

АНАЛІЗ ПРОТОКОЛІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В БЕЗДРОВОНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

У статті проводиться аналіз та класифікація методів (протоколів) маршрутизації, які використовуються в бездротових сенсорних мережах.

Бездротові сенсорні мережі (БСМ) або *Wireless Sensor Network* (WSN) – розподілені мережі, що складаються з маленьких сенсорних вузлів, з інтегрованими функціями моніторингу навколишнього середовища, обробки і передачі даних [1].

Сенсорні вузли (далі вузли) є інтегрованою платформою, яка об'єднує можливості сенсорів (зовнішніх датчиків, які реєструють сукупність параметрів, – акустичних, вібраційних, радіаційних, хімічних, біологічних і т.п.) з мікрокомп'ютерами, об'єднаними в бездротову мережу [2]. Класичними областями застосування БСМ є поле бою і місця надзвичайних ситуацій.

Відмінності БСМ від інших бездротових мереж (мобільних Ad-Hoc мереж або стільникових мереж зв'язку) полягають в наступному:

– на відміну від традиційних мереж зв'язку, майже всі прикладні програми сенсорних мереж вимагають передачі даних від множини вузлів до одного або декількох шлюзів (базових станцій) рис. 1;

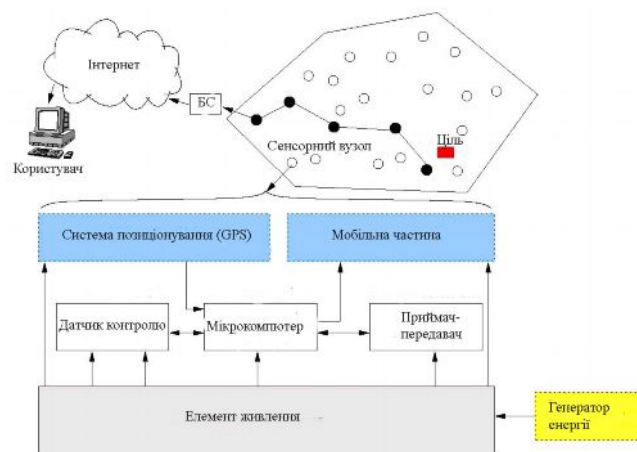


Рис. 1. Приклад збору інформації сенсорною мережею з одним шлюзом

– необхідність ефективного управління обмеженим ресурсом вузлів (енергія батарей, швидкість обробки даних, місткість зберігання і т.п.).

– можливість використання системи позиціонування (GPS) або методів, заснованих на триангуляції, які дозволяють вузлам обчислювати їх позиції [3].

Особливостями БСМ є: ненадійність і динамічність радіоресурсу, колективний характер його використання; обмеженість і неоднорідність ресурсів вузлів (енергоємність батарей, продуктивність процесорів, об'єм пам'яті і т.д.); обмежена безпека та ін. Забезпечити ефективне управління БСМ неможливо без відповідної системи управління. Одним з основних завдань оперативного управління БСМ є маршрутизація інформаційних повідомлень. Тому метою статті є класифікація методів (протоколів) маршрутизації в сенсорних мережах і їх стислий аналіз.

При розробці протоколів маршрутизації в сенсорних мережах необхідно враховувати наступні фактори:

– *Спосіб розміщення вузлів*: детермінований або випадковий.

- *Обмежена ємність батарей вузлів*: час роботи кожного вузла сильно залежить від ємності його батареї [4].
- *Спосіб збору даних*: почасовий спосіб (постійний моніторинг або в задані інтервали часу), на підставі подій, на підставі запиту і гібридний спосіб [5].
- *Гетерогенність функцій сенсорів вузлів*: можливість використання різних типів сенсорів в залежності від області застосування (контроль температури, тиску, вологості або виявлення вторгнення в зону, що охороняється).
- *Відмовостійкість*: вузли можуть вийти з ладу внаслідок відсутності живлення, фізичних пошкоджень, екологічних втручань або втручань супротивника.
- *Розмірність*: кількість вузлів, розгорнутих в заданій області може досягати сотень тисяч або десятків тисяч.
- *Динамічна топологія*: мережева архітектура сенсорних вузлів припускає статичну топологію але іноді необхідне використання мобільних БС або сенсорних вузлів [6].
- *Параметри фізичного та каналного рівня Еталонної Моделі взаємодії відкритих Систем (ЄМ ВВС)*: низька пропускна спроможність радіоканалів вузлів (від 1 до 100 кБайт/с), та обмежений радіус дії.
- *Покриття*: кожен сенсор може покрити тільки обмежену фізичну область.
- *Якість обслуговування (Quality of Service, QoS)*: наявність наборів параметрів (пропускна спроможність, затримка доставки пакетів та її варіація та ін.) для певного класу трафіка [7].

Всі методи маршрутизації, запропоновані для застосування в сенсорних мережах, можна класифікувати за наступними ознаками (рис. 2) [8]:

- за способом побудови і підтримки маршрутів: таблицно-орієнтовані (далі таблицні), зондові та гібридні;
- за кількістю одержувачів: однокористувальницькі, групові та „хвильові”;
- за кількістю і типом параметрів в метриці вибору маршруту: однопараметричні і багатопараметричні; енергозберігаючі, із заданою якістю обслуговування та ін.
- за кількістю маршрутів: одношляхові та багатошляхові;
- за типом маршрутів: симетричні та асиметричні.
- за наявністю обладнання позиціонування: координатні та некоординатні;
- за організацією мережі: ієрархічні та неієрархічні (однорівневі);
- за прийняттям рішень з маршрутизації: пасивні та активні (інтелектуальні).



Рис. 2. Класифікація методів маршрутизації в БСМ

Завданням методу маршрутизації є створення, зберігання і підтримання маршруту (ів) заданої якості між відправником і адресатом. У якості критерію оцінки маршруту можуть виступати наступні параметри: ширина смуги пропускання каналу, час затримки передачі пакетів у мережі, енергоємність батарей та ін.

На сьогоднішній день запропоновано ряд методів та протоколів маршрутизації призначених для використання в БСМ (перелік та порівняльна характеристика наведена в таблиці 1).

Таблиця 1

Порівняльна характеристика методів (протоколів) маршрутизації в БСМ

	Класифікація	Мобільність вузлів	Розмірність мережі	Об'єднання даних в мережі	QoS	Використання GPS	Енергоспоживання
SPIN	Н, З, Пр. З., Пр. У., Ц	Нормальна	Обмежена	Так	Ні	Ні	Обмежене
Directed Diffusion.	Н, З, Пр. У, Ц	Обмежена	Обмежена	Так	Ні	Ні	Обмежене
Rumor Routing.	Н, Т, Пр. У, Ц	Обмежена	Добра	Так	Ні	Ні	Н/Д
GBR	Н, Ц	Обмежена	Обмежена	Так	Ні	Ні	Н/Д
MCFA	Н, Пр. У, Ц	Ні	Добра	Ні	Ні	Ні	Н/Д
CADR	Н, Пр. З., Ц, Г	Ні	Обмежена	Так	Ні	Ні	Обмежене
COUGAR	Н, Пр. З., Ц	Ні	Обмежена	Так	Ні	Ні	Обмежене
AQUIRE	Н, З, Ц	Обмежена	Обмежена	Так	Ні	Ні	Н/Д
EAR	Н, Т, Ц	Обмежена	Обмежена	Ні	Ні	Ні	Н/Д
LEACH	И, Пр. У	Стационарні БС	Добра	Так	Ні	Ні	Максимальне
TEEN и APTEEN	И, Пр. З	Стационарні БС	Добра	Так	Ні	Ні	Максимальне
PEGASIS	И, З, Пр. З	Стационарні БС	Добра	Ні	Ні	Ні	Максимальне
MECN и SMECN	И, Пр. З	Ні	Обмежена	Ні	Ні	Ні	Максимальне
SOP	И, Пр. З, Т	Ні	Обмежена	Ні	Ні	Ні	Н/Д
HPAR	И, Т	Ні	Добра	Ні	Ні	Ні	Н/Д
VGA	И, Т	Ні	Добра	Так	Ні	Ні	Н/Д
TTDD	И, Т, НЦ	Так	Обмежена	Ні	Ні	Ні	Обмежене
GAF	К, НЦ	Обмежена	Добра	Ні	Ні	Так	Обмежене
GEAR	К, Пр. З	Обмежена	Обмежена	Ні	Ні	Так	Обмежене
SPAN	К, НЦ, Т	Обмежена	Обмежена	Ні	Ні	Так	Н/Д
MFR и GEDIR	К, Т	Ні	Обмежена	Ні	Ні	Так	Н/Д
GOAFR	К, НЦ	Ні	Добра	Ні	Ні	Так	Н/Д

Скорочення які використані в таблиці: Н – неієрархічна маршрутизація, И – ієрархічна маршрутизація, К – координатний метод маршрутизації, З – зондовий метод маршрутизації, Т – таблично-орієнтований метод маршрутизації, Г – гібридний метод маршрутизації, Пр. З. – протокол використовує запити, Пр. У. – протокол використовує узгодження, Ц – централізований протокол, НЦ – не централізований протокол.

Розглянемо детальніше окремі протоколи, їхні переваги та недоліки.

Неієрархічні протоколи маршрутизації

Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) [9]: включає сімейство (SPIN-1, SPIN-2) адаптивних протоколів, які поширюють всю інформацію про мережу між вузлами, передбачаючи, що всі вузли мережі є базовими станціями. Вузли збирають інформацію про об'єкт спостереження і формують її у вигляді метаданих, готуючи їх до відправки. Однак, замість передачі повного об'єму отриманої інформації в мережу передається службове повідомлення з відомостями про наявні дані, та маршрут їх отримання. Протоколи використовують почасовий спосіб збору даних.

Вузлами використовуються три типи службових повідомлень для визначення інформації яку необхідно передати: ADV (повідомлення про нову інформацію, та маршрут її отримання), REQ (запит інформації) та DATA (відправка інформації). Протокол SPIN розпочинає роботу, коли вузол отримує нову інформацію. Відбувається розсилання сусідам повідомлення ADV, яке містить метадані та встановлює маршрут. Вузол, який зацікавлений в отриманні даної інформації відправляє повідомлення REQ, після чого інформація у вигляді повідомлень DATA відправляється даному вузлу по встановленому маршруту. Вузол, який отримав інформацію, повторює цей процес у разі необхідності передачі даних до своїх сусідів.

Переваги: ефективне використання енергоресурсу вузлами, мінімальні топологічні зміни.

Недоліки: негарантована доставка інформації вузлам, які розташовані на відстані декількох ретрансляцій (наприклад, якщо проміжним вузлам не потрібна дана інформація, то вузли, розташовані далеко від відправника і потребують її, взагалі нічого не отримують).

Directed Diffusion [10]: Протокол використовує централізований метод маршрутизації (будує маршрути від множини відправників до одного адресата).

Вузли об'єднують дані, що поступають від різних відправників в процесі передачі. Базова станція запитує дані, відправляючи *зонд-запит*. *Зонд-запит* описує завдання, задане мережі для виконання і встановлює градієнт (маршрут отримання даних до БС). Градієнт визначає пріоритетність даних і маршрут передачі інформації. Протокол працює, поки не встановлені всі градієнти (маршрути) від відправника назад до БС. Мета протоколу полягає в тому, щоб з множини маршрутів визначити оптимальний маршрут об'єднання даних (забезпечити ефективне об'єднання і доставку даних від відправника до БС), рис. 3.

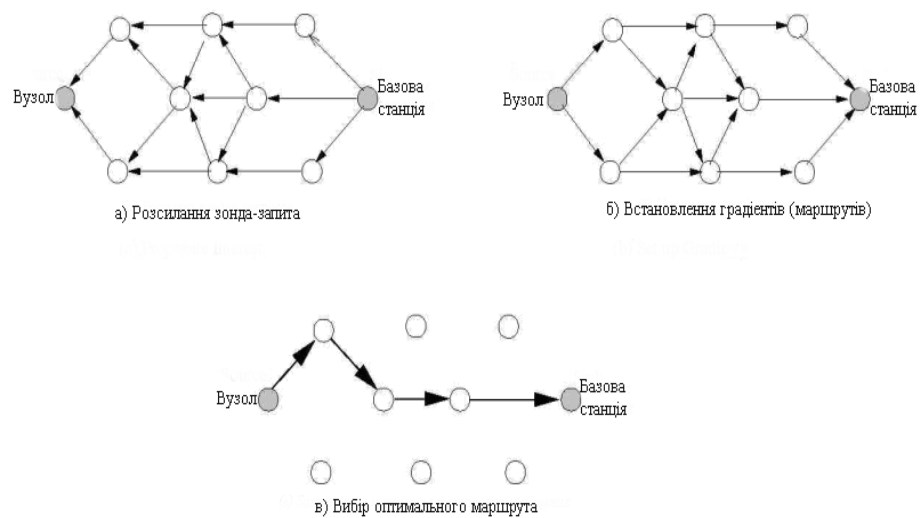


Рис. 3. Робота Directed Diffusion

Переваги: значна економія енергії, усунення резервування, використання кешування (збільшує ефективність, стійкість і координацію між вузлами).

Недоліки: Не можливо застосувати до прикладних програм (наприклад, екологічний моніторинг), які вимагають безперервну передачу даних, оскільки способи збору даних засновані на запиті неефективні в цьому випадку (визначення відповідності даних запитам приводить до великих енергетичних витрат).

Rumor routing [11]: протокол призначений для мереж, які не мають можливості застосувати географічну маршрутизацію. Для отримання інформації базова станція запитує тільки вузли, які збирають інформацію (замість запиту всієї мережі). Кожен вузол має таблицю сусідів, та виявивши подію, зберігає її в своїй таблиці (таблиця подій) і формує агента (службового повідомлення, яке відправляється в мережу, описуючи зібрану інформацію (таблиця подій) і кількість інтервалів маршруту до неї). Агент розповсюджується серед сусідів даного вузла (використовуючи таблицю сусідів) та виконує синхронізацію таблиці подій даного вузла з таблицями подій сусідів. Як висновок кожен вузол мережі знає мінімальний маршрут до кожної події. Для доставки інформації до БС, вузли використовують оптимальний маршрут, оглядаючи свої таблиці подій та сусідів.

Переваги: запит тільки окремих вузлів замість всієї мережі.

Недоліки: протокол ефективний, коли відбувається невелика кількість подій. При великій кількості подій, зберігання агентів і таблиць кожним вузлом стає неможливим.

Gradient-Based Routing (GBR) [13]: кожен вузол мережі будує маршрут до БС обчислюючи параметр, названий вартістю вузла (мінімальне число інтервалів маршруту для досягнення БС). Різниця між вартістю вузла і вартістю його сусідів називається градієнтом. Пакет відправляється по маршруту з найбільшим градієнтом, тобто мінімальною кількістю інтервалів. Протокол GBR використовує допоміжні методи (з'єднання даних при передачі і розповсюдження даних) для рівномірного розподілу трафіку в мережі. GBR використовує три різні методи вибору маршруту при передачі даних:

– Стохастичний метод: вузол вибирає градієнт (маршрут) навмання, якщо два і більше маршрутів, мають однаковий градієнт.

– Енергетичний метод: вузол завищує свою вартість (при зниженні рівня ємності батарей до заданого порогу), щоб вузли не відправляли дані за цим маршрутом.

– Метод управління потоками даних: нові дані не прямують через вузли, які в даний час є частиною маршрутів інших даних.

Переваги: збалансований розподіл трафіку в мережі.

Недоліки: Складність вибору і управління методами вибору маршрутів.

Information-driven Sensor Querying (IDSQ) ma Constrained Anisotropic Diffusion Routing (CADR) [14]: основна ідея протоколу полягає в прогнозуванні відправлення запитів сенсорам для отримання найбільш достовірної інформації при мінімальній витраті енергії та побудові маршрутів в мережі, при мінімальному часі затримки та максимальній пропускній спроможності. Протоколи поширюють запити, використовуючи ряд інформаційних критеріїв вибору (активізуються тільки сенсори, розташовані близько до деякої події і здійснюється динамічне корегування маршрутів).

Переваги: економія енергії, централізоване управління мережею.

Недоліки: не визначає, як направляти запит та інформацію між сенсорами і БС (може бути розглянутий тільки як додаткова методика оптимізації).

COUGAR [15]: даний протокол використовує декларативні запити (обробка запитів не входить до функцій мережевого рівня, які передбачають вибір необхідних сенсорів і т. п.). Протокол будує базу даних для сенсорної мережі, в якій сенсорні вузли вибирають головні вузли (з'єднання частин даних при передачі і передача даних до БС). БС формує схеми запиту (задає пріоритет інформації і описує критерії вибору головних вузлів).

Переваги: енергетично ефективна обробка даних в мережі, при великій кількості даних.

Недоліки: введення схеми запиту для кожного вузла вносить додаткові витрати (споживання енергії, місткість пам'яті і т. п.). Необхідна синхронізація вузлів для обробки даних в мережі (не всі дані отримуються водночас).

Active Query forwarding In sensor nEtworks (ACQUIRE) [16]: протокол розглядає мережу як розподілену базу даних. БС відправляє запит (комплексний, одноразовий або під запит) в мережу і здійснює централізований збір даних. Кожен вузол відповідає на запит частково або повністю (використовуючи інформацію, яка міститься в кеш-пам'яті) і передає іншому вузлу або назад БС. Якщо інформація не обновлювалась певний час вузол оновлює її використовуючи зонд запит якій розсилається сусіднім вузлам на відстані декількох ретрансляцій. Вирішений запит відправляється назад до БС, використовуючи найкоротший маршрут.

Переваги: одночасна відповідь декількома вузлами, ефективний запит мережі (регулюючи значення мережевого діаметра).

Недоліки: аналогічні протоколу COUGAR.

Energy Aware Routing (EAR) [17]: в фазі ініціалізації протоколу, БС розповсюджує хвильовим способом службове повідомлення. Згідно цього повідомлення кожен вузол мережі вираховує всі маршрути (і їх вартість) до БС та зберігає в своїй таблиці маршрутизації. В якості критерію вибору маршрутів використовується метрики (споживання енергії кожним маршрутом, та залишкова енергія кожного вузла). Вузол виявивши подію відправляє повідомлення своєму сусіду згідно таблиці маршрутизації (найменша вартість, залишкова енергія). Процес вибору найкращого інтервалу маршруту повторюється поки повідомлення не досягає БС. БС періодично оновлює таблиці маршрутизації всіх вузлів мережі.

Переваги: ефективне використання енергоресурсу вузлами.

Недоліки: вимагає збору інформації про місце розташування вузлів.

Ієрархічні протоколи маршрутизації

Дослідження сенсорних мереж великої розмірності показали, що навіть незначне підвищення динаміки топології мережі приводить до значного зростання службового трафіка. Інтенсивність потоку службової інформації зростає квадратично (множення числа вузлів на величину топологічних змін). Очевидно, що для вирішення цієї проблеми необхідно ввести ієрархічне управління БСМ – провести розбиття БСМ на окремі зони (кластери) з виділенням головних вузлів зони (ГВЗ), вузлів-шлюзів і внутрішніх вузлів [19]. Множина ГВЗ і виділені вузли-шлюзи утворюють в мережі віртуальну магістраль, яка може використовуватися як для розповсюдження маршрутної інформації, так і для передачі корисної інформації. Варіанти побудови методів ієрархічної маршрутизації представлені на рис. 4. Зі зростанням кількості вузлів (від декількох тисяч) БСМ може бути організована в *m-рівнів* ієрархії. Проте, це значно ускладнює процес управління мережею. Тому на практиці частіше використовують дворівневу організацію мережі.

Ієрархічна організація БСМ дозволяє:

- збільшити стабільність мережевої топології (динаміка зміни зони мережі значно нижча за динаміку зміни зв'язності окремих вузлів мережі);
- багатократно використовувати частотний (кодовий) радіоресурс за рахунок його просторового рознесення;
- підвищити ефективність управління мережею (ГВЗ може ефективніше управляти ресурсами своєї зони в порівнянні з центром управління мережею).



Рис. 4. Особливості реалізації методів ієрархічної маршрутизації

Проте ієрархічна організація мережі ускладнює процес управління мережею і передбачає вирішення наступних задач: динамічне створення і підтримка зон мережі; динамічну адресацію абонентів; внутрішню зонуву і між зоною маршрутизацію пакетів; відновлення управління зоною унаслідок відмови (знищення) ГВЗ.

Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) [20]: Протокол складається з двох фаз, фаза установки і фаза роботи. Протягом фази установки, певний набір вузлів p , визначаються як ГВ. Сенсорний вузол вибирає число r (від 0 до 1), якщо це число - менше ніж порогове значення, $T(n)$ (1), вузол стає ГВ для деякої зони вузлів ($1/p$):

$$T(n) = \frac{p}{1 - p(r \bmod (1/p))} \quad \text{якщо } n \in G$$

де G - набір вузлів, які вибирають ГВ. Кожен вибраний ГВ передає повідомлення іншим вузлам, що він головний у кластері. Вузли після отримання цього повідомлення, вибирають кластер, до якого вони можуть належати (рішення приймається на основі рівня потужності сигналу-запиту). ГВ створюють графік TDMA для кожного підпорядкованого вузла. Після закінчення певного часу (визначено априорі), мережа повертається у фазу установки. ГВ спілкуються з підлеглими вузлами, використовуючи різні методи доступу (CDMA), що забезпечує зменшення втручання вузлів, які належать до інших кластерів.

Переваги: збільшення терміну служби мережі.

Недоліки: не можливо застосовувати в мережах великої розмірності (кластеризація вносить додаткові витрати, пов'язані з вибором та зміною ГВ), необхідна додаткова методика визначення енергетичного порогу.

Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol (TEEN) и **Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol (APTEEN)** [22, 23]. У протоколі TEEN, вузли сканують середовище безперервно, проте передача інформації здійснюється періодично. ГВ розсилають підлеглим вузлам жорсткий поріг (порогова оцінка інформації яка зчитується) і м'який поріг (змінюється трохи, запускає вузол для передачі). Жорсткий поріг знижує число передач (передача тільки необхідної інформації). М'який поріг регулює число передач (передача тільки при певній кількості інформації). Таким чином, користувач може управляти ухваленням рішень між точністю даних і ефективністю використання енергії. При зміні головних вузлів (рис 6 (а)), задаються нові порогові значення.

Переваги: споживання енергії менше ніж в мережах тих, що використовують таблично-орієнтовані методи.

Недоліки: якщо пороги не задані, вузли ніколи не обмінюватимуться інформацією, і користувач не отримає ніяких даних.

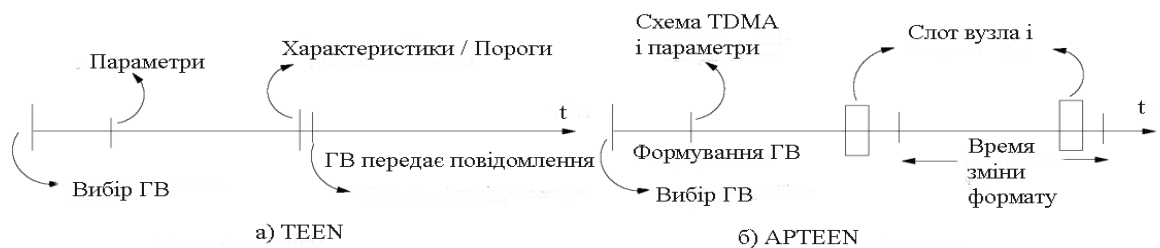


Рис. 5. Робота: а) TEEN; б) APTEEN.

APTEEN гібридний протокол, який змінює періодичність передач або порогові значення.

Головні вузли передають наступні параметри (рис. 5 (б)):

1. Характеристики (X): – набір фізичних параметрів (тип необхідної інформації).
2. Пороги: параметри Важкого Порогу (ВП) і М'якого Порогу (МП).
3. Графік: графік TDMA (встановлює час роботи кожного вузла).
4. Час підрахунку (ЧП): максимальний період часу між двома подальшими звітами, що посилаються вузлом.

Вузли зчитують навколишнє середовище безперервно, але тільки вузли, які прочитують задані дані (пороги) передають. Якщо вузол не відправляє дані певний період часу (час підрахунку), він примусово ретранслює дані. Графік TDMA визначає час передачі для кожного вузла в кластері.

Переваги: надає користувачу широкі можливості регулювання параметрів маршруту (порогові значення споживання енергії, час підрахунку).

Недоліки: складність завдання і здійснення порогових функцій і часу підрахунку.

Minimum Energy Communication Network (MECN) та Small Minimum Energy Communication Network (SMECN) [24, 25]: протоколи обчислюють енергетично-ефективні підмережі і ідентифікують область ретрансляції кожного вузла. Основне завдання MECN виявити під мережу, що має мінімальну кількість вузлів і визначити мінімальну величину енергії для передачі між вузлами (побудова енергетично - ефективних маршрутів).

SMECN – доповнення до MECN. Підграф G^* графа G , що представляє сенсорну мережу, зменшує споживання енергії використовуючи наступні умови:

1. число меж в G^* є менше ніж в графові G .

2. енергія необхідна для передачі, даних від вузла до його сусідів в підграфові G^* менше, ніж енергія необхідна для передачі всім сусідам в графові G . Передбачається, що $r = (u, u_1, \dots, u_{k-1}, v)$ – маршрут між u і v , який перекриває $k-1$ проміжних вузлів. Загальна споживча потужність одного маршруту:

$$C(r) = \sum_{i=0}^{k-1} (p(u_i, u_{i+1}) + c)$$

де $u = u_0$ і $v = u_k$.

Енергія необхідна для передачі даних згідно цього протоколу: $p(u, v)^n = td(u, v)^n$, для деякої відповідної константи t , n – експонента втрат на трасі для моделі розповсюдження радіохвиль $n \geq 2$, і $d(u, v)$ – відстань між u і v .

Недоліки: запропонований алгоритм є локальним. Обчислення підмережі з малим числом меж вносить значні енергетичні витрати.

Virtual Grid Architecture routing (VGA) [26]: запропонована енергозберігаюча парадигма маршрутизації, яка використовує об'єднання і обробку даних в мережі, для збільшення часу життя мережі (головні вузли (ГВ) використовуються, для отримання лінійної віртуальної топології). Мережа розбивається на зони і в кожній зоні вибирається ГВ. Побудова маршрутів і з'єднання частин даних виконується на двох рівнях: локальному (ГВ зони виконують локальне об'єднання) і глобальному (підмножина ГВ локального об'єднання виконує глобальне об'єднання частин даних). Визначення оптимального набору маршрутів і вибір вузлів для об'єднання інформації є NP повною проблемою. На рис. 6 приведений приклад віртуальної сіткової архітектури.

Hierarchical Power-aware Routing (HPAR) [27]: протокол ділить мережа на групи сенсорів (зони). Кожна зона ієрархічно управляє передачею повідомлень (вибір напрямку передачі між зонами) так, щоб максимізувати термін служби батарей вузлів в мережі. Повідомлення направлене по маршруту, названому шляхом максимального мінімуму (вибирає максимум зі всієї мінімальної енергії, що залишилася). Протокол заснований на компромісі між зменшенням повної споживаної енергії і збільшенням мінімальної залишкової енергії мережі. По-перше, алгоритм виявляє маршрут, споживаючий мінімум енергії (P_{\min}) використовуючи алгоритм Дійкстри. По-друге, алгоритм виявляє маршрут, що збільшує мінімальну залишкову енергію мережі. Запропонований алгоритм пробує оптимізувати обидва критерії рішення. Це досягається зменшенням мінімальною споживаною енергією (zP_{\min} з параметром $z \geq 1$, обмеження споживаної потужності для відправки одного повідомлення).

Переваги: висока продуктивність.

Недоліки: складність реалізації в великомасштабних мережах.

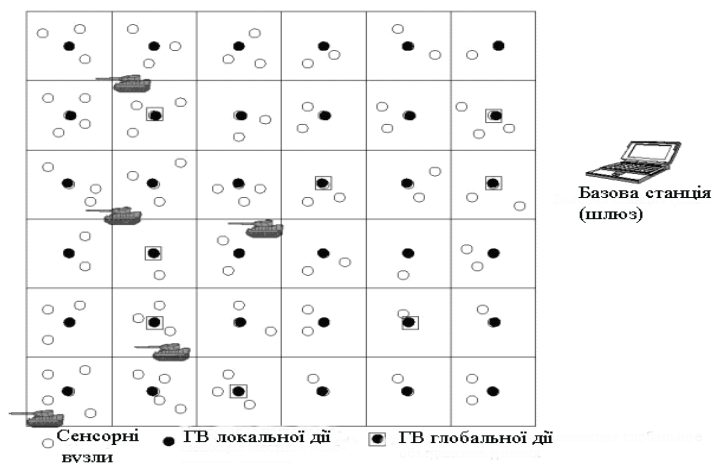


Рис. 6. Приклад віртуальної сіткової архітектури

Two-Tier Data Dissemination (TTDD) [28]: кожен відправник даних таблично-орієнтовано будує сіткову структуру, для передачі даних до рухомих базових станцій. Сенсорні вузли є стаціонарними і знають своє розташування. Як тільки відбувається подія, сенсори, що оточують її, формують сигнал, і один з них стає відправником (генерує звіти даних). Для будівництва сіткової структури, вузол відправник вибирає себе як пункт початку побудови сітки, і посилає службове повідомлення кожному з чотирьох суміжних пунктів схрещування про наявність інформації. Протягом цієї процедури, кожен проміжний вузол зберігає інформацію відправника в свою таблицю і передає повідомлення до своїх суміжних пунктів схрещування (сусідам), виключаючи вузол, що відправив це повідомлення. БС динамічно коректує побудову маршрутів для отримання інформації.

Переваги: низький час затримки.

Недоліки: застосовується тільки при стаціонарній структурі мережі; складність отримання інформації про місцеположення БС.

У таблиці 2 приведено порівняння ієрархічних і неієрархічних протоколів маршрутизації які використовуються в сенсорних мережах.

Таблиця 2

Порівняння неієрархічних і ієрархічних протоколів маршрутизації

<i>1.Ієрархична маршрутизація</i>	<i>2.Неієрархична маршрутизація</i>
Планування на основі резервування	Планування на основі конкуренції
Уникають зіткнень	Присутні зіткнення
Невеликий робочий цикл, унаслідок періодичної бездіяльності	Змінний робочий цикл, керований часом бездіяльності вузлів
Об'єднання даних головними вузлами	Вузли об'єднують дані, що поступають від сусідів
Вимагає глобальної і локальної синхронізації	Інтервали маршруту, формуються на льоту без синхронізації
Енергетичні витрати пов'язані з формуванням кластерів	Маршрути формуються тільки в областях, що мають інформацію для передачі
<i>1.Ієрархична маршрутизація</i>	<i>2.Неієрархична маршрутизація</i>
Низький час затримки	Затримка при включенні проміжних вузлів і формуванні безлічі маршрутів
Рівномірні енергетичні втрати	Енергетичні втрати залежать від моделі трафіка
Немає можливості управляти енергетичними втратами	Енергетичні втрати залежать від моделі трафіка
Рівномірний розподіл каналів	Рівномірний розподіл каналів не гарантований

Координатні (географічні) протоколи маршрутизації

Особливості БСМ обумовлюють ключові вимоги до методів координатної (географічної) маршрутизації (МКМ): розподілене функціонування; мінімальне завантаження мережі службовою інформацією при реакціях на зміни в мережі; відсутність зациклення маршрутів; швидка збіжність; гарантія доставки пакетів адресатові [29]. При синтезі методу маршрутизації необхідно реалізувати виконання даних вимог і забезпечити наступні функції (рис. 7):

- 1).збір інформації про стан мережі (яку, яким способом, і як часто збирати інформацію про стан мережі?);
- 2).зберігання маршрутів (яку інформацію і де зберігати?);

3). обчислення маршруту передачі пакету (визначення правил вибору одного або декількох вузлів-ретрансляторів).

За об'ємом контролю стану мережі збір інформації може здійснювати **глобально** (інформація про стан всіх вузлів мережі) або **локально** в межах певної відстані, вираженої числом (1, 2, ..., R) ділянок ретрансляцій). Тип и спосіб збору інформації про стан мережі знаходиться в тісному взаємозв'язку [29].



Рис.7. Функції геомаршрутизації

Geographic Adaptive Fidelity (GAF) [30]: енергозберігаючий протокол маршрутизації (розроблений для ad hoc мереж, але може застосовуватися і до сенсорних мереж). Мережа розбивається на зони (формується віртуальна сіткова архітектура). Кожен вузол використовує GPS систему. У протоколі GAF задано три стани: виявлення (визначення сусідів в зоні), активна робота (передача повідомлень, вузол є маршрутизатором) і бездіяльність (режим „сон”). Кожен вузол в зоні визначає свій час роботи (життя) і відправляє його сусідам. Сусіди коректують час бездіяльності для збереження точності маршрутизації. Після закінчення часу роботи активного вузла (маршрутизатора), недіючі вузли включаються, і один з них стає активним (маршрутизатором). Таким чином, GAF може істотно збільшити мережевий термін служби. На рис. 8. показаний приклад зонування. Зони вибрані, рівними і квадратним (вибір розміру зони залежить від заданої потужності передачі і напряму передачі інформації). Вертикальна і горизонтальна передача інформації відбудеться, якщо сигнал проходить відстань $a = \frac{r}{\sqrt{5}}$ (два сенсорні вузли в суміжних вертикальних або горизонтальних зонах можуть передавати інформацію безпосередньо). При діагональній передачі інформації, сигнал повинен перекрити відстань $b = \frac{r}{2\sqrt{2}}$.

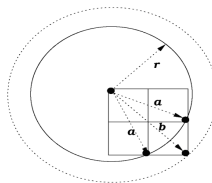


Рис. 8. Приклад зонування сенсорної мережі.

Протокол GAF розроблений для немобільних (GAF-basic) і мобільних (GAF-mobility adaptation) вузлів.

Недоліки: проблема вибору ГВ; складність використання GPS- технологій на даному етапі проектування БСМ.

Geographic and Energy Aware Routing (GEAR) [31]: використовує енергозберігаючу і географічно-інформовану евристику побудови маршруту (вибір сусідів) для відправки пакету адресатові. Ключова ідея: обмежити число запитів, розглядаючи тільки певну область за-

мість запиту всієї мережі. Кожен вузол в GEAR знає власне місцеположення, розташування сусідів (використання GPS) і зберігає оцінку вартість (комбінація енергія вузла / відстань до адресата) і вивчену вартість (доповнення до оцінної вартості, яка описує витрати маршрутизації щодо порожнеч (вузол не має сусіда) в мережі).

Протокол включає дві фази:

– побудова маршруту для відправки пакету в задану область: вузол візуально контролює своїх сусідів (вибирається найближчий сусід (враховується залишкова енергія) в заданій області в якості наступний кроку). Якщо вузол не має сусідів (порожнеча), то вибір маршруту (сусіда) заснований на функції вивчення вартості;

– побудова маршруту в межах заданої області: при досягненні пакетом заданої області, маршрут будується рекурсивним географічним відправленням (висока щільність вузлів) або обмеженим хвильовим розповсюдженням (при малій щільності вузлів).

Переваги: знижує споживання енергії маршрутами, і покращує доставку пакетів.

Недоліки: неефективний в мережах з високою мобільністю вузлів.

MFR, DIR, и GEDIR [32]: У цих протоколах вузол відправник або будь-який проміжний вузол будує маршрут згідно заданому критерію. Алгоритм GEDIR – „жадібний” алгоритм, який завжди передає пакет до сусіда якій знаходиться на мінімальній відстані. У протоколі DIR, для побудови маршруту вибирається сусід з мінімальною кутковою відстанню від уявної лінії, що сполучає даний вузол і адресата. У методі MFR, як наступний крок вибирається сусід з мінімальним скалярним твором $\overline{DA.DS}$, де S, D – відправник і одержувач. \overline{SD} представляє Евклідову відстань між вузлами D і S.

Переваги: висока продуктивність протоколів (низький час затримки, висока швидкість передачі і. т. п.)

Недоліки: протокол DIR може зациклиться (якщо не запам’ятован попередній трафік, або не встановлений часовий інтервал).

The Greedy Other Adaptive Face Routing (GOAFR) [33]: геометричний ad-hoc алгоритм маршрутизації, що об’єднує „жадібну” і *face* маршрутизацію. Алгоритм будує маршрут „жадібним” методом від відправника *s* до адресата *t* по межі мережевого графа. Мета протоколу полягає в тому, щоб визначити найближчий вузол до адресата *t* при використанні геометричних площин.

Переваги: висока продуктивність в мережах з великою щільністю вузлів.

Недоліки: не підходить для простих конфігурацій.

SPAN [34]: SPAN є таблично-орієнтованим протоколом. У мережі вибираються вузли-координатори (маршрутизатори або ретранслятори), тоді як інші вузли залишаються в режимі “сон”. Мережа періодично змінює вузли-координатори (збалансований розподіл енергії).

Кожен вузол періодично передає „hello” повідомлення, яке містить стан вузла (координатор або не координатор, розташування і кількість його сусідів). Вузли запам’ятовують в таблицю маршрутизації: свого координатора, сусідів і координатора його сусідів.

При передачі пакетів в мережі вузли - координатори використовують метод географічної “жадібної” маршрутизації. Вузол відправник „підписує” кожен пакет указуючи координати місцеположення вузла-адресата. Після отримання пакету вузол-координатор який знаходиться поза дальністю радіозв’язку, передає пакет сусідньому координаторові (найближчий до адресата). Якщо такий координатор не існує, пакет, відправляється звичайному вузлу, який ближче до адресата.

Якщо вузол „спав” якийсь час, пакети, призначені для нього не втрачаються, а буферизовані його сусідом і передаються при його пробудженні.

Недоліки: недостатня енергетична ефективність із-за необхідності зберігати маршрути для двох або трьох сусідів.

Висновок: аналіз, проведений в даній статті, показав неспроможність існуючих протоколів маршрутизації задовольнити вимогам, які пред’являються до тактичних сенсорних бездротових мереж, а саме: висока пропускна спроможність, масштабованість, самоорганізація

мережі, інтелектуальність, децентралізованість і оптимізація функцій управління, робота з різними видами трафіка, наявність систем позиціонування, робота в русі і т. п.

При розробці протоколів маршрутизації для тактичних сенсорних мереж необхідно враховувати наступні фактори:

1. Тип навантаження та періодичність (функцію) генерації навантаження.
2. Обмежену кількість адресатів (отримувачів) сенсорної інформації.
3. Обмежену енергоємність батарей вузлів та необхідність максимізації часу життя сенсорної мережі.

Можливим рішенням є використання гібридного R-зонового методу маршрутизації [35] який використовує множину метрик вибору маршрутів (в т.ч. енергозберігаючі).

Процес управління маршрутизацією повинен бути орієнтований на поточний стан сенсорної мережі (наявність цілей - джерел інформації, розмірність мережі, потужність сенсорів і т. п.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Міночкін А.І., Романюк В.А., Жук О.В. Перспективи розвитку тактичних сенсорних мереж // Збірник наукових праць № 4. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2007. – С. 112 – 119.
2. Миночкин А.И., Романюк В.А. Методология оперативного управления мобильными радиосетями // Зв'язок. – 2005. – № 2. – С. 53 – 58.
3. N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin, „GPS-less low cost outdoor localization for very small devices”, Technical report 00-729, Computer science department, University of Southern California, Apr. 2000.
4. Миночкин А.И., Романюк В.А., Управление энергоресурсом мобильных радиосетей // Зв'язок. – 2004. – № 8. – С. 50 – 53.
5. Y. Yao and J. Gehrke, “The cougar approach to in-network query processing in sensor networks”, in SIGMOD Record, September 2002.
6. F. Ye, H. Luo, J. Cheng, S. Lu, L. Zhang, „A Two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks”, proceedings of ACM/IEEE MOBICOM, 2002.
7. Кучерявый Е.А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. – СПб.: Наука и техника, 2004. – 336 с.
8. Миночкин А.И., Романюк В.А., Маршрутизация в мобильных радиосетях – проблема и пути ее решения // Зв'язок. – 2006. – № 7. – С. 49 – 55.
9. W. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan, „Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks” , (MobiCom '99), Seattle, WA, August, 1999. pp. 174-185.
10. C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, ”Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks”, Proceedings of ACM MobiCom '00, Boston, MA, 2000, pp. 56 – 67.
11. D. Braginsky and D. Estrin, „Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks”, in the Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA), Atlanta, GA, October 2002.
12. F. Ye, A. Chen, S. Liu, L. Zhang, „A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks”, (ICCCN), pp. 304 – 309, 2001.
13. C. Schurgers and M.B. Srivastava, „Energy efficient routing in wireless sensor networks”, in the MILCOM, McLean, VA, 2001.
14. M. Chu, H. Haussecker, and F. Zhao, „Scalable Information-Driven Sensor Querying and Routing for ad hoc Heterogeneous Sensor Networks”, The International Journal of High Performance Computing Applications, Vol. 16, No. 3, August 2002.
15. Y. Yao and J. Gehrke, “The cougar approach to in-network query processing in sensor networks”, in SIGMOD Record, September 2002.

16. *N. Sadagopan et al.*, The ACQUIRE mechanism for efficient querying in sensor networks, in the Proceedings of the First International Workshop on Sensor Network Protocol and Applications, Anchorage, Alaska, May 2003.
17. *R. C. Shah and J. Rabaey*, „Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), March 17 – 21, 2002, Orlando, FL.
18. *S. Servetto and G. Barrenechea*, „Constrained Random Walks on Random Graphs: Routing Algorithms for Large Scale Wireless Sensor Networks”, proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, Atlanta, Georgia, USA, 2002.
19. *Романюк В.А.* Иерархическая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв’язок. – 2002. – № 3. – С. 21 – 25.
20. *W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan*, „Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Mi-crosensor Networks”, Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS ’00), January 2000.
21. *S. Lindsey, C. Raghavendra*, „PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems”, IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2002, Vol. 3, 9 – 16 pp. 1125 – 1130.
22. *A. Manjeshwar and D. P. Agarwal*, „TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks”, In 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, April 2001.
23. *A. Manjeshwar and D. P. Agarwal*, „APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks”, Parallel and Distributed Processing Symposium., Proceedings International, IPDPS 2002, pp. 195 – 202.
24. *V. Rodoplu and T. H. Meng*, „Minimum Energy Mobile Wireless Networks”, IEEE Journal Selected Areas in Communications, vol. 17, no. 8, Aug. 1999, pp. 1333-44.
25. *L. Li, and J. Y. Halpern*, „Minimum-Energy Mobile Wireless Networks Revisited”, IEEE International Conference on Communications (ICC) 2001. Vol. 1, pp. 278 – 283.
26. *Jamal N. Al-Karaki, Raza Ul-Mustafa, Ahmed E. Kamal*, „Data Aggregation in Wireless Sensor Networks – Exact and Approximate Algorithms”, Proceedings of IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing (HPSR) 2004, April 18 – 21, 2004, Phoenix, Arizona, USA
27. *Q. Li and J. Aslam and D. Rus*, „Hierarchical Power-aware Routing in Sensor Networks”, In Proceedings of the DIMACS Workshop on Pervasive Networking, May, 2001.
28. *F. Ye, H. Luo, J. Cheng, S. Lu, L. Zhang*, „A Two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks”, proceedings of ACM/IEEE MOBICOM, 2002.
29. *Романюк В. А.* Геомаршрутизация в мобильных радиосетях // Зв’язок. – 2001. – № 5. – С. 37 – 39.
30. *Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin*, „Geography-informed Energy Conservation for Ad-hoc Routing”, In Proceedings of the Seventh Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking 2001, pp. 70 – 84.
31. *Y. Yu, D. Estrin, and R. Govindan*, „Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks”, UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR – 01 – 0023, May 2001.
32. *I. Stojmenovic and X. Lin*. „GEDIR: Loop-Free Location Based Routing in Wireless Networks”, In International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems, Boston, MA, USA, Nov. 3 – 6, 1999.
33. *F. Kuhn, R. Wattenhofer, A. Zollinger*, „Worst-Case optimal and average-case efficient geometric ad-hoc routing”, Proceedings of the 4th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, Pages: 267 – 278, 2003.
34. *B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, R. Morris*, „SPAN: an energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks”, Wireless Networks, Vol. 8, No. 5, Page(s): 481 – 494, September 2002.
35. *Романюк В. А.* R- зонова маршрутизація // Зв’язок. – 2005. – № 4. – С. 41 – 42.