

АНАЛІТИЧНИЙ ПІДХІД ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

Анотація. БСМ знаходять все більш широке застосування в якості розподілених систем моніторингу різних об'єктів і фізичних процесів. Об'єктом даного дослідження є бездротові сенсорні мережі, а предметом - розробка ефективних методів і засобів їх проектування, що включають оптимізацію, порівняння і аналіз топологій БСМ і їх якісних характеристик. За результатами моделювання та дослідження протоколу ZigBee бездротових сенсорних мереж зроблено висновок, що для малогабаритної мережі зіркова топологія є досить ефективною, хоча сітчаста мережа також може бути використана, якщо узгодити вартість і складність обладнання мережі. Для середнього розміру БСМ обидві топології мережі можуть бути застосовані, але сітчаста топологія дає більші затримки ЕТЕ. Реалізуючи топологію сітки можна уникнути обмеження дальності передачі ZigBee кінцевим пристроям.

Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, топологія, оптимізація, передача, трафік, протокол.

VIKT.V. HNATUSHENKO

ANALYTICAL APPROACH OPTIMIZING DATA IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

Annotation

Wireless Sensor Networks (WSN) have been noticed and researched in recent years. WSNs have inherent and unique characteristics compared with traditional networks. It consists of light-weight, low power and small size sensor nodes (SNs). They have ability to monitor, calculate and communicate wirelessly. Nodes using routing protocol determine a path for sending data to sink. Sensor nodes have a limited transmission range, and their processing and storage capabilities as well as their energy resources are also limited. Routing protocols for wireless sensor networks have to ensure reliable multi-hop communication under these conditions.

In this paper, we simulated and analyzed two different scenarios, where we examined the topological features and performance net using OPNET simulator. We compared the two possible topologies (mesh and star) to each other. The comparative results have been reported for the performance metrics like: End to End Delay and Load of network.

Keywords: Wireless Sensor Network, OPNET, load, routing, delay, protocols.

Постановка проблеми. В даний час зростає інтерес до розробки та вивченню бездротових самоорганізованих сенсорних мереж (БСМ) - мереж, що складаються з множини простих мініатюрних пристроїв (вузлів), кожен з яких містить мікроконтролер, приймач і автономне джерело живлення. Знаходять застосування в різних прикладних областях и дозволяють вирішувати найрізноманітніші завдання. Актуальною областю наукових досліджень є зниження ресурсозатрат при проектуванні, розгортанні та експлуатації БСМ за допомогою алгоритмічної та програмної реалізації раціональної топології мережі з урахуванням можливості її практичного відтворення.

Аналіз останніх досліджень. В даний час БСМ знаходять все більш широке застосування в якості розподілених систем моніторингу різних об'єктів і фізичних процесів. Специфіка даної задачі визначає загальну структуру бездротових сенсорних мереж, які, як правило, являють собою розподілені на великій території інформаційно вимірювальні комплекси [1-3]. Бездротові технології, використовувані для побудови систем моніторингу, мають ряд переваг в порівнянні з традиційними рішеннями: відсутність дротових комунікацій істотно полегшує процес розгортання і реконфігурування мережі, знижує вартість системи; автономність і мініатюрність пристроїв забезпечує можливість їх розміщення у важкодоступних місцях. Недоліком бездротових рішень виявляється їх менша надійність, як у сенсі гарантованості доставки даних за обмежений час, так і в сенсі захисту переданої інформації від несанкціонованого доступу. В даний час при побудові бездротової сенсорної мережі вибір розташування ретрансляторів зазвичай проводиться на основі результатів натурного моделювання, пов'язаного з проведенням численних експериментів, вимірів напруженості електромагнітного поля, що істотно підвищує трудомісткість і вартість процесу розгортання БСМ [4-5]. Наявність наведених проблем обумовлює актуальність задачі оптимізації топології за допомогою імітаційного моделювання.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Таким чином виникає необхідність розробки нового рішення задачі вибору раціонального геометричного розташування ретрансляторів, а також оптимальної маршрутизації інформаційних потоків між ними. Об'єктом даного дослідження є бездротові сенсорні мережі, а предметом - розробка ефективних методів і засобів їх проектування, що включають оптимізацію, порівняння і аналіз топологій БСМ і їх якісних характеристик.

Основна частина. Основними вимогами до вузлів БСМ є низьке енергоспоживання (що забезпечує тривалий час автономної роботи), висока швидкодія, малі розміри і невисока вартість. Вузли оснащуються сенсорами, здатними реєструвати інформацію про параметри фізичних полів різної

природи в місцях їх розташування. Результати вимірювань передаються по багатоланковому ланцюжку (від вузла до вузла) в обчислювальний центр для обробки та аналізу (зважаючи, що потужності приймача на вузлах можуть бути обмеженими, безпосередня передача інформації може виявитися неможливою).

Завдання моніторингу, як правило, не вимагають передачі інформаційних потоків високої щільності, тому зниження енергоспоживання вузлів може досягатися, наприклад, за рахунок синхронного їх включення на час комунікації та вимикання на тривалий час. Важливою вимогою до БСМ є можливість їх самоорганізації - вузли повинні вміти самостійно об'єднуватися в мережу і ретранслювати один одному пакети даних, за умови обміну інформаційними пакетами тільки між вузлами, що перебувають в області радіовидимості один одного, обумовленою імовірністю доставки інформаційних пакетів між вузлами.

Перераховані вимоги регламентує стандарт бездротового зв'язку IEEE 802.15.4 [6, 7]. Даний стандарт, так само, як і IEEE 802.11 для технології Wi-Fi, визначає два нижніх рівні взаємодії відкритих систем (ISO - OSI) - фізичного (PHY) та управління доступом до середовища (MAC) - нижнього підрівня канального рівня OSI. Чинний сьогодні базовий варіант стандарту був прийнятий в 2006 році [7]. Особливостями стандарту є низьке енергоспоживання, короткий час підключення до мережі, підтримка великої кількості клієнтів, можливість реалізації вимог стандарту в недорогих пристроях. Для забезпечення сумісності бездротових пристроїв, випущених різними виробниками, восени 2002-го року, ще до виходу остаточної специфікації на IEEE 802.15.4, з ініціативи компанії Philips Semiconductor був утворений ZigBee Alliance [8-10].

Застосування БСМ для вирішення завдань моніторингу (замість традиційних дротових мереж) обумовлено, головним чином, відсутністю необхідності прокладки дротових комунікацій. Платою за виграш за вартістю і масі рішення буде зменшення швидкості та надійності доставки інформації.

Проектування раціональної топології БСМ стикається з двома проблемами: власне розрахунком такої топології з урахуванням великої кількості факторів, що впливають на роботу мережі, і практичною реалізацією побудованого таким чином рішення. Остання проблема обумовлена можливими відмінностями критеріїв оптимальності маршрутизації в реальній мережі від аналогічних критеріїв, які використовуються при побудові раціонального рішення.

З огляду вище сказаного, нами побудовано математичну модель БС ZigBee з використанням пакету для імітаційного моделювання Opnet [11-13]. Імітаційна модель бездротової сенсорної мережі містить моделі пристроїв для ZigBee координаторів, маршрутизаторів і кінцевих пристроїв. Основною задачею дослідження мережі є аналіз продуктивності ZigBee в контексті WSN. WSN можуть змінюватись в розмірах від декількох метрів до тисяч метрів; наприклад, сільськогосподарські та екологічні додатки часто охоплюють великі відстані, в той час, як система автоматичного управління житлового будинку («розумний дім») може бути набагато меншою. Крім того, деякі WSN використовують лише декілька датчиків кінцевих пристроїв, а інші працюють з сотнею, а іноді й навіть з тисячами кінцевих пристроїв.

При моделюванні створено три мережі розміром 10x10 м, 100x100 м і 1000x1000 м, в рамках кожного з цих сценаріїв представлені топології зірки і комірки. Використання різних масштабів і топологій у сценаріях, зміна кількості кінцевих пристроїв наведена для кращої уяви роботи додатків великих сенсорних мереж у реальному житті. У даному випадку не наведено топологію дерево, через її відносну ненадійність для використання у WSN. А саме, якщо один з батьківських маршрутизаторів виходить з ладу, всі їх прапратківські зв'язки з вузлами будуть втрачені. Щоб краще імітувати WSN, були змінені деякі параметри за замовчуванням моделей ZigBee. Змінені параметри потужність передачі (мВт), порогова потужність прийому пакета, швидкість передачі даних і смуга передачі, як описано на рисунку 1.

Physical Layer Parameters	
Data Rate	250000
Packet Reception-Power Thre...	-90
Transmission Bands	(...)
2450 MHz Band	Enabled
915 MHz Band	Disabled
868 MHz Band	Disabled
Transmit Power	0.003

Packet Reception-Power Thre...	-90
--------------------------------	-----

Рис.1. Параметри ZigBee моделі мережі

Потужність передачі була знижена з 5 мВт до 3 мВт для відображення типових потужностей передачі для бездротових сенсорних вузлів. Типові пороги потужності прийому пакетів для пристроїв

ZigBee існують в діапазоні від -80 дБ до -100 дБ, більш чутливі прилади є дорожчими, для ілюстрування низьких вартісних характеристик мережевих приладів був вибраний поріг -90 дБ. Швидкість передачі даних 250 000 біт не поширена в WSNs, проте, вона була обрана для вивчення й моделювання найгіршого сценарію. Ця швидкість передачі даних може відображати додаток промислового управління, в якому вузол датчика ZigBee постійно контролює та передає значення датчика для контуру зворотного зв'язку, на відміну від переривчастих передач значення датчика. Смуга пропускання була обрана 2,45 ГГц, оскільки цей діапазон визначений для міжнародного використання, на відміну від 915 МГц і 868 МГц, який обмежуються певними географічними районами. Смуга пропускання 2,45 ГГц підтримує міжнародну сумісність ZigBee обладнання.

Сценарій для малої БСМ буде імітувати область 10x10 м з топологіями зірки та комірки. У топології зірка використовується 10 вузлів відправки трафіку на координатора ZigBee в центрі мережі та 50 датчиків. Коміркова мережа також буде складатися з 10 і згодом з 50 вузлів відправки трафіку на координатора, з 10 вузлів 2 будуть маршрутизаторами (також вони виступають в якості кінцевих пристроїв) і з 50 вузлів 7 будуть маршрутизаторами. На рисунку 2 показана топологія зірка з 4 вузлами для візуальної простоти і рисунок 3 зображує макет коміркової топології з обмеженою кількістю вузлів також для візуальної простоти.



Рис.2. Топологія зірка БСМ

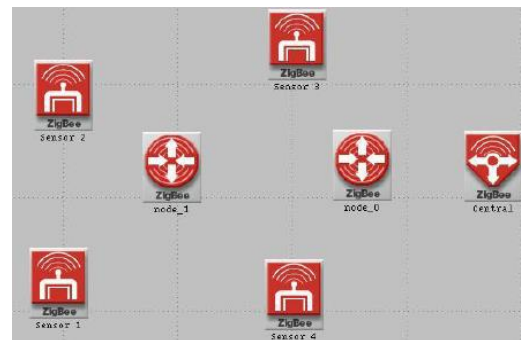


Рис.3. Коміркова топологія БСМ

Наступний сценарій подає середній масштаб БСМ з розміром мережі 100x100 м. Кількість передавальних вузлів і маршрутизаторів залишається такою ж, як і в попередньому випадку.

Сценарій 1000x1000 м моделює велику БСМ і використовує топології зірку і комірку. Для зіркової топології використовується 10 і 250 передавальних вузлів. Макет сітки здійснюватиме 10, 50 або 250 передавальних вузлів з 2,7 і 27 маршрутизаторами відповідно. Результати моделювання бездротової сенсорної мережі наведені нижче.

End-to-end затримки (ETE) є глобальною статистикою в OPNET, яка описує час, необхідний для передачі повідомлення від джерела до одержувача. Рисунок 4 детально ілюструє результат сценарію для малої БСМ по відношенню до середнього часу затримки ETE для обох топологій. Затримки ETE збільшуються при збільшенні ZigBee вузлів з 10 до 50, що більш важливіше, різко збільшується затримка ETE між топологією зірка та сітка.

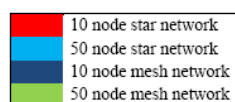
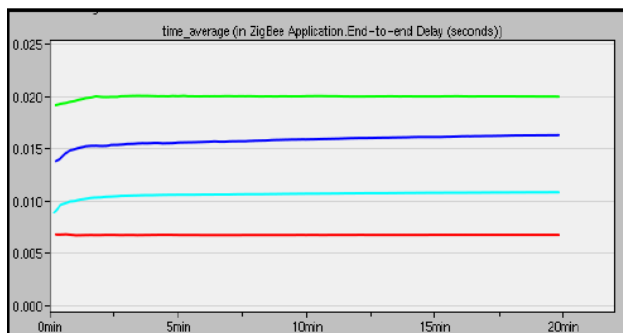


Рис.4. Сценарій 1: ETE затримка (сек.) залежно від часу моделювання (хв.)

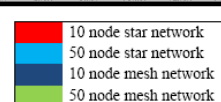
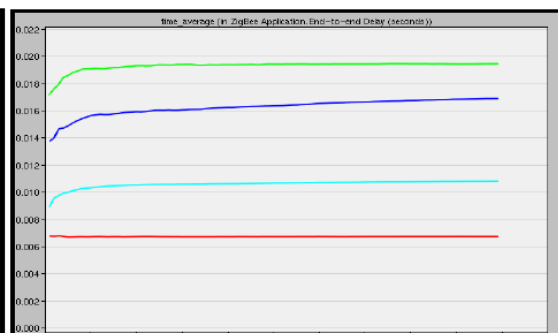


Рис.5. Сценарій 2: ETE затримка (сек) залежно від часу моделювання (хв)

У випадку моделювання середньої БСМ ми бачимо мінімальне збільшення затримки ЕТЕ, яка зображена на рисунку 5. Це може бути пов'язано з діапазоном передачі пристроїв ZigBee, оскільки цей сценарій знаходиться в межах дальності передачі пристроїв ZigBee. Затримки відрізняються приблизно вдвічі при порівнянні зірки і сітчастої топології мереж. Це пов'язано з додатковим хопом, введеним в сітчастій мережі, повідомленню для проходження від кінцевих пристроїв до координатора потрібно спочатку бути отримано за допомогою проміжного пристрою, а тільки потім передано в ZigBee маршрутизатор. Відповідно, додатковий хоп збільшує затримку ЕТЕ на 100 %.

У випадку великомасштабної БСМ, очікується, що деякі ZigBee вузли будуть лежати поза діапазону передачі в топології зірка. З рисунка 6 видно, що в міру збільшення кількості кінцевих пристроїв від 10 до 250 для топології зірка спостерігається невеличке збільшення затримки ЕТЕ. Це може бути пов'язано із збільшенням навантаження на координатор при надвеликому обсягу трафіку в мережі. Для топології сітки з 10 вузлами спостерігається очікуване значення затримки ЕТЕ, приблизно в два рази більше ніж для зірки для той же кількості вузлів. Однак, у міру збільшення вузлів до 50 і 250 є розбіжність у затримці ЕТЕ. Замість того, щоб затримка ЕТЕ збільшувалась при 200 вузлів, вона падає. Це може бути пов'язано із збільшенням щільності маршрутизаторів на одиницю площі, оскільки масштаб моделювання залишається незмінним і додаються додаткові 20 маршрутизаторів. Коли щільність маршрутизаторів збільшується, то повідомлення, відправлені на краях мережі можуть знайти більш прямий шлях через маршрутизатори до місця призначення. Коли є тільки 50 вузлів, повідомлення повинні пройти множину маршрутизаторів, для досягнення місця призначення.

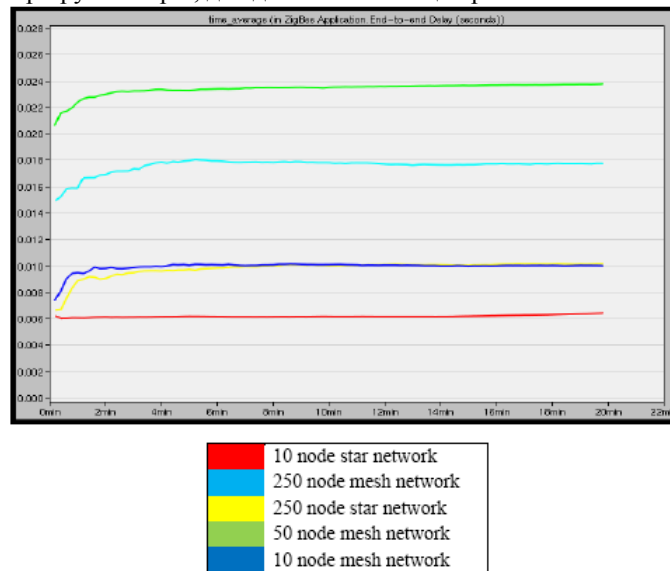


Рис.6. Сценарій 3: ЕТЕ затримка (сек.) залежно від часу моделювання (хв.)

Для дослідження ефективності сітчастих мереж у сенсі збільшення дальності передачі в цьому сценарії розглянуто кількість корисної інформації отриманої від координатора. Розглянуто роботу координатора в топології зірка, коли є 250 вузлів. Рисунок 7 зображує отриманий трафік координатором, а також трафік, що передається від одного з 250 вузлів.

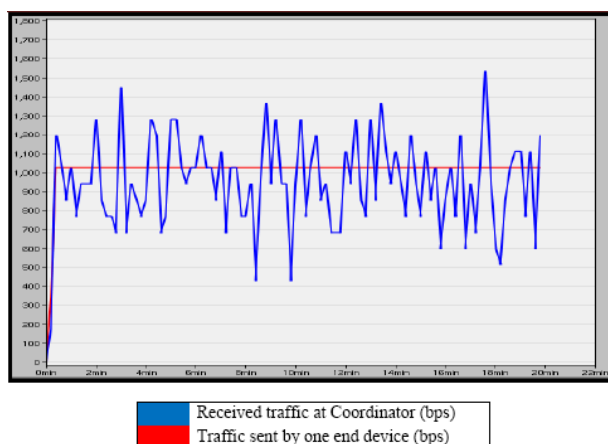


Рис.7. Сценарій 3: Швидкість передачі даних (біт) залежно від часу моделювання (хв)

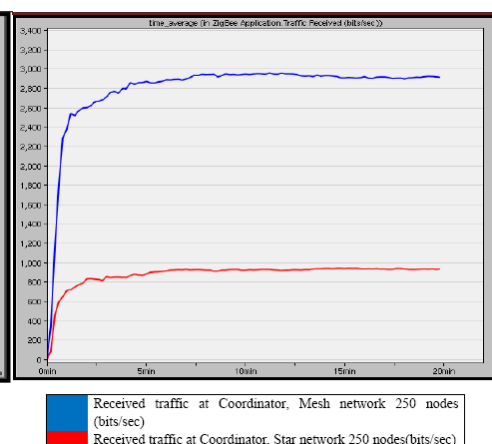


Рис.8. Сценарій 3: Швидкість передачі даних (біт) залежно від часу моделювання (хв)

Зроблено висновок, що кожен з 250 вузлів передає приблизно 1100 біт/сек, координатор отримує від 500 біт/сек до 1500 біт/сек. В ідеалі можна було б очікувати, що координатор хоче отримувати весь призначений для нього трафік, але багато вузлів знаходяться занадто далеко. Результати, зображені на рисунку 8, підтверджують, що маршрутизатори в топології сітки ефективніше збільшують діапазон периферійних вузлів.

Використовуючи топологію сітки координатор отримує приблизно в 3,5 рази більше трафіку, ніж при використанні топології зірка. Це ефективне збільшення дальності передачі пов'язано з додаванням маршрутизаторів в сітчастих мережах, шляхом відправки повідомлень на проміжні пристрої (маршрутизатори), які потім передають повідомлення на інші маршрутизатори, поки координатор або не буде знаходитися в діапазоні, або вузол буде далеко від координатора, з яким може спілкуватися.

Висновки та перспективи подальших досліджень. За результатами моделювання та дослідження протоколу ZigBee бездротових сенсорних мереж зроблено висновок, що для малогабаритної мережі зіркова топологія є досить ефективною, хоча сітчаста мережа також може бути використана, якщо узгодити вартість і складність обладнання мережі. Для середнього розміру БСМ обидві топології мережі можуть бути застосовані, але сітчаста топологія дає більші затримки ЕТЕ. Якщо затримка ЕТЕ має першорядне значення, наприклад в технологічному управлінні, доцільно розгорнути мережу з зіркоподібною топологією.

Для великої БСМ топологія зірка не підходить. Реалізуючи топологію сітки можна уникнути обмеження дальності передачі ZigBee кінцевим пристроєм. Ця реалізація надзвичайно приваблива, особливо для WSN, які застосовуються в сільському господарстві та моніторингу навколишнього середовища у зв'язку, як правило, з великим розмахом цих мереж.

Література

1. Терентьев М.Н. Беспроводные сенсорные сети. Учебное пособие. — М.: МАИ, 2007. — 345 с.
2. Culler D., Estrin D., Srivastava M. Overview of Sensor Networks. — University of California, Berkeley, University of California, Los Angeles, 2004.
3. Lewis F. L., Wireless Sensor Networks. — Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications, New York, 2004.
4. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович М.: Техносфера, 2005. - 591 с.
5. Олифер, Н. Качество обслуживания Электронный ресурс. / Н. Олифер. Электрон, дан. - Режим доступа: <http://www.olifer.ru/articles/ip2/ip2.html>, свободный.
6. IEEE Standards 802.15.4. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). — IEEE Computer Society, 2006.
7. IEEE 802.15.4 WPAN-LR Task Group. IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4 (TG4), 2010. <http://www.ieee802.org/15>.
8. Zigbee Technology. Internet: <http://www.zigbee.org/About/AboutTechnology/ZigBeeTechnology.aspx>, Jan.2, 2012 [10 травня, 2014].
9. Sinem C.E. ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary. — Berkeley, 09/2004.
10. Palo Wireless. ZigBee Resource Center, <http://www.palowireless.com>.
11. I.S. Hamoodi et al (2009) "Comprehensive Performance Study of OPNET Modeler For ZigBee Wireless Sensor Network" 2009 Third International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies. [On-line]. 3, pp. 357-362. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05337413> [2 квітня, 2014].
12. Sinem Coleri Ergen. "ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary" Internet: <http://pages.cs.wisc.edu/~suman/courses/838/papers/zigbee.pdf>, Sept.10, 2004 [30 квітня, 2014].
13. ZigBee Technology Overview. Internet: <https://docs.zigbee.org/zigbee-docs/dcn/09-5376.pdf>, 2009, [5 січня, 2014]