

УДК 621.396

Романюк А.В.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЦІЛЬОВІ ФУНКЦІЇ УПРАВЛІННЯ ВУЗЛАМИ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Проведено аналіз та класифікацію задач управління безпроводними сенсорними мережами, що належать до класу MANET. Наведено можливі об'єкти управління та основні параметри оптимізації у безпроводних сенсорних мережах за рівнями еталонної моделі OSI. Визначено множини цільових функцій управління безпроводними сенсорними мережами, їх взаємозв'язок та порядок використання системою управління мережею під час прийняття рішень з управління вузловими та мережевими ресурсами.

Ключові слова: цільова функція, безпроводна сенсорна мережа, моніторинг, система управління.

Постановка проблеми. Безпроводні сенсорні мережі (БСМ) – це розподілені на місцевості та стійкі до відмов радіомережі, що складаються з мініатюрних електронних пристроїв (сенсорних вузлів, які можуть бути як стаціонарними, так і мобільними), призначених для збору інформації про навколишнє середовище та передачі цієї інформації на спеціальні інформаційні центри [1]. Загальна ідея функціонування БСМ полягає у використанні великої кількості безпроводних сенсорів, які можуть бути розташовані на значних географічних територіях для моніторингу різномірних параметрів навколишнього середовища. Отримана безпроводним сенсорним вузлом інформація передається на спеціальні шлюзи безпосередньо або шляхом ретрансляції через проміжні сенсорні вузли. У разі, якщо площі території для моніторингу дуже великі, як шлюзи можуть використовуватися сенсорні вузли на базі безпілотних літальних апаратів (БЛА) чи аероплатформ [2].

Простота встановлення, відносна дешевизна та висока ефективність БСМ сприяли значному інтересу до цього класу радіомереж, і, як наслідок, вони знайшли широке застосування у різних галузях суспільного життя (рис. 1): автомобільні БСМ, БСМ для спостереження (охорони різного роду об'єктів), БСМ оповіщення (муніципальні БСМ), тощо. Однак наведені приклади застосування БСМ передбачають їхню попередню інсталяцію та налаштування, що часто є неможливим в умовах

моніторингу об'єктів критичної інфраструктури чи територій у зонах стихійних лих (техногенних аварій) або під час ведення активних бойових дій у тактичній ланці управління військами. За таких умов можливим виходом із ситуації є використання БСМ, побудованих за принципом Ad-Hoc або MANET (Mobile Ad-Hoc) [2], що дає змогу створити радіомережу, здатну до самоорганізації та адаптації вузлів до умов функціонування, які неможливо передбачити у процесі проектування. Такі БСМ будуть функціонувати в автоматичному або напівавтоматичному режимі, тому сенсорні вузли повинні мати змогу приймати рішення з управління вузловими та мережевими ресурсами без участі людини.

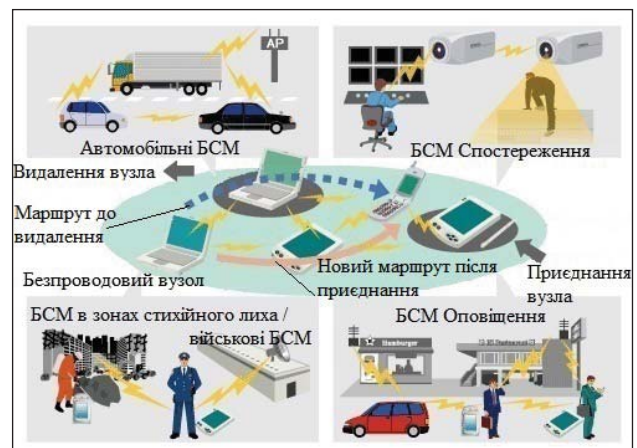


Рис. 1. Галузі застосування безпроводних сенсорних мереж класу MANET (Ad-Hoc)

Для цього у складі кожного сенсорного вузла повинна бути система управління (СУ), здатна приймати рішення за децентралізованим принципом з метою забезпечення заданої якості обслуговування трафіка, який передаватиметься в БСМ [3]. При цьому управляючі впливи вузлових СУ здійснюються шляхом реалізації циклу управління (збір та аналіз інформації про стан мережі, ідентифікація ситуації про стан мережі та прийняття управляючого рішення із забезпечення якості передачі трафіка) на основі цільових функцій управління. Варто зауважити, що з урахуванням різномірності параметрів сенсорних вузлів під час визначення цільової функції сенсорного вузла його система управління повинна враховувати і цільові функції вузлів сусідів, і цільову функцію управління всією БСМ (чи її зоною).

У зв'язку з цим **наукове завдання**, яке вирішується в цій статті, полягає у визначенні множини цільових функцій управління БСМ класу MANET, проведенні їх класифікації, визначенні взаємозв'язку, особливостей та порядку їх використання системою управління мережею.

Аналіз останніх публікацій. У процесі попередніх досліджень були запропоновані підходи до оптимізації радіомереж класу MANET за одним або декількома показниками [4–7]. Зокрема, в [4] запропоновано управляти витратами енергії батарей, у [5] – здійснювати багатокритеріальну оптимізацію маршруту з урахуванням його мобільності, в [6] – оптимізувати топологію мережі за декількома показниками, у [7] – враховувати тип трафіка тощо. Однак непередбачуваність умов функціонування радіомереж класу MANET приводить до необхідності трактування того, що

цільові функції управління не є статичними, а визначаються в часі залежно від етапів і функцій управління, а також параметрів стану об'єкта (об'єктів) управління (вузол, радіоканал, маршрут, зона, мережа) та наявних ресурсів [8].

Визначимо особливості задач управління БСМ класу MANET (рис. 2):

- реалізуються на різних етапах управління мережею (планування, розгортання або відновлення, оперативне управління);
- відрізняються за функціями, такими як переміщення БЛА чи рухомих сенсорів (управління маршрутом руху, координація польоту групи БЛА, визначення району баражування тощо); покриття зони моніторингу (визначення «зон відповідальності» сенсорів, пріоритетної групи сенсорів, послідовності роботи сенсорів тощо); забезпечення якості передачі даних (управління маршрутизацією, управління топологією, управління навантаженням тощо);
- різні об'єкти впливу (вся БСМ, окрема зона БСМ, напрям передачі інформації, маршрут, канал, сенсорний вузол), що вимагає узгодження та координації цільових функцій;
- різні цільові функції, що можуть заперечувати одна одну;
- різні математичні постановки цільових функцій (чітка або нечітка, задачі масового обслуговування, маршрутні тощо);
- висока розмірність та динамічний характер;
- важкість формування повної системи показників оцінки ефективності;
- неповнота та часто недостовірність контрольної інформації про стан БСМ та її елементів;
- взаємозалежність задач управління;



Рис. 2. Класифікація задач управління MANET із ТА

– відношення до різних рівнів еталонної моделі OSI.

В умовах змішаного управління (частка функцій виконується централізовано центрами управління БСМ, а друга децентралізовано – вузлами) можна визначити дві взаємозалежні групи цілей:

– мережеві (зонові) – оптимізація мережевих або зонних показників ефективності;

– користувальницькі – досягнення заданої якості передачі між сенсорними вузлами та функціонування елементів мережі за напрямом передачі.

До мережевих (зонних) цілей управління можна віднести оптимум таких параметрів $C_i = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$:

- C_1 – продуктивність всієї БСМ чи її зони;
- C_2 – потужність передач вузлів мережі чи її зони;
- C_3 – ступінь покриття території моніторингу сенсорними вузлами (рухомими чи стаціонарними);
- C_4 – структурна надійність (зв'язність) мережі, її зон;
- C_5 – кількість ресурсів (стаціонарних та мобільних сенсорів, аероплатформ тощо), які необхідно задіяти для досягнення певної мети;

– C_6 – час функціонування БСМ у разі її автономної роботи;

– C_7 – обсяг службового трафіка, який генерується для збору інформації про стан БСМ;

– C_8 – час планування, розгортання, відновлення БСМ;

– C_9 – параметри безпеки тощо.

Основними обмеженнями при цьому є ресурси і параметри сенсорних вузлів: батареї живлення, пропускна здатність радіоканалів, дальність радіозв'язку, обсяги пам'яті, швидкість обробки інформації процесорами тощо.

До основних користувальницьких цілей управління можна віднести оптимум (обмеження) таких параметрів, як пропускна здатність сенсорного вузла, час затримки передачі повідомлень, потужність передавача, енергія (витрати енергії) батарей у радіоканалі, маршруті, напрямі тощо, площа зони моніторингу, час автономного функціонування та ін.

Схема визначення цільових функцій вузловою системою управління

У табл. 1 наведено можливі об'єкти управління та основні параметри оптимізації. Як зазначалося вище, непередбачуваність умов функціонування БСМ, децентралізований принцип управління ними

Таблиця 1

Об'єкти управління та основні параметри оптимізації БСМ

Рівень OSI	Управляючий вплив вузла	Об'єкти управління	Основні параметри оптимізації
Фізичний	Потужність (спрямованість) передачі, вид модуляції, тип коригуючого коду, параметри ММО тощо	Радіоканал між рухомими та стаціонарними сенсорними вузлами	Пропускна здатність, витрати енергії батарей, потужність передачі тощо
Канальний	MAC-алгоритми та їх параметри, розміри пакетів та квитанцій тощо	Радіоканали в межах радіозв'язності окремих сенсорів (чи зони БСМ)	Пропускна здатність та час передачі в каналі, витрати енергії батарей, обсяг службової інформації тощо
Мережевий	Алгоритми маршрутизації, алгоритми управління топологією, алгоритми адресації, тощо	Один або декілька маршрутів передачі (відповідно зона або вся БСМ), топологія, тощо	Обсяг службової інформації, параметри маршруту (час побудови та існування, кількість, пропускна здатність, час доставки, витрати енергії батарей тощо), топологія
Транспортний	Алгоритми управління чергами, алгоритми управління навантаженням, тощо	Потоки даних різного типу (відео, мова, дані)	Параметри якості передачі даних у напрямі (час затримки передачі та його варіація, ширина смуги пропускання та ін.)
Прикладний	Алгоритми (протоколи) інформаційного обміну прикладного рівня (енергозбереження, координації та інтелектуалізації управління, розпізнавання об'єктів спостереження та ін.)	Вузол, вузли-сусіди, зона мережі, вся мережа, об'єкти спостереження та ін.	Пропускна здатність, витрати енергії батарей, безпека передачі, час виконання завдання, «час життя» сенсорного вузла та БСМ загалом тощо

та наявність різних типів інформації для передачі (відео, мова, дані) вимагає від системи управління кожного вузла здійснити вибір цільових функцій управління з урахуванням таких чинників:

1) стан самого сенсорного вузла, який визначається множиною його параметрів (реальна пропускна здатність радіоканалів, дальність радіозв'язності, наявні сусіди, стан черг, наявність, тип та величина зміни вхідного навантаження, мобільність, динаміка зміни наявних зв'язків із сусідами, наявність, кількість та якість побудованих маршрутів, розміри зони моніторингу тощо). Кожен вузол постійно (активно або/та пасивно) збирає інформацію про стан вузлів-сусідів, маршрутів та напрями передачі, мережу (зону) та за сукупністю показників визначає (ідентифікує) стан БСМ [3; 8]. При цьому ресурсами вузла є апаратні (потенційна пропускна здатність радіоканалу, наявний обсяг енергії батареї живлення, швидкодія процесорів, потужність передавача тощо) та програмні ресурси (алгоритми управління, протоколи управління на різних рівнях OSI та функціональних підсистемах, рівень інтелектуалізації процесів управління тощо);

2) стан БСМ (визначається станом сенсорних вузлів, каналів, інформаційних напрямів і зон БСМ) та динаміка його зміни;

3) тип інформації (трафіка), який визначає вимоги до якості передачі (час затримки передачі та його варіація, кількість помилок, ширина смуги пропускання тощо).

Узагальнений алгоритм визначення цільових функцій системою управління кожного сенсорного вузла складається з трьох етапів (рис. 3).

1. Сенсорний вузол постійно збирає інформацію про параметри свого функціонування та здійснює ідентифікацію власного стану.

2. Шляхом обміну службовими повідомленнями сенсорний вузол постійно збирає інформацію про параметри вузлів-сусідів та радіоканалів, через які вони з'єднані, здійснюючи таким чином ідентифікацію стану БСМ чи її зони. В умовах неможливості збору всієї інформації про стан БСМ та через її швидке старіння (тобто інформація про стан мережі є неповною і неточною) для здійснення процесу ідентифікації пропонується комплексне використання апарата нечіткої логіки та нейронних мереж [3].

3. Система прийняття рішення сенсорного вузла на основі ідентифікованих станів вузла та БСМ, а також вимог до якості інформаційного обміну, що визначаються типом інформації, яку має сенсор для передачі, виконує такі функції:

- визначає поточну множину параметрів оптимізації – мережевих та користувальницьких;
- визначає об'єкти управління (табл. 1);
- визначає поточну цільову функцію (функції) управління;

- узгоджує (координує) її з сусідніми сенсорними вузлами (якщо вузли одного рангу) або призначає її підпорядкованим сенсорним вузлам (якщо це центр управління БСМ або головний вузол зони БСМ);

- вибирає управляючий вплив за етапами, охопленням, функціональною підсистемою, рівнем OSI.

У [8] наведена взаємозалежність цілей, а також їх ієрархічний характер, проведена декомпозиція

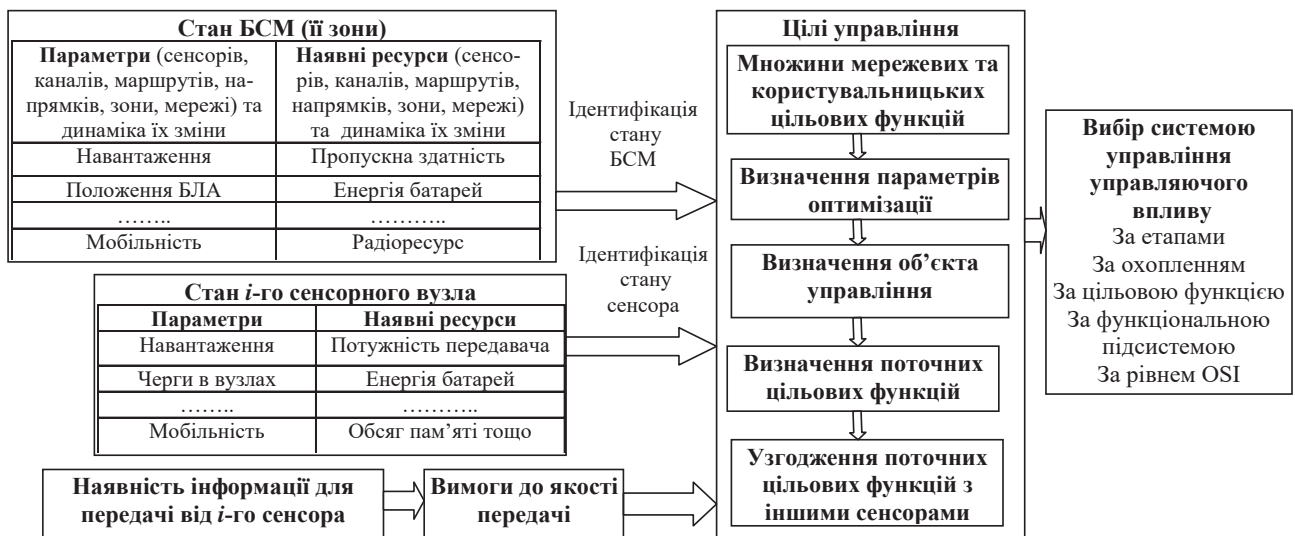


Рис. 3. Схема визначення цільових функцій вузловою системою управління

глобальної мети управління мережею за функціями, кожна з яких ділиться на завдання і реалізується за рівнями OSI. Мета – одержання вектору пріоритету елементів нижнього рівня ієрархії щодо цілі – елементу першого рівня за – допомогою методу аналізу ієрархій або методу згортки нечітких відносин. Цільова структура (ЦС) управління БСМ має такий вигляд:

$$\ddot{O}\ddot{N} \rightarrow \dot{I} = \{ \tilde{N}_1, R_{1m(1)} \{ \tilde{N}_{21}, \tilde{N}_{22}, \dots, \tilde{N}_{2m(2)} \}, R_{2m(2)} \{ \tilde{N}_{31}, \tilde{N}_{32}, \dots, \tilde{N}_{3m(3)} \}, \dots, R_{km(k)} \{ \tilde{N}_{k1}, \tilde{N}_{k2}, \dots, \tilde{N}_{km(k)} \} \}$$

де C_i – основна ціль системи управління, $C_{im(i)}$ – $m(i)$ -а підціль i -го рівня на цільовій структурі, $i=1 \dots k$, R – множина відносин на підцілі структури. Крім того, у [8] запропонована побудова ієрархії процесу вибору альтернатив та порівняння рішень на кожному рівні ієрархії на основі нормалізації отриманих оцінок альтернатив (застосовуючи процедуру зважування методу аналізу ієрархій або метод згортки нечітких відносин). Завдання ухвалення рішення з управління БСМ (вибір методів управління та необхідних параметрів функціонування сенсорних вузлів) зведене до

завдання ієрархічного цільового динамічного оцінювання альтернатив за нечітких вихідних даних.

Висновки. Таким чином, проведена класифікація цільових функцій управління БСМ класу MANET, які можуть бути застосовані для моніторингу об'єктів критичної інфраструктури. Запропонований новий підхід до формування цільових функцій управління в зазначених радіомережах, який полягає в тому, що кожен сенсорний вузол визначає власну цільову функцію залежно від типу трафіка, що передається, цільових функцій вузлів-сусідів, ситуації, що склалася в БСМ, а також наявних вузлових та мережевих ресурсів. Завдання прийняття рішення щодо вибору цільової функції управління БСМ зведене до ієрархічного цільового оцінювання альтернатив.

Зважаючи на неповноту та неточність інформації про стан БСМ, для реалізації представленої схеми формування цільових функцій управління пропонується комплексне використання апарату нечіткої логіки та нейронних мереж. У процесі подальших досліджень будуть розроблені методи координації цільових функцій вузлів БСМ класу MANET.

Список літератури:

1. Dargie W. Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice / Dargie W., Poellabauer C. – New York: John Wiley and Sons, 2010. – 248 p.
2. Sitharama I.S. Distributed Sensor Networks, Second Edition: Image and Sensor Signal Processing / Sitharama Iyengar S., Richard R. – USA: CRC Press, 2012. – 764 p.
3. Жук О.В. Система управління тактичними сенсорними мережами / Жук О.В., Романюк В.А., Сова О.Я. // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2008. – № 2. – С. 88–96.
4. Olascuaga-Cabrera J.G. A multi-objective PSO strategy for energy-efficient ad-hoc networking / Olascuaga-Cabrera J.G., Lopez-Mellado E., Mendez-Vazquez // IEEE Cybernetics Systems, Man (SMC) Conference, 2011. – P. 235–240.
5. Babaei H. Multi Objective AODV Based On a Realistic Mobility Model / Babaei H., Romoozi M. // IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 7, Issue 3, No 3, May 2010. – P. 152–155.
6. Banner R. Multi-Objective Topology Control in Wireless Networks / Banner R., Orda A. // In Proc. IEEE INFOCOM, 2008. – P. 452–456.
7. Selvi R. Multiple-objective optimization of multimedia packet scheduling for ad hoc networks through hybridized genetic algorithm / Selvi R., Rajaram R. // The International Journal of Multimedia & Its Applications (IJMA). – Vol.3, № 3. – August 2011. – P. 368–372.
8. Романюк В.А. Цільові функції оперативного управління тактичними радіомережами // Збірник наукових праць. – К.: ВІТІ НТУУ «КПІ». – 2012. – № 1. – С. 109–117.

ЦЕЛЕВЫЕ ФУНКЦИИ УПРАВЛЕНИЯ УЗЛАМИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Проведены анализ и классификация задач управления беспроводными сенсорными сетями, которые относятся к классу MANET. Приведены возможные объекты управления и основные параметры оптимизации в беспроводных сенсорных сетях за уровнями эталонной модели OSI. Определено множество целевых функций управления беспроводными сенсорными сетями, их взаимосвязь и порядок использования системой управления сетью при принятии решений по управлению узловыми и сетевыми ресурсами.

Ключевые слова: целевая функция, беспроводная сенсорная сеть, мониторинг система управления.

**NODAL OBJECTIVE CONTROL FUNCTIONS OF THE WIRELESS
SENSOR NETWORKS FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE MONITORING**

The analysis and classification of the MANET wireless sensor networks management tasks are considered. The possible management objects and main optimization parameters in wireless sensor networks by the OSI model levels are shown. The set of objective control functions of the wireless sensor networks is defined. The relationship and the use of objective control functions by the network control system in decision-making of nodal and network resources control are considered in the article.

Key words: *objective function, wireless sensor network, monitoring, control system.*