{ext} – сумарна потужність сигналів від інших вузлів всередині даної зони дії; P_n – потужність внутрішнього шуму, в якості моделі якого використовується модель білого гаусівського шуму.

Якість прийнятого сигналу, зазвичай, виявляється через ставлення числа помилково прийнятих біт до загального числа прийнятих біт (BER – *Bit Error Rate*). Оскільки BER безпосередньо залежить від S_{IR} , мінімально припустима якість сигналу виражається у виді $S_{IRmin} = S_{IRj} / S_F$, де S_{IRj} – мінімально припустиме співвідношення сигнал-завада для j -го типу трафіку (мова, відео, дані, їх комбінації та ін.).

Інші припущення для аналізу перераховані нижче.

1) Кожна зона покриття (аж до меж зони впевненого прийому) має одну або кілька (N) точок доступу з покриттям сегментів $WLAN$. Область точки доступу знаходиться в діапазоні покриття однієї точки доступу $WLAN$ (AP). Наприклад, припустимо, що радіус зони дії мережі складає 1000 метрів.

2) Для простоти аналізу форма області впевненого прийому апроксимується кругами з геометричними радіусами R і r для всієї зони прийому та сегменту зони відповідно.

3) У зоні прийому розглядаються два типи мобільності користувачів: 1 – транспортна та 2 – змішана транспортна і не транспортна мобільність (тобто не транспортна мобільність у точці доступу та транспортна мобільність за її межами). Нехай θ_{tr} є часткою користувачів транспортних засобів у точці доступу i ($i = 1, \dots, N$).

Відповідно, $(1 - \theta_{tr})$ є частка користувачів не транспортної мобільності в точці доступу- i . Низька величина θ_{tr} (наприклад, $\theta_{tr} < 0,2$) ілюструє порівняно високий відсоток користувачів у зоні доступу, які не використовують транспортні засоби, (наприклад, в офісі, на території установи), тоді як високе значення θ_{tr} (наприклад, $\theta_{tr} > 0,8$) відповідає загальнодоступній зоні $WLAN$ з великою кількістю транспортних засобів. Пропонована модель мобільності класифікує поведінку користувачів за двома категоріями: перша – новий виклик у точці доступу, який виходить у межах тривалості запиту; друга – запит у точці доступу, який входить і, нарешті, виходить із точки доступу, ще будучи активним. Позначимо через $T_{dwell}^{(r)}$ час очікування нового запиту, який визначається як час, протягом якого мобільний користувач знаходиться в точці доступу з моменту ініціювання запиту до моменту його закінчення. Для другої категорії $T_{dwell}^{(r)}$ позначає час перебування запиту на маршруті, який визначається як тривалість часу, протягом якого запит користувача знаходиться в точці доступу. Виходячи з вищевикладеного, ми кількісно оцінюємо пропоновану модель мобільності за часом перебування в околиці точки доступу, що визначається як час, який активний/неактивний користувач проводить в околиці точки доступу. Користувачі з не транспортною мобільністю в зоні доступу слідує розподілу часу перебування в зоні $WLAN$ [2], чия функція щільності ймовірності (*Probability Density Function, PDF*) позначається як $f_{m_wwan}(t)$. Користувачі з транспортною мобільністю в зоні доступу наслідують масштабований розподіл часу перебування запиту за допомогою функції щільності ймовірності $f_{m_wwan}(t)$. Позначимо T_{m_wwan} як випадкову величину, що становить час перебування запиту також за допомогою функції щільності ймовірності $f_{m_wwan}(t)$. Отже, час перебування користувача з транспортною мобільністю в точці доступу є випадковою величиною, T_{m_wwan} . У роботах [8, 9] показано, що

$$\begin{aligned} T_{m_wwan} &= \left(\frac{r_{eff}}{R_{eff}} \right) T_{M_wwan} = \\ &= \left(\frac{r}{R} \right) T_{M_wwan}, \end{aligned} \quad (1)$$

де R_{eff} та r_{eff} – ефективний радіус зони впевне-

ного прийому та зони охоплення точки доступу відповідно.

Показники процесу доступу на основі мобільності адаптивно контролюються наступним чином: зі збільшенням середньої мобільності в точці доступу більше користувачів займають ресурс *WWAN* і не потребують додаткового ресурсу, коли вони переміщуються з точки доступу. Для схеми "WLAN з повним покриттям" швидкість *VHO* від "WLAN до WWAN" і "WWAN до WLAN" швидко зростає зі збільшенням мобільності, що небажано.

Для вибору та обґрунтування прийнятного числа найкращих маршрутів треба неперервно у реальному часі розв'язувати задачу комбінаторної оптимізації. Загальна мета процесу оптимізації полягає у визначенні мінімального числа маршрутів, що покривають необхідну зону покриття мережі із забезпеченням якості сервісу, що заявляється. Розглянемо це завдання більш докладно.

Розробка метаевристичного алгоритму вибору числа маршрутів

Завдання розміщення оптимального числа маршрутів розв'язується на підґрунті методу цілісного комбінаторного програмування [10], яка застосовується для каналу обміну даними, є класичне завдання мінімізації

$$\min \left(\sum_{j=1}^m c_j y_j + \mu \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u_i \frac{1}{r_{ij}} x_{ij} \right) \quad (2)$$

за умови нормування

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \quad i \in I \quad (3)$$

та додаткових обмеженнях

$$x_{ij} \leq y_j; \quad x_{ij}, y_j \in \{0,1\}; \quad i \in I, \quad j \in M. \quad (4)$$

Перший доданок у цільовій функції відповідає загальній вартості установки. Так як $1/r_{ij}$ пропорційна випромінюваній потужності від i -ї контрольної точки (КТ), пов'язаної з j -м вузлом, другим доданком описується шукана КТ, на якій загальна потужність випромінювання мінімальна. Оскільки критерії пошуку мінімуму з обох доданків суперечливі, вводиться певний коефіцієнт компромісу $\mu \geq 0$. Умова (3) є гарантією, що кожна i -та КТ асоціюється з єдиним j -м вузлом. Обмежуюча умова (4) означає, що КТ задані лише для точок, де у даний момент часу існують мережні вузли. Зазначимо, що оскільки змінні x_{ij} є бінарними, у кожному допустимому рішенні всі активні сполуки можуть бути віднесені лише до одного вузла. Розглядаючи граничне значення потужності терміналів користувача,

необхідно приєднати до кожної пари КТ $i \in I$ та до варіанта розміщення вузла $j \in S$ наступну умову:

$$\frac{P_t}{r_{ij}} x_{ij} \leq P_{\max} y_j, \quad (5)$$

де P_{\max} – максимальна потужність випромінюваного сигналу, а P_t/r_{ij} відповідає необхідній потужності випромінювання в i -й КТ для забезпечення якості сигналу P_t , що приймається, на j -му вузді прийому. Необхідно відмітити, що коли $\frac{r_{ij} P_{\max}}{P_t} < 1$, то контрольні точки не можуть

бути асоційовані з j -м вузлом із-за обмеження по потужності та, відповідно, змінна x_{ij} може бути виключена із загального набору точок. Інакше кажучи, умова (5) впливає з відповідної умови (4). Як зазначалося вище, необхідно брати до уваги якість сервісу, що безпосередньо залежить від потужності сигналу кожного вузла. Для кожного з'єднання мінімально необхідна якість, що визначається через мінімально допустиме відношення сигнал-завада, $S_{IR} \geq S_{IR\min}$, може бути записана як

$$S_F \frac{P_r}{P_{\text{int}} (k_{\text{ort}} + \delta)} \geq S_{IR\min}, \quad (6)$$

що еквівалентно

$$\frac{P_{\text{int}}}{P_r} \leq \frac{S_F}{S_{IR\min} (k_{\text{ort}} + \delta)}. \quad (7)$$

Потужність вхідного сигналу P_r , що приймається на j -й точці прийому, яка знаходиться у контрольній точці, від кожного мобільного вузла, дорівнює P_t . Розглядаючи величину обмеження мінімальної якості як верхню межу числа

з'єднань $\sum_{i=1}^n u_i x_{ij}$, яке може бути асоційовано з

даною точкою прийому, отримаємо вираз

$$\sum_{i=1}^n u_i x_{ij} \leq \frac{S_F}{S_{IR\min} (k_{\text{ort}} + \delta)} + 1. \quad (8)$$

Підставляючи типові значення $\delta, S_F, S_{IR\min}$, отримаємо верхню межу $K_{c\max}$ максимальної кількості з'єднань, які можуть обслуговуватися будь-яким вузлом. Таким чином, для кожного варіанта розміщення ділянок $j \in S$, обмеження на мінімально допустиму якість сигналу може бути записано у вигляді

$$\sum_{i=1}^n u_i x_{ij} \leq K_{c\max}. \quad (9)$$

В результаті отримаємо базову задачу мінімізації з обмеженнями:

$$\min \left(\sum_{j=1}^m c_j y_j + \mu \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u_i \frac{1}{r_{ij}} x_{ij} \right) \quad (10)$$

за умов

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad i \in I; \quad (11)$$

$$x_{ij} \leq \min \left\{ 1, \frac{r_{ij} P_{\max}}{P_i} \right\} y_j, \quad i \in I, j \in M; \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n u_i x_{ij} \leq K_{c_{\max}}, \quad j \in M; \quad (13)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0,1\}, \quad i \in I, j \in M, \quad (14)$$

яка відноситься до класу стандартних завдань розміщення з обмеженнями, добре вивченими в літературі з оптимізації (див. [11]).

Розглянуте вище завдання оптимізації числа та розташування вузлів характеризується такими особливостями. По-перше, це стохастична задача внаслідок випадкових умов поширення сигналів, властивостей середовища розповсюдження тощо. По-друге, розмірність завдання велика. Число оптимізованих параметрів дуже приблизно можна оцінити як добуток числа вузлів в зоні обслуговування на кількість змінюваних параметрів в мережі зв'язку. До цього результату необхідно ще додати число параметрів, загальних для мережі в цілому: характеристики ландшафту, середньорічні та сезонні зміни метеорологічних умов, випадкові зміни навантаження на мережу в цілому та на окремі її сегменти та ін. Можна припускати, що загальна кількість змінних параметрів у даному завданні оптимізації складатиме сотні або навіть тисячі. Як відомо [11, 12 та ін.], при розмірності оптимізаційної задачі більше ніж 20 ... 25 регулярні методи пошуку екстремуму практично непрацездатні внаслідок так званої надполіноміальної (*NP-hard*) складності. Справа в тому, що такі завдання вирішуються евристичними та метаевристичними методами [12]. До таких методів, зокрема, відноситься метод табу-пошуку [12]. Евристичні алгоритми пошуку є наближеними за визначенням. При їх застосуванні можна отримати рішення з прийнятною точністю за найближчий час і з прийнятними потрібними ресурсами. Тут необхідно враховувати такі чинники:

- швидкість збіжності алгоритму залежить від успішного вибору початкового наближення;
- точність отриманого рішення залежить не тільки від точності завдання вихідних даних, а й від детальності їх представлення. Може статися,

що за надмірної детальності статистичних характеристик виникнуть додаткові локальні мінімуми цільової функції, що призведе до підвищення ризику зациклювання на одному з них.

Для урахування таких розроблено комбінований метаевристичний метод оптимізації, заснований на дуальному підході – комбінації адаптивності та навчання по раніше отриманим результатам [14–16]. Крім того, також введено оригінальний метод разового подолання заборони шляхів табу-пошуку: коли черговий крок вважається мало перспективним і повинен відкидатися, але за попередніми кроками були отримані гарні результати – цей крок дозволяється, а отриманий результат зраховується як початковий для подальшого пошуку.

Дамо короткий опис алгоритму:

1. Набір параметрів, що оптимізуються. У нашому випадку це число вузлів, потужності сигналу на входах приймачів, пропускна здатність по висхідному та низхідному каналам.
2. Пробне та поточне рішення. Це елементи пошуку та порівняння поточних результатів рішення.
3. Кроки пошуку, що характеризують процес генерації пробних рішень, пов'язаних із поточним станом пошуку.
4. Набір можливих напрямів кроку пошуку – набір пробних рішень, близьких до поточному рішенню. У розглянутій задачі частина аргументів є безперервними величинами, отже безліч пробних рішень може прагнути до нескінченності. Для практичної реалізації алгоритму оперували на підмножині з обмеженою кількістю пробних рішень.
5. Обмеження на деякі кроки пошуку, які виявилися невдалими. Заборонені кроки запам'ятовуються і надалі не використовуються.

Ефективність рішення (швидкість збіжності, відсутність зациклювань на локальних екстремумах) безпосередньо залежить від виявлених невдалих кроків. Розмір списку заборонених кроків пов'язаний із розмірністю завдання. У деяких джерелах вказується, що досить ефективним є найпростіший вибір розміру списку близько 7.

У роботі [12] зазначено, що при практичній апробації найкращі результати були отримані при розмірі списку $n/3$, де n – розмірність задачі. Для завдань менеджменту ресурсів розмір списку зазвичай перевищує 25 %–35 % від розмірності завдання.

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

Критерій зупинки – умова, у якому процес пошуку припиняється. Це може бути перевищення допустимої кількості ітерацій після останньої зміни найкращого рішення або перевищення максимально допустимої кількості ітерацій.

Для усунення конфлікту між адекватністю та складністю моделі організації доставляння даних розроблено метод усунення надлишковості множини маршрутів на основі спрямованої дифузії з мобільними агентами [17].

Висновки

Отримано загальний вираз для розподілу часу перебування точки доступу в неоднорідній безпроводовій мережі разом із ймовірностями перетину межі точки доступу. Чисельні результати та результати моделювання показують задовільний збіг. Чисельні результати наведені для демонстрації використання ймовірностей перетину меж гарячої точки для розрахунку швидкості вертикальної передачі обслуговування в HWN, який є важливим параметром для аналізу продуктивності на рівні мережі. Завдяки просторовому рознесенню точок доступу та наявності додаткових маршрутів вдається розв'язати конфлікт між справедливістю та оптимальністю вибору маршрутів неоднорідної безпроводової мережі:

1. При розв'язанні задач організації маршрутів у безпроводових мережах зв'язку необхідно враховувати не тільки розмір зони дії, а й якість сервісу, яка, зокрема, залежить як від загальної кількості користувачів у мережі в цілому, так і від числа користувачів у кожному автономному сегменті.

2. Алгоритми комбінаторної оптимізації при відносній простоті є досить ефективними для вирішення поставлених завдань. Модифікації алгоритму з урахуванням специфіки предметної області дозволяють підвищити ефективність пошуку точок розміщення вузлів.

3. Додатковий виграш у точності розрахунків, а головне – в економії потрібного числа вузлів можна отримати завдяки мінімізації надлишковості числа маршрутів, набір яких за відповідного управління методом спрямованої дифузії з мобільними агентами обирається мінімальним без втрат та перекручень при обміні даними.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Tanenbaum A. S., Wetherall D. J. *Computer Networks*, 5th Ed. Prentice Hall, Cloth, 2011. 960 p.

[2] Tanenbaum A. S., Steen M. V. *Distributed systems: principles and paradigms*. Pearson Education. Inc. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458, 2007. 686 p.

[3] Стеклов В. К., Кільчицький Є. В. *Основи управління мережами та послугами телекомунікацій*. К.: Техніка, 2002. 438 с.

[4] Stallings W. *Computer Organization and Architecture*, 10th Ed. Pearson Education, Inc., Hoboken, NJ, 2016. 864 p.

[5] Stallings W., *Data and Computer Communications*, 10th Ed. Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, 1 Lake Street, Upper Saddle River, New Jersey, 07458, 2014. 912 p.

[6] Stallings W. *Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud*. Pearson Education, Inc., Old Tappan, New Jersey, 2016. 538 p.

[7] Stallings W. *High-Speed Networks and Internets: Performance and Quality of Service / 2nd Ed*. Pearson Education, 2002. 744 p.

[8] Khaki, M., Ghasemi, A. The impact of mobility model on handover RATs in heterogeneous multi-tier wireless networks. *Computer Networks*, 2020, 182, 107454. doi: 10.1016/j.comnet.2020.1074

[9] Soret, B., Mogensen, P., Pedersen, K. I., & Aguayo-Torres, M. C. Fundamental tradeoffs among reliability, latency and throughput in cellular networks. 2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). 2014. P. 1391–1396. doi: 10.1109/glocomw.2014.7063628

[10] Pardalos P., Du D.-Z., Graham R.L. (Eds.) *Handbook of Combinatorial Optimization*, 2nd Ed. Springer Science+Business Media New York, 2013. 3409 p.

[11] Resende M. G. C., Pardalos P. M. (Eds.) *Handbook of Optimization in Telecommunications*. Springer Science+Business Media, Inc., 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA, 2006. 1134 p.

[12] Gendreau M., Potvin J.-I. *Handbook of Metaheuristic*, 3rd ed. Springer International Publishing AG, 2019. 604 p.

[13] G. Zayaraz, J. Kanchana Devi, V. Vijayalakshmi, V. Hemamalini. Mobility Management in Heterogeneous Wireless Networks. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, May-2014, Volume: 03 Special Issue: 07, p. 761–768.

[14] Ahmed N. U., Song Hui. Real-time Feedback Control of Computer Networks Based on Predicted State Estimation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2005, vol. 1, 7–32. doi: 10.1155/MPE.2005.7

[15] Wittenmark B. Adaptive Dual Control Methods: An Overview. *IFAC Proceedings Volumes*, 1995, 28(13), 67–72. doi: 10.1016/s1474-6670(17) 45327-4

[16] Unbehauen, H. (n.d.). Adaptive dual control systems: a survey. *Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium* (Cat. No.00EX373). doi: 10.1109/asspcc.2000.882466

[17] Vinogradov M., Skrypnichenko A., et al. Eliminate Application Redundancy Using Local Processing Using Directional Diffusion with Mobile Agents, *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, 2019, Conference Paper, p. 360–364.

Пампуха І. В., Скрипниченко А. А.

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ ТА УСУНЕННЯ КОНФЛІКТІВ У БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖАХ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Розглядається задача забезпечення наскрізної якості обслуговування неоднорідних безпроводових (БП) мереж з випадковим множинним доступом. Проаналізовані процеси виникнення конфліктів між справедливістю та оптимальністю вибору маршрутів та розподілу ресурсів у БП мережах. Розроблено методику усунення конфліктів між справедливістю та оптимальністю розподілу ресурсів. Показано, що при раціональному визначенні технології радіодоступу в неоднорідних мережах функції кожного рівню та, відповідно, інформаційні параметри трафіку на цьому рівні можна віднести до однієї з двох альтернативних груп: функції, що залежать від конкретної технічної реалізації мережі або функції, орієнтовані на роботу із застосунками. Відповідно до цього сформульовано глобальний підхід до оптимального вибору технології радіодоступу (RAT) як задачі з надполіноміальною складністю та запропоновано підхід для вибору RAT з використанням розподіленого метаевристичного алгоритму табу-пошуку, заснованого на піковій швидкості, яку спроможні сприймати користувачі. Розроблено розподілену систему вибору RAT на основі метаевристичної оптимізації набору маршрутів з усуненням надлишковості. Розроблено комбінований метаевристичний метод оптимізації, заснований на дуальному підході – комбінації адаптивності та навчання за раніше отриманими результатами. Введено оригінальний метод разового подолання заборони шляхів табу-пошуку: коли черговий крок вважається мало перспективним і повинен відкидатися, але за попередніми кроками були отримані гарні результати – цей крок дозволяється, а отриманий результат зраховується як початковий для подальшого пошуку. Отримано загальний вираз для розподілу часу перебування точки доступу в неоднорідній безпроводовій мережі разом із ймовірностями перетину межі точки доступу. Чисельні результати та результати моделювання показують задовільний збіг.

Ключові слова: неоднорідна безпроводова мережа, технологія радіодоступу, глобальний і багатоекстремальний розподіл ресурсів, метаевристична оптимізація.

Рампуха І. В., Skrypnichenko A. A.

A SYSTEMATIC APPROACH TO THE ANALYSIS AND ELIMINATION OF CONFLICTS IN SPECIAL PURPOSE WIRELESS NETWORKS

The task of ensuring the end-to-end quality of service of heterogeneous wireless (WW) networks with random multiple access is considered. The processes of the occurrence of conflicts between the fairness and optimality of route selection and resource allocation in BP networks are analyzed. A technique for eliminating conflicts between fairness and optimality of resource distribution has been developed. It is shown that in the rational definition of radio access technology in heterogeneous networks, the functions of each level and, accordingly, the information parameters of the traffic at this level can be attributed to one of two alternative groups: functions that depend on a specific technical implementation of the network or functions oriented to work with applications. Accordingly, a global approach to the optimal selection of a radio access technology (RAT) is formulated as a problem with super-polynomial complexity, and an approach for RAT selection using a distributed metaheuristic tabu search algorithm based on the peak rate that users are able to perceive is proposed. A distributed RAT selection system based on metaheuristic optimization of the set of routes with elimination of redundancy has been developed. A combined metaheuristic optimization method based on a dual approach - a combination of adaptability and learning from previously obtained results - has been developed. An original method of one-time overcoming the prohibition of tabu search paths has been introduced: when the next step is considered unpromising and should be rejected, but good results were obtained from the previous steps - this step is allowed, and the obtained result is counted as an initial one for further search. A general expression for the distribution of the access point's stay time in a heterogeneous wireless network together with the access point boundary crossing probabilities is obtained. Numerical results and simulation results show satisfactory agreement.

Keywords: heterogeneous wireless network, radio access technology, global and multi-extreme resource allocation, metaheuristic optimization.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2024 р.

Прийнято до друку 12.06.2024 р.