УДК 681.326:681.51

Є.М. Сніжко, канд. техн. наук, Д.І. Петровнін
(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет)

МОДЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Постановка проблеми

Сенсорні мережі – це клас автономних систем збору, обробки та передачі даних. Сферою застосування сенсорних мереж – це спостереження за динамікою та просторовою еволюцією фізичних процесів, за переміщенням рухомих об'єктів тощо. У динамічній сенсорній мережі до складу вузла також можуть входити актуатори – пристрої, які забезпечують переміщення вузла у просторі.

Наявність актуаторів додає для мережі можливість впливу на оточуюче середовище. Це обумовлює їх використання в екологічному моніторингу, гірничому виробництві, медицині, керуванні виробничими процесами, у військових цілях та ін. Моделювання сенсорних мереж наразі є актуальним завдяки розширенню сфери їх застосування та збільшенню питомої частки вартості обладнання у вартості розробки та впровадження сенсорної мережі.

Аналіз останніх досягнень та публікацій

Основними властивостями сенсорних мереж є [1]:

- здатність до самоорганізації;
- радіозв'язок на короткі відстані та багатоетапна передача інформації;
- глибока інтегрованість та спільні процеси для кількох вузлів;
- часто змінювана топологія відповідно до задач та для боротьби з
- технічною відмовою окремих вузлів;
- обмеження у запасі енергії, потужності передачі, обсязі пам'яті та обчислювальній потужності.

Саме ці властивості, особливо останні три, визначають відмінність сенсорних мереж від звичайних мереж даних.

Створення системи простих і відносно дешевих сенсорів дає переваги у вигляді економії ресурсів, більшої стійкості до відмов обладнання та завад при передачі сигналу, створення рівномірно розподіленої у просторі структури [2]. Від сучасної сенсорної мережі вимагається ефективна обробка даних вже на найнижчому рівні. Тому природною є ієрархічна організація, яка дозволить обробляти інформацію на різних рівнях. Залежно від вимог предметної галузі архітектура та логічна організація мереж можуть значно змінюватися.

Здатність до самоорганізації дозволяє адаптацію до відмови певного відсотка вузлів та інших непередбачуваних ситуацій, однак ускладнює моделювання сценаріїв її роботи.

Усі сенсорні мережі можуть бути поділені на два великі класи: гомогенні та гетерогенні. У гомогенних мережах усі сенсори мають однакові технічні характеристики, функції та алгоритми роботи. У гетерогенних мережах функції

вузла та його місце у схемі функціонування мережі визначаються його технічними можливостями. Гетерогенна архітектура є більш гнучкою та дозволяє ефективніше використання ресурсів, але розгортання таких мереж є складнішим у порівнянні з гетерогенними, оскільки вузли повинні бути розташовані один відносно іншого відповідно до їх місця у схемі передачі даних. У динамічних сенсорних мережах постає проблема адресації сенсорів, оскільки абсолютну адресацію доцільно замінювати умовною, тобто адресувати тільки вузли, який у даний момент знаходяться у зоні спостережуваного явища та є частиною шляху передачі даних до кінцевого користувача. Таким чином можливий механізм взаємної адресації вузлів, і це принципово змінює тип мережі з пасивного (властивого для мереж даних) на активний. Тобто сенсорний вузол може ініціювати зміну схеми передачі даних, а також може, за потреби, переорієнтуватися з передачі власних результатів вимірюваня на прийом і подальшу передачу даних з інших вузлів.

Функціонування мережі можна розглядати на таких окремих рівнях:

– сенсорний рівень – отримання даних про досліджувані процеси;

– комунікаційний рівень – передача даних вимірювань на вищий рівень для обробки (прикладна комунікація) та обмін повідомленнями між сенсорами для взаємного позиціонування тощо (інфраструктурна комунікація);

– рівень обробки даних – статистична обробка та аналіз даних, формування кінцевих даних, відповіді на запит користувача тощо ;

– рівень користувача – надання інтерфейсу доступу до кінцевих даних та забезпечення різноманітних представлень [2, 3].

– Для здійснення опису доступу до інформації вводиться поняття узагальненої функціональної *архітектури сенсорної мережі*. У цій архітектурі визначаються функціональні компоненти мереж та зв'язки між ними, які повинні бути присутні у мережі, а також те, як між ними розподілено обов'язки підтримки функцій мережі – як зовнішніх, так і внутрішніх [4, 5].

Сенсорні мережі можуть бути розділені на два умовні класи – *запитів* та *задач*.

Мережі запитів вирішують проблему того, як інформація, що зібрана та зберігається у сенсорній мережі, може бути отримана як результат запиту за визначеним критерієм, наприклад, одержання інформації про фізичні показники середовища. Доступ до даних у *мережах задач* здійснюється за рахунок виклику у програмованих вузлах відповідних методів як відклику на певний тип подій. У реальних мережах такими подіями можуть бути зміни у досліджуваній системі, повідомлення від сусідніх вузлів, тригерні повідомлення від апаратних або програмних модулів усередині самого вузла.

Функціональна архітектура у сенсорних мережах складається із таких частин.

– Ієрархічна кластеризація. З метою підтримки масштабованої архітектури, сенсорні вузли можна об‘єднати у кластери за ознаками їх ресурсів потужності та взаємного віддалення.

– Позиціонування. У мережах, які взаємодіють із просторово розподіленими фізичними системами, інформація про положення кожного із вузлів у даний момент часу є обов‘язковою умовою відтворення поведінки системи. Тому актуальною є задача позиціонування вузлів. Існує два

принципових механізми позиціонування: абсолютне (на базі GPS) та відносне.

– Іменування за атрибутами. У сенсорних мережах розповсюдженим типом доступу до даних є запит до певного регіону, а не до конкретного вузла. У цьому випадку доцільним є запровадження іменування вузлів за атрибутами – типом, приналежністю до кластера тощо [6, 7].

Аналіз сучасного ринку програмного забезпечення для проведення модельних досліджень у сенсорних мережах дозволяє виділити дві численні групи програм – універсальні пакети імітаційного моделювання (такі як, наприклад, AnyLogic, UniModel) та спеціалізовані прикладні програми. Перша група програмних засобів надає широкі можливості для моделювання, однак у них не закладено головні принципи архітектури сенсорних мереж, такі як, наприклад, синхронність процесів прикладної та інфраструктурної комунікації, функціонування в режимі реального часу та ін. Друга група програмних засобів призначена, в основному, для моделювання найнижчих функціональних рівнів мережі – сенсорного та комунікаційного, тому модель виявляється дуже залежною від апаратного рішення, вибраного для мережі.

Постановка задачі

На основі аналізу сфер застосування різних архітектур динамічних сенсорних мереж для аналізу було вибрано дві найбільш поширені архітектури – багаторівнева гетерогенна мережа, керована вузлами вищого рівня, та однорівнева гомогенна мережа зі здатністю до самоорганізації (тип smart dust). Для кожної з цих архітектур треба створити формальну модель, обрати відповідне архітектурне рішення та програмну реалізацію. Роль, яку відіграє модель у процесі проектування динамічної сенсорної мережі, обумовлює підвищені вимоги до інструменту моделювання та відповідності моделі реальній мережі. Мета роботи – аналіз класифікації сенсорних мереж, вивчення підходів до їх формального опису, методик та інструментів для їх моделювання із подальшим створенням програмного додатка для моделювання динамічних сенсорних мереж та проведенням модельних досліджень найбільш застосовуваних конфігурацій мереж. Розробка програмного додатка передбачає вибір оптимальної архітектури та методів програмної реалізації для кожної з моделей.

Для створених моделей необхідно провести аналіз коректності роботи залежно від параметрів модельованої системи, виявити додаткові обмеження, внесені у модель способом її програмної реалізації, проаналізувати коректність їх застосування та ступінь відповідності реальній мережі.

Основні результати

Методика моделювання

У системі, де передбачено асинхронне реагування на певні події, доцільно запровадити архітектуру, що базується на подіях (Event Based Architecture). Її принцип полягає у тому, що від одного процесу до іншого передаються повідомлення.

Реалізацією такої архітектури є *компоненти, керовані повідомленнями* J2EE, що розроблені як приймачі асинхронних повідомлень у середовищі Java [8], тобто інший компонент може надіслати такому компоненту повідомлення і продовжувати роботу, не очікуючи на обробку. У J2EE для передачі повідом-

лень використовується технологія JMS (Java Message Service – служба передачі повідомлень Java). JMS підтримує два способи передачі.

– *Двоточкова передача (Point-to-point).* При такій схемі передачі повідомлень один з клієнтів діє як відправник повідомлення, а інший – як отримувач.

– *Публікація та підписка (Publish-subscribe).* За цією схемою як надсилати, так і отримувати повідомлення може багато компонентів одразу. Повідомлення направляються компонентом-видавцем і їх одразу отримують усі компоненти, які на цю тему підписані. Така реалізація є зручною у моделюванні сенсорних мереж, зокрема, процесу обміну повідомленнями між вузлами.

– *Модель гетерогенної багаторівневої сенсорної мережі, керованої вузлами вищого рівня*

У моделі гетерогенність мережі реалізовано трьома типами вузлів:

- вузол першого рівня – характеризується координатами, виміряним значенням величини та дальністю передачі сигналу;

- вузол другого рівня – характеризується координатами, обчисленим значенням величини (усередненим з вузлів першого рівня) та дальністю передачі сигналу. Інформацію від вузлів першого рівня отримують за механізмом запитів;

- вузол третього рівня – виконує функцію інтерфейсу користувача, тобто представлення узагальнених даних від вузлів другого рівня.

Топологія у мережі встановлюється за схемою «згори вниз», тобто положення кожного вузла першого рівня визначається вузлом другого рівня і відповідно положення вузлів другого рівня визначається вузлом третього рівня.

У роботі реалізована спрощена модель з одним вузлом третього рівня. Однак таке спрощення не руйнує коректності моделі, її можна розглядати як фрагмент мережі з багатьма вузлами третього рівня. Послідовність етапів функціонування мережі представлено на рис. 1.

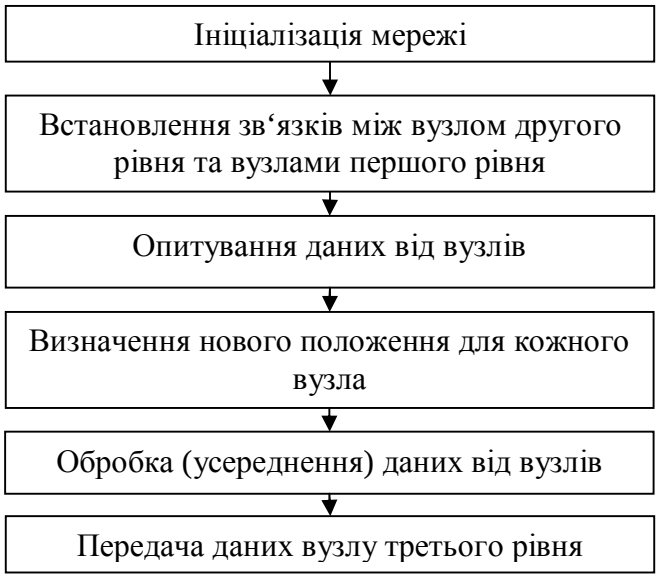


Рис. 1. Схема функціонування гетерогенної мережі

Модель гомогенної однорівневої динамічної сенсорної мережі зі здатністю до самоорганізації

У мережі всі вузли мають однакову потужність та радіус передачі, а з метою економії ресурсів передавача та зменшення обсягів передаваної інформації вузли на етапі ініціалізації мережі об‘єднуються у кластери. Послідовність етапів функціонування мережі представлено у табл. 1.

Таблиця 1

Рівні функціонування гомогенної мережі

Рівень моделі	Схема обміну повідомленнями Інформація про розташування вузлів Інформація про вимірювану величину
Рівень представлення	Графічне відображення вузлів Візуальні ефекти переміщення
Рівень контролера	Налагодження експерименту Генерація подій та повідомлень Підписання об‘єктів на одержання повідомлень та їх відписка

Розроблений програмний додаток DSN Modeling являє собою програмну реалізацію двох моделей динамічних бездротових сенсорних мереж. Для моделі гетерогенної багаторівневої сенсорної мережі архітектура Publisher-Subscriber була реалізована таким чином: на етапі ініціалізації експерименту кожен об‘єкт вузла другого рівня мав доступ до колекції усіх об‘єктів вузлів першого рівня. За допомогою ітератора (Array List Iterator) він отримував координати кожного з цих вузлів і якщо вузол був у зоні доступу, він додавався у список отримувачів повідомлень від цього вузла другого рівня.

Для вузлів першого рівня було реалізовано механізм «випадкової відмови» – на випадково вибраній ітерації вузол повертав null замість значення вимірюваної величини. Для вузла другого рівня було створено сценарій реагування на базі обробки виняткової ситуації. Після одержання null від вузла, його вилучали зі списку підписаних на повідомлення (з метою економії ресурсів на передачу), а кожен із сусідніх вузлів зміщувався. Для різної кількості вузлів другого і першого рівнів були отримані такі дані (табл. 2).

Таблиця 2

Результати моделювання гетерогенної мережі

Кількість вузлів другого рівня (M)	Кількість вузлів першого рівня (m)	Якість покриття мережі (%)
2	50	48
4	50	84
4	60	87
4	80	90
8	60	92
8	80	94
8	120	96
16	60	95
16	80	98

На основі проведених досліджень було отримано конфігурацію, яка дозволяє значно заощадити ресурси для задач, які не потребують інформації про досліджувану систему в режимі реального часу, а натомість потребують усе-

реднених даних. Така мережа є достатньо стабільною і зберігає якість збору інформації у випадку відмови одного з вузлів першого рівня. Також у такій мережі є можливість одержання даних безпосередньо з сенсорного вузла і передачі їх на рівень представлення користувача, а отже така мережа є реалізацією мережі запитів. Вона є вдалим технічним рішенням для задач, у яких може виникнути потреба в отриманні детальної інформації рівня сенсора, як, наприклад, системи промислового контролю якості, системи спостереження за хімічно небезпечними об‘єктами тощо.

Для моделі гомогенної однорівневої сенсорної мережі зі здатністю до самоорганізації архітектура Publisher-Subscriber була реалізована таким чином: на етапі ініціалізації експерименту кожен з **N** об‘єктів вузла був за замовченням підписаний на отримання повідомлень від усіх решти (N-1) вузлів. Таким чином здійснювалася взаємна адресація усіх вузлів. Після відповідного налагодження обчислювального експерименту, за критерієм найменшої взаємної відстані формувалися групи з ***n*** вузлів – кластери. На наступній ітерації порівнювалися відстані між вузлами ***l(i,j)*** у кластері і на основі такого порівняння визначався центральний вузол – $\Sigma l(i,j)=min$. Для даної моделі особливий інтерес становлять експерименти з механізму утворення кластерів.

Ініціалізація моделі відбувалася випадковим рівномірним розподілом вузлів, після чого спостерігалося утворення кластерів з виділенням центрального вузла. Не всі вузли утворили кластер. Відсоток вузлів, які знаходяться в кластері, залежить від розмірів кластера та кількості вузлів (табл. 3).

Таблиця 3

Результати моделювання гомогенної мережі

Кількість вузлів у кластері	Загальна кількість вузлів	% вузлів, що входять у кластер
3	100	30
4	100	30
5	100	60
6	100	70
9	100	80
15	150	90
20	150	60

У ході модельних досліджень було встановлено, що відсутність зворотного зв‘язку від вузлів після формування кластера призводить до того, що будь-який вузол може після чергового зміщення опинитися за межами кластера. Також у випадку відмови вузла кластер залишається неповним.

З урахуванням таких недоліків модель було удосконалено – формування кластерів відбувається повторно на кожній ітерації. Такий підхід дозволив збільшити надійність, але при цьому продуктивність мережі зменшилася за рахунок ітерацій службової комунікації. На рис. 2 показано динаміку перебудови кластерів у мережі, а на рис. 3 – гістограми відносних відстаней між вузлами на різних ітераціях.

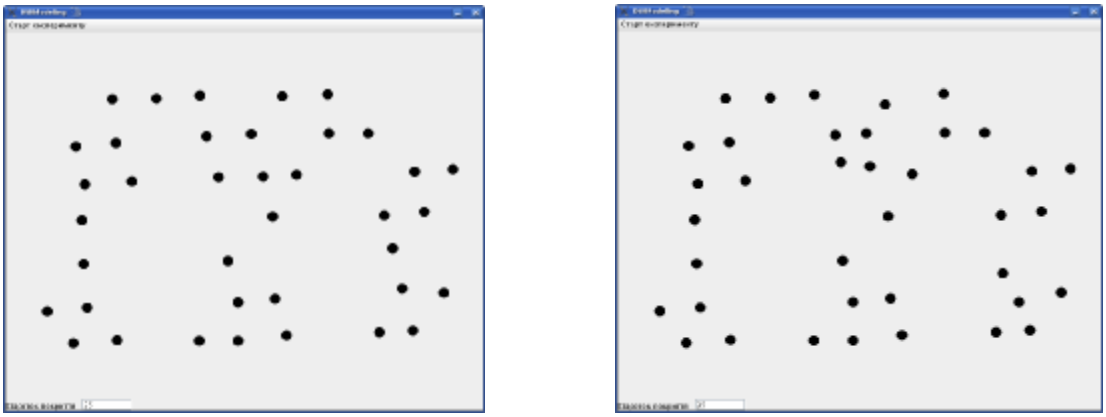
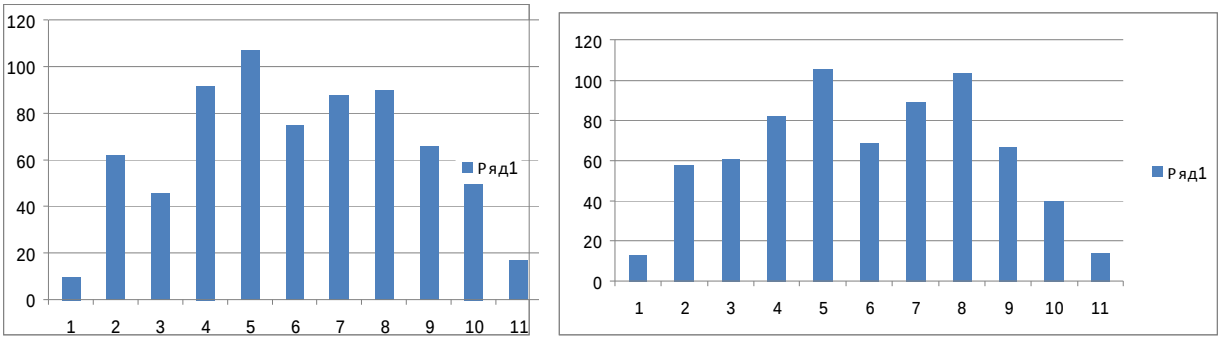


Рис. 2. Зміна конфігурації кластерів у мережі

З рис. 3 видно, що критерій формування кластера на різних ітераціях виконується для різних пар вузлів. Якби не відбулося перегрупування, обидва кластера виявилися б неповними.



а *б*

Рис. 3. Гістограми відносних відстаней між вузлами на різних ітераціях

Дана мережа є типовою реалізацією мережі задач, зокрема мереж із невизначеною топологією, таких як системи екологічного моніторингу, військової розвідки тощо. З метою одержання повної інформації від усіх вузлів та збереження ресурсів на передачу важливо підібрати таке співвідношення кількості вузлів у кластері, щоб відсоток вузлів поза кластерами був якомога меншим.

Висновки та подальші перспективи

Моделювання схеми обміну інформацією у динамічних бездротових сенсорних мережах виявило, що найбільш точною програмною реалізацією цієї моделі є архітектура Publisher-Subscriber та технологія Java Message Service.

Розроблений програмний додаток DSNModeling є коректною реалізацією моделі гетерогенної багаторівневої мережі, керованої вузлами вищого рівня, та гомогенної одноріневої мережі зі здатністю до самоорганізації.

Результати обчислювальних експериментів дозволяють встановити залежність між кількістю вузлів і їх розташуванням, а також якістю покриття мережі. Покращена модель дозволить значно підвищити надійність у таких мережах і вирішити проблему неповних кластерів або руйнування кластерної структури - через відмову сенсорів, природні завади сигналу тощо. Однак слід зазначити,

що для дуже великих розподілених мереж, що функціонують без втручання людини, де певний відсоток втрат інформації цілком припустимий (наприклад, задачі екологічного моніторингу), використання цієї моделі є невиправданим, оскільки призведе до суттєвого збільшення обсягів службової комунікації і, як наслідок, до витрат ресурсів енергії.

Список літератури

1. Handbook of sensor networks : compact wireless and wired sensing systems . - CRC Press, 2005.
2. A Taxonomy of Wireless Micro-Sensor Network Models/Sameer Tilak, Nael B. Abu-Ghazaleh and Wendi Heinzelman - Electrical and Computer Engineering University of Rochester, 2003.
3. A. Borshchev, A. Filipov. From System Dynamic to Practical Agent- Based Modelling. - St.Petersburg Technical Univercity, 2004.
4. Falko Dressler, "Sensor-Based Localization-Assistance for Mobile Nodes," Proceedings of 4. GI/ITG KuVS Fachgespräch Drahtlose Sensornetze, Zurich, Switzerland, March 2005, pp. 102-106.
5. Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks, Second International Workshop, ALGO-SENSORS 2006, Venice, Italy, July 15, 2006, Revised Selected Papers.
6. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. – Walley, 2008.
7. Feng Zhao. Wireless Sensor Networks: An Information Processing Approach (The Morgan Kaufmann Series in Networking). – MiK, 2008.
8. Ноултон П. Java 2 в подлиннике. – BHV. – СП.б, 2006.