

# КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

I. Galelyuka

## MODELLING OF WIRELESS SENSOR NETWORKS

*In the article the results of modelling of the wireless sensor networks for precision agriculture and ecological monitoring are considered.*

*Key words: wireless sensor network, modelling.*

*Приведены результаты моделирования беспроводной сенсорной сети для прецизионного земледелия и экологического мониторинга.*

*Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, моделирование.*

*Наведені результати моделювання бездротової сенсорної мережі для прецизійного землеробства та екологічного моніторингу.*

*Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, моделювання.*

© I.B. Galelyuka, 2015

УДК 681.5, 621.398

I.B. ГАЛЕЛЮКА

## МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗДРотовИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

**Вступ.** Бездротові сенсорні мережі щороку все активніше проникають у всі галузі промисловості та сфери діяльності людини. На даний час вони широко використовуються не тільки для збору і обробки даних та керування промисловими об'єктами, але і у звичайному побуті у вигляді Інтернету речей (Internet of Things) [1]. Бездротова сенсорна мережа (БСМ) вже перестала бути тільки об'єктом наукових досліджень і перетворюється на масовий продукт, який випускають багато виробників. Саме це зумовило появу багатьох промислових стандартів, які розробляються різними міжнародними організаціями, наприклад, Міжнародною організацією по стандартизації (ISO), Інститутом інженерів електротехніки та електроніки (IEEE), Інженерною радою Інтернету (IETF) та Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU). Результатом роботи провідних у галузі стандартизації організацій стало сімейство стандартів IEEE 802.15.4, які визначають особливості побудови мереж з невисокою пропускнуою здатністю.

**Загальна частина.** Існуючі та проєктовані бездротові сенсорні мережі розрізняються як областями застосування, так використаними технічними рішеннями [2]. Тим не менш, можна виділити основні характеристики, які характерні більшості бездротових систем. Типова БСМ складається із великої кількості простих пристроїв або, іншими словами, вузлів для збору інформації та декількох більш складніших пристроїв, які ще називають координаторами, для обробки інформації та певного керування мережею. Кожний вузол здійснює періодичні вимірювання, первинну

обробку інформації та передачу цих даних до координатора. В координаторі дані обробляються та зберігаються, а при необхідності передаються на вищий рівень або до іншої системи. Вузли можуть передавати виміряну інформацію не тільки напряму координатору, але при необхідності через інші проміжні вузли. Типові сценарії використання БСМ накладають певні обмеження на структуру та функціонування вузлів. Зокрема, вузли мають бути малогабаритними, достатньо дешевими та мати досить довгий час автономної роботи. Відповідно, вузли мають енергетичні та обчислювальні обмеження, що слід враховувати при розробці БСМ. Координатори виконують відмінні від вузлів функції і, саме тому, часто володіють потужнішими процесорами, більшими обсягами пам'яті та кращими джерелами автономного живлення.

Слід зауважити, що специфіка БСМ передбачає можливість передачі даних від вузла до координатора через один або більше проміжних вузлів. При цьому надійність у передачі даних досягається не за рахунок встановлення надійного радіоканалу, а за рахунок підтвердження приймання кожного переданого пакету. Саме тому, для бездротових сенсорних мереж важлива розробка необхідних протоколів мережевої маршрутизації.

Не дивлячись на певну історію розвитку бездротових сенсорних мереж, концепції побудови таких мереж все ще не оформились і не втілилися у типових апаратно-програмних рішеннях. В більшості випадків реалізація сенсорних мереж залежить від вимог конкретної прикладної задачі, а також досвіду та навичок колективу розробників [3].

Велика кількість областей застосування бездротових сенсорних мереж породжує певні проблеми, які полягають у тому, що дослідникам та розробникам мереж приходится працювати з великою кількістю обмежень та характеристик мереж у залежності від прикладної задачі. В такому випадку моделювання є єдиним підходом, коли можна завчасно розрахувати та оцінити характеристики мережі в залежності від топології мережі, оточуючого середовища, інфраструктури без розробки реально діючих вузлів мережі.

В теперішній час моделювання та проектування бездротових сенсорних мереж є досить актуальною темою для досліджень у всьому світі. Слід відмітити, що, не дивлячись на наявність сімейства стандартів, багато аспектів роботи та побудови БСМ є не стандартизованими. Проведення натурних випробувань навіть невеликої частини БСМ є порівняно складним і в більшості випадків дорогим процесом. Крім того, не можливо передбачити і забезпечити стабільність роботи лише ділянки мережі при натурному експерименті, оскільки не можливо врахувати усі фактори та ізолювати їх один від одного.

При моделюванні протоколи, схеми, топології та навіть ідеї можуть бути оцінені у великих масштабах досить швидко і дешево. Из-за складності та тривалості налаштування БСМ широке застосування отримали різноманітні системи імітаційного моделювання мереж, які дозволяють користувачам ізолювати різні фактори лише за допомогою налаштування параметрів.

Моделювання БСМ – це є заміна оригінала деяким об'єктом, який дозволяє вивчати характеристики оригінала з певним наближенням до реальності. Основ-

ною складністю при моделюванні БСМ є необхідність врахування різноманітних факторів. Наприклад, на кожному вузлі мережі встановлено свої оригінальні програмні засоби, варіантів яких може бути багато. Зокрема, багато вузлів існуючих бездротових сенсорних мереж працюють під керівництвом операційних систем, яких на сьогоднішній день є декілька. Це слід враховувати при моделюванні. Крім того, різні вузли в тій же самій мережі можуть виконувати різні функції. Не слід забувати, що мережі є безпроводними, і тому на їхню роботу можуть впливати різного типу перешкоди і завади, які ускладнюють передачу даних від одного вузла до іншого. Також мережі можуть розгортатися як на відкритих територіях, так і у закритих приміщеннях, наприклад, лабораторіях або теплицях. Не найменш важливою особливістю є те, що вузли мають обмежені енергетичні та обчислювальні ресурси.

Отримання точних результатів та висновків при моделюванні не є простою задачею. Основними ключовими аспектами при моделюванні БСМ є правильність імітаційної моделі та придатність конкретних інструментів для реалізації даної моделі [4]. До фундаментальних проблем відноситься вибір між точністю, продуктивністю та масштабованістю моделі.

При виборі системи моделювання БСМ слід звернути увагу на те, що система має дозволяти:

- підвищувати ефективність розробки БСМ;
- проводити експерименти без реального розгортання сенсорної мережі;
- проводити дослідження різних режимів роботи мереж;
- зменшувати затрати на розробку та розгортання мережі в майбутньому.

Будемо вважати, що всі кінцеві вузли нашої БСМ є апаратно та програмно ідентичні. Тому для створення моделі досить описати типовий вузол мережі, алгоритми його функціонування та взаємодії. Якщо використовувати імітаційне моделювання, то слід звернути увагу на два основних підходи до моделювання БСМ: агентно-орієнтований та об'єктно-орієнтований.

**Об'єктно-орієнтований підхід.** Кожний вузол представляється окремим класом зі своїм набором властивостей, які визначають набір методів та його поведінку. Середовище взаємодії визначається класом з параметрами, які не можуть бути описані в кожному вузлі. Ці параметри визначають цілу мережу на верхньому рівні, наприклад, кількість вузлів у мережі, протоколи передачі даних, протоколи маршрутизації тощо. Для моделювання середовища передачі даних розробляється відповідна модель радіоканалу. Крім того, для моделювання конкретної мережі слід розробити та використати додаткові моделі, наприклад, модель енергоспоживання вузла, модель явища, параметри якого зчитуються сенсором вузла тощо. Функціонування моделі вузла визначається поведінкою решти моделей, а модель бездротової сенсорної мережі визначається поведінкою моделей окремих вузлів.

**Агентно-орієнтований підхід** – метод моделювання, який вивчає функціонування децентралізованих агентів і як їхня робота впливає на роботу цілої системи. На відміну від системної динаміки, в цьому підході правила для агентів визначаються індивідуально і правила функціонування цілої системи є результа-

том спільної діяльності багатьох агентів. При такому моделюванні використовується підхід "знизу-вверх". Агентно-орієнтований підхід включає у себе елементи теорії ігор, складних систем, багатоагентних систем та еволюційного програмування. Також застосовується метод Монте-Карло, теорія ймовірності та математична статистика.

Агентно-орієнтоване моделювання бездротових мереж у деякій мірі являє собою підвид імітаційного моделювання, в якому основну увагу приділено дослідженню стану глобальної системи в залежності від поведінки агентів, які є компонентами системи. У випадку бездротових сенсорних мереж цей підхід є доцільним, так як вузли мережі розподілені на великій території, активно взаємодіють з навколишнім середовищем та сусідніми вузлами, а поведінка та технічні характеристики окремого вузла безпосередньо впливають на функціонування та продуктивність цілої мережі.

Враховуючи вище вказане, можна зробити висновок, що вибір інструменту для моделювання БСМ, який би максимально точно враховував всі фактори та обмеження, є складною задачею. На даний час існує кілька програмних засобів, які дозволяють моделювати бездротові сенсорні мережі з урахуванням багатьох факторів. Найбільш відомими є Anylogic, TOSSIM, OPNET Modeler, Network Simulator (NS, NS-2, NS-3), GloMoSim, Worldsens, NetSim, OMNeT++, Castalia. Серед вказаних програмних інструментів є як платні, так і безплатні варіанти. Крім інструментів для моделювання мережі слід відмітити також засоби для моделювання розповсюдження радіосигналів, наприклад, EDX Signal pro, Winprop (AWE) і CINDOOR.

Після аналізу описаних вище програмних середовищ обрано комплекс з OMNeT++ [5] і Castalia [6] для моделювання розроблюваної БСМ для сільського господарства та екологічного моніторингу. Одним з критеріїв вибору вказаних програм було те, що в сукупності вони досить реально моделюють мережі з малопотужних бездротових вузлів та імітують певні проблеми в енергоспоживанні таких вузлів і перешкоди та завади при проходженні радіосигналів. Крім того, вони є безкоштовними для некомерційного використання.

Castalia – це система моделювання бездротових сенсорних мереж і, що не менш важливо, взагалі мереж з малопотужними вузлами. Castalia побудована на платформі OMNeT++ і може використовуватися дослідниками та розробниками, які планують дослідити свої алгоритми і протоколи в реалістичному середовищі бездротового каналу з розширеною моделлю радіоканалу та приближеною до реальності поведінкою вузла. Вказана система може використовуватися для оцінки різноманітних характеристик мереж для конкретних застосувань.

Слід відмітити, що система Castalia не є орієнтованою на конкретну апаратну платформу, але при цьому вона гарантує загальний спосіб перевірки алгоритму перед його реалізацією на конкретній апаратно-програмній платформі. Звичайний окремих вузол є простим елементом моделювання. Він приймає повідомлення від інших моделей вузлів і у відповідності з повідомленням або за самостійною програмою виконує частину коду. Цей код може зберігати

стан вузла, який змінюється при прийманні повідомлення, та відправляє нові повідомлення.

Розробка моделі кластеру проєктованої нами БСМ для сільського господарства та екологічного моніторингу, як вказано вище, починається з розробки вузла мережі. Модель вузла складається з кількох дрібніших елементів, а саме: моделі вимірювального вузла, моделі вузла енергоспоживання, моделі вузла бездротового модуля, моделі програмного забезпечення та моделі мобільності вузла. Крім того, розробляється модель бездротового каналу або береться вже з існуючих моделей каналів передачі даних. Також слід враховувати фізичне середовище, в якому працює як вузол, так і ціла мережа, шляхом розробки відповідної моделі.

Моделювання БСМ в OMNeT++ і Castalia відбувається в автоматичному режимі згідно заданих алгоритмів функціонування мережі, кількості та розташування вузлів, правил мобільності, коефіцієнтів послаблення сигналу та можливих перешкод на шляху сигналу, часу моделювання тощо.

Після завершення моделювання на екран виводяться зведені результати по кожному вузлу та цілій мережі, зокрема, кількість переданих пакетів даних та кількість пакетів, які було втрачено внаслідок перешкод і завад, енергоспоживання вузла протягом заданого часу. При необхідності можна змоделювати та отримати результати за іншими параметрами, наприклад, час формування мережі, швидкість передачі певного обсягу даних, енергоспоживання вузлів у різних умовах функціонування тощо.

**Результати моделювання.** Для моделювання розроблено бездротову сенсорну мережу, яка працює на базі стандарту 802.15.4 (2,4 ГГц) і містить у своєму складі малопотужні бездротові вузли зі змінною потужністю передачі від 0 до -5 dBm та чутливістю приймання - 95 dBm. Швидкість передавання даних складала 250 кбіт/с. При цьому енергоспоживання вузла не перевищує 60 мВт.

Перш за все здійснено розрахунок залежності потужності радіосигналу від відстані, яку він подолав у вільному середовищі без завад і перешкод, з використанням формули [7]:

$$P_r = 10 \cdot \lg \left( \frac{P_t \cdot G_r \cdot G_t \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d^2} \cdot 10^3 \right), \quad (1)$$

де  $P_r$  – потужність радіосигналу на певній відстані від передавача, dBm;  $P_t$  – потужність передавача радіосигналу, dBm;  $G_r$  – коефіцієнта підсилення приймача;  $G_t$  – коефіцієнт підсилення передавача;  $d$  – відстань між передавачем і точкою приймання сигналу, м;  $\lambda$  – коефіцієнт, який враховує частоту сигналу, визначається за формулою  $\lambda = \frac{c}{f}$ , де  $c$  – швидкість світла, м/с;  $f$  – частота сигналу, Гц.

Коефіцієнти підсилення передавача і приймача за умов нашої прикладної задачі рівні 1.

Звичайно за умов реального оточення, наприклад, на сільськогосподарських угіддях, радіосигнал буде послаблюватися значно сильніше ніж при повній від-

сутності перешкод і завад. Тобто відстань між передавачем і приймачем має бути значно менша для встановлення зв'язку відповідної якості. Для такого випадку використовують коефіцієнт послаблення радіохвиль для різних умов розповсюдження, який часто позначають символом  $n$ . Як правило, для середовища без перешкод і завад цей коефіцієнт рівний 2 [8, 9]. Максимальне значення цього коефіцієнту може сягати 6, наприклад для щільних міських забудов [8]. Також у літературі зустрічається залежність між потужністю сигналу та відстанню, яку він пройшов, з урахуванням коефіцієнту послаблення  $n$ . В роботі [9] вказується, що послаблення сигналу прямо пропорційне  $d^n$ . З урахуванням вище зазначеного і того, що коефіцієнт  $n$  для нашої прикладної задачі, а саме сільськогосподарських угідь, буде рівним 3, формулу (1) можна привести в наступний вигляд для приблизного врахування впливу реального середовища на розповсюдження хвиль:

$$P_r = 10 \cdot \lg \left( \frac{P_t \cdot G_r \cdot G_t \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d^3} \cdot 10^3 \right). \quad (2)$$

Отримані за формулами (1) і (2) залежності в графічній формі показані на рис. 1. Як видно з рисунку, сигнал у вільному середовищі послаблюється до рівня чутливості приймача (-95 dBm) на відстані 300 метрів. Звичайно, ослаблення сигналу до такого рівня у реальних умовах, особливо в умовах сільськогосподарських угідь, відбудеться значно ближче, а саме на відстані близько 35 метрів.

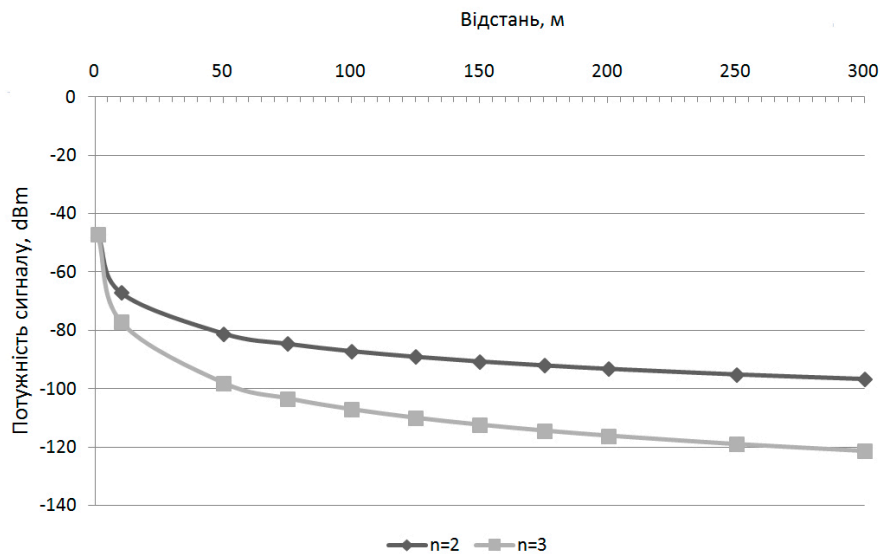


РИС. 1. Залежність потужності радіосигналу від подоланої відстані

Надалі для порівняння з вище наведеними розрахунками та визначення відстані, на якій встановлюється стабільний зв'язок, у системах OMNeT++ і Castalia

проведено моделювання якості зв'язку між вузлами, які рівномірно покривають територію певної площі. Оскільки вузли є малопотужними, то досліджувані ділянки являли собою квадрати зі сторонами від 30 до 175 метрів, тобто площею від 9 арів до 3 гектарів. На вказаних площах проведено моделювання роботи трьох мереж з 9, 16 і 25 вузлів. Вузли розташовувалися приблизно на рівній відстані квадратами 3×3, 4×4 і 5×5 вузлів відповідно. Час моделювання складав 100 секунд, протягом яких кожний вузол передавав 100 повідомлень. Потужності передачі вузлів складали 0, -1, -3 і -5 dBm.

Спочатку розраховувалася якість зв'язку між окремими вузлами як відношення отриманих повідомлень до переданих. Потім на основі окремих значень якості зв'язку розраховувалося інтегральне значення якості зв'язку мережі. Слід розуміти, що інтегральне значення якості зв'язку мережі є узагальненим показником і розраховується на основі показників якості зв'язку встановлених бездротових каналів між вузлами. Результати моделювання мережі з 9 вузлів можна побачити на рис. 2.

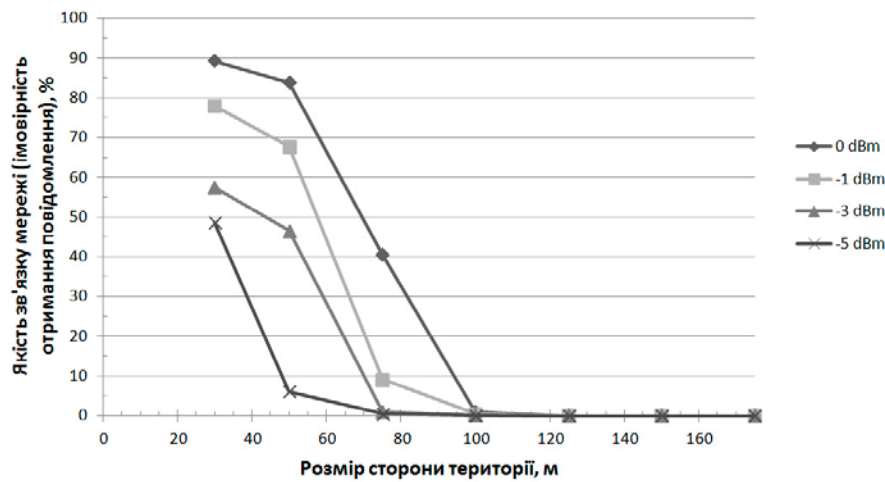


РИС. 2. Залежність якості зв'язку мережі з 9 елементів від розмірів охопленої території

При цьому за отриманими результатами можна побудувати діаграму видимості або, іншими словами, діаграму якості зв'язку при розмірах ділянки 30×30 метрів та потужності передачі -5 dBm (рис. 3, а). Під якістю зв'язку між вузлами мається на увазі відношення успішно прийнятих повідомлень від конкретного вузла до загальної кількості повідомлень, відісланих цим вузлом. Різниця у цих двох значеннях зумовлені випадковими перешкодами та завадами на шляху радіосигналу і конфліктами при передачі повідомлень. При цьому збільшення потужності передачі до 0 dBm призводить до того, що для кожного окремого вузла стійкий (якісний) зв'язок встановлюється з безпосередньо усіма вузлами без проміжних вузлів, тобто вузол "0" без жодних проблем отримує пові-





яка буде на певній відстані від джерела сигналу, при цьому не враховуються особливості взаємодії джерела і приймача сигналу та природа самого переданого повідомлення.

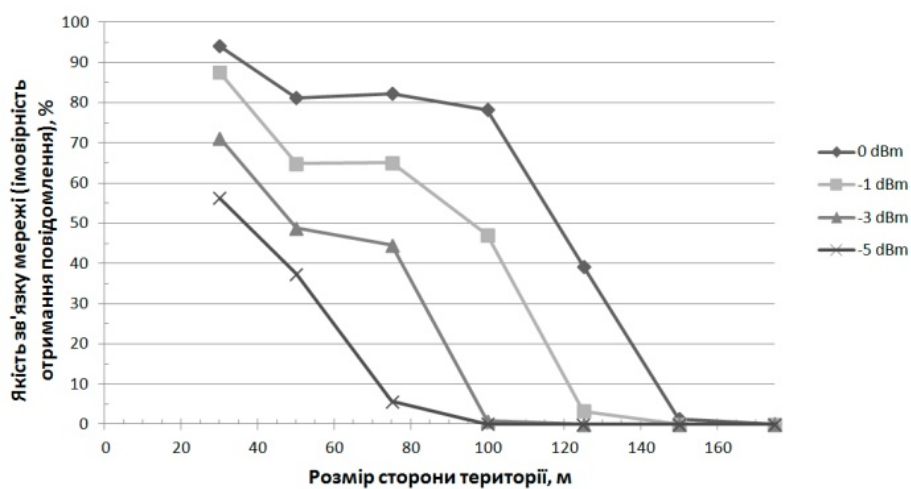


РИС. 4. Залежність якості зв'язку мережі з 16 вузлів від розмірів охопленої території

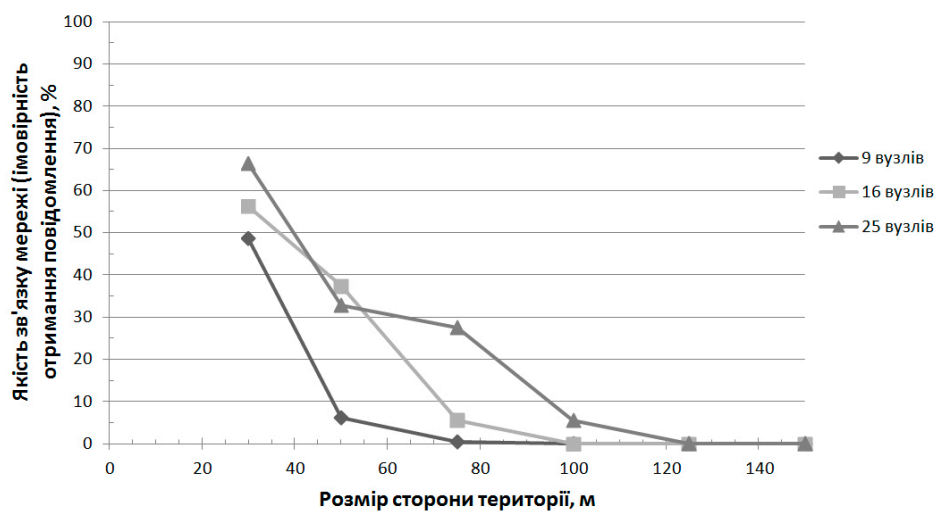


РИС. 5. Залежність якості зв'язку мереж від розмірів охопленої території при потужності передачі -5 dBm

За таких обставин можна вважати, що результати моделювання мереж у певній мірі збігаються з теоретичними розрахунками. Наступним кроком буде перевірка отриманих результатів в умовах польового експерименту з використанням реальних апаратно-програмних засобів та умов навколишнього середовища.

**Висновки.** Перед створенням та впровадженням такої складної системи, як бездротова сенсорна мережа, доцільно провести її моделювання в різних режимах роботи та оцінити основні параметри, наприклад, втрати пакетів даних при передачі внаслідок перешкод та завад, енергоспоживання вимірювальних вузлів та координатора, час самоорганізації мережі, діаграми видимості та ін. В статті наведений перелік як комерційних, так і безкоштовних систем моделювання бездротових мереж, які дають можливість у короткі терміни та з мінімальними часовими затратами провести моделювання бездротової сенсорної мережі будь-якої складності. На прикладі кластеру бездротової сенсорної мережі для сільськогосподарства та екологічного моніторингу описано процес моделювання в системах OMNeT++ і Castalia та відображено узагальнені результати, отримані в процесі моделювання.

Показано, що результати моделювання мереж з різною кількістю вузлів, здійсненого в програмних засобах OMNeT++ і Castalia, збігаються з теоретичними розрахунками, отриманих з використанням класичних формул розповсюдження сигналу.

Наступним кроком верифікації моделей буде натурний експеримент у польових умовах з використанням реальних апаратно-програмних засобів та умов навколишнього середовища.

1. *Recommendation Y.2060 "Overview of the Internet of things"* // International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector, 2012.
2. *Shorey R., Ananda A., Mun Choon Chan, Wei Tsang Ooi.* Mobile, wireless, and sensor networks: technology, applications, and future directions // USA: A John Wiley & Sons, Inc. – 2011. – 430 p.
3. *Kryvonos Yu., Romanov V., Wojcik W., Galelyuka I., Voronenko A.* Application of wireless technologies in agriculture, ecological monitoring and defense // Proceeding of the 8th IEEE International conference on "Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications", IDAACS'2011. – Warsaw, Poland. – 2015, September 24–26.
4. *Борисенко А.С., Галкин П.В.* Адекватность моделей беспроводных сенсорных сетей в средах имитационного моделирования // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 4/ 9 (64). – С. 52–55.
5. <https://omnetpp.org>.
6. <http://castalia.forge.nicta.com.au/index.php/en/index.html>.
7. *Грудинская Г.П.* Распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1975. – 280 с.
8. *Шабунин С.Н., Лесная Л.Л.* Распространение радиоволн в мобильной связи: Методическое пособие. – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – 38 с.
9. *Pottie G.J., Kaiser W.J.* Wireless integrated network sensors // Commun. ACM, 43(5):51–58. – 2000.

Одержано 29.09.2015