

УДК 621.311

**Трач Б. В.,
Лисенко О. І.,**д.т.н., професор,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»**АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОТОКОЛУ
BIDIRECTIONAL FORWARDING DETECTION ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
НАДІЙНОСТІ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ**

Анотація. У роботі розглядаються безпроводові сенсорні мережі, проводиться дослідження можливості застосування протоколу BFD для підвищення надійності безпроводових сенсорних мереж, надаються рекомендації по застосуванню протоколу BFD у безпроводових сенсорних мережах.

Ключові слова: безпроводова сенсорна мережа, надійність, виявлення відмови.

**Трач Б. В.,
Лысенко А. И.,**д.т.н., професор,
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОТОКОЛА
BIDIRECTIONAL FORWARDING DETECTION ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ
НАДЕЖНОСТИ БЕЗПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ**

Аннотация. В работе рассматриваются беспроводные сенсорные сети, проводится анализ возможности использования протокола BFD для увеличения надежности беспроводных сенсорных сетей, предоставляются рекомендации по использованию протокола BFD в беспроводных сенсорных сетях.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, надежность, обнаружение отказа.

**Trach B.V.,
Lysenko O.,**Doctor of Science, engineer, professor
National Technical University of Ukraine
"Kyiv Polytechnic Institute"**ANALYSYS OF APPLICABILITY OF THE
BIDIRECTIONAL FORWARDING DETECTION PROTOCOL
FOR INCREASING RELIABILITY OF WIRELESS SENSOR
NETWORKS**

Annotation. The paper reviews wireless sensor networks, provides analysis of applicability of the BFD protocol for improving reliability of wireless sensor networks, and provides guidelines for implementing BFD in wireless sensor networks .

Keywords: wireless sensor network reliability, identify failure.

Вступ. На даний момент безпроводові сенсорні мережі є важливим інструментом дослідження фізичного світу. Їх важливість пов'язана з новими можливостями використання, що обумовлені такими характеристиками БСМ, як відсутність необхідності у кабельній інфраструктурі, мініатюрність вузлів, низьке споживання електроенергії, вбудований радіоінтерфейс, досить висока обчислювальна здатність, порівняно невелика вартість. Все це зробило можливим їх широке застосування у багатьох сферах людської діяльності з метою автоматизації процесів збору інформації, моніторингу, контролю характеристик різноманітних технічних та природних об'єктів [1]. У той же час, важливим для сенсорних мереж є питання, пов'язані із енергоспоживанням, що обумовлені необхідністю автономного функціонування. Таким чином, постає задача оптимізації використання наявних ресурсів. Крім того, до безпроводових сенсорних мереж висуваються вимоги по забезпеченню певної надійності функціонування, особливо у сферах, де відмова або затримка у доставці інформації про певне явище може мати критичні наслідки. Так, у сферах ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, медичних застосуваннях надійність мережі є надзвичайно важливою. Для підвищення надійності можливе застосування спеціалізованих протоколів, наприклад BFD (Bidirectional Forwarding Detection) [2]. Всі ці аспекти ускладнюють їх архітектуру та часто вимагають розробки спеціалізованих рішень.

Безпроводова сенсорна мережа (БСМ) – це розподілена система необслуговуваних мініатюрних електронних пристроїв (вузлів мережі), які здійснюють збір даних про параметри зовнішнього середовища і передачу їх на базову станцію за допомогою ретрансляції від вузла до вузла за допомогою бездротового зв'язку. Декілька вузлів такої мережі виступають у якості шлюзів, що виконують прийом-передачу інформації користувачам сенсорної мережі. Основу мережі становлять її вузли - сенсори - що мають можливість вимірювання фізичних параметрів середовища відповідно до задачі, що ставиться перед мережею, наприклад температуру, тиск, тощо. Крім того, сенсор містить мікроконтролер, пам'ять, радіопередавач, автономне джерело живлення і іноді виконавчі механізми (див. Рисунок 1). Можлива також передача керуючих впливів від вузлів мережі до зовнішнього середовища. Сенсорні вузли можуть закріплюватися стаціонарно, а також мати відносну мобільність, тобто довільно переміщатися один щодо одного в деякому просторі, не порушуючи при цьому логічної пов'язаності мережі. В останньому випадку сенсорна мережа не має фіксованої постійної топології, і її структура динамічно змінюється.

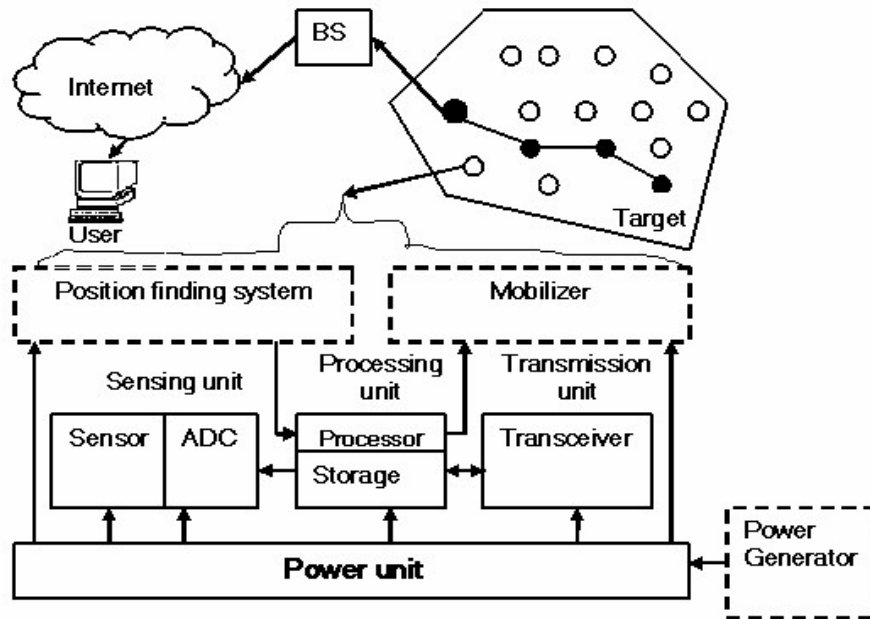


Рисунок 1 - Структура сенсорної мережі

Крім того, вузли мають можливість місцевої обробки даних від датчиків, що дозволяє приймати рішення про необхідність передачі інформації на шлюз, та визначення підмножини інформації, що має бути передана. Окрім функцій збору інформації про фізичні явища, вузли виступають у якості маршрутизаторів, що забезпечують зв'язність передачі інформації від територіально віддалених сенсорів до вузлів-шлюзів. При цьому враховуються обмеження з боку енергоспоживання, обчислювальних можливостей, пропускної здатності радіоканалів. Ці аспекти можуть обмежувати здатність мережі до масштабування, вимагаючи застосування більшої кількості шлюзів для покриття більшої площі спостереження. 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.

Основні цілі функціонування бездротової сенсорної мережі (БСМ):

- Вимірювання значень фізичних величин;
- Реєстрація виникнення явищ, що викликають зацікавлення та визначити параметри зафіксованих подій;
- Класифікація та відслідковування об'єктів;

Таким чином, важливими вимогами до БСМ є:

- здатність до масштабування по площі та кількості сенсорів;
- надійність системи;
- оптимальне розміщення стаціонарних датчиків;
- низьке енергоспоживання;
- самоорганізація;
- спільна обробка сигналів;

– здатність працювати за запитами.

Решта даної статті організована наступним чином. У розділі 2 міститься застосування сенсорних мереж, у розділі 3 міститься загальний опис протоколу BFD, у розділі 4 проводиться аналіз можливості застосування протоколу BFD для підвищення надійності БСМ, у розділі 5 – висновки.

Застосування сенсорних мереж. Безпроводові сенсорні мережі можуть застосовуватись у великій кількості систем, що характеризуються різними вимогами. Так, сенсорні мережі можуть застосовуватись у екологічному моніторингу, у домашніх мережах типу "Розумний будинок", у зонах стихійних лих, тощо. Потенційно можливі наступні застосування безпроводових сенсорних мереж:

1. Військове застосування:
 1. дослідження військової обстановки;
 2. моніторинг державних кордонів;
 3. слідкування за рухомими об'єктами;
 4. спостереження за полем бою.
2. Застосування у зоні надзвичайних ситуацій:
 1. вимірювання забруднення атмосфери;
 2. датчики рівня води/радіації;
3. Екологічний моніторинг
 1. моніторинг стану ґрунту та води;
 2. дослідження природних середовищ;
 3. спостереження за біологічними та штучними системами.
4. Автоматизація виробничих процесів
 1. спостереження за станом промислових установок;
 2. збір інформації про проходження виробничого процесу.
5. Автомобільні мережі
 1. збір інформації про підсистеми автомобіля;
 2. контроль за станом дорожнього покриття;
 3. надання важливої інформації водію.

Можливі і інші застосування, наприклад у медицині, метеорології, агрономії, тощо. У багатьох з цих застосувань є важливим надійність мережі, адже наслідки у випадку відсутності інформації про явище можуть бути критичними. Протоколи динамічної маршрутизації підвищують надійність шляхом переобчислення маршрутів у випадку втрати зв'язності, однак ці дії виконуються тільки після виявлення відмови вузла або каналу. Для прискорення виявлення відмови застосовується протокол BFD.

Огляд протоколу BFD. BFD — простий протокол обміну Hello-повідомленнями, що у багатьох аспектах схожий на механізми виявлення відмов у відомих протоколах маршрутизації [2, 3]. Дві системи періодично передають BFD-пакети через кожен шлях між цими системами, і якщо система не одержувала BFD-пакети протягом досить довгого часу,

вважається, що відмовив певний компонент цього двостороннього шляху. За деяких умов системи можуть узгодити припинення періодичного розсилання BFD-пакетів для зменшення використання смуги пропускання мережі.

BFD працює з будь-яким протоколом передачі даних (канального, мереже-

вого рівня, тунелів), що працює між двома системами. Єдиний режим роботи — унікаст, точка-точка. Пакети BFD передаються як навантаження пакетів протоколів канального і вищих рівнів, що застосовуються у мережі. BFD може працювати одночасно на декількох рівнях еталонної моделі OSI. Контекст, у якому працює протокол, визначається рівнем OSI, на якому відбувається інкапсуляція.

Шлях вважається функціонуючим лише у випадку, якщо між системами встановлено двосторонній зв'язок, хоча це не виключає використання однонаправлених ліній. Окрема сесія BFD створюється для кожного шляху і кожного протоколу між двома системами.

Кожна система оцінює, з якою швидкістю вона може виконувати прийом та передачу пакетів BFD для досягнення згоди із сусідніми системами про швидкість виявлення відмови. Ці оцінки можуть мінятися у режимі реального часу для адаптації до незвичайних умов. Це дозволяє швидким системам, що працюють у спільному середовищі передачі, у якому наявні повільніші системи, швидше виявляти відмови між швидкими системами, в той час як повільніші системи будуть брати участь у роботі протоколу у мірі своїх можливостей.

Сесія BFD встановлюється на основі потреб додатку, що використовує цей протокол. Прийняття рішення про необхідність задіяти BFD та вибір системи адресації залежить від додатку, що його використовує. У протоколі не передбачено жодного протоколу виявлення сусідніх систем. Наприклад, реалізація протоколу OSPF може прийняти рішення про встановлення сесії BFD із сусідньою системою, виявленою через механізм Hello-повідомлень протоколу OSPF.

BFD має два режими функціонування, які можуть бути обрані користувачем, а також додаткову функцію, що може застосовуватись у комбінації з цими двома режимами. Основний режим — асинхронний. У цьому режимі системи періодично обмінюються пакетами управління BFD Control, і якщо певна кількість цих пакетів не була одержана іншою системою, сесія оголошується розірваною. Інший режим функціонування — режим за запитом. У цьому режимі припускається, що у системі є інший незалежний спосіб виявлення втрати зв'язку із сусідньою системою. Коли сесія встановлена, система що функціонує у цьому режимі може відправити сусідній системі запит на припинення обміну повідомленнями BFD Control. У випадку, коли у системі є потреба явно перевірити зв'язність із сусідньою системою, виконується обмін короткою

послідовністю пакетів BFD Control. Режим запиту може працювати або незалежно у різних напрямках, або одночасно.

Крім того, у протоколі передбачена ехо-функція. Коли ехо-функція активна, послідовність ехо-пакетів BFD передається на сусідню систему, і сусідня система передає їх у зворотньому напрямку через свій шлях комутації пакетів. Якщо певна кількість пакетів втрачена, сесія оголошується розірваною. Ехо-функція може працювати як у режимі запитом, так і у асинхронному режимі. Оскільки ехо-функція виконує функцію виявлення відмови, періодичний обмін пакетами управління може проходити зі зниженою швидкістю (у випадку асинхронного режиму), або бути повністю припиненим (у випадку режиму запитом).

Перевагою чистого асинхронного режиму є те, що йому необхідна в два рази менше пакетів, щоб досягнути того ж часу виявлення відмови, ніж у випадку застосування ехо-функції. Він також застосовується у випадку, коли застосування ехо-функції з певних причин неможливе.

Перевагою застосування ехо-функції є те, що вона дозволяє провести повну діагностику шляху комутації пакетів до віддаленої системи. Це дозволяє досягнути нижчих часів виявлення відмов, а також потенційно дозволяє виявити деякі види відмов, що у іншому випадку було б неможливо виявити.

Ехо-функція може застосовуватись незалежно у кожному напрямі. Її застосування можливе лише у випадку, якщо віддалена система дозволяє її використання, а локальна система прийме рішення про необхідність такої перевірки.

Режим запитом корисний у випадку, коли пропускна здатність обмежена, і виділення її частини для функціонування протоколу неможливе. Це може мати місце у системі з великою кількістю сесій BFD. Він також корисний у випадку, коли застосовується ехо-функція у двосторонньому режимі. Недоліком є те, що час виявлення відмови фактично залежить від евристик реалізації системи виявлення відмови і невідомий протоколу BFD. Режим запиту неможливо застосувати у випадку, коли двостороння затримка при передачі більша за бажаний час виявлення відмови, бо за цих умов протокол не буде працювати коректно.

Особливості застосування протоколу BFD у безпроводових сенсорних мережах. Як можна побачити з опису, протокол BFD досить гнучкий для застосування у безпроводових сенсорних мережах. Однак для його успішного застосування необхідно виконати адаптацію до характеристик БСМ, а саме: виявлення сусідніх систем, споживання електроенергії. На основі цього можна прийняти рішення про вибір режиму функціонування протоколу BFD, застосування ехо-функції.

Для економії енергетичних ресурсів у вузлах безпроводових сенсорних мереж виконується перехід у стан "сну", протягом якого вузол може не виконувати вимірювання, обчислення, зв'язок з сусідніми

системами, або будь-яку комбінацію з цих способів енергозбереження [4]. З цього можна зробити висновок, що асинхронний режим не відповідає вимогами безпроводових сенсорних мереж, адже його використання вимагає живлення мікроконтролера та передачі даних з малими інтервалами, що не даватиме змоги вузлу перейти у ошадний режим. Застосування ехо-функції також недоцільне через потребу у неперервній передачі великого обсягу даних. При цьому можливе використання як асинхронного режиму, так і ехо функції на вузлах-шлюзах, адже у випадку втрати зв'язку з мережею обробки даних інформація буде недоступною протягом довгого часу, тому необхідна швидка реакція на втрату зв'язку. Для всіх інших вузлів доцільним є застосування режиму за запитом, що дозволяє виконувати перевірку зв'язності тільки перед передачею даних сенсорів. При цьому у якості події, що сигналізує перевірку зв'язку, можна застосовувати сигнал від системи позиціонування про переміщення, або від сенсора якщо є необхідність підготуватись до передачі даних.

Крім того, постає проблема виявлення сусідніх систем та вибору адресації для організації роботи протоколу BFD. Так, у випадку застосування мережі, організованої за протоколом ZigBee [5, 6], є можливість використати інформацію про джерела протокола маршрутизації AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing) для адресації та виявлення сусідів. При застосуванні інших спеціалізованих алгоритмів маршрутизації функцію виявлення сусідів також може реалізовувати протокол маршрутизації [7]. Слід зазначити, що алгоритми на основі flooding зазвичай не потребують BFD, адже дані у будь-якому випадку передаються всім сусіднім вузлам.

З урахуванням вищевказаного матеріалу можна зробити висновок про можливість застосування протоколу BFD у безпроводових сенсорних мережах.

Висновки. Сенсорні мережі є багатообіцяючими у області збирання інформації із віддалених місць. Ця сфера телекомунікацій розвивається, що пропонує багато простору для досліджень. Одним з напрямків дослідження є методи підвищення надійності безпроводових сенсорних мереж, що є важливим для багатьох способів застосування БСМ. У цій статті проаналізовано можливість підвищення надійності БСМ за допомогою протоколу BFD, що дозволяє підвищити швидкість виявлення відмови та прискорити відновлення зв'язності у мережі. Зроблено висновок про доцільність застосування на звичайних вузлах режиму BFD за запитом, а на вузлах-шлюзах - асинхронного режиму BFD. При цьому важливим є адаптація BFD до способів аدرسациї та виявлення сусідніх систем, що застосовуються у безпроводових сенсорних мережах.

Використані джерела інформації:

1. Akyildiz I., Weilian S., Sankaraubramaniam Y., and Cayirci E. (2002), “A Survey on sensor networks”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, pp. 102 - 114.
2. Katz D. and Ward D. (2010), “RFC 5880: Bidirectional Forwarding Detection (BFD)”, *Internet Engineering Task Force*, vol. 1, available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc5880> (Accessed 12.02.2015).
3. Katz D. and Ward D. (2010), “RFC 5882: Generic Application of Bidirectional Forwarding Detection (BFD)”, *Internet Engineering Task Force*, vol. 1, available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc5882> (Accessed 12.02.2015).
4. Doumit S. and Agrawal D. (2002), “Self-Organizing and Energy-Efficient Network of Sensors”, *Proceedings of IEEE MILCOM 2002*, vol. 2, pp. 1245-1250.
5. Gutierrez J., Naeve M., Callaway E., Bourgeois M., Mitter V. and Heile B. (2001), “IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Power Low-Cost Wireless Personal Area Networks”, *IEEE Network*, vol. 15, no. 5, pp. 12-19.
6. Callaway E., Gorday P., Hester L., Gutierrez J., Naeve M., Heile B. and Bahl V. (2002), “A Developing Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 6, pp. 70-77.
7. Shen C., Srisathapornphat C. and Jaikao C. (2001), “Sensor Information Networking Architecture and Applications”, *IEEE Personal Communications*, vol. 8, no. 4, pp. 52-59.

References:

1. Akyildiz I., Weilian S., Sankaraubramaniam Y., and Cayirci E. (2002), “A Survey on sensor networks”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, pp. 102 - 114.
2. Katz D. and Ward D. (2010), “RFC 5880: Bidirectional Forwarding Detection (BFD)”, *Internet Engineering Task Force*, vol. 1, available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc5880> (Accessed 12.02.2015).
3. Katz D. and Ward D. (2010), “RFC 5882: Generic Application of Bidirectional Forwarding Detection (BFD)”, *Internet Engineering Task Force*, vol. 1, available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc5882> (Accessed 12.02.2015).
4. Doumit S. and Agrawal D. (2002), “Self-Organizing and Energy-Efficient Network of Sensors”, *Proceedings of IEEE MILCOM 2002*, vol. 2, pp. 1245-1250.
5. Gutierrez J., Naeve M., Callaway E., Bourgeois M., Mitter V. and Heile B. (2001), “IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Power Low-Cost Wireless Personal Area Networks”, *IEEE Network*, vol. 15, no. 5, pp. 12-19.
6. Callaway E., Gorday P., Hester L., Gutierrez J., Naeve M., Heile B. and Bahl V. (2002), “A Developing Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 6, pp. 70-77.
7. Shen C., Srisathapornphat C. and Jaikao C. (2001), “Sensor Information Networking Architecture and Applications”, *IEEE Personal Communications*, vol. 8, no. 4, pp. 52-59.

Рецензент: Дубко В.О.