

УДК 004.021

В. О. ВЛАСЕНКО, аспірант,

Державний університет телекомунікацій, Київ

## МЕТОДИ ПОБУДОВИ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

**Розглянуто безпроводові сенсорні мережі (*Wireless Sensor Networks — WSN*) як складову інтернету речей. Проаналізовано методи побудови *WSN*, такі як зірка, кластерне дерево, кожний-із-кожним (чарункова). Сформовано узагальнену структуру моделювання *WSN*.**

**Ключові слова:** безпроводові сенсорні мережі; інтернет речей; масштабованість мережі; система моделювання *WSN*.

### Вступ

Безпроводові сенсорні мережі (*Wireless Sensor Networks — WSN*) дедалі активніше проникають в усі сфери життя та діяльність людини. За прогнозами провідних експертів у галузі телекомунікацій, сенсорні мережі як складова інтернету речей (*Internet of Things — IoT*) у середньостроковій перспективі посядуть важливе місце серед мереж зв'язку.

Головна особливість безпроводових сенсорних мереж — це здатність їх до самоорганізації. Локально згруповані та взаємозв'язані вузли, утворюючи мережу, мають змогу через один або кілька шлюзів передавати дані для подальшої обробки (наприклад, у мережі зв'язку загального користування). Поєднаність сенсорних мереж із мережами зв'язку загального користування змушує здійснювати розрахунок параметрів зазначених шлюзів, а отже, досліджувати природу навантаження, що циркулює в сенсорних мережах [7].

### Основна частина

У період інтенсивного розвитку концепції *NGN* мережні структури *WSN* розглядалися у межах *NGN*. Тоді вважалося, що клієнтська база *WSN* невдовзі зросте до сотень мільйонів сенсорних вузлів. Проте стрімкий розвиток цієї нової технології, поява концепцій інтернету речей і Веб-речей (*Web of Things — WoT*) змусили переглянути перспективи розвитку *WSN*. Так, за сучасними прогнозами, кількість безпроводових пристроїв досягне 7 трлн на 7 млрд людей у світі вже до 2018–2020 років.

Сектор стандартизації Міжнародного союзу електров'язку розглядає нині можливість заміни концепції *NGN* на концепцію *розумних всепроникних мереж (Smart Ubiquitous Networks — SUN)*, що містить концепцію *NGN* як одну зі своїх складових [1].

Поширення безпроводових мереж *IEEE 802.11* посприяло створенню систем, що підтримують самоорганізацію мереж, які працюють без інфраструктури. Самоорганізована мережа, як і всі мережі зв'язку, складається з мережі доступу та транзитної мережі. Мережа доступу має назву *Ad Hoc* (цільова мережа), а *транзитна мережа — mesh* (чарункова). Вузли мережі *Ad Hoc* не мають функцій маршрутизації і можуть взаємодіяти лише з найближчими вузлами. Тому вузли *Ad Hoc* називають *дочірніми* [1].

Передавання даних — пріоритетне завдання інфокомунікаційних систем, а тому моделі навантаження мають особливо важливе значення для оцінювання ефективності таких систем. Як показали дослідження трафіку мереж зв'язку, зокрема *WAN*, *LAN*, найпоширеніші моделі на базі пуассонівських чи близьких до них процесів не придатні для опису самоподібного мережного навантаження. Такі моделі через занадто оптимістичну оцінку продуктивності інфокомунікаційних мереж не дозволяють із прийнятною точністю розраховувати ресурси, що мають забезпечувати передавання та обробку даних, а це призводить до зниження якості обслуговування.

Розглянемо основні види мережного навантаження.

• Аварійна сигналізація — повідомлення цього типу передаються з мінімальними затримками і втратами.

• Мовні дані — дані, чутливі до джитеру і втрат.

• Протокольна сигналізація.

• Дані обслуговування, такі як прошіття та конфігурації, а також статичні файли (наприклад, фото), вимагають гарантованого доставляння, але не чутливі до затримок.

• Дані телеметрії — припустимий лише низький рівень втрат.

• Решта даних, що передаються без жодних гарантій.

Сучасні мережі надають широкий спектр послуг по єдиних каналах даних. При цьому кожна з мереж може мати власні вимоги щодо забезпечення якості обслуговування.

У Рекомендації *Y.1541 MCE-T* визначено шість класів обслуговування для мереж із комутацією пакетів на базі *IP*. Для розрахунку параметрів класів обслуговування використовуються нормовані

величини, розглянуті в Рекомендації Y.1540. Такі параметри застосовуються до послуг IP виду *точка-точка, кінцевий вузол до кінцевого вузла і мережних частин, які забезпечують або сприяють наданню таких послуг* [2].

Рекомендація Y.1540 визначає чотири головні параметри, за допомогою яких можна описати класи якості обслуговування на базі IP мереж:

- середня затримка пакетів (**IPTD** — *IP Packet Time Delay*);
- варіація затримки пакетів (джитер) (**IPDV** — *IP Packet Delay Variation*);
- імовірність втрати пакета (**IPLR** — *IP Packet Lost Rate*);
- імовірність помилкового передавання пакета (**IPER** — *IP Packet Error Rate*).

Умови застосування та призначення сенсорних мереж не дозволяють повною мірою реалізовувати класи обслуговування, регламентовані в Рекомендації Y.1541. Порівнюючи існуючий набір класів специфікації Y.1541 та запропонований набір для WSN, виявляємо два класи, не включені в згадану Рекомендацію: дані аварійної сигналізації та дані, які вимагають гарантованого доставляння, але не чутливі до затримок. Важлива особливість даних аварійної сигналізації полягає в тому, що затримки при їх передаванні можуть вноситися тільки на фізичному рівні.

Зауважимо, що сенсорні мережі — результат поєднання множини автономних пристроїв, які спільно функціонують, виконуючи поставлене перед мережею завдання (наприклад, здійснюють збір даних із датчиків, автоматизацію технологічних процесів тощо).

Головне завдання мереж WSN — організація сукупності сенсорів із використанням багатьох порівняно простих датчиків на відміну від традиційного підходу, який передбачає розміщення кількох дорогих і складних модулів зондування. Окрім того, ці мережі забезпечують велику зону охоплення, точність і надійність у поєднанні з економічністю функціонування.

Як показала практика, персональні мережі IEEE 802.15.4 знайшли своє застосування й у сфері WSN під назвою *повільна безпроводова персональна мережа (Low Rate Wireless Personal Area Network — LR-WPAN)*.

При створенні протоколу IEEE 802.15.4 було висунено певні вимоги: мережа мала бути надійна, легка в розгортанні, із простим протоколом і низьким енергоспоживанням, аби тривалий час вона могла працювати на базі акумуляторних батарей [4]. При цьому вимоги стосовно дальності дії та швидкості передавання порівняно невисокі.

Мережі IEEE 802.15.4 мають такі особливості:

- швидкість передавання — 250; 40 і 20 кбіт/с;
- використання короткої 16-бітової або розширеної 64-бітової адресації;
- призначення гарантованих часових інтервалів (*Guaranteed Time Slot — GTS*);
- використання множинного доступу з контролем носійної і запобіганням колізіям (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance — CSMA-CA*);
- протокол із підтвердженнями для гарантованого передавання;
- виявлення сигналу (*Energy Detection — ED*);
- індикатор якості каналу зв'язку (*Link Quality Indicator — LQI*);
- 16 каналів у смузі частот 2450 МГц; 10 каналів у смузі частот 915 МГц і один канал у смузі частот 868 МГц.

Мережі IEEE 802.15.4 підтримують архітектуру трьох типів: *зірка, кластерне дерево і чарункова*, або *кожний із кожним* (рис. 1). В архітектурі *зірка* зв'язок встановлюється між пристроями і єдиним центральним контролером — координатором. Такі пристрої мають, як правило, кілька супутніх застосувань і являють собою або вузол початку передавання, або вузол призначення для сеансів зв'язку в мережі.

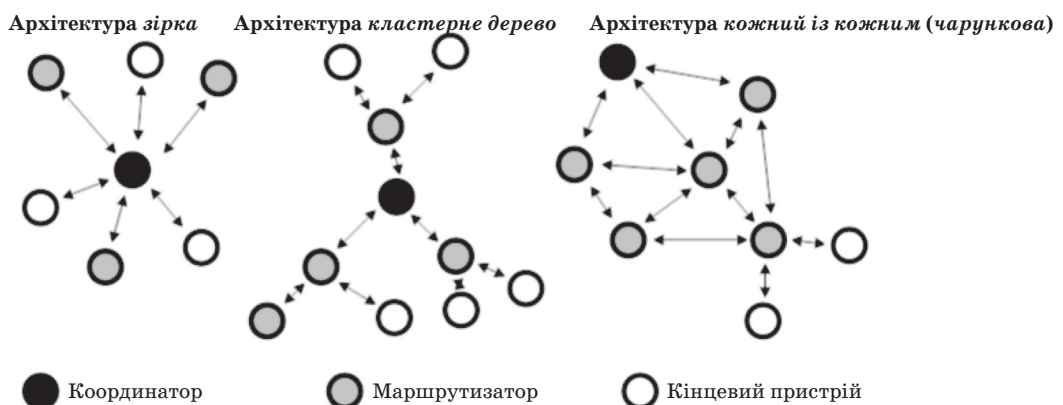


Рис. 1. Типи архітектури для мереж IEEE 802.15.4

У мережі з архітектурою *кластерне дерево* передавання даних і повідомлень управління через мережу здійснюється з використанням ієрархічної стратегії вибору маршруту і може відбуватися під централізованим управлінням. Для цього на фізичному рівні потрібно використовувати періодичні сигнали маяків від координаторів IEEE 802.15.4 [1].

Для створення складної архітектури, такої як *кластерне дерево* і *чарункова*, потрібна реалізація на мережному рівні моделі взаємодії відкритих систем. Існує кілька відповідних протоколів, серед яких найбільш відомі ZigBee і IETF 6LoWPAN [7].

Індустріальний стандарт ZigBee — це розробка організацією ZigBee Alliance, до складу якої входять провідні розробники обладнання та програмного забезпечення для WSN. Остання версія специфікації ZigBee побачила світ 2007 року. При розробці стека протоколів ZigBee було враховано надбання розробників, що працюють у сфері локальних низькошвидкісних економічних безпроводових мереж. Специфікація ZigBee забезпечує стандартизовану організацію безпроводового зв'язку між пристроями від різних виробників у багатьох прикладних сферах, а також пропонує методи, що сприяють швидкому розгортанню і запуску розподілених безпроводових систем управління та спостереження [9].

Що ж до робочої групи IETF 6LoWPAN, то її було сформовано для розв'язання проблеми передавання IP-пакетів по каналах IEEE 802.15.4 згідно з відкритими стандартами та забезпечення взаємодії з іншими IP-каналами й пристроями, так само як і з пристроями IEEE 802.15.4.

Зазначене вирішення відзначається багатьма перевагами. Кожний сенсор у 6LoWPAN мережі має персональну IPv6 адресу. Це дозволяє багатьом компаніям виробляти LR-WPAN пристрої, здатні працювати разом і взаємодіяти в одній мережі на базі мережних комп'ютерів і наявного обладнання. Кожний вузол сенсорної мережі стає доступний із зовнішніх мереж за IP-адресою. Цим самим усувається потреба в комплексних шлюзах для кожного локального IEEE 802.15.4 протоколу і чисельних адаптерів, використовуваних додатками для зв'язку через ці шлюзи, а також спрощується багато специфічних для шлюзів процедур автентифікації і безпеки. Чимало усталених, базованих на IP-протоколі програмних інструментів, таких як ping, traceroute чи SNMP, можна відразу ж використовувати для об'єднання в мережу й обслуговування LR-WPAN пристроїв. Окрім того, на основі IP можуть бути легко реалізовані функції NAT (підміна адрес), розподіл навантаження та кешування. Відомі моделі передавання даних на програмному рівні та сервіси на базі HTTP/XML/SOAP дозволяють спростити розроблення додатків для LR-WPAN мереж і уніфікувати інтеграцію пристроїв в існуючу корпоративну мережу при використанні 6LoWPAN [9].

З'єднання типу *точка–точка* і *зірка* підходять для найпростіших додатків, мають мінімальну вартість та найнижче енергоспоживання, дозволяючи використовувати стратегію стандартного множинного доступу. У кожній мережі з топологією *зірка* є один координатор мережі.

Топологія *кластерне дерево* забезпечує масштабованість мережі та розширення зони покриття, не вимагаючи додаткових витрат на інфраструктуру. Мережа цього типу може включати в себе кілька підмереж із топологією *зірка*.

У разі *чарункової* топології немає виділених маршрутизаторів, і тоді будь-який мережний вузол може виконувати функції маршрутизатора для інших пристроїв у мережі. Проте термін служби вузлів зменшується за рахунок підвищеного обчислювального навантаження та частішого використання приймача.

Моделювання сенсорних мереж дозволяє істотно знизити часові та фінансові витрати на їх розробку й налагодження.

Узагальнену структуру системи такого моделювання подано на рис. 2. Розглянемо окремі її компоненти.

*Менеджер подій* забезпечує видачу останніх на датчики вузлів мережі із заданою частотою і відповідно до параметрів вузлів (їхніх датчиків) [9].

*Модель вузла мережі*, що слугує для симуляції функціонування вузлів реальних мереж, має такі характеристики: координати  $(x, y)$  у двовимірному або  $(x, y, z)$  у тривимірному просторі; заряд батареї, мА; потужність передавача, Вт (або дБп); енергоспоживання при передаванні даних, мА; чутливість приймача, дБ (мінімальний рівень відношення С/Ш, при якому можливе приймання); енергетичні витрати на приймання даних; період активної роботи (як часто вузол переходить із режиму очікування в активний); тривалість роботи в активному режимі, с; енерговитрати в активному режимі, мА; витрати на роботу в режимі економії енергії, мА; витрати енергії на обробку подій від датчиків, мА; затримка при прийманні та передаванні пакетів, с; затримка на обробку подій, с; стан вузла (режим роботи, роботоздатність); довжина переданих пакетів, біт.

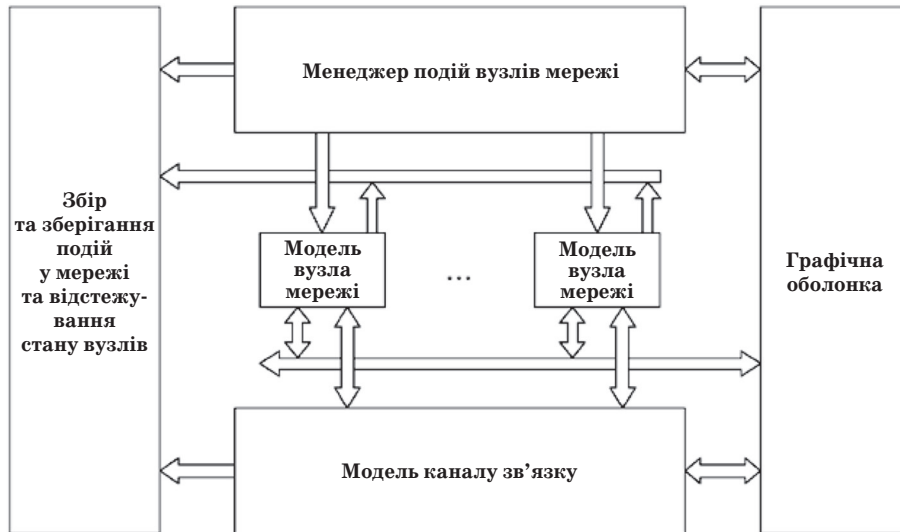


Рис. 2. Узагальнена структура системи моделювання сенсорної мережі

Кожний вузол WSN може працювати в кількох режимах. Режими роботи змінюються самим вузлом або під впливом зовнішніх подій. Режими роботи та переходи від режиму до режиму можуть бути подані у вигляді автомата, як це зображено на рис. 3.



Рис. 3. Режими роботи вузла WSN

Режими роботи вузла WSN мають такий сенс.

1. *Ініціалізація* — дії, виконувані вузлом при ввімкненні.
2. *Енергозберігальний режим* — режим із мінімальним енергоспоживанням (елементи вузла, що споживають найбільше енергії, у цьому режимі вимкнено).
3. *Активний режим* — вузол мережі виконує обробку даних, отриманих від датчиків, або тих, що надійшли по каналу зв'язку.
4. *Передавання* — режим передавання даних до інших вузлів.
5. *Приймання* — режим приймання даних від інших вузлів мережі.
6. *Нероботоздатний стан вузла* — виникає в разі розрядження джерела живлення (батареї).

Розглядувана модель забезпечує передавання пакетів даних між вузлами з урахуванням загасання сигналу, внесення помилок у пакети даних, а також втрати пакетів. Модель каналу зв'язку передбачає стан зайнятості (за рівнем сигналу).

Нехай  $P_{\text{прм}}$  і  $P_{\text{прд}}$  — потужність сигналу відповідно на боці приймача і на боці передавача. Тоді маємо:

$$P_{\text{прм}} = \frac{P_{\text{прд}}}{(1 + d^y)} (1 + a)(1 + b),$$

де  $d$  — відстань між передавачем і приймальним вузлом;  $y$  — ступінь загасання (типове значення змінюється від 2 до 5);  $a, b$  — випадкова величина з нормальним розподілом і нульовим середнім значенням, що залежить відповідно від відстані між вузлами та від часу.

Пакет даних вважається прийнятим, якщо рівень сигналу на боці приймача більший, ніж рівень чутливості приймача:  $P_{\text{прм}} > C/\text{Ш}$  [9].

Програмна частина зі збору та зберігання подій у мережі та її стану (див. рис. 2) дає змогу відстежувати поведінку модельованої мережі в процесі її роботи.

Графічна оболонка (див. рис. 2) забезпечує розміщення (автоматичне або в ручному режимі) вузлів у просторі, а також задання параметрів мережі та параметрів менеджера подій, із відображенням стану вузлів і подій у мережі та передаваних пакетів даних.

### Висновки

◆ Обґрунтовано актуальність сенсорних мереж, які завдяки своїй здатності до самоорганізації забезпечують достатньо високу якість обслуговування.

◆ Сформовано узагальнену структуру моделювання безпроводових сенсорних мереж і доведено, що таке моделювання дозволяє істотно знизити часові та фінансові витрати на розробку й налагодження зазначених мереж.

### Список використаної літератури

1. **IEEE 802.15 Working Group for WPAN** [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.ieee802.org/15/>.
2. **Simon, G.** *Simulation-based optimization of communication protocols for large-scale wireless sensor networks* / G. Simon // *IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT.*— March 8-15, 2003.
3. **Simon, G.** *Probabilistic wireless network simulator, 2003* [Електронний ресурс] / G. Simon.— Режим доступу: <http://www.isis.vanderbilt.edu/projects/nest/prowler>.
4. **IEEE 802.15.4-2003 Standard** [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf>.
5. **Dressler, F.** *A Study of Self-Organization Mechanisms in Ad Hoc and Sensor Networks* // *Computer Communications.*— 2008.— V. 31, N 13.— P. 3018–3029.
6. **Дмитриев, А. С.** *Сверхширокополосные беспроводные сенсорные сети на основе хаотических радиопульсов* / А. С. Дмитриев, Л. В. Кузьмин, В. Ю. Юркин // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.*— 2009.— Т. 17, № 4.— С. 90–104.
7. **Иваненко, В. А.** *Информационные аспекты при разработке сенсорных сетей. Ч. 2* / В. А. Иваненко, А. Н. Зеленин // *Вост.-Европ. журн. передовых технологий.*— 2011.— 4/2 (52).— С. 11–13.
8. **Гайкович, Г.** *Стандартизация в области промышленных сетей* / Г. Гайкович // *Электронные компоненты.*— 2009.— № 1.— С. 37–39.
9. **Иваненко В. А.** *Анализ протоколов передачи данных от узлов в беспроводных сенсорных сетях* / В. А. Иваненко // *Вост.-Европ. журн. передовых технологий.*— 2011.— 2/10 (50).— С. 9–12.
10. **802.15.4-2011** — *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks* [Електронний ресурс] // *IEEE Standards Association.*— 2011.— Режим доступу: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.15.4-2011.html>.
11. **ZigBee Standards Overview** [Електронний ресурс] / *ZigBee® Alliance.*— Режим доступу: <http://www.zigbee.org/Standards/Overview.aspx>.

**Рецензент:** доктор техн. наук, професор **В. А. Дружинін**, Державний університет телекомунікацій, Київ.

V. O. Vlasenko

### МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

Рассмотрены беспроводные сенсорные сети *Wireless Sensor Networks (WSN)* как составляющая интернета вещей. Проанализированы методы построения *WSN*, такие как звезда, кластерное дерево, каждый-с-каждым (ячеистая). Сформирована обобщенная структура моделирования *WSN*.

**Ключевые слова:** беспроводные сенсорные сети; интернет вещей; масштабируемость сети; система моделирования *WSN*.

V. O. Vlasenko

### METHODS OF CONSTRUCTION OF WIRELESS SENSOR NETWORKS

The wireless sensor networks (*WSN*), as a component of the Internet of Things are considered in the article. The methods of construction, such as a star, cluster tree, one-to-each (cellular) were analyzed. The generalized structure of the modeling *WSN* was formed.

**Keywords:** wireless sensor networks; Internet of Things; network scalability; system modeling *WSN*.