

УДК 004.05:004.738.2 (045)

Дрововозов В.І., к.т.н.,  
orcid.org/0000-0002-6303-9741  
Аль-Шаммарі Ахмед Аршед,  
Толстікова О.В., к.т.н.,  
Водоп'янов С.В., к.т.н.,  
Коцюр А.Б.  
orcid.org/0000-0003-4404-1966

## НАСКРІЗНА ЯКІСТЬ СЕРВІСУ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ З МІЖ-РІВНЕВОЮ ВЗАЄМОДІЄЮ

Національний авіаційний університет

drovvlad47@gmail.com  
ovtolst21@gmail.com

### Вступ

Безпроводові мережі нових поколінь, призначені для підтримки різних видів трафіку, таких як голос, дані та мультимедіа, активно впроваджуються в сучасні складні та різномірні інформаційно-комунікаційні системи. У цих мережах обмін даними між абонентами може бути покращений завдяки високій якості зображень та відео, а доступ до інформації та послуг – за рахунок підвищення швидкості передачі даних, якості сервісу (QoS) та зменшення рівня бітових помилок, заходів безпеки, урахування локації абонента, енергоефективності та новим гнучкими комунікаційним можливостям. Ці функції створюють нові можливості не тільки у виробничій та організаційній сферах, але і для постачальників контенту та послуг, що використовують ці мережі. Поставлені завдання розв'язуються за допомогою спеціальних модулів управління радіо ресурсами, адаптації та оптимізації на декількох рівнях стека протоколів моделі взаємодії відкритих систем (*Open System Interconnection Reference Model, OSI*).

Тут відразу виникає дилема: або реалізовувати методи адаптації на кожному рівні незалежно, у відповідності з класичним підходом до проектування мережних комутаційних вузлів, або їх можна здійснювати спільно на декількох рівнях стека протоколів (міжрівнева оптимізація). Як

відмічено у роботі [1], у цьому випадку можливі альтернативні підходи.

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.

До планувальників пред'являються надзвичайно високі вимоги стосовно швидкості розв'язання завдань оптимального розподілу ресурсів (аж до вимоги роботи у реальному часі) з прийнятною якістю. Задовольнити цим вимогам за умов незалежної адаптації на окремих рівнях моделі *OSI*, звичайно, можна, але тут неминуче виникає відома проблема: вартість такої системи є непринятною. Тому треба застосовувати альтернативні підходи.

Завдяки застосуванню методів розподіленого опрацювання службової інформації, зокрема, міжрівневої (*cross-layer*) оптимізації вдається певною мірою подолати згадані проблеми. Основним принципом міжрівневої оптимізації є комплексне рішення задачі ефективного використання обмеженого числа радіо ресурсів, що вра-

ховує 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 медіа доступу до середовища адаптивне планування може бути реалізовано на основі урахування 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. Однак інтегрована оптимізація QoS (наскрізна, End-to-End QoS) потребує опрацювання великих масивів даних та розв'язання векторно-матричних рівнянь великої розмірності, яка визначається числом транзитних ділянок на трасі доставки (так зване "прокляття розмірності" [2]). Це веде до неприпустимих часових

втрат або до неприйнятних витрат апаратних та програмних ресурсів. Тут також треба приходити до певного компромісу. Розглянемо у наступному підрозділі альтернативні методи забезпечення наскрізної QoS.

### **Основна частина**

1. Методи забезпечення наскрізної QoS з економією апаратних та програмних ресурсів.

Надання гарантій якості є важливою метою розробки безпроводових мереж. Різні методи можуть мати дуже різноманітні вимоги до якості щодо термінів передачі даних, міжкінцевої затримки та ймовірностей порушення, пов'язаних із затримкою. Наприклад, програми управління виробничим підприємством вимагають надійної та своєчасної доставки команд управління; отже, важливо гарантувати, що жоден пакет не втрачається чи затримується під час передачі пакету. Цей тип гарантій QoS зазвичай називають детермінованими або жорсткими гарантіями. З іншого боку, для більшості мультимедійних застосунків, включаючи відео телефонію, передачу мультимедіа та Інтернет-ігри, не потрібні такі суворі вимоги до якості QoS, тому що ці застосунки мало чутливі до короткострокових порушень QoS. Цей тип гарантій QoS зазвичай називають статистичними або м'якими гарантіями.

Для безпроводових мереж, оскільки пропускна спроможність безпроводового каналу випадково змінюється з часом, спроба забезпечити детерміновану QoS (тобто з нульовою ймовірністю порушення QoS) призведе до надто консервативних гарантій. При цьому гарантована з ймовірністю одиниця пропускна спроможність (без контролю потужності) дорівнює нулю.

Очевидно, що така консервативна гарантія недосяжна. За цими резонами в роботі розглядається статистична QoS. Для підтримки гарантій QoS запропоновано два загальні підходи.

Перший підхід – мереже-орієнтований. За таким підходом маршрутизатори,

комутатори та центри збору даних у мережі повинні забезпечувати підтримку QoS для задоволення вимог щодо швидкості передачі даних, обмеженої затримки та втрати пакетів, що вимагаються програмними застосунками (наприклад, інтегровані сервіси або диференційовані послуги [4].

Другий підхід базується виключно на End-to-End системі і не пред'являє жодних вимог до мережі. Зокрема, в End-to-End системах використовуються методи управління для досягнення максимальної якості на рівні застосунків без підтримки QoS на транспортному рівні. У цій роботі розглядається проблема забезпечення QoS з мережної точки зору. Для забезпечення

гарантій QoS у безпроводових мережах архітектура мережі повинна містити такі компоненти: специфікація трафіку, маршрутизація QoS, контроль прийому викликів, характеристика безпроводових каналів, резервування ресурсів та планування пакетів. Схема мережі з архітектурною концепцією резервування QoS зображена на рис.1.

Розподіл ресурсів зазвичай поєднується з контролем прийому запитів. Аналіз результатів пошуку маршруту на засадах QoS проводиться на маршруті, що складається з декількох транзитних ділянок і є оптимальним за критерієм мінімальної сумарної затримки. Далі розглядаються обґрунтування вибору методу оптимізації та результати роботи моделюючої програми.



Рис. 1. Мережна архітектура для резервування QoS

2. Короткий опис методу пошуку оптимальних маршрутів та результатів роботи програми.

Як показано у роботах [1,5], найбільш перспективним підходом до розв'язання проблеми пошуку оптималь-

ного маршруту в мережі з багатьма вузлами є використання методів теоретичного аналізу та оптимізації наскрізної якості сервісу. Задачі пошуку оптимального маршруту в мережі з  $N$  вузлами є задачами цілочисельного програмування, тісно пов'язаними з проблемами комбінаторної

та дискретної математики. Вони відносяться до класичної задачі про потоки в мережах [6] як різновид квадратичних задач розміщення [2,7]. Квадратична задача про розміщення (Quadratic Assignment Problem, QAP) – це відома задача дискретної оптимізації, яка є однією з найбільш важких завдань в цій області. Відомо також, що ця задача має надполіноміальну складність і для розмірності більше 20 не піддаються точному рішення [7]. Якщо звернутися до задачі вибору оптимального маршруту в мережі з транзитними ділянками, то, по суті, розмірність задачі визначається саме числом згаданих ділянок.

Використання наближених методів і алгоритмів є на даний момент фактично єдиним способом вирішення проблеми. За останні роки запропоновані різноманітні евристичні та метаевристичні методи [5] отримання наближеного рішення квадратичної задачі про призначення: табу-пошук, імітація відпалу, генетичні алгоритми тощо. Не вдаючись до докладного порівняльного аналізу евристичних методів, оберемо метод табу-пошуку, як один із найбільш успішних методів, що застосовуються для розв'язання таких задач. Для прискорення роботи алгоритму застосовують спеціальні технології, отримані вітчизняними вченими [8,9]. На цілій серії задач отримані результати, які не поступаються, а часто перевершують результати най-

більш успішних алгоритмів, що застосовуються для розв'язання квадратичної задачі про призначення.

У роботі [1] розроблений алгоритм розв'язання квадратичної задачі про призначення, заснований на класичній схемі з локальним пошуком для поліпшення отриманих рішень. Для прискорення роботи алгоритму застосована технологія локальної оптимізації з апостеріорною корекцією. Там же надано докладний опис алгоритму та наведені асимптотичні оцінки точності отриманих рішень. Відмічено, що точність отриманого рішення залежить не тільки від точності завдання вихідних даних, але і від детальності їх подання. Може трапитися, що при зайвій деталізації статистичних характеристик мереж виникнуть додаткові локальні мінімуми цільової функції, що призведе до підвищення ризику зациклення на одному з них. Ці питання носять системний характер. Основною проблемою деталізації подання вихідних даних є ризик зациклювання на локальних екстремумах цільової функції. Для згладжування цих екстремумів використаний алгоритм локальної апостеріорної оптимізації, заснований на методі дуального управління Фельдбаума: результати, отримані на поточному та на попередніх кроках пошуку, використовуються в якості початкових даних на наступних кроках. На рис.2 та 3 показані графіки зміни перетину цільової функції  $f_c$  при локальній апостеріорній оптимізації різного порядку.

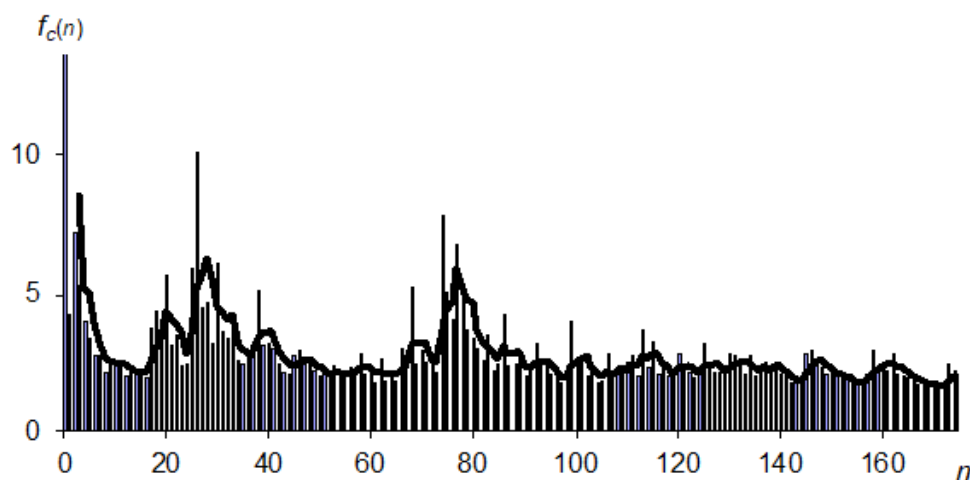


Рис. 2. Еволюція цільової функції без локальної апостеріорної корекції (лінійчатий графік) та з локальною апостеріорною корекцією по двох попередніх поточних даних

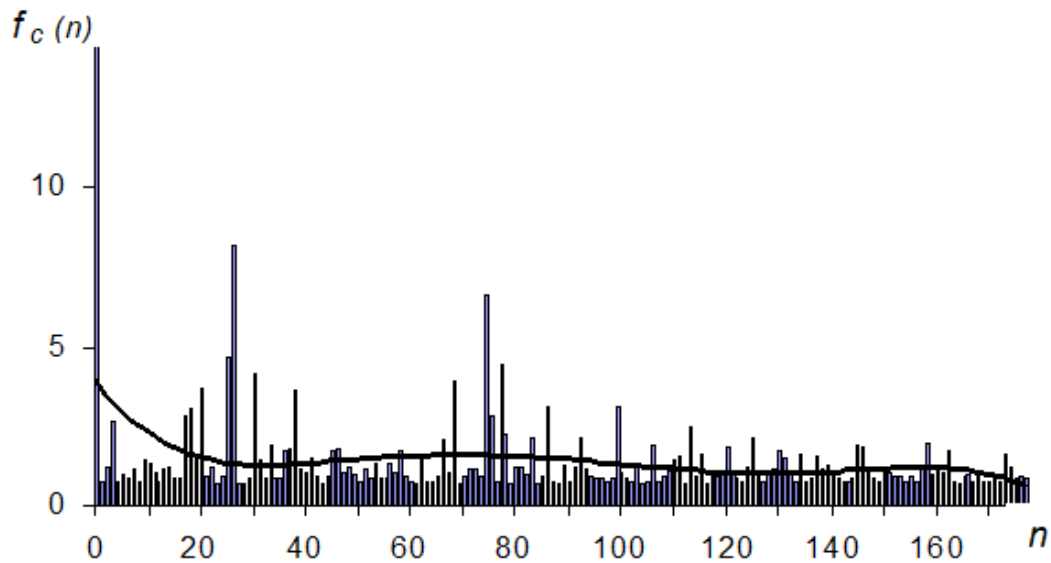


Рис. 3. Еволюція цільової функції без локальної апостеріорної корекції (лінійчастий графік) та з локальною апостеріорною корекцією по п'яти попередніх поточних даних

Видно, що при накопиченні більшої кількості попередніх поточних даних локальні екстремуми згладжуються краще. Однак при цьому підвищується ризик пропуску глобального екстремуму. Це питання також носить системний характер та має бути докладно досліджено у подальшому.

### Висновки

1. Завдяки застосуванню методів розподіленого опрацювання службової інформації, зокрема, міжрівневої (cross-layer) оптимізації вдається подолати проблеми "прокляття розмірності" у задачах пошуку оптимальних маршрутів.

2. Для розв'язання задачі комбінаторної оптимізації, зокрема, квадратичних задач розміщення (або квадратичних задач призначення) приходиться застосовувати наближені методи, зокрема, евристичні та метаевристичні методи. Одним з них є метод табу-пошуку. Метод досить легко алгоритмізується та програмується.

3. Алгоритми табу-пошуку при своїй відносній простоті є досить ефективними для вирішення завдань маршрутизації. Модифікації алгоритму з урахуванням специфіки предметної області дозволяють підвищити ефективність пошуку точок ро-

зміщення мережних вузлів шляхом згладжування цільової функції та "обходу" локальних екстремумів.

### Література

1. Drovovozov V., Al-Shammari Ahmed Arshed, Tolstikova O., Vodopianov S. Optimization of the Key Performance Indicators of Wireless Cross-layer Networks. Доповідь на конференції "World Congress "AVIATION IN THE XXI-st CENTURY" Computer systems and components".

2. Pardalos P. Handbook of Combinatorial Optimization, 2nd Ed. / Panos M. Pardalos, Ding-Zhu Du, Ronald L. Graham (Eds.) – New York: Springer Science+Business Media, 2013. – 3409 p.

3. Resende M.G.C. Handbook of Optimization in Telecommunications / Mauricio G.C. Resende, Panos M. Pardalos. (Eds.) – New York: Springer Science+Business Media, Inc., 2006. – 1134 p.

4. Kurose J.F. Computer Networking: A Top-Down Approach, 7th Ed / James F. Kurose, Keith W. Ross. – Pearson Education, Inc., 2017. – 864 p.

5. Gendreau M., Potvin J.-I. Handbook of Metaheuristic, 3rd ed. / M. Gendreau, J.-I. Potvin. – Springer International Publishing AG, 2019. – 604 p.

6. Ford L.R. Flows in Networks. / L.R. Ford Jr., D.R. Fulkerson. – Princeton University Press; Revised edition, 2010. – 216 p.

7. Floudas C. Encyclopedia of Optimization, 2nd Ed. / C.A. Floudas, P.M. Pardalos (Eds.). – Springer Science+Business Media, LLC, 2009. – 4646 p.

8. Сергиенко И.В., Шило В.П. Задачи дискретной оптимизации. / И.В. Сергиенко, В.П. Шило. – Киев: Наукова думка, 2003. – 256 с.

9. Шило В.П. Метод глобального равновесного поиска. / В.П. Шило. – Кибернетика и системный анализ. – 1999. – №1. – С. 18-27.

**Дрововозов В.І., Аль-Шаммарі Ахмед Аршед, Толстікова О.В., Водоп'янов С.В., Котюр А.Б.**

## **НАСКРІЗНА ЯКІСТЬ СЕРВІСУ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ З МІЖРІВНЕВОЮ ВЗАЄМОДІЄЮ**

*У даній роботі розглядаються безпроводові мережі з пакетною комутацією. По мережі циркулює різноманітна мультимедійна інформація, а обмін даними здійснюється як зі стаціонарними, так і з мобільними абонентами. Це обумовлює складну специфіку мережного трафіку та жорсткі вимоги до параметрів мережі. Проаналізовано статистичні характеристики мережного трафіку Quadruple Play й ключові параметри (затримку та пропускну спроможність) мереж. Показано, що мережа передавання даних, по суті, має бути інформаційною системою жорсткого реального часу. Для забезпечення вимог до якості сервісу (QoS) сучасних інформаційно-комунікаційних мереж, що працюють у реальному часі, потрібно розробляти нові моделі та методи організації безпроводових каналів зв'язку, планування маршрутів з мінімальними затримками опрацювання у комутаційних вузлах, доставляння до отримувачів, малим рівнем бітових помилок тощо. Проведено порівняльний аналіз методів забезпечення QoS безпроводових мереж та представлено деякі результати у цій галузі. Дано обґрунтування основного методу забезпечення QoS мережі з міжрівневою взаємодією. Зокрема, представлено результати у деяких найбільш важливих напрямках, а саме: моделі забезпечення ефективності мережних служб, методи специфікації трафіку, планування пакетів для безпроводової передачі, контроль прийому викликів у безпроводових мережах та оптимізація характеристик безпроводових каналів. Для кожної задачі представляються перспективні підходи, обговорюються їх обмеження та аналізуються компромісні шляхи розв'язання проблем, що виникають. Зокрема, для розв'язання проблеми оптимального планування пакетів та організації маршрутів доставляння пакетів застосовано модифікований метаевристичний метод табу-пошуку з локальною апостеріорною корекцією та тимчасовим подоланням заборони.*

**Ключові слова:** *якість сервісу, міжрівнева взаємодія, метаевристична оптимізація, метод табу, локальна апостеріорна корекція.*

**Drovovozov V.I., Al-Shammari Ahmed Arshed, Tolstikova O.V., Vodopianov S.V., Kotsyur A.B.**

## **END-TO-END QUALITY OF SERVICE OF WIRELESS NETWORKS WITH INTERLEVEL INTERACTION**

*This article considers wireless networks with packet switching. Diverse multimedia information circulates on the network, and data exchange is carried out with both fixed and mobile subscribers. This causes a complex specifics of network traffic and strict requirements for network parameters. The statistical characteristics of Quadruple Play network traffic and key indicators (delay and bandwidth) of networks are analyzed. It is shown that the data*

transmission network, actually, should be a hard real-time information system. To meet the requirements for quality of service (QoS) of modern information and communication networks operating in real time-scale, it is necessary to develop new models and methods of wireless communication channels, route planning with minimal processing delays in switching nodes and traffic delivery to recipients, low level bit errors, etc. The comparative analysis of methods of wireless networks QoS providing is carried out and some results in this area are presented. The substantiation of the basic method of providing QoS of a network with cross-layer interaction is given. In particular, the results in some of the most important areas are presented, namely: models for ensuring the efficiency of network services, methods of traffic specification, scheduling of packets for wireless transmission, control of call receiving in wireless networks and optimization of wireless channel characteristics. For each task, promising approaches are presented, their constraints are discussed and compromise ways of solving emerging problems are analyzed. In particular, a modified metaheuristic taboo search method with local a posteriori correction and temporary overcoming the ban was used to solve the problem of optimal packet planning and organization of packet delivery routes.

**Keywords:** quality of service (QoS), cross-layer interaction, metaheuristic optimization, taboo method, local a posteriori correction.

**Дрововозов В.И., Аль-Шаммари Ахмед Аршед, Толстикова Е.В., Водопьянов С.В., Коцюр А.Б.**

#### **СКВОЗНОЕ КАЧЕСТВО СЕРВИСА БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ С МЕЖУРОВНЕВЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ**

В данной работе рассматриваются беспроводные сети с пакетной коммутацией. По сети циркулирует разнородная мультимедийная информация, а обмен данными осуществляется как со стационарными, так и с мобильными абонентами. Это обуславливает сложную специфику сетевого трафика и жесткие требования к параметрам сети. Проанализированы статистические характеристики сетевого трафика *Quadruple Play* и ключевые параметры (задержку и пропускную способность) сетей. Показано, что сеть передачи данных, по сути, должно быть информационной системой жесткого реального времени. Для обеспечения требований к качеству сервиса (QoS) современных информационно-коммуникационных сетей, работающих в реальном времени, нужно разрабатывать новые модели и методы организации беспроводных каналов связи, планирование маршрутов с минимальными задержками обработки в коммутационных узлах, доставку до получателей, малым уровнем битовых ошибок и тому подобное. Проведен сравнительный анализ методов обеспечения QoS беспроводных сетей и представлены некоторые результаты в этой области. Дано обоснование основного метода обеспечения QoS сети с межуровневым взаимодействием. В частности, представлены результаты в некоторых наиболее важных направлениях, а именно: модели обеспечения эффективности сетевых служб, методы спецификации трафика, планирование пакетов для беспроводной передачи, контроль приема вызовов в беспроводных сетях и оптимизация характеристик беспроводных каналов. Для каждой задачи представляются перспективные подходы, обсуждаются их ограничения и анализируются компромиссные пути решения проблем, которые возникают. В частности, для решения проблемы оптимального планирования пакетов и организации маршрутов доставки пакетов применен модифицированный метаэвристический метод табу-поиска с локальной апостериорной коррекцией и временным преодолением запрета.

**Ключевые слова:** качество сервиса, межуровневое взаимодействие, метаэвристическая оптимизация, метод табу, локальная апостериорная коррекция.