

УДК 621.311

Алексеева І.В., к. фіз.-мат. н.;
Пашинський Д.М.,
НТУУ «КПІ»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ПРОТОКОЛІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ТА ЇХ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ

Проведено дослідження поширених енергоефективних протоколів маршрутизації бездротових сенсорних мереж, а також прослідковано за їх розвитком.

Проанализированы по критерию энергосбережения протоколы маршрутизации и указаны перспективы их развития.

Protocols of routing are analysed on the criterion of energy-savings and the prospects of their development are indicated.

Вступ. Бездротові сенсорні мережі (БСН) обладнанні автономними сенсорними вузлами – датчиками, головним призначенням яких є реєстрація фізичних умов навколишнього середовища та маршрутизація до головного датчика, що являє собою базову станцію із надійним джерелом електроживлення та, як правило, стаціонарна. Основна задача головного датчика – обробка даних із датчиків для подальших дій або прийняття рішень. Від працює як інтерфейс. Датчики рівномірно розповсюджені у певній області для реєстрації фізичного стану середовища для певного застосування [1]. Кожен датчик може здійснювати обмежену обробку та подальшого об'єднання даних від інших датчиків. Головною проблемою при експлуатації датчиків є їх енергоспоживання. Для тривалого функціонування мережі критичним є енергоефективне збирання даних. Однак більше енергоспоживання спостерігається при обробці та передачі даних. Відношення між енергоспоживанням для дальністю зв'язку у БСН: $E = kd^n$ [1], де E – енергоспоживання, d – дальність зв'язку, а $k, 2 < n < 4$ – константи. Із формули видно, що чим більша дальність зв'язку, тим більше енергоспоживання. Головними обмеженнями виступають обмежений розмір буфера, обмежена ємність живлення, обмежена обчислювальна потужність та обмежена смуга частоти. Тому дослідження спрямовують на розробку енергоефективних протоколів маршрутизації для збереження енергії датчиків. Існує багато енергоефективних протоколів, але досліджено буде два із них: LEACH та GAF.

Цілі розробки бездротових сенсорних мереж. Бездротові сенсорні мережі мають ряд обмежень, які відрізняють їх від мобільних ad-hoc мереж і, таким чином, проектуванні бездротової сенсорної мережі є досить складним завданням. По-перше, згенерований трафік має високу надмірність, оскільки декілька датчиків можуть генерувати однакові дані в

безпосередній близькості від явища. По-друге, датчики сенсорної мережі можуть бути розгорнуті щільно. Непотрібні датчики не мають вести передачу задля забезпечення зв'язку у всьому полі дії датчика. По-третє, датчики обмежені запасом енергії, обчислювальними можливостями та обсягом пам'яті. Це вимагає обережного управління ресурсами. По-четверте, датчики можуть не мати глобальних ідентифікаторів.

Також важливим фактором є **масштабованість**. Для мереж великого масштабу ймовірно, що локалізація взаємодії через ієрархічність та агрегацію можуть бути критичними для забезпечення масштабування.

Користувач зацікавлений у отриманні даних про подію із заданою **затримкою**. Отже важливим є своєчасне отримання даних.

В силу обмеження потужності датчиків, **енергоефективність** є найважливішим аспектом до розгляду. Багато-стрибкова маршрутизація споживатиме менше енергії, ніж прямий зв'язок, оскільки потужність передачі пропорційна квадрату відстані або навіть вищому порядку в силу певних обставин. Однак, багато-стрибковість вводить значні накладні витрати для керування топологією та керування доступом до середовища.

LEACH (Lowenergyadaptiveclusteringhierarchy – низька енергія, адаптивна кластерна ієрархія). Протокол LEACH використовує множинний доступ із кодовим (CDMA) або часовим (TDMA) розділенням каналів контролю доступу до середовища для розділення каналів, що інтегрований із кластеризацією та простим протоколом маршрутизації бездротових сенсорних мереж (БСМ). Мета LEACH – зниження енергоспоживання необхідного для створення та підтримання кластерів з метою підвищення терміну служби БСМ. LEACH – ієрархічний протокол у якому більшість вузлів передають дані до керуючого датчика кластера, керуючий датчик, який накопичує та стискає дані та перенаправляє їх до базової станції. Кожен датчик використовує стохастичний алгоритм для кожного раунду, щоби визначити чи стане він керуючим датчиком кластера у наступному раунді. LEACH враховує, що кожен датчик має передавач досить потужний, аби напряду зв'язатися із базовою станцією або найближчим головним датчиком кластера, але що використання передавача на повну потужність весь час – це марна витрата енергії. Використовуючи об'єднання даних та енергетичну рівновагу, LEACH може збільшити тривалість «життя» мережі але має певні недоліки. По-перше, для визначення головного датчика кластера використовуються випадкові величини, тому може виникнути ситуація, коли датчик із низьким рівнем заряду джерела живлення стане головним датчиком кластера. По-друге, LEACH не враховує сусідні вузли при обиранні головного датчика кластера, а тому, якщо якісь датчики опиняються далеко від головного датчика кластера, їхнє живлення виснажується значно швидше. По-третє, кожен датчик використовує однострибковий маршрут для передачі даних, що робить передачу між датчиками надто

дорогою енергетично. На основі LEACH створено багато ієрархічних протоколів, таких як PEASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information System – енергоефективне збирання даних у сенсорних інформаційних системах), TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol – чутливий до затримок енергоефективний протокол для сенсорних мереж), APTEEN (Adaptive TEEN – адаптивний чутливий до затримок енергоефективний протокол для сенсорних мереж) і т. п.

Недавні просування протоколу LEACH. Вдосконалений протокол LEACH (WLEACH - Wise Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [3] вдосконалений у таких трьох напрямках: по-перше, додано врахування залишку енергії у датчику, по-друге, додано багатострибкову маршрутизацію між датчиками, по-третє, додано режим сну для головного датчика кластера. Враховуючи перший аспект, відомо, що протокол LEACH обмежує кількість разів для датчика, коли він може бути головним датчиком кластера, що дозволяє уникнути швидкого розряду датчика через високі енерговитрати, але датчики при цьому все одно розряджаються. Для того, щоб уникнути обрання в якості головного датчика кластера важливо встановити граничне значення енергії датчика, при якій його може бути обрано як головний у кластері. Зараз спостерігається певні припущення стосовно енергетичного порогу, такі як початкова енергія датчика, середня енергія кластера та середня енергія мережі. Для того, щоб отримати загальний стан мережі, у якості параметра енергетичного порогу обирається середня енергія мережі. Механізм наступний: у кожному раунді кожен датчик пересилає дані про рівень його енергії до головного датчика кластера. Головний датчик об'єднує ці дані та відправляє до головного вузла – базової станції, що у ширококомовному режимі передає ці дані на усі вузли. На основі даних про запас енергії датчиків, кожен датчик вирішує, чи ставати йому головним у кластері. Середнє значення енергії мережі E_r . У даній статті етап кластероутворення розбито на дві стадії. Перша стадія аналогічна такій у протоколі LEACH, вузол, що обирається у кластері показаний як $C(n)$, де n – кількість вузлів; на другій стадії із усіх вузлів буде видалено вузли, енергія яких нижче порогового значення E_c , що утворює новий кластер $C(m)$. E_c може бути знайдено за формулою (2):

$$E_c = f(E_r) = \frac{\sum_{i=1}^{n-dead} E_i}{n - dead} \quad (2)$$

У формулі (2) n – початкова кількість датчиків, E_i – енергія i -го датчика. Крім того, враховуючи оптимальний для LEACH розмір кластера K_{best} , якщо m більше від N_c , надлишкові вузли будуть виведені зі стану головних датчиків кластера. Таким чином для створення оптимальної топології, необхідно 2 – 3 етапи для утворення кінцевого кластера $c(l)$:

$$E_c = \frac{\sum_{i=1}^{n-dead} E_i}{2(N_c - dead)}$$

де $N_c = 1,5K_{best}$.

Відносно другого аспекту, LEACHу якості критерія побудови кластера використовує відстань між датчиками, щоб забезпечити менші витрати на передачу. Але зв'язок між головним датчиком кластера та базовою станцією йде в один стрибок, тобто головний вузол кластера має надвисокі енерговитрати (у деяких випадках до четвертого степеню від відстані між вузлами), що сильно скорочує тривалість функціонування усієї мережі. Враховуючи цю проблему, використали маршрутизацію за географічним положенням та багатострибкову передачу для вдосконалення та алгоритм PRIM для встановлення мінімального дерева покриття. На відміну від класичного алгоритму PRIM було використано відстань між датчиками для поправки ваги суміжних країв, що зменшує ймовірність обрання в якості головного вузла кластера датчика із низьким запасом енергії. Формула наступна:

$$W_c = \frac{W}{E_a + E_b}$$

де W_c – кінцева вага, W – початкова вага, E_a та E_b – енергія вузлів між суміжними краями.

Щодо третього аспекту, більшість БСМ використовуються для моніторингу; частота передачі від датчиків та частота обробки базовою станцією визначають сукупну продуктивність мережі. Якщо частота передачі датчиками надто висока, навантаження на базову станцію також високе, а енерговитрати датчиків надто високі. На додаток, у деяких випадках дані слід передавати лише коли досягаються якісь порогові значення. Такі характеристики БСМ визначають, що для функціонування мережі необхідний підходящий режим «сну». Він встановлюється наступним чином: якщо датчик $S(i)$ стає головним у кластері у одному раунді, його таймер сну встановлюється у значення T . При передачі в кожному раунді кожен датчик спочатку перевіряє його таймер сну, якщо значення рівне 0, то здійснюється нормальна передача у іншому випадку здійснюється передача до найближчого вузла із значенням таймера 0 та рівнем енергії вище порогового. Якщо таких вузлів немає, передача не здійснюється у цьому раунді, але дані зберігаються, об'єднуються із даними наступного раунду та передаються разом. Оскільки використання енергії при об'єднанні даних використовує менше енергії, ніж передача даних до базової станції, такий режим сну може ефективно зменшувати енергоспоживання та використовує можливість збереження та об'єднання даних від усіх датчиків.

LEACH-CC. Протокол LEACH у поєднанні із протоколом Chain – ієрархічний протокол. Він має достоїнства алгоритму розподіленого

утворення кластерів LEACH, де кожен датчик автономно приймає рішення, які впливають на усі інші датчики у кластері. Даний протокол не дає гарантій стосовно розміщення та/або кількості головних вузлів кластера. Оскільки кластери – адаптивні, отримання поганого налаштування кластерів не сильно впливає на загальну продуктивність LEACH. Однак використання алгоритму централізованого контролю для формування кластерів може формувати кращі кластери розкидаючи головні датчики кластера по усій мережі. Потім між головними датчиками кластера утворюється ланцюг маршрутизації, щоб зменшити кількість вузлів, що зв'язуються із базовою станцією. Подальші покращення у енерговитратах на збирання даних може бути досягнуто лише якщо один головний вузол кластера здійснює передачу до базової станції та якщо кожен із головних вузлів кластера передає лише сусіднім головним вузлам кластера на етапі збирання даних. Це основа LEACH-CC (LEACH Centralized with Chain – централізований, із ланцюгом). В процесі фази установки LEACH-CC кожен датчик відправляє інформацію про його нинішнє місце розташування та рівень енергії живлення до базової станції. Базова станція за алгоритмом оптимізації визначає структуру кластерів для даного раунду. В загальному кластери утворені базовою станцією кращі ніж такі, що утворені розподіленням алгоритмом. Однак LEACH-CC потребує, щоб кожен вузол відправляв інформацію про його місце розташування до базової станції на початку кожного раунду. Дана інформація може бути отримана із використанням глобальної системи позиціонування (GPS), передавач якої активується на початку кожного раунду для отримання поточного місця розташування. Стаціонарний режим роботи розбитий на кадри, коли датчики передають дані до головного вузла кластера максимум один раз за кадр впродовж їх визначеного часового інтервалу для передачі. Головний вузол кластера завжди має увімкнений приймач для отримання усіх даних від усіх датчиків кластера. Як тільки головний датчик кластера отримає усі дані, він їх з'єднує. Оскільки базова станція може бути далеко відмінність від LEACH полягає у тому, що передача може здійснюватися багатострибково через ланцюг, сформований із головних вузлів кластера та обираючи лише один головний вузол кластера для передачі до базової станції замість багатьох для зменшення розсіювання енергії. Головна ідея LEACH-CC це передача між суміжними головними вузлами кластера із зміною ведучого вузла, що передає до базової станції. Такий підхід рівномірно розподіляє енергетичне навантаження поміж датчиками БСМ.

GAF. GeographicalAdaptiveFidelity, [7] – протокол на основі місця розташування, у якому датчики адресуються відповідно до їх розміщення. Інформація про місце знаходження вузлів необхідна сенсорній мережі для розрахунку відстані між певними датчиками для оцінки енергоспоживання. GAF– це протокол, на основі відомостей про

енергетику початково запропонований для MANET, але який також може бути застосований для БСМ, оскільки сприяє енергозбереженню. Дизайн GAF заснований на енергетичній моделі, що розглядає споживання енергії через прийом та передачу пакетів а також прослуховування – час, коли приймач датчика увімкнений для виявлення присутності вхідних пакетів. GAF заснований на механізмі вимкнення непотрібних датчиків при цьому забезпечуючи необхідний рівень точності маршрутизації – або неперервного зв'язку між датчиками. У протоколі GAF сенсорна область розбита решіткою на квадрати і кожен датчик використовує інформацію про його розташування, що забезпечується GPS або іншою системою щоб зв'язати себе із певною клітинкою решітки у якій він перебуває. GAF заснований на механізмі вимкнення непотрібних датчиків при цьому підтримуючи постійний рівень точності маршрутизації. У протоколі GAF можливі три типи стану: а) розгортання, б) активний стан, в) сон.

У даному протоколі кожен датчик використовує інформацію про розташування на основі GPS для того, щоб віднести себе із «віртуальною ґраткою» так, щоб уся зона була поділена на кілька квадратів, а кожен датчик із найбільшою залишковою енергією у кожному квадраті стає у ньому головним. Два датчики вважаються еквівалентними, якщо вони обслуговують однакову кількість сусідніх вузлів і можуть належати однаковим маршрутам. Джерело та місце призначення у даному випадку виключені із характеристики. GAF використовує повідомлення виявлення для того, щоб дізнатися про інші датчики у квадраті. Навіть у активному стані датчик періодично посилає ширококомовні повідомлення виявлення для повідомлення еквівалентних датчиків про його стан. [7] Час, що витрачається кожен із цих станів, може бути налаштований програмно залежно від кількох факторів, таких як його потреби та мобільність датчика. GAF націлений на максимізацію часу життя мережі за допомогою досягнення стану, коли кожен квадрат має лише один активний датчик, обраний на основі правил ранжування датчиків. Ранжування датчиків засновано на їх залишкових рівнях енергії. Однак датчики із вищим рангом можуть обробляти маршрутизацію всередині відповідних квадратів. Наприклад, датчик у активному стані має вищий ранг, ніж датчик у стані виявлення. Датчик, що перебуває у режимі очікування довше має вищий ранг. Датчик із більшим очікуваним часом роботи має вищий ранг. У протоколі GAF сенсорне поле розділено на квадрати і кожен датчик використовує інформацію про своє місце знаходження, що забезпечується GPS або іншою системою визначення положення щоб співвіднести себе із певним квадратом, у якому він перебуває. Такий вид об'єднання використовується у GAF, щоб визначити еквівалентні датчики з точки зору передачі пакетів як показано на Рис. «Діаграма переходу станів». GAF має три стани, що називаються розгортання, активний стан та сон. Коли датчик переходить у стан сну його радіомодуль вимикається. GAF націлений на

максимізацію часу функціонування мережі за допомогою досягнення стану, у кожному квадраті активний лише один датчик, обраний згідно із правил ранжування датчиків, що засноване на залишкових рівнях їх енергії. Таким чином, датчик із вищим рангом може здійснювати маршрутизацію всередині відповідного квадрату. Всередині кожного квадрату датчики взаємодіють для того, щоб визначити різні ролі кожного. Наприклад, датчики обирають один датчик, який залишається увімкнений на протязі певного часу, а потім переходять у режим сну. Обраний датчик відповідає за моніторинг та доставку даних до базової станції від імені усіх датчиків квадрату і називається головним вузлом. Інші датчики цього ж квадрату можна розглядати як надлишкові для передачі пакетів і, таким чином, їх можна безпечно перевести у режим сну не жертвуючи ефективністю маршрутизації. Другорядні вузли переключаються між режимами сну та прослуховування, що гарантує, що у кожному квадраті лишатиметься один головний вузол. Наприклад, вузли 2, 3 та 4 на у квадраті В Рис. – еквівалентні у тому сенсі, що кожен із них може передавати пакети між вузлами 1 та 5 у той час коли інші можуть перебувати у режимі сну для економії енергії. Таким чином, GAF забезпечує збереження енергії тим, що вимикає непотрібні вузли мережі без впливу на ефективність маршрутизації.

Обмеження протоколу GAF:

1. GAF залежить від інформації про розміщення. У випадку неможливості визначення координат його використання дуже обмежене.
2. Якщо квадрат містить лише один датчик, то неможливо здійснювати баланс енерговитрат і мережа може містити комірки із низькою енергією, що може призвести до її розділення.

Розширені дослідження протоколу GAF. Протокол CODE [4] заснований на протоколі GAF та використовує решітчасту структуру для зменшення енергоспоживання. Він розглядає енергозбереження не лише для режимів зв'язку, а й на режим сну. Протокол CODE розглядає усі вузли як стаціонарні. Кожен датчик знає свої рівень енергії, що залишилася та розміщення. Коли виникає подія, датчики, що оточують її колективно обробляють сигнал і один із них стає джерелом, що генерує дані. Базова станція та джерело не мають апріорно відомостей про можливе положення одне-одного. Щоб залишити непотрібні вузли в режимі сну, використовується надбудова над GAF, що дозволяє реалізувати алгоритми CODE.

Основна ідея протоколу CODE – розділення сенсорного поля на квадрати. Квадрати проіндексовані на основі їх місця розташування. Відповідно до GAF, кожен квадрат містить один головний вузол, що накопичує та передає дані. CODE складається із трьох фаз: оголошення

даних, відправка запиту та розповсюдження даних. Коли виявлено подію, джерело генерує повідомлення із оголошенням про дані та відсилає його усім координаторам – головним вузлам – використовуючи простий механізм «flooding» (затоплення). Кожен головний вузол повинен підтримувати частину інформації джерела, включаючи подію та положення джерела. Коли мобільна базова станція приєднується до мережі, обирається координатор у тому ж квадраті, та функціонує як Агент. Коли вона потребує дані, відправляє запит до Агента. Агент відповідає за пересилання запиту до джерела, що засновано на розміщенні цілі та індексу квадрата. Ефективний шлях передачі даних встановлюється, коли запит передається до джерела. Отримавши запит, джерело відправляє дані до базової станції по обраному шляху передачі. Агент допомагає базовій станції постійно підтримувати прийом даних від джерела коли базова станція пересувається. Періодично базова станція перевіряє її розміщення. Якщо вона переміщається до іншого квадрату, в першу чергу вона відправляє повідомлення очистки пам'яті, щоб прибрати попередній шлях передачі даних та відправляє запит на встановлення нового маршруту. CODE відрізняється від таких протоколів трьома фундаментальними речами. По-перше, CODE використовує GAF для зменшення енергоспоживання та колізії при переході вузлів у режим сну. По-друге, заснований на решітчастій структурі, CODE може контролювати кількість стрибків передачі та передавати дані коротшими шляхами. По-третє, кількість повторно переданих запитів зменшується шляхом підтримання Агентом передачі даних до базової станції, якщо вона пересувається всередині квадрату. На додаток, CODE враховує агрегацію запитів та даних для зменшення кількості даних, що передаються від різних датчиків до базових станцій.

Висновок. В останні роки бездротові сенсорні мережі привертають багато уваги. Все більше досліджень спрямовані на покращення енергоефективності протоколів маршрутизації для зменшення енергоспоживання датчиків. Найбільша частина у енергоспоживанні датчиків складається із приймання та передачі. У даній роботі були показані поправки зроблені у протоколи LEACH та GAF. Були розглянуті обмеження протоколу LEACH та покращення у WLEACH та LEACHCC. WLEACH на відміну від LEACH враховує рівень енергії та використовує багатострибкову маршрутизацію і режим сну, що зменшує енергоспоживання головного датчика кластера. LEACH-CC також краще від LEACH в силу використання централізованого алгоритму контролю забезпечує кращу кластеризацію та покращує енергозбереження – лише один головний вузол кластера передає дані до базової станції, а усі головні вузли кластерів передають дані лише до сусідніх головних вузлів та агрегують дані. GAF – заснований на механізмі вимкнення непотрібних

датчиків при дотриманні необхідного рівня надійності маршрутизації – неперервної зв'язності між датчиками, тоді як протокол CODE заснований на решітчастій структурі та протоколі GAF зменшує енергоспоживання. CODE використовує протокол GAF для зменшення енергоспоживання та запобіганню колізіям, якщо вузли хибно приймають рішення про перехід до режиму сну. Крім того, CODE може контролювати кількість стрибків та передає дані коротшими шляхами ніж звичайно.

Використані джерела інформації:

1. Chao Wang, Hailing Wang et al, “The Studies on Energy Control of Protocols in Wireless Sensor Networks”, IEEE Communication Magazine, 2006.
2. Baiping Li, Xiaoqin Zhang et al, “Research and Improvement of LEACH Protocol for Wireless Sensor Network”, IERI, 2012.
3. Chen Yueyun, Zhu Yue-long, An Jianwei, et al, “An Energy-saving Routing Protocol Based on LEACH”, IEEE, 2012.
4. Hung Le Xuan, Sungyoung Lee, et al, “Two Energy Efficient Routing Algorithms for Wireless Sensor Networks”, Department of Computer Engineering, Kyung Hee University, Korea.
5. Shio Kumar Singh, M P Singh, D K Singh, et al, “Routing Protocols in Wireless Sensor Networks –A Survey”, JCSES, November 2010.
6. W. Heinzelman, A. Chandrakasam, and H. Balakrishnan, “Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks”, In Proceedings of the Hawaii Conference on System Science, Jan. 2000.
7. Sinchan Roychowdhury, Chiranjib Patra, “Geographic Adaptive Fidelity and Geographic Energy Aware Routing in Ad Hoc Routing”, IJCCT, Aug. 2010