

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Розглядаються особливості функціонування безпроводних сенсорних мереж з метою визначення вимог до протоколів обміну даними для підвищення їх живучості. Аналізується багаторівнева модель сенсорних мереж та площини управління. Показано, що основним чинником, що впливає на живучість і функціональність мережі, є застосування енергоефективних методів комунікації.

Ключові слова: сенсорні мережі, енергозбереження, комунікаційні протоколи.

Рассматриваются особенности функционирования беспроводных сенсорных сетей с целью определения требований к протоколам обмена данными для повышения их живучести. Анализируется многоуровневая модель сенсорных сетей и плоскости управления. Показано, что основным фактором, который влияет на живучесть и функциональность сети, является применение энергоэффективных методов коммуникации.

Ключевые слова: сенсорные сети, энергоэффективность, коммуникационные протоколы.

The features of functioning of off-wire sensory networks are examined with the purpose of determination of requirements to protocols of exchange of data for the increase of their vitality. The multilevel model of sensory networks and C-plane is analysed. It is rotined that a basic factor which influences on vitality and functionality of network is application of energy effective methods of communication.

Keywords: sensory networks, energy effective, communication protocols.

Вступ

Сенсорні мережі – нова сім'я безпроводних мереж, яка радикально відрізняються від традиційних безпроводних мереж, таких як стільникові мережі чи мережі MANET (*ang. Mobile ad-hoc network*) обмеженими можливостями окремих вузлів-давачів. В сенсорних мережах спосіб організації, маршрутизації, а також управління мобільністю сконструйований так, щоб забезпечити ефективне використання енергії, що істотно підвищує живучість мережі в цілому [1].

Всі сенсори в мережі подібні між собою і розміщені дуже густо, що ставить вимоги високої ефективності протоколів, діючих в мережі. Розміщення вузлів, як правило, не визначене завчасно чи запроектоване. Це дає можливість їх розміщення у важкодоступних місцях наприклад, під час катастроф чи зсувів ґрунту. Проте це вимагає від протоколів і алгоритмів сенсорних мереж здатності самостійної організації.

Особливістю більшості застосувань, які використовують сенсорні

мережі, є відсутність можливості додавання або заміни джерел живлення вузлів, тому оптимальне управління і використання енергії в сенсорних мережах є ключовим питанням. Оскільки межі дії одиничного вузла відносно малі, то можна стверджувати, що перевага сенсорних мереж – в кількості сенсорів, що дозволяє передавати дані на значну відстань до керуючих вузлів. Крім того, вузли містять вбудовані процесори і пам'ять. Замість пересилати дані давачів до головних вузлів самостійно, вузли виконують операції обробки, використовуючи можливості своїх місцевих ресурсів. Тим самим вони пересилають тільки такі дані, які необхідні або нові [2-5].

Мета роботи: дослідження особливостей функціонування сенсорних мереж для отримання даних про живучість та функціональність.

Чинники, що впливають на проектування сенсорних мереж

При формуванні сенсорних мереж необхідно врахувати ряд чинників, які мають значний вплив на процес проектування, а пізніше функціонування сенсорної мережі. До них належать :

- нечутливість до помилок;
- масштабованість;
- густина розміщення;
- середовище роботи;
- середовище передачі;
- споживання енергії;
- обмеження обладнання.

Нечутливість до помилок. Деякі вузли сенсорної мережі можуть бути заблокованими через відсутність енергії, фізичне знищення чи інтерференцію середовища. Знищення вузла або групи вузлів сенсорних мереж не повинно впливати на задачу, яку повинна виконувати мережа. Тільки в такому випадку можна говорити про безвідмовність чи нечутливість до помилок мережі, що розуміється як підтримка її цілковитої функціональності без яких-небудь перерв. Потрібно відмітити, що алгоритми і сенсорні протоколи проектуються з врахуванням рівня нечутливості до помилки, що вимагається діями, які виконує сенсорна мережа.

Масштабування. Сенсорна мережа може складатися з сотень і навіть тисяч сенсорних вузлів. Через це застосування мусять бути пристосовані для роботи з таким великим числом вузлів і вміти використовувати таку велику густину сенсорів. Густина розміщення сенсорів може бути розрахована як $\mu(R) = (N \cdot \pi \cdot R^2) / A$, де N – число розсіяних сенсорних вузлів в просторі A , R – межі трансмісії. На основі $\mu(R)$ визначають число вузлів, що знаходяться в напрямку трансмісії для кожного вузла в просторі A .

Середовище роботи. Сенсорні мережі можуть працювати в різноманітних, часом екстремальних умовах – під великим тиском, у важких промислових чи температурних умовах. Тому ми можемо розмістити їх в

таких місцях, як наприклад:

- дороги і перехрестя;
- всередині обладнання;
- океани;
- місця біологічного і хімічного забруднення ґрунту;
- на диких тваринах, для моніторингу їх збереження;
- у великих промислових складах;
- у важкодоступних місцях.

Витрати. Оскільки сенсорні мережі складаються з величезного числа сенсорних вузлів, витрати для реалізації одиничного вузла мають величезне значення для загальних витрат всієї мережі. Щоб використання сенсорних мереж в промислових застосуваннях мало сенс, вартість одиничного вузла мусить бути мінімальною.

Споживання енергії. У сенсорних мережах на основі безпроводного середовища споживання енергії має дуже велике значення. Сенсорні вузли можуть бути оснащені досить обмеженим джерелом енергії (<0,5Ah, 1,2V) [4]. У багатьох застосуваннях немає можливості замінити джерела енергії, через що час життя вузла дуже сильно залежить від ресурсів батареї. Крім того, у сенсорних мережах з послідовною передачею даних кожен вузол повинен виконувати подвійну роль - як джерело даних і даних маршрутизації. Тому втрата функцій декількох вузлів може мати значний вплив на зміни топології, а також вимагати дані для повторної маршрутизації і реорганізації всієї мережі. У зв'язку з цим збереження енергії і відповідне нею управління має величезне значення і у фазі проектування.

Середовище передачі. У сенсорних мережах комунікація між вузлами проводиться через безпроводний простір: радіохвилі, інфрачервоні хвилі або оптичне середовище. У випадку радіохвиль сенсори використовують смугу ISM (*ang. Industrial, Scientific and Medical*), яка доступна безкоштовно в більшості країн.

Іншою можливістю комунікації між вузлами в сенсорних мережах є застосування інфрачервоних хвиль. Передача за допомогою інфрачервоних хвиль також не ліцензується, а також не має інтерференції з іншим обладнанням. Проте головною вадою інфрачервоних хвиль як середовища передачі є вимога збереження прямої видимості між відправником і одержувачем (*ang. a line of sight*).

Нетипові вимоги застосувань сенсорних мереж показують, що вибір середовища передачі є важливою задачею. Щоб трансмісія між вузлами була ефективна і не порушувалась іншим обладнанням, окрім вибору середовища передачі потрібно застосовувати ефективну модуляцію і кодування.

Архітектура і топологія сенсорних мереж. Архітектура сенсорних мереж неструктурована (розсіяна) і в спрощеній формі представлена на рис.1.

Кожен з розсіяних сенсорів повинен збирати інформацію, а надалі пересилати її до головного (*ang. sink*) вузла, який є сполучною ланкою між

сенсорами у вимірювальному полі і кінцевим користувачем.

Топологія. Сенсорна мережа складається з дуже великого числа вузлів, які часто можуть бути недоступні або пошкоджені. Саме тому топологія сенсорної мережі змінюється дуже часто і управління нею є досить складним завданням. Способом розв'язання цієї проблеми є розміщення відповідно великого числа вузлів, поступовий обмін їх функцій, а також застосування спеціальних протоколів маршрутизації, що відповідає завданням і умовам, в якій працює мережа.

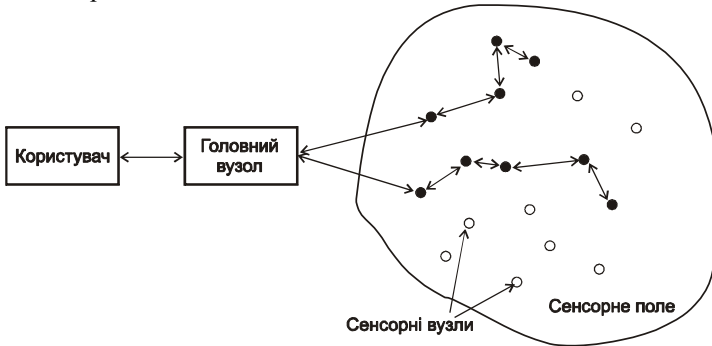


Рис.1. Архітектура сенсорної мережі

Комунікаційні протоколи в сенсорних мережах

Хоча сенсорні мережі підтримують зв'язок з використанням перш за все радіохвиль, проте протоколам і алгоритмам, що використовуювані в традиційних безпроводних мережах ad-hoc, немає відповідності в сенсорних мережах. Обидва види мереж відрізняються в наступних аспектах:

- вузли сенсорної мережі набагато густіше розміщені;
- вузли сенсорної мережі мають схильність до пошкоджень;
- топологія сенсорної мережі змінюється дуже часто;
- вузли сенсорної мережі підтримуються зв'язок швидше через повідомлення, а вузли в мережі ad-hoc – організують зв'язок типу точка-точка;
- сенсори мають значні обмеження відносно обчислювальних можливостей, енергетичних ресурсів і пам'яті;
- сенсорні вузли не володіють глобальними ідентифікаторами, такими як, наприклад, адреса IP;
- сенсорні мережі використовуються для виконання специфічних завдань, в той час коли мережі типу ad-hoc в основному для комунікаційних завдань.

Для поєднання протоколів, що виступають в сенсорних мережах подібно як і у випадку комп'ютерних мереж, вводиться модель рівнів [1], представлена на рис. 2.

Ця модель містить наступні рівні: застосування, транспортний, мережний, каналу даних, фізичний, а також площини: управління енергією,

мобільного управління (переміщенням) і управління завданням.

Площини управління: енергією, переміщенням і завданнями

Площина управління енергією повинна перш за все контролювати використання енергії сенсорним вузлом. Наприклад, сенсор може вимикати приймач після отримання інформації від своїх сусідів, що запобіжить повторенню даних. Також у випадку, коли рівень енергії у вузлі є низьким, вузол може переслати інформацію до своїх сусідів про енергію, що вичерпується і припинити участь в пересиланні інформації. Тоді решта енергії буде збережена для проведення власних завдань вузла.

Площина мобільного управління (переміщенням) використовується головним чином в мобільних застосуваннях і концентрується на вияві і реєстрації переміщення вузлів в мережі. Завдяки ній сенсорні вузли знають, які сусіди існують в даний момент і можуть співставляти використання енергії і виконання завдань.

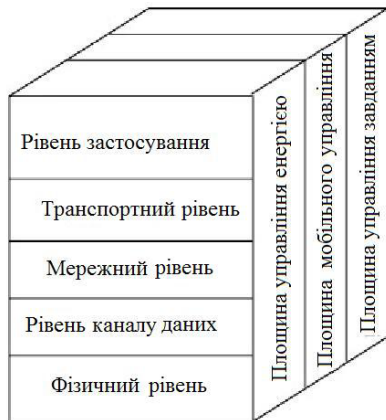


Рис.2. Модель рівнів для сенсорних мереж [1]

Завданнями площини управління є зіставлення і планування вимірювань для визначеного вимірювального поля. Не всі сенсори в даному вимірювальному просторі мусять проводити завдання одночасно і з однаковою частотою. Все залежить від енергетичних ресурсів даного вузла, що робить функціонування мережі ще більш ефективним.

Всі площини надзвичайно необхідні, щоб вузли могли взаємодіяти енергетично ефектно, маршрутизувати дані в мобільних мережах і ділити ресурси між собою. Без цих площин кожен сенсор функціонував би індивідуально, що з точки зору ефективності мережі є небажаною ситуацією.

Рівень застосування, це рівень, що зараз розвинутий найменше, проте в подальшому розвитку сенсорних мереж можна власне в ньому чекати виникнення багатьох нових протоколів. Нижче представлено три найважливіші для цього рівня протоколи: *Sensor Management Protocol (SMP)*, *Task Assignment and Data Advertisement Protocol (TADAP)* а також *Sensor*

Query and Data Dissemination Protocol (SQDDP).

Протокол *SMP* служить для забезпечення можливості комунікації з сенсорною мережею за допомогою, наприклад, мережі Інтернет. Додатково забезпечує виконання наступних адміністративних завдань:

- обмін інформацією, пов'язаною з алгоритмами пошуку положення вузла;
- забезпечення синхронізації між вузлами;
- включення і виключення вузла;
- аутентифікація і забезпечення безпеки під час трансмісії;
- перевірка і зміна конфігурації сенсорного вузла.

Протокол *TADAP* дозволяє адміністраторові видати запит до вузла або до групи вузлів сенсорної мережі про, наприклад, вимірювання певної величини в атмосферному явищі.

Інший протокол опитування *SQDDP* дозволяє видати запит до сенсорної мережі, базуючись на конкретному атрибуті даних чи локалізації, – наприклад, вказівка локалізації – де в сенсорній мережі виміряна температура більша ніж 25° С.

Головними завданнями *транспортного рівня* є забезпечення взаємодії рівня застосування і рівня мережі шляхом мультиплексування і демультиплексування, а також надання механізмів передачі даних між сенсорними вузлами і головним вузлом з використанням механізму контролю помилок, пристосованого до вимог безвідмовності, що ставляться рівнем застосування. Крім того, важливим завданням є контроль величини трафіку в мережі і проведення механізму контролю перевантажень.

Враховуючи орієнтацію мережі на певне застосування, основний сенсорний трафік проходить від сенсорів, які проводять вимірювання, до головного вузла. Зворотний шлях від головного вузла до сенсорів заброньований для інформації, що управляє мережею, команд чи запитів. У обох випадках можна говорити про різні рівні безвідмовності постачання даних. У випадку даних, що генеруються сенсорами, немає потреби застосування особливих механізмів постачання, тому що враховуючи кореляцію великого числа даних, застосування, побудоване на сенсорній мережі, завжди має їх надлишок. Застосування, наприклад, механізму підтвердженнь значно збільшило б трафік в мережі, що могло б привести до заторів, а також, враховуючи збільшене число трансмісій, знизило б енергетичну ефективність мережі, а далі час функціонування мережі.

У випадку даних, що генеруються головним вузлом, вимагається значно вищий рівень надійності. Під час поширення інформації від головного вузла вимагається практично 100% гарантія постачання інформації. Враховуючи ці розходження, були спроектовані два різні протоколи транспортного рівня: *Event-to-Sink Reliable Transport (ESRT)* та *Pump Slowly Fetch Quickly (PSFQ)*.

• Протокол *ESRT* базується на трафіку даних від сенсорів до головного вузла. Неперервно контролює можливість пошкодження, змінюючи запитами частоту відповіді вузлів, а тому надає дуже ефективний енергетично і

безвідмовний механізм детектування відмов. Додатково має механізм контролю заторів в мережі і не вимагає ідентифікації сенсорів. Оскільки алгоритм вводиться в дію в основному на головному вузлі, то мало навантажує ресурси сенсорів.

- Механізм *PSFQ* забезпечує безвідмовний транспорт запитів, конфігурації чи команд з головного вузла до сенсорів. Базується на повільному проведенні пакетів по мережі, але з отриманням повторних даних від вузла у випадку їх втрати. Тому кожен вузол мусить містити деяку пам'ять, зберігаючи дані на випадок їх втрати в наступній фазі трансмісії.

Мережевий рівень. відповідає за маршрутизацію даних, представлених транспортним рівнем. Протоколи, діючі в цьому рівні, є дуже важливим предметом і будуть розглянуті далі.

Функціонування **рівня каналу даних** забезпечує мультиплексування потоків даних, виявлення фрейму даних, визначаючого доступ до носія, а також контроль помилок. Подібно як і у вищих рівнях моделі, специфічні властивості сенсорних мереж не дозволяють використати вже існуючі протоколи рівня каналу даних. Тому існуючі протоколи були піддані модифікації або розроблені заново. Нижче представлені протоколи і відповідні механізми контролю доступу до носія і контролю помилок.

Протоколи доступ до носія (*ang. Medium Access Control – MAC*) мають два основні завдання: визначення можливості трансмісії, а також ефективний і справедливий спосіб регулювання доступу до спільно використовуваного середовища для всіх вузлів сенсорної мережі. Очевидно, що протоколи *MAC* для сенсорних мереж мусять бути енергетично ошадні, управляти нобільністю вузлів, а також відпрацьовувати пошкодження в мережі. Запропоновані такі рішення для рівня каналу даних, що базуються на вже існуючих:

- *TDMA (ang. Time Division Multiple Access)*. В [6] було показано, що у випадку коли радіомодуль не включений весь час, що має місце в сенсорних мережах, то протокол доступу до носія на основі *TDMA* найбільш ефективний енергетично. На цій підставі був створений спеціалізований протокол *Self-organizing Medium Access Control for Sensor networks (SMACS)*, який призначає часові щілини вузлам сенсорної мережі. Кожен сенсор в мережі отримує таблицю *TDMA*, яка інформує його, в якій часовій щілині можна домовлятися зі своїм сусідом. Протокол економить енергію шляхом випадкового включення вузла під час фази трансмісії і вимикання радіомодуля під час стану бездіяльності. Недоліком протоколу є необхідність часової синхронізації всіх вузлів.

- Гібрид *TDMA/FDMA (ang. Time Division Multiple Access/Frequency Division Multiple Access)*. Іншим способом доступу до середовища в сенсорній мережі є поєднання техніки *TDMA* з *FDMA* або використання доступу до середовища за технологією *GSM*. Ця техніка має декілька істотних переваг, між якими: низьке споживання енергії і оптимальний розподіл каналів. Оптимальне число каналів залежить від відношення споживання енергії

передавачем до споживання енергії приймачем.

- *CSMA (ang. Carrier Sense Multiple Access)* - протокол рівня каналу даних, добре відомий з мережі Ethernet. Для сенсорних мереж, застосований після певних змін, але також складається з двох механізмів: прослуховування і *backoff*-у, або визначення способу очікування на доступ до носія. Крім того протокол містить механізм *Adaptive Transmission Rate Control (ARC)*, який забезпечує справедливий доступ до середовища. Він забезпечує контроль середовища, завдяки чому відсутня ситуація, в якій вузлам, що знаходяться ближче до головного вузла надається перевага. *ARC* контролює також кількість висланих вузлом даних і у певних випадках шляхом сигналізації наказує зменшити цю величину.

Іншою дуже важливою функцією рівня каналу даних є контроль помилок. У деяких застосуваннях сенсорних мереж, наприклад, при стеженні за транспортними засобами, контроль помилок є ключовим моментом. Були запропоновані два механізми контролю помилок: *Automatic Repeat Request (ARQ)*, а також *Forward Error Correction (FEC)*.

Фізичний рівень відповідає за вибір робочої частоти, генерацію носія і його модуляцію, детектування сигналу, а також зашифрування даних. Безпроводна комунікація досить вразлива внаслідок дії явищ, наприклад, дифракції чи відбиття несучих хвиль, завмирання сигналу чи багатошляховості. З багатьма цими проблемами зустрічаються також в інших системах безпроводної комунікації і тому відомі способи їх розв'язання. В загальному, завдяки забезпеченню відповідної густоти вузлів в мережі, можна практично усунути ці ефекти, а мережа стане ефективною і енергоощадною.

Висновки

Гнучкість, стійкість до помилок, велика чутливість вимірювань, низькі витрати і легкість в розміщенні сенсорних мереж породили величезне поле можливостей їх застосування. Можна стверджувати, що в недалекому майбутньому сенсорні мережі і базові застосування на їх основі будуть невід'ємною частиною нашого життя. Проте в даний момент необхідний подальший розвиток наукових досліджень для подолання певних обмежень, існуючих в сенсорних мережах (споживання енергії, обмеження обладнання).

1. *Callaway E.H.* Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols. – New York: CRC Press LLC, 2004. 350 p.
2. *Rishi Pidva* "Security in Wireless Sensor Networks" (March 3 2003 http://www.cs.wmich.edu/wsn/doc/spins/Pidva_SPINS.pdf)
3. *Тимченко О.В., Зеляновський М.Ю.* Методи і протоколи обміну даними сенсорних мереж // Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.46. – К.: 2008. – С. 176-183.
4. *Зеляновський М.Ю., Тимченко О.В.* Способи синхронізації та забезпечення автономного живлення вузлів сенсорних мереж з бездротовим доступом // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.52. – К.: 2009. – С. 201-208.

5. Зеляновський М.Ю., Тимченко О.В. Засоби для моделювання спеціалізованих та сенсорних мереж бездротового доступу: симулятор SHAWN // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ПІМЕ НАН України. – Вип.54. – К.: 2009. – С. 52-62.
6. Зеляновський М.Ю., Тимченко О.В. Математичні моделі для спеціалізованих та сенсорних мереж бездротового доступу // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ПІМЕ НАН України. – Вип.50. – К.: 2009. – С. 192-200.

Поступила 18.08.2010р.

УДК 004.942

М.Ю. Лесів¹

АНАЛІЗ ЗМІН В НЕВИЗНАЧЕНОСТЯХ РЕЗУЛЬТАТІВ ІНВЕНТАРИЗАЦІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ВІД СПАЛЮВАННЯ ВИКОПНОГО ПАЛИВА

Summary. Mathematical apparatus for analysis of changes in uncertainties in results of greenhouse gas inventory due to increased knowledge of emission processes and structural changes in emissions is presented. Historical change in uncertainty is analyzed; projections of uncertainty are made for 15 European Union Member States for the year 2020 using today's knowledge of emission processes and different emission scenarios.

Keywords: uncertainty, greenhouse gas inventory, energy sector, fossil fuel.

Анотація. Представлено математичний апарат для аналізу змін в невизначеностях результатів інвентаризації парникових газів, викликаних як покращенням знань про емісійні процеси, так і структурними змінами в емісіях. Проаналізовано зміни в невизначеностях інвентаризацій у минулому, а також здійснено прогнозування невизначеності інвентаризацій для 15 країн Європейського Союзу на 2020 рік, використовуючи теперішні знання про емісійні процеси та різноманітні емісійні сценарії.

Ключові слова: невизначеність, інвентаризація парникових газів, енергетичний сектор, викопне паливо.

Вступ. Сьогодні немає достатньо досвіду для оцінювання невизначеностей результатів інвентаризації парникових газів. Тому актуальними є дослідження, які дають можливість зрозуміти причини зміни невизначеностей у минулому, а це, в свою чергу, дозволить прогнозувати невизначеності результатів інвентаризації у майбутньому, а також покращити

¹ Національний університет "Львівська політехніка"