

УДК 519.6

## КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯ У ПРИМІЩЕННЯХ З ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

Долженкова О.В., Гук М.К.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Розроблено автоматизовану систему моніторингу та контролю параметрів повітряного середовища у приміщенні. Пропонується архітектура інтегрованої системи із застосуванням бездротової сенсорної мережі, розглядається варіант побудови бездротової мережі на основі технології ZigBee. Побудовано математичну модель розповсюдження сигналу, модель топології мережі. Для розв'язання задачі проектування топології мережі використано генетичний алгоритм. Розроблено програмне забезпечення для проектування та оптимізації топології мережі.

**Ключові слова:** моніторинг параметрів повітря, бездротова сенсорна мережа, сенсор, роутер, сервер, топологія, задача покриття, генетичний алгоритм.

**Постановка проблеми.** Якість повітря всередині приміщень суттєво впливає на самопочуття і здоров'я людини, оскільки мешканці міст проводять у замкненому середовищі від 58 до 78% свого часу. Ця проблема стає ще більш гострою, у зв'язку з тим, що з метою енергозбереження сучасні будівлі створюються герметичними, в них відсутня природна вентиляція. Концентрація домішок у повітрі у приміщеннях такого типу може перевищувати відомі стандарти, тому обов'язково повинна контролюватися.

Аналіз хімічних складових повітря не завжди може дати точну відповідь про його якість. Поєднання великої кількості хімічних компонентів, які виділяються покриттями стін та підлогою, меблями та іншими предметами, з такими факторами як температура і вологість повітря в приміщенні істотно впливають на його якість і, призводять до того, що повітря приміщення може сприйматися людьми як дратівливе, забруднене або затхле, тобто низькоякісне.

Комплексне дослідження повітря з використанням газоаналізаторів дозволяє визначити максимальні разові концентрації і середні значення змінних концентрацій забруднюючих речовин. Для проведення аналізу якості повітря у приміщенні зазвичай вимірюються такі параметри: концентрації речовин  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ; запиленість – наявність пилу фракцій:  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_4$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_1$ , загальна масова концентрація пилу; наявність формальдегіду, фенолу та інших органічних речовин; складові мікроклімату – температура, вологість, рух повітря. Здійснення такого контролю передбачає наявність спеціальної лабораторії, потребує часу для проведення аналізу та матеріальних витрат. Його рекомендується проводити у новозбудованих або відремонтованих приміщеннях, оскільки найбільша концентрація речовин спостерігається на початкових стадіях експлуатації об'єкта, з часом концентрації шкідливих речовин знижується.

Для безперервного контролю за станом повітря всередині приміщень достатньо вимірювати рівень  $\text{CO}_2$ , температуру і вологість. На підставі цих даних можна автоматизувати управління системою вентиляції всередині приміщення.

У даній роботі пропонується створення автоматизованої системи контролю стану повітряного середовища у приміщенні з використанням бездротової сенсорної мережі (Wireless Sensor Network).

**Аналітичний огляд проблеми.** Питанням проектування й аналізу топології бездротових сенсорних мереж присвячена велика кількість робіт. У літературі широко представлений випадок моделювання мереж з нерухомими в просторі вузлами. При цьому для розв'язання таких задач використовуються алгоритми теорії графів [3; 5; 6; 7; 9].

Розв'язання задач у такій постановці відбувається шляхом побудови в графі мінімальних остовних дерев, дерев Штейнера, гамільтонових контурів мінімальної довжини. Однак з використанням цього підходу можливо розглянути задачу тільки у випадку використання однотипних вузлів мережі за умови, що відомими є ваги зв'язків, що з'єднують вузли мережі.

Інший підхід до проектування топології мережі полягає у формулюванні задачі оптимізації. В якості критерію оптимальності може використовуватися вартість обладнання, рівномірність сигналу в зоні покриття та інші. Однак використання одного з перерахованих критеріїв у якості цільової функції не дозволяє забезпечити виконання умов за іншими критеріями.

При проектуванні оптимальної топології мережі задача може бути сформульована як задача багатокритеріальної оптимізації, для лінеаризації якої використовують метод згортки критеріїв або метод головного критерію [3]. Для розв'язання задачі у такій постановці використовуються перелікові алгоритми, що мають високу обчислювальну складність. Алгоритм перебору розглядає усі варіанти розв'язків й вибирає з них той, що відповідає екстремуму критеріальної функції, що забезпечує інваріантність алгоритму стосовно критеріальних функцій.

Задача проектування топології мережі також може бути розв'язана з використанням теорії алгоритмів як задача розміщення (facility location problem), або як задача покриття (covering problem).

Використання точних математичних моделей для задачі покриття вимагає істотних обмежень на умови задачі, що унеможливує їх застосування при розв'язанні практичних задач. Крім того, використання класичних методів оптимізації можливе лише для розрахунків топології мереж малої вимірності через значні труднощі обчислювального характеру.

З аналізу літературних джерел випливає, що аналітичні моделі й методи розв'язання мають обмежену область застосування та певні недоліки, які не дозволяють використовувати їх для розв'язання практичних задач. Переважна більшість робіт, що мають відношення до задач кругового покриття, присвячена дослідженню евристичних методів їх розв'язання. Сучасні обчислювальні технології, такі як генетичний алгоритм, метод мурашиних колоній, застосовуються для розв'язання задач оптимального проектування сенсорної мережі. Однак сформульовані в літературі цільові функціонали не враховують усіх вимог, які висуваються до бездротових сенсорних мереж на практиці.

У даній роботі пропонується проектування оптимальної бездротової сенсорної мережі, що реалізує оптимальне покриття заданої області, при цьому в автоматичному режимі здійснюється розподіл ролей пристроїв (сенсор, роутер, сервер) між вузлами мережі. Побудована конфігурація повинна забезпечувати зв'язаність вузлів мережі, стійкість мережі (можливість передачі інформації навіть у випадку відмови окремих сенсорів).

**Опис конфігурації сенсорної мережі та функцій автоматизованої системи.** У бездротовій сенсорній мережі присутні три основні типи пристроїв: сервер, роутер, сенсор (кінцевий пристрій). Сервер контролює процес формування мережі, приймає рішення щодо підключення нових вузлів, виконує обробку даних, отриманих від сенсорів, шифрування даних, розподіляє ролі в мережі між всіма пристроями. При виявленні нестандартної ситуації сервер організує розсилку інформаційних повідомлень спеціальним службам, а також повідомлень на мобільні пристрої відвідувачів приміщення. Таким чином здійснюється інформування відповідних служб та користувачів системи о надзвичайної ситуації для подальшого усунення проблеми.

Роутери розширюють діапазон мережі, у випадку відмови сервера один з роутерів починає виконувати його роль. Роутери передають дані, отримані від сенсорів, на сервер. Сенсори – це пристрої, які оснащені датчиками температури, задимленості, рівня вологості, рівня вуглекислого газу та іншими. Вони вимірюють показники параметрів середовища у приміщенні та передають отримані дані роутеру.

Необхідно побудувати оптимальну топологію бездротової стільникової мережі, що забезпечує високу надійність передачі даних (максимізується покриття області сигналами вузлів мережі), крім того, повинні бути розподілені ролі вузлів мережі. Для забезпечення відмовостійкості мережі повинні виконуватися додаткові обмеження: кожний сенсор повинен перебувати в області дії мінімум 2-х роутерів; кожний роутер повинен перебувати в області дії іншого роутера [1].

Сенсори обладнані радіочастотним модулем зв'язку та датчиками для виявлення небезпечних ситуацій. Радіочастотний модуль пристроїв працює в частотному діапазоні 2,4 ГГц і підтримує високорівневий мережевий протокол Zigbee для забезпечення зв'язку «вузол-вузол».

Пристрої розташовано на стінах приміщення. За допомогою датчиків у пристроях вимірюють-

ся параметри повітря у приміщенні, отримані від кожного датчика дані передаються на сервер. Розроблене програмне забезпечення, яке встановлюється на сервері, накопичує отримані дані, порівнює отримані значення із критичними значеннями для відповідних параметрів. Серверне обладнання вмикає систему вентиляції приміщення за результатами аналізу параметрів повітря. У разі появи небезпечної ситуації (наявність диму, вогню) розроблена автоматизована система здійснює функції централізованого керування різними засоби реагування – системами сповіщення, системами протипожежної автоматики та системами пожежогасіння, інженерними системами.

Крім того, за координатами розташування сенсору, від якого отримані дані про небезпечну ситуацію, можливе встановити її місцезнаходження.

Автоматизована система за допомогою радіозв'язку здійснює контакт із мобільними пристроями відвідувачів приміщення, на яких встановлено відповідне програмне забезпечення у вигляді мобільного додатку для операційних систем IOS та Android. Таким чином здійснюється сповіщення відвідувачів про небезпечну ситуацію, що склалась.

**Логарифмічно-нормальна модель поширення сигналу бездротового каналу зв'язку**

Для визначення відстаней між пристроями мережі необхідно побудувати математичну модель поширення радіосигналу в просторі, за допомогою якої визначається відстань, на якій ймовірність помилкового приймання пакета даних менше деякої заданої прийнятної ймовірності помилки. У зоні впевненого прийому з'єднання між вузлами мережі встановлюється й забезпечує максимальну швидкість передачі даних.

За граничне значення приймається ймовірність помилкового приймання пакета даних, яка дорівнює 1%, що забезпечує 99% надійності з'єднання.

У роботі для опису процесу поширення сигналу використовується логарифмічно-нормальна модель Фрися із загасанням [10]:

$$\overline{PL}(d) = PL(d_0) + n \cdot 10 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma(0, \sigma),$$

де  $\overline{PL}(d)$  – середнє затухання сигналу на відстані  $d$  в дБ;

$PL(d_0)$  – середнє загасання сигналу на відстані  $d_0 = 1$  м;

$n$  – ступінь втрат при поширенні;

$X_\sigma(0, \sigma)$  – гауссова випадкова величина з нульовим математичним очікуванням і середнькватратичним відхиленням  $\sigma$ .

Ослаблення сигналу на відстані  $d_0 = 1$  м можна обчислити, використовуючи рівняння Фрися:

$$PL(d_0) = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right),$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі несучого сигналу.

Прийнято, що на відстані у межах одного метра сигнал поширюється, як у моделі відкритого простору. Довжину хвилі несучого сигналу при частоті 433 МГц визначимо як  $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300}{433} = 0.692$  м.

Випадкова величина  $X_\sigma$  визначає всі динамічні зміни в навколишньому середовищі, а також багатопроменеве поширення сигналу. Параметри  $n$  і  $\sigma$  для цієї моделі задаються, виходячи з експе-

риментальних даних про навколишнє середовище. За допомогою розробленої моделі можна визначити дальність впевненого прийняття радіосигналу.

Оптимізація топології сенсорної мережі. Задачу про оптимальне проектування топології бездротової стільникової мережі пропонується сформулювати як задачу кругового покриття, оскільки область дії радіопристрою описується колом [2].

Для опису кругового покриття області  $\Omega$  побудуємо об'єднання кіл  $B_i$ ,

$$\Psi = \bigcup_{i=1}^n B_i,$$

де  $i = \overline{1, N}$  – кількість кіл.

Сформулюємо критерій якості  $Q(X)$ , за яким будемо оцінювати оптимальне покриття. Необхідно розташувати на області  $\Omega$  центри кіл  $X_k, X_p$ , які визначають сенсори та роутери, відповідно, так, щоб мінімізувати підмножину точок області  $\Omega^{(1)}$ , яку не покрито колами, підмножину точок  $\Omega^{(2)}$ , що належать перетину двох і більше кіл, підмножину точок  $\Omega^{(3)}$ , які не належать області  $\Omega$ . Для побудови оптимального покриття множини  $\Omega$  системою кіл необхідно, щоб міра множини  $\Omega^* = \bigcup_{i=1}^3 \Omega^{(i)}$  була мінімальною:

$$mes \Omega^* \Rightarrow \min.$$

Для забезпечення відмовостійкості мережі сформулюємо умови: кожний сенсор повинен з'єднуватись з двома роутерами, кожний роутер повинен з'єднуватись хоча б ще з одним роутером. Умови відмово стійкості приєднуються до цільового функціоналу методом штрафних функцій.

**Метод розв'язання задачі.** У якості методу розв'язання сформульованої задачі оптимізації будемо використовувати генетичний алгоритм.

Область покривається рівномірною сіткою, яка складається з вузлів  $X_n$ ,  $n = \overline{1, N}$ . Вузли сітки є точками розміщення пристроїв (роутерів, сенсорів). Кодування інформації про розміщення пристрою (сенсора, роутера) у вузлі сітки виконується в такий спосіб: 00 – пристрій (роутер або сенсор) у вузлі не розміщено; 01 – у вузлі розміщений сенсор; 10 – у вузлі розміщений сенсор; 11 – у вузлі розміщений роутер.

Для генерації популяції будемо використовувати різні варіанти розміщення сенсорів у вузлах дискретизації області. Набір хромосом для популяції генерується випадковим чином. У роботі розмір популяції дорівнює 500 хромосомам ( $M = 500$ ).

Сгенеровані у такий спосіб хромосоми (варіанти топології мережі) оцінюються з точки зору цільової функції задачі. На кожній ітерації генетичного алгоритму виконуються операції селекції та мутації, кращий розв'язок з поточної популяції використовується для формування нової популяції, після чого цикл (генерація) повторюється.

**Програмна реалізація.** У програмному продукті було розроблено структури для зберігання даних про план будинку, інформації стосовно розташування пристроїв мережі, даних про хромосоми і популяції.

Програма складається з декількох модулів. Модуль роботи із планами будинків здійснює перетворення інформації з файлів типу .json,

та забезпечує збереження, графічне відображення плану будівлі на формі.

Модуль роботи з пристроями здійснює генерацію, конвертування інформації про хромосома, графічне відображення пристрою на екранній формі.

Модуль генетичного алгоритму містить реалізацію генетичних операцій мутації, схрещування, селекції, процедури генерації початкової популяції, процедури обчислення значення фітнес-функції.

Також розроблено модуль допоміжних геометричних функцій для визначення геометричного місця точок області й зіставлення їх місцезнаходження із границями області.

За допомогою розробленого програмного забезпечення обрано методи виконання операцій та проведено налаштування параметрів генетичного алгоритму. Було обрано наступні параметри генетичного алгоритму:

- Розмір популяції: 500 осіб, значення початкової кількості роутерів та сенсорів встановлюється більшими ніж цільова кількість відповідних пристроїв;
- Мутація: обирається однорідна (Uniform) мутація з 1% імовірністю і кількістю генів, що підлягають мутації від 0 до 3;
- Схрещування: обирається однорідне схрещування з імовірністю 10%;
- Селекція: обирається турнірний відбір;
- Значення функцій штрафу: за використання надмірного числа роутерів значення функції штрафу дорівнює 1; за використання надмірного числа сенсорів значення функції штрафу дорівнює 0.75; за невиконання умов стійкості мережі значення функції штрафу дорівнює 0,0001.
- Площа покриття для одного пристрою: для роутера становить 450 м<sup>2</sup>, площа покриття сенсора становить 40 м<sup>2</sup>;
- Критерій припинення роботи алгоритму: стагнація результатів на ітераціях генетичного алгоритму.

Із використанням обраних параметрів було розв'язано задачу покриття, оптимальний результат розташування пристроїв отримано після виконання 300 ітерацій генетичного алгоритму. Декодований результат розрахунку зображено на рис. 1 (на декодованому зображенні маленький прямокутник позначає сенсор, великий прямокутник позначає роутер, лінії, які поєднують пристрої, позначають між якими пристроями встановлюється зв'язок).

#### Висновки

1. Задачу проектування топології бездротових сенсорних мереж сформульовано як задачу кругового покриття.
2. На підставі проведеного аналізу літературних джерел обрано перспективні для дослідження математичні моделі, метод генетичного пошуку.
3. Сформульовано цільову функцію, яка визначає площу покриття області радіопристроями, й систему обмежень, що забезпечують додаткові умови стійкості мережі. Обмеження приєднані до цільової функції із використанням штрафних функцій.
4. У якості методу розв'язання задачі оптимізації обрано генетичний алгоритм. Основні генетичні оператори (селекція, схрещування, мутація, формування початкової популяції) адаптовано

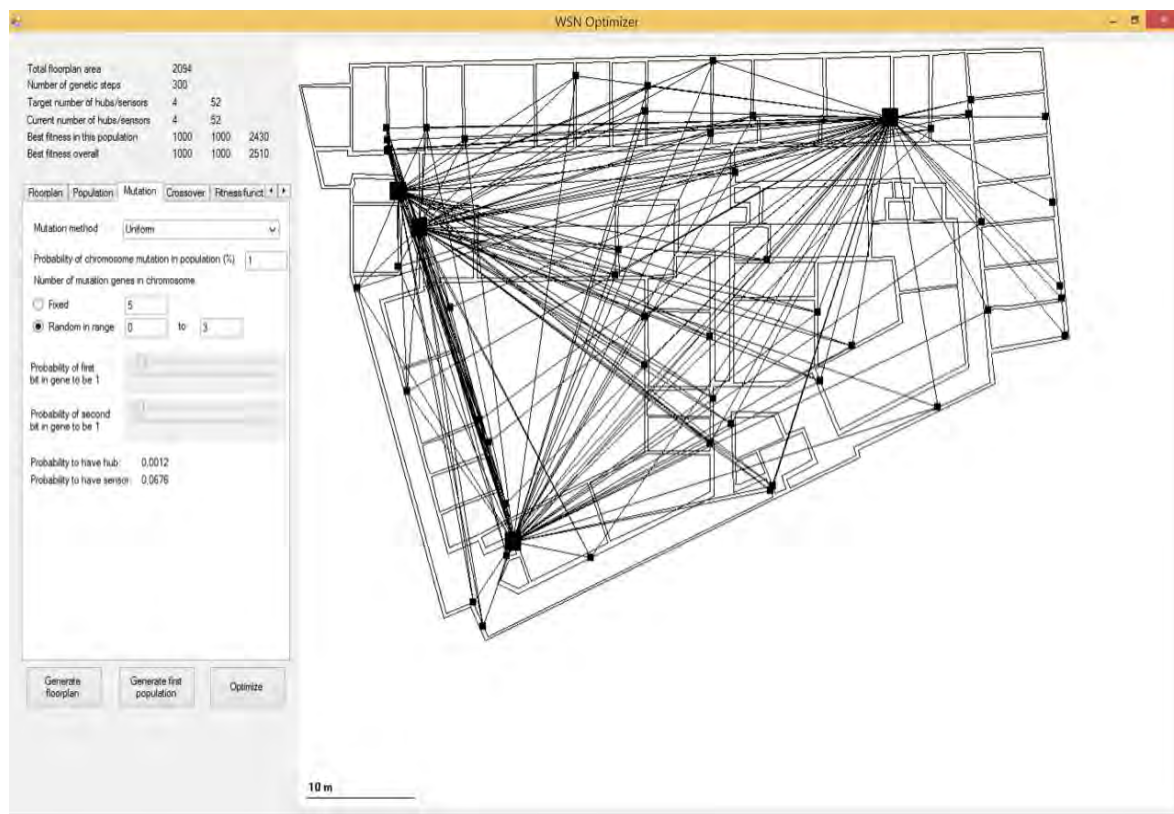


Рис. 1. Декодований результат розв'язання задачі покриття

до задачі проектування топології бездротових сенсорних мереж, виходячи з вигляду цільової функції задачі оптимізації сформульовано фітнес-функцію генетичного алгоритму.

5. Встановлено, що із збільшенням кількості ітерацій генетичного алгоритму поведінка фітнес-функції суттєво змінюється до певного мо-

менту, при подальшому збільшенні кількості ітерацій генетичного алгоритму у поведінці фітнес-функції не відбувається значних змін, при цьому час виконання розрахунків за генетичним алгоритмом значно зростає, тому у якості критерію зупинення генетичного алгоритму обрано стагнацію результатів на ітераціях алгоритму.

### Список літератури:

1. Гук М.К. Про вибір топології бездротової мережі при розробці системи безпеки будівлі / М.К. Гук // Тези доп. XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2016)», 16-18 листопада, 2016. – Дніпро. – 2016. – С. 55–56.
2. Н.І. Ободан, М.К. Гук. Оптимізація топології бездротової сенсорної мережі сповіщення // Питання прикладної математики і математичного моделювання. – зб. наук праць, вип. 17. – 2017. – С. 154–162.
3. Князев Д.М. Приложение теории графов к решению задачи топологических петель в сетях Ethernet [Текст] / Д.М. Князев, И.А. Грибанов // Сб. ст. по мат. XXXI междунар. студ. науч.-практ. конф. «Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки». – 2015. – № 4(30). – С. 54–59.
4. Тайк А.М. Применение алгоритма перебора для оптимизации топологии беспроводных сетей [Text] / А.М. Тайк, С.А. Лупин, Ю.Ф. Вагапов // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – № 9.
5. A. Guinard, A. McGibney, D. Pesch. A wireless sensor network design tool to support building energy management // In Proceedings of the First ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings. – 2009. – ACM, New York, NY, USA, 25-30. DOI=http://dx.doi.org/10.1145/1810279.1810286.
6. Doumit S.S. Self Organizing and Energy-Efficient Network of Sensors [Text] / Doumit S.S., Agrawal D.P. // IEEE. – 2002. – P. 1–6.
7. Drezner Z. Facility Location: applications and theory [Text] / Z. Drezner, H.W. Hamacher. editors. – Springer-Verlag, Berlin, 2002.
8. Farahani R.Z. Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies [Text] / R.Z. Farahani, M. Hekmatfar. – Physica-Verlag, Heidelberg, Germany, 2009. – 549 p.
9. Mihelic J. Facility Location and Covering Problems [Text] / J. Mihelic, B. Robic // Theoretical Computer Science. Information Society (October 11-15, 2004). – Ljubljana, Slovenia. – 2004.
10. Sklar B. Digital Communications. Fundamentals and Applications [Text] / B. Sklar. Moscow, Vil'iams Publ, 2003.

**Долженкова Е.В., Гук М.К.**

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

## **КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ**

### **Аннотация**

Разработана автоматизированная система мониторинга и контроля параметров воздушной среды в помещении. Предлагается архитектура интегрированной системы с применением беспроводной сенсорной сети, рассматривается вариант построения беспроводной сети на основе технологии ZigBee. Построена математическая модель распространения сигнала, модель топологии сети. Для решения задачи проектирования топологии сети используется генетический алгоритм. Разработано программное обеспечение для проектирования и оптимизации топологии сети.

**Ключевые слова:** мониторинг параметров воздуха, беспроводная сенсорная сеть, сенсор, роутер, сервер, топология, задача покрытия, генетический алгоритм.

**Dolzhenkova E.V., Huk M.K.**

Oles Gonchar Dnipro National University

## **CONTROL OF AIR INDOORS USING A WIRELESS SENSOR NETWORK**

### **Summary**

An automated system for monitoring and controlling indoor air parameters has been developed. The architecture of the integrated system with the use of a wireless sensor network is proposed, the variant of construction of a wireless network based on technology ZigBee is considered. A mathematical model of signal propagation, network topology model was constructed. To solve the problem of network topology designing, a genetic algorithm has been used. Software for designing and optimizing network topology is developed.

**Keywords:** air parameters monitoring, wireless sensor network, sensor, router, server, topology, coverage problem, genetic algorithm.