

П. Є. Пустовойтов, М. Ю. Охрименко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

МЕТОД АНАЛІЗУ ЯКОСТІ ЛОГІЧНИХ КАНАЛІВ ТА ВИБІР МАРШРУТІВ У ОДНОРАНГОВІЙ СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ

Анотація. Сенсорні мережі відіграють ключову роль у багатьох галузях завдяки своїй здатності ефективно збирати та передавати дані. Однак забезпечення надійності та якості передавання даних залишається однією з основних проблем. У статті представлено метод розрахунку якості каналів у сенсорній мережі, який базується на використанні апарату нечіткої математики, а саме операції транзитивного замикання нечіткого бінарного відношення. Запропонований метод використовує нечітке бінарне відношення для моделювання якості каналів зв'язку між вузлами мережі. Виконуючи транзитивне замикання, метод дозволяє отримати більш точну та адаптивну оцінку якості каналів, враховуючи різні фактори, такі як затримка, пропускна здатність, енергоспоживання та надійність. Результати досліджень показують, що використання операції транзитивного замикання нечіткого бінарного відношення дозволяє значно покращити точність оцінки якості каналів та підвищити ефективність вибору маршрутів у сенсорній мережі. Запропонований метод може бути корисним для покращення продуктивності та надійності сенсорних мереж, забезпечуючи їхню стійку та ефективну роботу у різних умовах експлуатації.

Ключові слова: логічний канал, оптимальний маршрут, однорангова сенсорна мережа.

Вступ

Логічний канал у сенсорній мережі (або мережі датчиків) являє собою концептуальний шлях, по якому дані передаються між вузлами мережі. Звичайно, це не обов'язково фізичний шлях, а швидше абстракція, яка допомагає організувати передачу даних. Логічні канали використовують для визначення шляху, яким дані повинні передаватися від сенсора до базової станції або іншого кінцевого пункту [1].

Створення захищених каналів [2] для передачі чутливих даних дозволяє забезпечити конфіденційність, цілісність та автентичність інформації в сенсорних мережах, захищаючи її від несанкціонованого доступу, перехоплення та модифікації, що є критично важливим для підтримки безпеки і надійності в різних застосуваннях, таких як моніторинг навколишнього середовища, медичні системи або військові операції.

В сенсорних мережах можуть існувати різні типи логічних каналів [3], наприклад: уніфіковані канали (використовуються для передачі даних від кожного вузла до центрального вузла або базової станції), групові канали (призначені для передачі даних між вузлами, які знаходяться в межах однієї підмережі або кластера), динамічні канали (формуються та змінюються в залежності від поточної мережевої топології та вимог до передачі даних). Логічні канали допомагають оптимізувати роботу сенсорної мережі, забезпечуючи надійність, ефективність та безпеку передачі даних.

Актуальність дослідження. Мета роботи. Однорангові сенсорні мережі складаються з великої кількості взаємопов'язаних сенсорів, які обмінюються даними про навколишнє середовище. Надійність і ефективність цих мереж залежать від якості логічних каналів та оптимального вибору маршрутів для передачі даних.

Метод аналізу якості логічних каналів та вибір маршруту у одноранговій сенсорній мережі є **актуальним** через зростаючу потребу в ефективному управлінні сенсорними мережами, які використовуються в різних галузях, таких як охорона здоров'я,

промисловість, сільське господарство та розумні міста. Здатність надійно збирати та передавати дані в реальному часі є критичною для підтримки безперервної роботи цих систем. Відповідний метод аналізу якості логічних каналів допомагає забезпечити стабільність і надійність зв'язку між сенсорами, що є необхідним для прийняття обґрунтованих рішень на основі зібраних даних.

Окрім того, метод вибору маршруту у одноранговій сенсорній мережі сприяє підвищенню загальної надійності та безпеки системи. Врахування якості логічних каналів дозволяє запобігати можливим збоєм зв'язку та забезпечувати безперервність передачі даних навіть у випадку виходу з ладу окремих вузлів. Це особливо важливо для застосувань, де безпека та надійність даних мають критичне значення, таких як моніторинг здоров'я пацієнтів або контроль промислових процесів. Відповідний підхід до вибору маршруту підвищує стійкість мережі до збоїв та забезпечує стабільну роботу в різних умовах експлуатації.

Метою даного дослідження є розробка методу аналізу якості логічних каналів і вибору оптимальних маршрутів у одноранговій сенсорній мережі для забезпечення надійності зв'язку, мінімізації енергоспоживання та підвищення загальної ефективності мережі.

Для досягнення поставленої мети треба вирішити такі задачі:

- провести огляд існуючих методів аналізу якості логічних каналів і маршрутизації в однорангових сенсорних мережах;
- визначити ключові фактори, що впливають на якість логічних каналів та вибір маршрутів, такі як енергоспоживання, пропускна здатність, затримки передачі та надійність;
- розробити метод для оцінки якості логічних каналів, враховуючи параметри, що впливають на продуктивність мережі;
- створити алгоритм вибору маршрутів, що забезпечує баланс між метриками якості передачі даних;
- реалізувати запропонований метод та алгоритм у програмному середовищі;

- провести моделювання роботи однорангової сенсорної мережі з використанням розробленого методу;
- розробити рекомендації щодо впровадження розробленого методу у реальні сенсорні мережі.

1. Огляд літератури

Сенсорні мережі складаються з численних невеликих сенсорів, які взаємодіють для збору і передачі даних про навколишнє середовище. Ці сенсори можуть вимірювати різні параметри, такі як температура, вологість, тиск, рух та інші фізичні явища. Сенсорні мережі застосовуються у багатьох сферах, включаючи охорону здоров'я, промисловість, сільське господарство, екологічний моніторинг та розумні міста. Вони дозволяють здійснювати постійний моніторинг і аналіз даних, що сприяє прийняттю більш обґрунтованих рішень та підвищенню ефективності процесів. Тому для управління такими мережами, визначення логічних каналів та маршрутизації використовують різні методи.

В роботах [4, 5] приділяється увага мережевим протоколам на основі кластеризації, які мають такі переваги, як зниження енергоспоживання (вузли передають дані лише до центру кластера, що зменшує кількість передач на великі відстані) та покращену масштабованість (Велика мережа розбивається на кластери, що дозволяє краще масштабуватися при збільшенні кількості вузлів).

Але існує висока залежність від кластерних центрів. Якщо кластерний центр виходить з ладу, це може вплинути на всю підмережу. У свою чергу нерівномірне споживання енергії, через те, що кластерні центри споживають більше енергії, ніж інші вузли, приводить до швидкого розрядження їх батарей.

В роботах [5, 6] розглядаються методи маршрутизації на основі позиційної інформації. Вони розраховують маршрути за рахунок використання географічних даних, що дозволяє знаходити найкоротші та найефективніші шляхи для передачі даних. Методи вибирають найближчі вузли як проміжні вузли, що зменшує затримки в передачі даних. Але, у свою чергу, у великих мережах складно підтримувати актуальну позиційну інформацію для всіх вузлів, що ускладнює масштабованість. Для роботи методів ставиться вимога наявності GPS або інших засобів визначення положення координат, але не всі вузли можуть бути обладнані таким приладом.

В роботах [7, 8] пропонуються методи маршрутизації у сенсорних мережах на основі енергетичних ресурсів. Методи враховують рівень заряду батарей вузлів, що дозволяє ефективніше використовувати ресурси мережі. У свою чергу, збалансоване використання енергії між вузлами продовжує загальний термін служби мереж. Але врахування енергетичних ресурсів кожного вузла вимагає складних алгоритмів та обчислень, потрібно постійно контролювати енергетичний стан кожного вузла, що ускладнює управління у великих мережах.

Методи на основі ієрархічної маршрутизації, які розглядаються у [9], припускають, що ієрархічна структура дозволяє ефективніше організувати

передачу даних, а навантаження на вузли зменшується за рахунок того, що вузли з нижчого рівня передають дані лише до вузлів вищого рівня, що знижує навантаження. Проте, ієрархічна структура потребує складного управління та налаштування, а вихід з ладу вузлів вищого рівня може значно вплинути на роботу мережі.

Протоколи на основі мультишляхової маршрутизації, розглянуті у [9] базуються на очевидному твердженні, що наявність кількох альтернативних шляхів дозволяє забезпечити безперервність передачі даних у разі виходу одного з вузлів з ладу, і, у свою чергу, розподіл трафіку між різними шляхами допомагає уникнути перевантаження окремих вузлів. Але, знов таки, це вимагає підвищене енергоспоживання, тому що підтримка кількох маршрутів може вимагати більше енергії. Також, вибір оптимальних шляхів та підтримка актуальних маршрутів може бути складним завданням з точки зору зберігання бази маршрутів та управління мережею.

Кожен метод має свої особливості і може бути обраний залежно від специфічних вимог та умов роботи сенсорної мережі.

2. Постановка задачі

Розглянемо модель сенсорної мережі (рис. 1), створену в середовищі OMNeT++. Цей приклад являє собою візуальне представлення архітектури мережі. Візуалізація в OMNeT++ допомагає зрозуміти складні взаємодії між елементами мережі.

Будівництво тимчасових логічних каналів у сенсорній мережі за певними метриками дозволяє оптимізувати передачу даних і забезпечити надійність зв'язку. Це особливо важливо в динамічних середовищах, де умови можуть швидко змінюватися, наприклад, через зміну фізичного розташування сенсорів або зміну умов навколишнього середовища. Вибір оптимальних логічних каналів на основі таких метрик, як енергоспоживання, пропускна здатність, затримка передачі та надійність, дозволяє адаптувати мережу до поточних умов і забезпечити ефективну передачу даних.

Тимчасові логічні канали також сприяють збалансованому використанню ресурсів мережі, запобігаючи перевантаженню окремих вузлів та подовжуючи час роботи всієї системи. Вони дозволяють розподіляти навантаження між різними сенсорами, враховуючи їхні поточні ресурси та стан. Це допомагає зменшити ризик виходу з ладу критично важливих вузлів і забезпечити стійкість мережі до збоїв. Таким чином, створення тимчасових логічних каналів на основі відповідних метрик підвищує загальну ефективність і надійність сенсорної мережі, що є важливим для її успішного функціонування у різних застосуваннях.

Таким чином, ставиться задача розробки методу аналізу якості та створення тимчасових логічних каналів у сенсорній мережі на основі певних метрик, що дозволить оптимізувати передачу даних і забезпечити надійність зв'язку. Врахування метрик, таких як пропускна здатність, затримка передачі та надійність, дозволяє адаптувати мережу до змінних умов навколишнього середовища і фізичного розташування сенсорів.

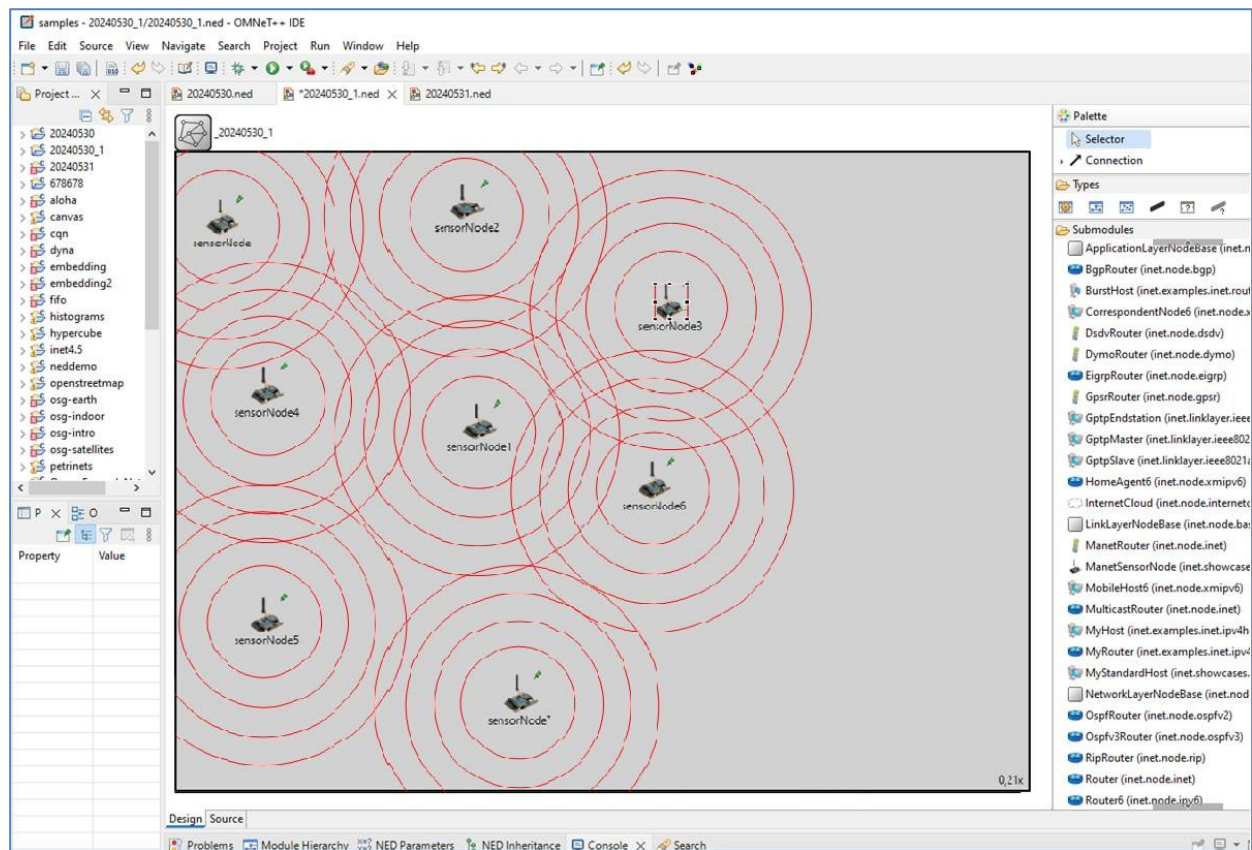


Рис. 1. Екранна форма моделі мережі у OMNeT++

Рішення цієї задачі сприятиме збалансованому використанню ресурсів мережі, запобіганню перевантаженню окремих вузлів і подовженню часу роботи всієї системи. Це дозволить ефективно розподіляти навантаження між сенсорами, зменшуючи ризик виходу з ладу критично важливих вузлів і підвищуючи стійкість мережі до збоїв. Отже, розробка методу аналізу якості та створення тимчасових логічних каналів на основі відповідних метрик є ключовою для підвищення загальної ефективності та надійності сенсорної мережі.

3. Основні результати

Сенсорну мережу, модель якої наведена на рис. 1, було представлено у вигляді графа, де кожен вузол сенсорної мережі та зв'язки між ними інтерпретовані, як вершини та ребра графа відповідно. Кожен сенсорний вузол (сенсор) у мережі представлено вершиною графа, які позначено v_i , $i = 1..8$. У свою чергу, зв'язки між сенсорами представлено ребрами графа, якщо сенсори можуть обмінюватися даними безпосередньо один з одним. Тобто, якщо сенсорний вузол v_i має змогу безпосередньо передавати дані сенсорному вузлу v_j , то між v_i та v_j проводилось ребро. У відповідність кожному ребру ставилась вага (значення якості логічного каналу між вузлами) - дійсне число з інтервалу $[0..1]$.

Такий граф $G(V, E, \mu)$ представлено у вигляді матриці M_Q , табл.1, Де, V - множина вершин графа, E – множина дуг графа, $\mu_Q(< v_i, v_j >)$ – функція якості каналу, що залежить від пари вузлів v_i, v_j , які

поеднує канал. Якщо вузли не пов'язані один з одним безпосередньо, то у матриці M_Q ставиться нуль на перехресті відповідного стовпця та строки.

Таблиця 1 – Матриця M_Q безпосередніх зв'язків вузлів та якості каналів

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
v_1	1	0,75	0,32	0,47	0,53	0,68	0,71	0,83
v_2	0,75	1	0,11	0,73	0,89	0,51	0,49	0,42
v_3	0,32	0,11	1	0,29	0,87	0,37	0,34	0,92
v_4	0,47	0,73	0,29	1	0,17	0,23	0,59	0,67
v_5	0,53	0,89	0,87	0,17	1	0,86	0,36	0,24
v_6	0,68	0,51	0,37	0,23	0,86	1	0,75	0,79
v_7	0,71	0,49	0,34	0,59	0,36	0,75	1	0,81
v_8	0,83	0,42	0,92	0,67	0,24	0,79	0,81	1

Використовуючи математичний апарат теорії нечіткої математики для опису відношень між усіма парами вузлів мережі, маємо бінарне нечітке відношення $Q = \{< v_i, v_j >, \mu_Q(< v_i, v_j >)\}$.

Оберемо пару вузлів мережі, наприклад, v_i та v_j , побудуємо множину всіх можливих шляхів, які починаються у вузлі v_i та закінчуються у вузлі v_j і проходять через всі інші вузли сенсорної мережі. Для кожного такого шляху ($< v_i, v_{n_1} >, < v_{n_1}, v_{n_2} >, \dots, < v_{n_{m-2}}, v_j >$) розраховується його метрика як

$$L_t^{[i,j]}(v_i, v_j) = \min\{\mu_Q(< v_i, v_{n_1} >), \mu_Q(< v_{n_1}, v_{n_2} >), \dots, \mu_Q(< v_{n_2}, v_j >)\}, \quad (1)$$

де t – номер можливого маршруту від вузла v_i до вузла v_j , $n_1, n_2 \dots n_z$ – деякі проміжні вузли маршруту, $z \leq m - 2$ (маршрут не обов'язково повинен охоплювати всі вузли мережі), m – кількість вузлів у мережі.

Тепер, серед множини t можливих маршрутів від вузла v_i до вузла v_j відшукується такий, для якого значення метрики $L_t^{[i,j]}(v_i, v_j)$ буде максимальним. Тоді для пари вузлів $\langle v_i, v_j \rangle$ значення функції належності нечіткого відношення $R(\langle v_i, v_j \rangle, \mu_R(\langle v_i, v_j \rangle))$ розраховується як

$$\mu_R(\langle v_i, v_j \rangle) = \max_t L_t^{[i,j]}(v_i, v_j). \quad (2)$$

Повторюючи таку процедуру для всіх пар вузлів v_i та v_j , отримуємо сукупність значень функції належності $\mu_R(\langle v_i, v_j \rangle)$ результуючого нечіткого відношення $R(\langle v_i, v_j \rangle, \mu_R(\langle v_i, v_j \rangle))$, яке являє собою

$$\mu_{Q \otimes Q}(\langle v_i, v_j \rangle) = \max_{v_z} \{ \min\{\mu_Q(\langle v_i, v_z \rangle), \mu_Q(\langle v_z, v_j \rangle)\} \}, \quad z \neq i, z \neq j, \quad (3)$$

та визначає величину належності елемента $\langle v_i, v_j \rangle$ до бінарного відношення $Q \otimes Q$ з матрицею належності $\mu_{Q \otimes Q}$.

Таким чином, відповідно до (3) фінальне значення метрики якості шляху між будь-якими вузлами мережі визначається серед найкращих маршрутів серед сукупностей $1 \dots m - 1$ ланцюгових маршрутів. При чому, треба мати на увазі, що, якщо на деякому етапі, наприклад на $k + 1$ кроці при обчисленні матриці M_Q^{k+1} з'ясується, що $M_Q^{k+1} = M_Q^k$, то зрозуміло, що і $M_Q^k = M_Q^{k+1} = M_Q^{k+2} \dots M_Q^{m-1}$. Тому, у такому випадку обчислення можна припинити на k кроці.

Розрахуємо відношення $R^{(2)}$ із матрицею належності $M_R^{(2)} = M_Q \vee M_Q^2$, для випадку, коли відшукуються найкращі шляхи з точки зору показника метрики якості, які складаються виключно із одно- та дволанцюгових маршрутів (табл. 2). Тут кольором відмічено дволанцюгові маршрути, які покращили метрику якості у порівнянні із одностанцюговими, що мають ті ж вузли відправки та призначення.

Таблиця 2 – Матриця $M_R^{(2)}$ метрики якості одностанцюгових маршрутів

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
v_1	1	0,75	0,83	0,73	0,75	0,79	0,81	0,83
v_2	0,75	1	0,87	0,73	0,89	0,86	0,71	0,75
v_3	0,83	0,87	1	0,67	0,87	0,86	0,81	0,92
v_4	0,73	0,73	0,67	1	0,73	0,67	0,67	0,67
v_5	0,75	0,89	0,87	0,73	1	0,86	0,75	0,87
v_6	0,79	0,86	0,86	0,67	0,86	1	0,79	0,79
v_7	0,81	0,71	0,81	0,67	0,75	0,79	1	0,81
v_8	0,83	0,75	0,92	0,67	0,87	0,79	0,81	1

Далі, використовуючи (3) та (4), розрахуємо тепер відношення $R^{(3)}$ із матрицею належності

$$M_R^{(3)} = M_Q \vee M_Q^2 \vee M_Q^3, \quad (6)$$

транзитивне бінарне замикання нечіткого бінарного відношення Q (табл.1) із матрицею належності M_Q .

Практичне виконання операції транзитивного замикання R бінарного нечіткого відношення Q реалізується шляхом об'єднання матриць M_Q із

$$M_R = M_Q \vee M_Q^2 \vee M_Q^3 \vee \dots \vee M_Q^k, \quad (3)$$

де M_Q^k – представляє собою k - ступень матриці M_Q бінарного нечіткого відношення Q , $k < m - 2$, m – кількість вузлів мережі. У свою чергу, k -а ступень матриці бінарного нечіткого відношення обчислюється рекурентно із співвідношення

$$M_Q^k = M_Q \otimes M_Q^{k-1}, \quad k > 1, \quad (4)$$

де знак \otimes – операція композиції матриць належності двох бінарних відношень. Наприклад, композиція $M_{Q \otimes Q}$ двох матриць M_Q задається формулою

для випадку, коли відшукуються найкращі шляхи з точки зору показника метрики якості серед 1..3 ланцюгових маршрутів (табл. 3). Тут, аналогічно, кольором виділені триланцюгові маршрути, які покращили метрику, отримані на попередній ітерації.

Таблиця 3 – Матриця $M_R^{(3)}$ метрики якості 1..3 ланцюгових маршрутів

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
v_1	1	0,75	0,83	0,73	0,83	0,79	0,81	0,83
v_2	0,75	1	0,87	0,73	0,89	0,86	0,75	0,87
v_3	0,83	0,87	1	0,73	0,87	0,86	0,81	0,92
v_4	0,73	0,73	0,73	1	0,73	0,73	0,71	0,73
v_5	0,83	0,89	0,87	0,73	1	0,86	0,81	0,87
v_6	0,79	0,86	0,86	0,73	0,86	1	0,79	0,86
v_7	0,81	0,75	0,81	0,71	0,81	0,79	1	0,81
v_8	0,83	0,87	0,92	0,73	0,87	0,86	0,81	1

На четвертому кроці розраховується матриця $M_R^{(4)}$, яка представлена у таблиці 4. У свою чергу, розрахунок матриці $M_R^{(5)}$ не дав будь-яких покращень метрики якості, тому подальші розрахунки можна не продовжувати і зупинитись на матриці $M_R^{(4)}$,

Таблиця 4 – Матриця $M_R^{(4)}$ метрики якості 1..4 ланцюгових маршрутів

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
v_1	1	0,83	0,83	0,73	0,83	0,83	0,81	0,83
v_2	0,83	1	0,87	0,73	0,89	0,86	0,81	0,87
v_3	0,83	0,87	1	0,73	0,87	0,86	0,81	0,92
v_4	0,73	0,73	0,73	1	0,73	0,73	0,73	0,73
v_5	0,83	0,89	0,87	0,73	1	0,86	0,81	0,87
v_6	0,83	0,86	0,86	0,73	0,86	1	0,81	0,86
v_7	0,81	0,81	0,81	0,73	0,81	0,81	1	0,81
v_8	0,83	0,87	0,92	0,73	0,87	0,86	0,81	1

4. Обговорення результатів

У табл. 5 наведено матрицю послідовності маршрутів, яка відображає знайдені шляхи передачі даних у вихідній сенсорній мережі. Кожна клітинка цієї

матриці відповідає конкретному маршруту, що складається з кількох послідовних вузлів мережі. Визначення якості маршруту базується на показниках метрики, яку задає адміністратор мережі.

Таблиця 5 – Матриця послідовності вузлів для 1..4 ланцюгових маршрутів

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
v_1		1-8-3-5-2	1-8-3	1-2-4	1-8-3-5	1-8-3-5-6	1-8-7	1-8
v_2	2-5-3-8-1		2-5-3	2-4	2-5	2-5-6	2-5-3-8-7	2-5-3-8
v_3	3-8-1	3-5-2		3-5-2-4	3-5	3-5-6	3-8-7	3-8
v_4	4-2-1	4-2	4-2-5-3		4-2-5	4-3-5-6	4-2-1-8-7; 4-2-5-6-7	4-2-1-8
v_5	5-3-8-1	5-2	5-3	5-2-4		5-6	5-3-8-7	5-3-8
v_6	6-5-3-8-1	6-5-2	6-5-3	6-5-2-4	6-5		6-5-3-8-7	6-5-3-8
v_7	7-8-1	7-8-3-5-2	7-8-3	7-6-5-2-4; 7-8-1-2-4	7-8-3-5	7-8-3-5-6		7-8
v_8	8-1	8-3-5-2	8-3	8-1-2-4	8-3-5	8-3-5-6	8-7	

Матриця (табл. 5) дозволяє порівнювати різні маршрути між собою (якщо їх декілька) та обирати найбільш оптимальні з них за допомогою додаткових метрик для забезпечення ефективної та надійної передачі даних. Показано приклади, коли більш багатоланцюговий маршрут (той, що має більше проміжних вузлів) може бути кращим за менш ланцюговий. Це може статися через різні причини, наприклад, кращу якість зв'язку або меншу завантаженість окремих сегментів багатоланцюгового маршруту. Такі маршрути можуть мати переваги у стабільності та надійності передачі даних, оскільки кожен проміжний вузол може виконувати функції ретранслятора та корекції помилок, забезпечуючи більш стійкий зв'язок. Вибір багатоланцюгового маршруту може також знизити навантаження на окремі вузли мережі, розподіляючи трафік рівномірніше і таким чином подовжуючи загальний термін служби сенсорної мережі.

Висновки

Розробка методу аналізу якості логічних каналів та вибору маршрутів у одноранговій сенсорній мережі дозволило покращити параметри якості роботи мережі, серед них: надійність передачі даних, пропускна здатність та загальна ефективність функціонування мережі. Це сприятиме підвищенню продуктивності та тривалості роботи сенсорних мереж.

На практиці використання такого методу можливо у управляючих вузлах кластерів для покращення метрик функціонування саме кластера. Рекомендації стосовно частоти виконання наведених розрахунків залежать від багатьох показників сенсорної мережі, таких як динаміка вузлів, швидкість руху, зміна навантаження та т.п. Такі рекомендації потребують подальшого дослідження, результати якого будуть опубліковані у майбутньому.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Pustovoitov, P., Voronets, V., Voronets, O., Sokol, H., Okhrymenko, M. Assessment of QoS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2024. V. 1. № 4(127). P. 23-31.
2. Pavlo Pustovoitov, Maxim Okhrymenko, Vitalii Voronets, Dmitry Udalov. The speed calculating increasing method of the Markov model network. *Advanced Information Systems (Сучасні інформаційні системи)*. 2021. Vol. 5, No. 3. P. 13-17.
3. A.M. Kapiton, R.V. Baranenko, H.V. Sokol, M.Yu. Okhrymenko. Adaptive combined channel network coding for cognitive radio networks with cooperative relay. *Electronic Modeling*. 2024. V. 46. № 1, с. 78—89
4. Meroth A., Sora P. *Sensor networks in theory and practice*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023
5. *Handbook of Sensor Networks* / ed. by I. Stojmenović. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2005
6. Obaidat M. S., Misra S. *Principles of Wireless Sensor Networks*. Cambridge University Press, 2014.
7. Azim M. M. A., Xiaohong J. *Wireless Sensor Multimedia Networks*. Taylor & Francis Group, 2020.
8. Vuran M. C., Akyildiz I. F. *Wireless Sensor Networks*. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2010. 520 p.
9. *Wireless Sensor Networks* / S. Chai et al. Singapore : Springer Singapore, 2020

Received (Надійшла) 29.08.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.10.2024

Method for analyzing the quality of logical channels and choosing routes in a single-rank sensor network

Pavlo Pustovoitov, Maksym Okhrymenko

Abstract. Sensor networks play a key role in many industries due to their ability to effectively collect and transmit data. However, ensuring the reliability and quality of data transmission remains one of the main problems. The article presents a method for calculating the quality of channels in a sensor network, which is based on the use of fuzzy mathematics, namely the operation of transitive closure of a fuzzy binary relation. The proposed method uses a fuzzy binary relation to model the quality of communication channels between network nodes. By performing transitive closure, the method allows to obtain a more accurate and adaptive assessment of channel quality, taking into account various factors such as delay, bandwidth, energy consumption and reliability. The research results show that the use of the transitive closure operation of a fuzzy binary relation can significantly improve the accuracy of channel quality assessment and increase the efficiency of route selection in a sensor network. The proposed method can be useful for improving the productivity and reliability of sensor networks, ensuring their stable and efficient operation under various operating conditions.

Keywords: logical channel, optimal route, peer-to-peer sensor network.