

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету
«Львівська політехніка»
д.т.н., доц. Бешлею М.І.

РЕЦЕНЗІЯ

доцента кафедри інформаційно-комунікаційних технологій

Навчально-наукового інституту інформаційно-комунікаційних технологій
та електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка»

к.т.н., доц. Селюченка Мар'яна Олександровича

на дисертаційну роботу Пирога Ярослава Романовича

**"Підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж
на основі генетичного алгоритму",**

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії

в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

та спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Актуальність дисертаційної роботи

Активний розвиток розподілених телекомунікаційних систем та зростання кількості прикладних сервісів, що базуються на автономному збиранні та передаванні даних, зумовлюють підвищені вимоги до алгоритмічного забезпечення безпроводних сенсорних мереж (БСМ). Такі мережі дедалі частіше функціонують у складних просторово-часових умовах, де сенсорні вузли відрізняються за апаратними характеристиками, мають неоднакові радіуси дії, обмежені енергетичні ресурси та можуть змінювати своє положення у процесі експлуатації. За цих обставин ефективність БСМ визначається узгодженістю рішень щодо розміщення вузлів і організації передачі даних у мережі.

Задачі просторового розташування сенсорних вузлів і маршрутизації трафіку є тісно взаємопов'язаними. Нераціональне розміщення вузлів призводить до надлишкового перекриття зон покриття, швидкого виснаження енергетичних ресурсів та деградації якості зв'язку, тоді як неадаптивні алгоритми маршрутизації не здатні забезпечити стійку передачу даних у разі змін топології

або виходу окремих вузлів з ладу. Особливо гостро ці проблеми проявляються в мережах з динамічною структурою та неоднорідними параметрами сенсорних елементів, де класичні евристичні або детерміновані підходи виявляються недостатньо гнучкими.

Зазначені обмеження та складність задач проектування БСМ зумовлюють необхідність використання методів еволюційної оптимізації, здатних ефективно працювати в умовах високої розмірності та множинних взаємозалежних критеріїв.

Генетичні алгоритми (ГА) є ефективним інструментом для роботи в динамічно змінних середовищах, де топологія постійно трансформується через мобільність вузлів або зміну радіусів дії. Популяційний підхід ГА дозволяє зберігати набір альтернативних рішень, що дає змогу оперативно визначати оптимальні маршрути та розміщення сенсорів.

Таким чином, спрямованість дисертаційної роботи на розробку методів підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж шляхом розв'язання задач розміщення сенсорних вузлів і маршрутизації даних на основі генетичного алгоритму в умовах мобільності та різних радіусів дії вузлів є актуальною, обґрунтованою з позицій сучасної теорії та практики телекомунікацій і відповідає потребам розвитку спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Ступінь обґрунтованості та достовірності основних наукових положень, висновків і рекомендацій

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Пирога Ярослава Романовича, забезпечуються:

- коректним застосуванням методів теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії графів, імітаційного моделювання, об'єктно-орієнтованого програмування;
- достовірністю отриманих здобувачем науково-практичних результатів, що засвідчено актами впровадження;
- необхідною апробацією матеріалів дисертації, зокрема на міжнародних наукових конференціях.

Наукова новизна дисертаційної роботи

Результати наукової новизни дисертаційної роботи складаються із 3 пунктів, які чітко окреслюють, що було розроблено здобувачем вперше, а що розвинуто із вже існуючого, зокрема:

1. Удосконалено метод маршрутизації в БСМ, який базується на мінімізації метрики довжини шляху та відрізняється від відомих аналогів застосуванням динамічного корегування параметрів генетичного пошуку. Впровадження механізму адаптації ймовірностей операторів схрещування та мутації залежно від поточного значення фітнес-функції дозволило забезпечити автоматичну реконфігурацію маршрутів при структурних змінах топології, що підвищило стабільність функціонування мережі в динамічних умовах.

2. Набув подальшого розвитку багатокритеріальний метод формування маршрутів, що використовує еволюційний апарат оптимізації з інтегральною фітнес-функцією на основі нормалізованих мережових та апаратних параметрів (Евклідової відстані, рівня втрат даних, затримки передачі даних, рівня заряду батареї, рівня сигналу, вхідного/вихідного ступеня). Метод враховує вагові коефіцієнти кожного нормалізованого значення, що дозволяє синтезувати не лише основний оптимальний шлях, а й множину відмовостійких резервних маршрутів, адаптованих до обмеженого ресурсу гетерогенних вузлів.

3. Вперше запропоновано метод просторового розміщення сенсорних вузлів, який на відміну від існуючих, заснований на модифікованому генетичному алгоритмі, що оперує механізмом оцінки щільності їх розподілу в дискретизованому просторі із використанням системи штрафних функцій для дотримання обмежень на мінімальну міжвузлову відстань та врахуванні варіативності радіусів дії сенсорів. Це забезпечило мінімізацію зон надлишкового перекриття як при первинному розгортанні мережі, так і при інтеграції нових елементів у вже існуючу інфраструктуру.

Повнота викладу результатів дисертаційної роботи у наукових публікаціях

Основні наукові положення, теоретичні висновки та практичні результати дисертаційного дослідження Пирога Ярослава Романовича викладено у наукових працях з належним ступенем повноти. Усього за темою дисертації опубліковано 15 наукових праць. Зокрема, 9 статей надруковано у наукових фахових виданнях України, що входять до переліку МОН України за спеціальністю 172. Апробація

основних ідей дисертації здійснювалася на 3 міжнародних науково-технічних конференціях, за результатами яких опубліковано відповідні тези доповідей.

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження

Практична цінність результатів дисертаційного дослідження визначається можливістю їх безпосереднього впровадження при розробці та експлуатації сучасних безпроводних сенсорних мереж, зокрема:

- застосування вдосконаленого генетичного алгоритму маршрутизації дозволило скоротити протяжність шляху на 47,14% порівняно з жадібним алгоритмом та на 28,39% відносно мурашиного алгоритму для сценаріїв з ідентичними радіусами дії. Водночас було досягнуто зменшення кількості переходів між вузлами у 3 та 2 рази відповідно. Для сценаріїв із трьома різними радіусами дії вузлів забезпечено формування маршрутів, коротших на 32,10–48,80% порівняно з жадібним пошуком. Залежно від обраної метрики відстані (Евклідова, Манхеттенська, Чебишова чи Мінковського), перевага над мурашиним алгоритмом становить від 4,62% до 26,67%. У випадках видалення вузлів вдосконалене рішення перевищує результати мурашиного алгоритму за довжиною маршруту в середньому на 16,14%. При масштабуванні мережі шляхом додавання нових елементів досягнуто скорочення маршруту в межах 8,72–22,87%, тоді як жадібний алгоритм у ряді сценаріїв виявився неспроможним сформувати зв'язний шлях.

- застосування багатокритеріального алгоритму маршрутизації із комплексним критерієм на основі шести, що поєднують параметри вузла та мережі, дозволило отримати маршрути, які на 15,75% коротші за результати мурашиного алгоритму. Такий підхід гарантує успішне досягнення вузла-отримувача в умовах обмежених ресурсів, на відміну від жадібного пошуку, який схильний до зупинок на проміжних етапах.

- впровадження еволюційного пошуку для визначення траєкторій транспортних засобів у концепції «розумного міста» дозволило зменшити час руху на 15,28% порівняно з існуючими методами. Алгоритм забезпечив гарантоване прибуття до точки призначення за критеріями довжини маршруту, завантаженості та недоступності доріг, тоді як мурашиний та жадібний алгоритми не призвели до отримання найкращого результату.

- застосування методу просторового розміщення забезпечило встановлення максимальної кількості вузлів (25 одиниць), що на 8–24% ефективніше за

жадібний та випадковий пошук. Важливим результатом є повне усунення накладання зон дії (0% перекриття проти 12% у рівномірного пошуку), що дозволяє уникнути надмірних витрат ресурсів при забезпеченні покриття території.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

Структурно дисертаційна робота Пирога Ярослава Романовича складається зі вступу, чотирьох логічно пов'язаних розділів та загальних висновків, що охоплюють увесь спектр поставлених завдань.

У першому розділі проведено аналіз специфіки генетичних алгоритмів (ГА) для застосування в БСМ. Встановлено критичну залежність результативності ГА від параметричної адаптації та запропоновано авторську класифікацію алгоритмів за принципом налаштування параметрів для схрещування та мутації, за видом фітнес функції, за видом алгоритму та за типом мережевих задач.

Другий розділ присвячено розробці адаптивного методу пошуку найкоротших шляхів у БСМ. Наукова новизна полягає у впровадженні динамічної адаптації ймовірностей схрещування та мутації залежно від поточної якості рішення (значення фітнес-функції) та використанні сукупності генетичних операторів, що дозволило скоротити протяжність маршрутів до 47,14% та зменшення кількості транзитних вузлів у 2-3 рази порівняно з існуючими евристичними підходами, підтверджуючи високу гнучкість алгоритму при зміні конфігурації мережі.

У третьому розділі здобувач розвиває концепцію багатокритеріальної маршрутизації, що враховує шість нормалізованих мережевих параметрів та характеристик вузла. Розроблений багатокритеріальний ГА довів свою перевагу над мурашиними алгоритмами, забезпечуючи формування не лише основного маршруту, який є на 15.75% коротшим порівняно з мурашиним алгоритмом, а й множини резервних маршрутів. Особливої уваги заслуговує доведена універсальність методу, який демонструє високу ефективність і в задачах інтелектуальних транспортних систем Smart City.

Четвертий розділ містить опис розробленого методу розміщення сенсорних вузлів, що базується на оцінці щільності розподілу з використанням системи штрафів. Розроблене спеціалізоване програмне забезпечення дозволило реалізувати сценарії розміщення з нульовим показником надлишкового перекриття зон покриття (проти 12% у традиційних методах) при збереженні

максимальної кількості активних пристроїв. Це є важливим чинником для підвищення продуктивності роботи БСМ.

Ефективність пропонованого рішення підтверджується наступними показниками:

- для гомогенних мереж (однакові радіуси дії вузлів): дозволило збільшити кількість успішно розгорнутих вузлів на 1–4 одиниці порівняно зі стратегією жадібного вибору та на 1–6 одиниць – відносно випадкової генерації координат. При цьому зафіксовано суттєве зниження коефіцієнта просторової надлишковості: площа взаємного перекриття зон покриття зменшилася на 2,85–13,23%.

- для гетерогенних мереж (різні радіуси дії вузлів): продемонструвало здатність до формування максимально повної конфігурації (25 вузлів), що перевершує результативність жадібного алгоритму на 8–16% (2–4 вузли), а показники випадкового пошуку – на 24% (6 вузлів). Ключовою перевагою є повне нівелювання зон інтерференції сигналів: зафіксовано нульовий показник перекриття (0%) для розробленого методу, тоді як при використанні рівномірного пошуку цей негативний чинник становить 12%.

Дисертаційна робота Пирога Ярослава Романовича відзначається логічною цілісністю, завершеністю та високим науковим рівнем.

Зауваження та рекомендації до дисертаційної роботи

1. У другому розділі недостатньо деталізовано алгоритм взаємодії вузлів із різними радіусами дії. Зокрема, не вказано, чи враховується асиметричність зв'язків та як це впливає на формування графа зв'язності мережі.

2. Графічний матеріал роботи містить повнорозмірні матриці відстаней для 25 вузлів, які займають значний обсяг та ускладнюють сприйняття основного тексту. Оскільки ці дані мають довідковий характер і слугують підтвердженням вхідних параметрів моделювання, доцільно представити їх у додатку.

3. У другому розділі параметри мурашиного алгоритму задано фіксованими значеннями без обґрунтування їх оптимальності або проведення параметричного аналізу.

4. На рис. 4.57 та 4.63 наведено графіки фітнес-функції, які демонструють досягнення оптимуму при значно різній кількості поколінь. Було б корисно додатково проаналізувати, чим зумовлене таке зростання кількості ітерацій.

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Пирога Ярослава Романовича.

Загальні висновки

Дисертаційна робота Пирога Ярослава Романовича є завершеною науково-практичною працею, що містить нові науково-обґрунтовані результати, які мають суттєве значення для розвитку теорії та практики побудови безпроводних сенсорних мереж.

Всі наукові положення, висновки та рекомендації, викладені в дисертації, є обґрунтованими та достовірними, а їх практична цінність підтверджена експериментальними результатами, отриманими шляхом імітаційного моделювання, та актами впровадження.

Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», а також Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України №44 від 12.01.2022 р. зі змінами), а її автор - Пиріг Ярослав Романович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

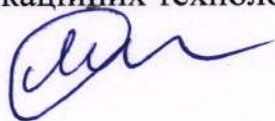
Рецензент:

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри інформаційно-комунікаційних технологій

Національного університету

«Львівська політехніка»



Мар'ян СЕЛЮЧЕНКО

Підпис к.т.н., доцента Селюченка М.О. засвідчую:

Вчений секретар

Національного університету

«Львівська політехніка»



Роман БРИЛИНСЬКИЙ