

УДК 621.311

Алексеева І.В., к.ф.-м.н, доцент;
Пашинський Д. М.,
НТУУ «КП»

КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ПОРІВНЯННЯ ПРОТОКОЛІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗДРОВОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

У роботі розглядаються та порівнюються із MANET бездротові сенсорні мережі, проводиться дослідження особливостей протоколів маршрутизації бездротових сенсорних мережах, розглядається класифікація протоколів маршрутизації.

В работе рассматриваются и сравниваются с MANET беспроводные сенсорные сети, проводится исследование особенностей протоколов маршрутизации беспроводных сенсорных сетях, рассматривается классификация протоколов маршрутизации.

The paper reviewed and compared with MANET bezdrovoti sensor networks, conduct research features of routing protocols for wireless sensor networks is considered classification of routing protocols.

Вступ. Сенсорні мережі з'явилися у якості перспективного інструменту для спостереження за фізичним світом, використовуючи мережі із самоорганізацією із автономним живленням, що можуть сприймати, обробляти та обмінюватися даними. У сенсорних мережах енергія – важливий ресурс, в той час як додатки демонструють обмежений набір характеристик. Таким чином, існує потреба та можливість оптимізації використання ресурсів. Вимоги та обмеження сенсорних мереж роблять їх архітектуру і протоколи одночасно складним і відмінними від потреб традиційної архітектури Internet.

Сенсорна мережа – це мережа, що складається із багатьох малих одноразових приладів (вузлів), що просторово розподілені для виконання конкретних глобальних прикладних задач. Дані вузли утворюють мережу, взаємодіючи один із одним напряму або через інші вузли. Один чи декілька вузлів із них виступають стоком, що мають змогу взаємодіяти із користувачем напряму або через дротову мережу. Первинний компонент мережі – датчик, здатний сприймати фізичні умови середовища, такі як звук, температура, вологість, напруженість, коливання, тиск, рух, забруднення і т. п. у різних місцях. Вузол складається із датчика, процесора для обробки даних та системи зв'язку. Використовується концепція мережі на основі взаємодії великого числа вузлів. Рис. 1 показує структуру сенсорної мережі. Кожен вузол зазвичай складається із чотирьох

компонентів: сенсорного блоку, центрального процесора, блока живлення та блока зв'язку. Вони призначені для різних задач. Сенсорний блок складається із датчика та АЦП (аналогово-цифрового перетворювача). Сенсорний блок відповідає за реєстрацію інформації, АЦП – оцифровує сигнали від датчика та керує датчиком. Блок зв'язку приймає команди або запити та передає дані від процесора по радіоканалу. Процесор – найскладніша частина, він інтерпретує команди і запити до АЦП, контролює енергоспоживання, обробляє отримані дані, розраховує наступний стрибок передачі до стоку і т. п. Блок живлення забезпечує живлення сенсорного блоку, процесора та радіомодуля. Крім того, кожен вузол може містити і додаткові компоненти: систему визначення розташування та блок мобільності. Якщо користувачу необхідно визначити розташування датчика із високою точністю він обладнується системою визначення розташування. Блок мобільності забезпечує можливість переміщення вузлів, якщо це необхідно для вирішення задачі.

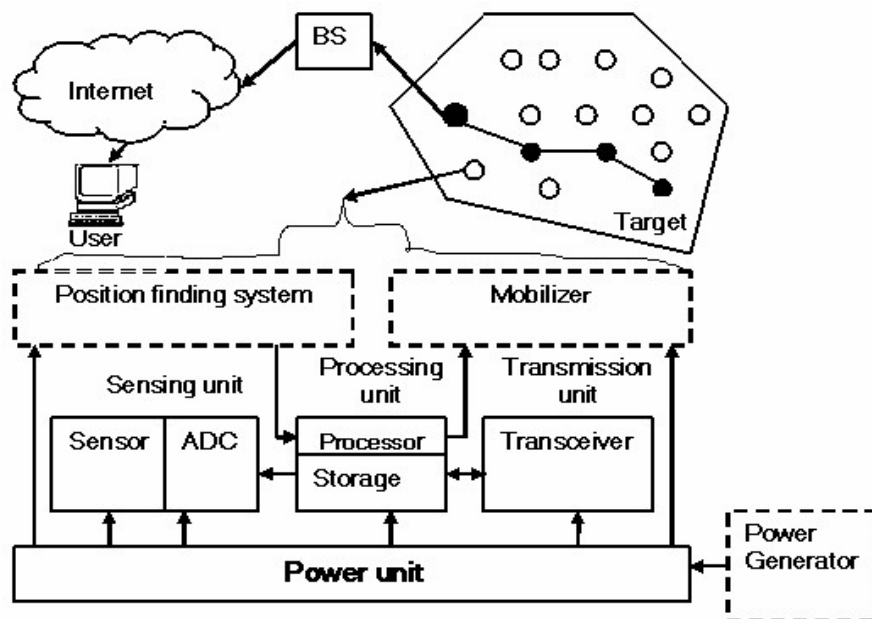


Рис. 1. «Структура сенсорної мережі»

Замість відправки необроблених даних до вузлів до вузлів, що відповідають за їх об'єднання, вузли використовують можливості обробки для здійснення місцевої часткової обробки та передачі лише необхідних даних. Вузли не лише виконують задачу збирання та обробки даних, а й виступають в ролі маршрутизаторів, пересилаючи дані бездротовими каналами при обмеженні енергії джерела живлення. Вузли сенсорної мережі обмежені щодо енергозабезпечення, обчислювальної потужності та пропускної здатності. В ідеалі бездротова сенсорна мережа масштабована, відмовостійка, має мале енергоспоживання, програмно налаштовувана,

швидко збирає дані, надійна та точна у довгостроковій перспективі, недорога та не потребує технічного обслуговування.

Основна мета бездротової сенсорної мережі (БСМ):

- Визначення значень фізичних величин у заданих місцях;
- Зафіксувати виникнення явищ, що викликають зацікавлення та визначити параметри зафіксованих подій;
- Класифікувати зафіксований об'єкт;
- Відслідкувати об'єкт;

Таким чином, важливими вимогами до БСМ є:

- Використання великої кількості датчиків;
- Розміщення стаціонарних датчиків;
- Низьке енергоспоживання;
- Самоорганізація;
- Спільна обробка сигналів;
- Здатність працювати за запитами.

Решта даної статті організована наступним чином. У розділі 2 міститься порівняння сенсорних мереж та мереж MANET, у розділі 3 міститься застосування сенсорних мереж, у розділі 4 міститься класифікація протоколів маршрутизації, у розділі 5 містяться конструктивні особливості протоколів маршрутизації, у розділі 6 міститься порівняння протоколів маршрутизації, у розділі 7 – висновки.

2. Порівняння сенсорних мереж із мережами MANET

Мережі MANET та БСМ – це два класи бездротових Ad-hoc мереж із обмеженими ресурсами. MANET зазвичай складаються із мобільних пристроїв, що мають високі можливості. Сенсорні мережі зазвичай розгортаються у певних географічних місцевостях для відслідковування, спостереження та реєстрації. Обидва цих типи бездротових мереж характеризуються своєю Ad-hoc природою, що пов'язано із недостатньо розгорнутою інфраструктурою для обчислення та зв'язку. Обидва типи мереж мають спільні риси, такі як відсутність фіксованої топології, обмеженість енергетичного ресурсу та бездротове сполучення між вузлами мережі. Але існує і багато фундаментальних відмінностей між БСМ та MANET:

- сенсорні мережі зазвичай використовуються для збору інформації, тоді як MANET розроблені більше для розподілених обчислень, ніж для збору інформації;
- сенсорні мережі зазвичай використовують широкомовну передачу, тоді як MANET засновані на зв'язку точка-точка;
- кількість вузлів у сенсорній мережі може бути на кілька порядків вищою, ніж у MANET;
- вузли сенсорних мереж не мають глобальних ідентифікаторів через велику кількість вузлів та, відповідно, велику довжину заголовків;

- сенсорні вузли сильно обмежені у енергії джерела живлення, обчислювальних можливостях та обсягу пам'яті, тоді як вузли MANETякимось чином можна перезаряджати;
- сенсори зазвичай розгортаються лише один раз, тоді як у MANETвузли можуть переміщуватися;
- сенсорні вузли значно більш обмежені у обчислювальних та комунікаційних можливостях, ніж вузли MANETв силу значно меншої вартості.

3. Застосування сенсорних мереж

Останнім часом БСМ знайшли застосування у широкому колі систем із вимогами та характеристиками, що значно відрізняються. Сенсорні мережі застосовуються при ліквідації наслідків стихійних лих, аварійно-рятувальних операціях, спостереженні за навколишнім середовищем та природним середовищем існування, у домашніх мережах, що фіксують хімічні, радіоактивні чи вибухові матеріали і т. п., докладніше у Таблиці 1.

Таблиця 1

Застосування БСМ

Область	Застосування
Військова	Дослідження військової обстановки Розпізнавання вторгнення Реєстрація переміщення об'єктів на суші та на морі Спостереження за полем бою
Надзвичайні ситуації	Боротьба зі стихійними лихами Датчики води/вогню Реєстрація концентрації хімічних речовин
Матеріальний світ	Моніторинг води та ґрунту Дослідження природного середовища проживання Спостереження за біологічними та штучними системами
Медицина	Датчики кровотоку, частоти дихання, електрокардіограма, вмісту кисню в крові, кров'яного тиску Спостереження за місцезнаходженням та станом здоров'я
Промисловість	Контроль за виробничими процесами, автоматизація Спостереження та контроль промислового обладнання
Домашні мережі	Побутова техніка, контроль розміщення Місцезнаходження людини
Автомобільна	Контроль тиску в шинах Активна мобільність Координоване стеження за автотранспортними засобами

4. Класифікація протоколів маршрутизації

Простір для розробки алгоритмів маршрутизації у БСМ досить великий, а класифікувати їх можна по різному. Протоколи маршрутизації поділяють на вузлоорієнтовані, дата-орієнтовані, геоорієнтовані та QoS-орієнтовані. Більшість протоколів маршрутизації БСМ вузло-орієнтовані де напрямки задаються на основі чисельних адрес (ідентифікаторів) вузлів. У БСМ вузлоорієнтовані зв'язки зазвичай не очікуються. Тому протоколи маршрутизації у БСМ зазвичай дата-орієнтовані або геоорієнтовані. При дата-орієнтованій маршрутизації стоки посилають запити до певних областей та очікують даних від сенсорів, розміщених там. Оскільки дані надсилаються за запитом, необхідне іменування на основі атрибутів для вказівки властивостей даних. Дані тут зазвичай передаються від кожного сенсора у області розгортання із значною надмірністю. При геоорієнтованій маршрутизації вузлам відомо, у якій області вони розміщені. Інформація про розміщення може бути використана для підвищення продуктивності маршрутизації або забезпечення нових типів послуг. У QoS-орієнтованих протоколах маршрутизації головними аспектами являються ймовірність доставки даних, затримка та споживання енергії. Для забезпечення високої якості обслуговування дані протоколи повинні володіти високою ймовірністю доставки, низькими затримками та низьким енергоспоживанням.

Крім того, протоколи маршрутизації БСМ поділяють на проактивні та реактивні. Проактивні протоколи встановлюють маршрути та стани до запиту на маршрутизацію трафіку. Шляхи підтримуються навіть у випадку відсутності трафіку. Реактивні протоколи маршрутизації здійснюють маршрутизацію у випадку, коли є дані для передачі до інших вузлів. Шляхи тут встановлюються на вимогу, коли ініціюються запитами.

Інша класифікація протоколів маршрутизації БСМ поділяє їх на протоколи із ініціацією джерелом та протоколи із ініціацією призначенням. Протоколи із ініціацією джерелом встановлюють маршрути на вимогу вузла-джерела і маршрути починаються від цього вузла. Джерело сповіщає про дані для передачі та розпочинає доставку даних. У протоколах із ініціацією призначенням навпаки – вузол адресант розпочинає встановлення маршруту.

Існує класифікація протоколів маршрутизації БСМ за архітектурою мережі. Деякі сенсорні мережі складаються із однорідних вузлів, тоді як інші із різнорідних. На основі даної концепції протоколи можна класифікувати як функціонуючі на плоскій (однорівневій) топології або на ієрархічній топології. У однорівневих протоколах маршрутизації усі вузли розглядаються однаково. Якщо вузол має передати дані, він може знайти маршрут, що складається із декількох стрибків, до стоку. Ієрархічні протоколи маршрутизації мають більш природний підхід, утворюючи багаторівневу мережу, у якій деякі вузли більш потужні за інші. Ієрархія не

завжди залежить від потужності вузлів. У ієрархічних (кластерних) протоколах різні вузли погруповані у кластери, а дані від вузлів одного кластера можуть об'єднуватися. Кластерні протоколи мають такі переваги як масштабованість, енергоефективність при прокладанні маршруту та легкість керування.

5. Конструктивні особливості протоколів маршрутизації

На початку існування БСМ в основному створювалися для військових задач. Пізніше вони були розглянуті і для цивільного застосування, як спостереження за навколишнім середовищем та видами, виробництвом, у медицині, для «розумного дому» і т. п. Такі БСМ можуть складатися із гетерогенних мобільних вузлів, топологія мережі мала вигляд зірки; масштаб та щільність мережі відрізняються залежно від застосування. Для задоволення цієї потреби диверсифікації необхідно розглянути наступні важливі особливості будови сенсорної мережі.

5.1 Стійкість до відмов

Деякі сенсорні вузли можуть вийти з ладу або бути заблоковані в силу нестачі живлення, фізичних ушкоджень чи впливу середовища. Неполадки сенсорних вузлів не повинні впливати на виконання задачі мережею. Це надійність або відмовостійкість. Відмовостійкість це здатність підтримувати функціонування сенсорної мережі безперервно у випадку відмов вузлів.

5.2 Масштабованість

Кількість сенсорних вузлів що розгортаються у сенсорній області може досягати сотень, тисяч чи більше і схеми маршрутизації повинні бути досить масштабовані для реагування на події.

5.3 Вартість виробництва

Оскільки сенсорні мережі складаються із великої кількості вузлів, вартість окремого вузла – дуже важлива. Щоб загальна вартість мережі була оправдана, вартість вузла повинна бути як найнижчою.

5.4 Умови експлуатації

Сенсорну мережу можна установити в середину великих машин, на дно океану, у біологічно або хімічно забрудненій зоні на полі бою у приватному або великому будинку, на складі, приєднані до тварин або транспортних засобів, що швидко пересуваються, у лісі для спостереження за середовищем проживання і т. п.

5.5 Енергоспоживання

Оскільки потужність бездротової передачі пропорційна квадрату або навіть вищому степеню відстані залежно від умов передачі, багатострибкова маршрутизація споживає менше енергії ніж прямий зв'язок. Однак багатострибкова маршрутизація викликає значне зростання обсягу службової інформації для контролю топології та керування доступом. Пряма передача гарно показує себе, якщо відстань між вузлами невелика та усі вузли розміщені не далеко від стоку. Сенсорні вузли

оснащені обмеженим джерелом енергії. ($< 0,5 \text{ А*Год}$, $1,2 \text{ В}$). Час життя вузла прямо залежить від часу розряду батареї.

5.6 Моделі доставки даних

Моделі доставки даних визначають коли дані, що зібрані вузлами, доставляються. Залежно від призначення сенсорної мережі, моделі доставки можуть бути неперервні, керовані подією, керовані запитом та гібридні. У неперервних моделях доставки кожен сенсор періодично відправляє дані. У моделях керованих подією передача даних розпочинається коли реєструється подія. У моделях керованих запитом передача даних запускається запитом від стоку. Деякі мережі використовують гібридну модель, що являється комбінацією вище описаних моделей.

5.7 Агрегація та злиття даних

Оскільки сенсорні мережі можуть генерувати дуже надлишкові дані, подібні пакети від кількох вузлів можуть бути сполучені, щоб зменшити кількість передач. Агрегація даних – це сполучення даних від різних джерел із використанням придушення дублюючої інформації. Оскільки обробка споживає менше енергії, ніж зв'язок, через агрегацію даних можна досягнути істотного збереження енергії. Дана технологія використовується для енергозбереження та оптимізації трафіку у великій кількості протоколів маршрутизації.

5.8 Якість обслуговування – QoS

Якість обслуговування – це якість, що вимагається при даному застосуванні. Це може бути час життя, надійність даних, енергоефективність, інформація про точне розташування, спільна обробка. Дані фактори впливають на обрання протоколу маршрутизації для конкретного застосування. При деяких застосуваннях (наприклад військовому) дані повинні бути доставлені на протязі певного проміжку часу від часу відправлення.

5.9 Затримка та службова інформація

Це важливі фактори, що впливають на принцип протоколу маршрутизації. Агрегація даних та багатострибкова передача збільшують затримку передачі даних. На додаток, деякі протоколи створюють велику кількість службової інформації для забезпечення своїх алгоритмів, що не припустимо для мереж, що сильно обмежені енергетично.

5.10 Розгортання вузлів

Розгортання вузлів залежить від застосування та впливає на продуктивність протоколу маршрутизації. Розгортання може бути попередньо визначеним або самоорганізованим. У випадку попереднього визначення вузли розміщують вручну, а дані передаються по попередньо встановлених шляхах. Однак у системах із самоорганізацією сенсорні вузли розсіяні випадково утворюючи структуру на кшталт ad-hoc. У такій структурі розміщення стоку або головного вузла кластера також

вирішальне з точки зору енергозбереження та продуктивності. Якщо розподіл вузлів неоднорідний, оптимальне розміщення головних вузлів кластера стає нагальною потребою для задіяння енергоефективного функціонування мережі.

6. Порівняння протоколів маршрутизації

У даній статті порівнюються протоколи маршрутизації відповідно до їх проектних характеристик.

- SPIN: Sensor Protocols for Information via Negotiation. (сенсорний протокол для маршрутизації через переговори)
- DD: Directed Diffusion (спрямована дифузія)
- RR: Rumor Routing (маршрутизація плітками)
- GBR: Gradient Based Routing (маршрутизація на основі градієнтів)
- CADR: Constrained Anisotropic Diffusion Routing (обмежено анізотропна дифузійна маршрутизація)
- COUGAR
- ACQUIRE: ACtive QUery forwarding In sensoR nEtworks (активна відправка запитів у сенсорних мережах)
- LEACH: Низька Energy Adaptive Clustering Hierarchy (низькоенергетична кластерна ієрархія)
- TEEN & APTEEN:[Adaptive] Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network (сенсорна мережа із [адаптивним] порогом чутливості)
- PEGASIS: The Power-Efficient GAthering in Sensor Information Systems (енергоефективне збирання у сенсорних інформаційних системах)
- VGA:Virtual Grid Architecture Routing (маршрутизація із архітектурою віртуальної решітки)
- SOP: Self Organizing Protocol (самоорганізований протокол)
- GAF: Geographic Adaptive Fidelity (географічно адаптивна точність)
- SPAN
- GEAR: Geographical and Energy Aware Routing (географічно та енергетично свідомо маршрутизація)
- SAR: Sequential Assignment Routing (маршрутизація послідовним призначенням)
- SPEED:A real time routing protocol (протокол маршрутизації реально часу)

Таблиця 2 представляє класифікацію та порівняння протоколів маршрутизації у БСМ.

Таблиця 2

Класифікація та порівняння протоколів маршрутизації бездротових сенсорних мереж

Протокол маршрутизації	Класифікація	Енергозбереження	Агрегація даних	Масштабованість	По запиту	Кількість службової інформації	Модель доставки даних	QoS
SPIN	Одноранговий/ Ініційована джерелом/ Дата-орієнтований	Обмежено	Так	Обмежено	Так	Низька	Керується подією	Ні
DD	Одноранговий/ Дата-орієнтований/ Ініційована стоком	Обмежено	Так	Обмежено	Так	Низька	Керується вимогою	Ні
RR	Одноранговий	Низька	Так	Висока	Так	Низька	Керується вимогою	Ні
GBR	Одноранговий	Низька	Так	Обмежено	Так	Низька	Гібридна	Ні
CADR	Одноранговий	Обмежено		Обмежено	Так	Низька	Неперервна	Ні
COUGAR	Одноранговий	Обмежено	Так	Обмежено	Так	Висока	Керується запитом	Ні
ACQUIRE	Одноранговий/Дата-орієнтований	Низька	Так	Обмежено	Так	Низька	Складний запит	Ні
LEACH	Ієрархічний /Ініційована стоком /Вузло-орієнтований	Висока	Так	Висока	Ні	Висока	Керується головним вузлом кластера	Ні
TEEN & APTEEN	Ієрархічний	Висока	Так	Висока	Ні	Висока	Активний поріг	Ні
PEGASIS	Ієрархічний	Максимальне	Ні	Висока	Ні	Низька	На основі ланцюгів	Ні
VGA	Ієрархічний	Низька	Так	Висока	Ні	Висока	Висока	Ні
SOP	Ієрархічний	Низька	Ні	Висока	Ні	Висока	Неперервна	Ні
GAF	Ієрархічний / За розміщенням	Обмежено	Ні	Висока	Ні	Змінна	Віртуальна решітка	Ні
SPAN	Ієрархічний / За розміщенням	Обмежено	Так	Обмежено	Ні	Висока	Неперервна	Ні
GEAR	За розміщенням	Обмежено	Ні	Обмежено	Ні	Змінна	Керується вимогою	Ні
SAR	Дата-орієнтований	Висока	Так	Обмежено	Так	Висока	Неперервна	Так
SPEED	За розміщенням/ Дата-орієнтований	Низька	Ні	Обмежено	Так	Низька	Географічна	Так

Висновки. Сенсорні мережі є багатообіцяючими у області збирання інформації із віддалених місць. Ця область розвивається, що пропонує багато простору для досліджень. Більше того, не відміну від MANET, сенсорні мережі розроблені для більш специфічних застосувань. Отже розробка ефективних протоколів маршрутизації для сенсорних мереж, що

підходять для мереж, що обслуговують різні задачі є важливою. У даній статті було визначено деякі важливі особливості проектування протоколів маршрутизації для сенсорних мереж та було порівняно та протиставлено існуючі протоколи маршрутизації. У дослідженні показано, що неможливо створити алгоритм, що показуватиме високу продуктивність для різних задач та сценаріїв. Хоча для БСМ запропоновано багато протоколів, на багато особливостей слід звернути увагу.

Використані джерела інформації:

1. Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankaraubramaniam, and Erdal Cayirci: A Survey on sensor networks, IEEE Communications Magazine (2002).
2. José A. Gutierrez, Marco Naeve, Ed Callaway, Monique Bourgeois, Vinay Mitter, Bob Heile, IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Power Low-Cost Wireless Personal Area Networks, IEEE Network, pp. 12-19 (September/October 2001).
3. Ed Callaway, Paul Gorday, Lance Hester, Jose A. Gutierrez, Marco Naeve, Bob Heile, Venkat Bahl: A Developing Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks; IEEE Communications Magazine, pp. 70-77 (August 2002).
4. Sarjoun S. Doumit, Dharma P. Agrawal: Self-Organizing and Energy-Efficient Network of Sensors, IEEE, pp. 1-6 (2002).
5. Elaine Shi, Adrian Perrig: Designing Secure Sensor Networks IEEE Wireless Communications, pp. 38-43 (December 2004).
6. Chien-Chung Shen, Chavalit Srisathapornphat, Chaiporn Jaikaeo: Sensor Information Networking Architecture and Applications, IEEE Personal Communications, pp. 52-59 (August 2001).