

О.В. Тимченко^{1,2}, д.т.н., професор,

О.О. Тимченко², аспірант,

Б.М. Гавриш², к.т.н., ст. викл.

МЕТОДИ ТА ПРОТОКОЛИ СИНХРОНІЗАЦІЇ ВУЗЛІВ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ У ЧАСІ

Розглядаються способи та засоби синхронізації вузлів мережі з безпроводним доступом, основні технології, що застосовуються в існуючих системах для синхронізації часу, описані моделі поведінки локальних годинників, а також взаємодії пристроїв мережі; проведено класифікацію методів та існуючих підходів до синхронізації часу в безпроводних сенсорних мережах, а також пояснюється необхідність такої синхронізації.

Ключові слова: синхронізація, протоколи синхронізації, безпроводні сенсорні мережі

The considers ways and means of synchronizing network nodes with wireless access, the basic technologies used in existing systems for timing, describes the models of behavior of local clocks, as well as the interaction of network devices, the classification of methods and existing approaches to time synchronization in wireless sensory networks , and also the need for such synchronization is explained.

Keywords: synchronization, synchronization protocols, wireless sensor networks

Вступ

Безпроводні сенсорні мережі (Wireless sensor networks, WSN) складаються з великої кількості вузлів, які збирають інформацію про навколишнє оточення, обробляють і передають дані по радіоканалу. Час збору і період передачі може змінюватись від одиниць мілісекунд до кількох годин. Як правило, зміни оточення фіксуються в часі, що вимагає синхронізації та прив'язки часових міток вузлів. Крім того, висока точність локальних годинників також необхідна для забезпечення взаємодії вузлів мережі, які з метою економії енергії більшу частину часу перебувають у сплячому режимі і на зв'язок виходять тільки періодично [1].

Методи синхронізації часу для традиційних розподілених систем виявляються не доцільно застосовувати до WSN, зважаючи на специфіку принципів організації сенсорних мереж (малопотужна елементна база, самоорганізація мережі), а також особливостей застосування (вузли можуть

¹ Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

² Українська академія друкарства

не лише стаціонарними а і розташовуватися на рухомих об'єктах). При побудові схем синхронізації часу слід враховувати особливості організації сенсорних мереж:

- комунікаційні, енергетичні та обчислювальні ресурси в сенсорних мережах обмежені,
- масштабованість сенсорних мереж,
- інфраструктура синхронізації в сенсорних мережах,
- конфігурація вузлів сенсорної мережі,
- джерела похибки синхронізації.

Мета роботи – проаналізувати основні технології, що застосовуються в існуючих системах для синхронізації часу; описати моделі поведінки локальних годинників, а також взаємодії пристроїв мережі; провести класифікацію задач синхронізації; дати огляд існуючих підходів до синхронізації часу в безпроводних сенсорних мережах.

Призначення синхронізації

У даній роботі розглядаються бездротові сенсорні мережі з автономним електроживленням вузлів. Велику частину часу сенсорні вузли знаходяться в сплячому стані і прокидаються тільки за розкладом або в умовах будь-якого відбувається події для збору інформації в залежності від зазначених цілей використання бездротових сенсорних мереж.

Очікуваний час роботи сенсорного вузла в такій мережі складає кілька років. Такий великий термін роботи досягається за рахунок імпульсного характеру роботи мережі: більшу частину часу вузли знаходяться в режимі наднизького енергоспоживання ("сну"), не роблячи ніяких дій; періодично вузли переходять в активний режим, працюють з встановленими датчиками і обмінюються даними з оточуючими вузлами. Для проведення сеансу зв'язку необхідно, щоб вузли що беруть участь в сеансі одночасно включили свої приймачі, що вимагає синхронізація їх локальних годинників. Крім того, точний час сенсорного вузла необхідний для формування часових міток даних, отриманих з давачів [2].

Синхронізований протокол надає гарантовані ділянки часу для передачі пакетів і дозволяє значно підвищити відношення витраченої енергії до кількості переданої інформації для найближчих до базової станції вузлів.

Синхронізація безпроводних сенсорних мереж з автономним живленням вузлів виражається в наявності деякого опорного часового інтервалу, який критично необхідний для коректного функціонування вузлів бездротової мережі (далі мережі) та всієї мережі в цілому. Синхронізація необхідна в мережах будь якою топологією – з ієрархією, в мережах з поділом на кластери, у мережах змішаного типу, тощо.

Таким чином, синхронізація в часі – це метод забезпечення знання про час у розподіленій системі. Синхронізація як і наявність деякого опорного часового інтервалу є критично необхідною для коректного функціонування

вузлів бездротової мережі та всієї мережі в цілому.

Синхронізація критична для ряду фундаментальних завдань, що покладаються на WSN, а саме:

- інтеграція даних – коректне опрацювання зібраних даних можливе за умови однакової шкали часу для кожного з вузлів;
- керування живленням – правильне планування та тривалість режимів сну та присутності в мережі дозволяє мінімізувати споживання енергії. Правильність такого розкладу залежить від синхронізації між логічно зв'язаними вузлами і дозволяє уникати втрати пакетів;
- диспетчеризація прийомопередачі – протоколи множинного доступу з розділом часу та їм подібні неможливо реалізувати без забезпечення синхронізації. Синхронізація дозволяє мінімізувати колізії пакетів;
- загальні – методи локалізації, захисту інформації, слідкування за переміщенням у БСМ вимагають фіксації часу замірів, здійснених сенсорами; часу надсилання чи отримання пакетів для відкидання прострочених пакетів.

Вузли мережі з автономним живленням вмикають приймач та передавач періодично. Вузли саме з таким типом живлення і складають більшу частину сенсорної мережі. Щоб не витратити марно свою енергію кожен такий вузол в найкращому випадку повинен знати в який момент передати чи прийняти пакет.

Іноколи повної синхронізації досягти неможливо, часом вона і не потрібна, оскільки від одного вузла до іншого може бути достатньо велика кількість маршрутів. Тут маємо на увазі що густота мережі є високою і відповідно ймовірність пропуску даних зменшується, адже кожен вузол має багато сусідів в радіусі дії.

Особливо важливою є синхронізація для мереж з кластерною організацією.

Вимоги синхронізації в IEEE 802.15.4

Для прикладу розглянемо синхронізацію вузлів в популярному протоколі ZigBee. Часовий поділ ZigBee базується на використанні режиму синхронізації, при якому підлеглі мережеві вузли більшу частину часу перебувають у «сплячому» стані, періодично «прокидаючись» для обміну даними з координатором або синхронізації з координатором. Координатор керує обміном, виділяє частотні канали і синхронізує обмін з періодом від 15 мс до 252 с. Обмін даними визначає пропускну здатність, час очікування черги доступу і розмір тимчасового інтервалу, на якому виключені колізії в мережі. Відповідно до стандарту, часовий інтервал доступу для кожного вузла мережі визначається або координатором, або за допомогою механізму CSMA-CA. Інтервали спокою (рис.1) відображають енергозберігаючий режим вузла-координатора, або час, відведений для вузлів які не підключені [3].

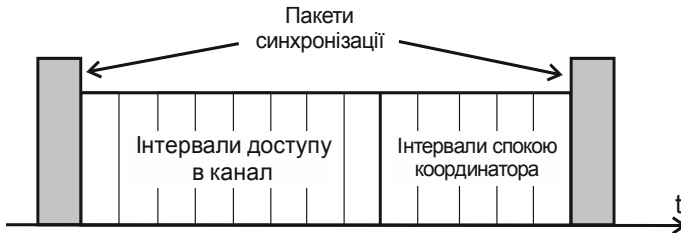


Рис.1. Синхронізація доступу в мережі ZigBee

Пакети синхронізації повинні слідувати з певними інтервалами. Синхронізований доступ дозволяє значно спростити програмну реалізацію вузла-координатора завдяки відсутності випадкових пересилань від кінцевих вузлів. Реалізація бездротової мережі можлива і без використання стека ZigBee (під стеком розуміється ієрархічний набір програм). Будь-який стек може використовувати рівні MAC і PHY стандарту IEEE 802.15.4. Стеки різних фірм несумісні між собою, більш того, їх протоколи не розкриті. Виняток становить стек SimpliTI від фірми TI, але він носить виключно ознайомчий характер, що дозволяє працювати тільки двох пристроїв. У цьому стеці ніяк не торкнулися питання синхронізації вузлів.

Методи забезпечення синхронізації

На рис.2 подано поділ методів синхронізації вузлів WSN.

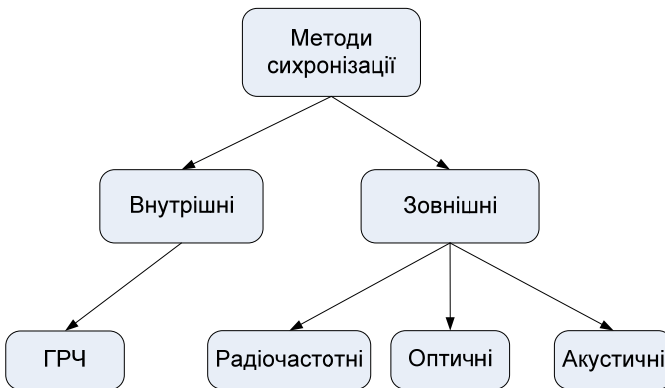


Рис.2. Класифікація методів синхронізації

Нижче розглядаються можливі способи забезпечення синхронізації між вузлами мережі відповідно до класифікації, поданої на рис.2.

1. Зовнішні радіочастотні:

- а) періодичний радіосигнал синхронізації з деякого вузла мережі. Таким способом реалізується TDMA у мережах в межах всієї мережі або окремого кластера, коли окремі вузли періодично надсилають сигнал синхронізації до інших вузлів. Недоліки: певна ймовірність недосягнення синхронізації за виділений проміжок часу, якщо інтервал між передачею пакетів достатньо великий;
- б) тактовий радіосигнал з опорного джерела, що розповсюджується на довгих хвилях (до прикладу станція DCF77, що у Франкфурті, Німеччина транслює на частоті 75,5 КГц на дальність до 2000 км). Недолік – необхідне додаткове обладнання для вузла;
- в) використання GPS – супутники постійно передають власне положення та час. Недоліки: необхідне додаткове обладнання; необхідна пряма видимість між вузлом та супутником;
- г) використання пасивних радіосистем, подібних до систем радіочастотної ідентифікації (RFID, Radio Frequency Identification). Недоліки: необхідне додаткове обладнання, поки-що недостатня дальність дії. Варто зазначити що разом із розвитком технології WREL – Wireless Resonant Energy Link (безпроводна резонансна передача електроенергії) такий спосіб отримує нові інструменти для реалізації.

2. Зовнішні оптичні:

- а) лазерні промені – можуть застосовуватися в мережах з однонапрявленою передачею даних;
- б) інфрачервоні промені – системи на зразок описаних в стандарті IrDA (Infrared Data Association) можуть в деяких режимах роботи вузла служити альтернативним засобом передачі інформації.

Обидва оптичних методи мають наступні недоліки: необхідне додаткове обладнання; необхідна пряма видимість між вузлами, вузький кут діаграми направленості, порівняно високе енергоспоживання.

3. Зовнішні акустичні:

передача звукового імпульсу на границях діапазону, що сприймається людиною.

4. Внутрішні:

надточне джерело тактових імпульсів (на зразок годинника реального часу – ГРЧ, RTC, real-time clock) у складі вузла мережі. Але навіть такий спосіб вимагає періодичної синхронізації з іншими вузлами мережі. Недолік – найчастіше додаткова інтегральна схема, оскільки джерело надточних тактових імпульсів не входить до складу мікроконтролерів, що використовуються у автономних вузлах сенсорних мереж (відповідні похибки способів синхронізації показані на рис.3).

Додаткові витрати по обладнанню вливаються в додаткові витрати по живленню. Тому деякі способи синхронізації можуть застосовуватися у вузлах з автономним живленням лише в рідкісних випадках.

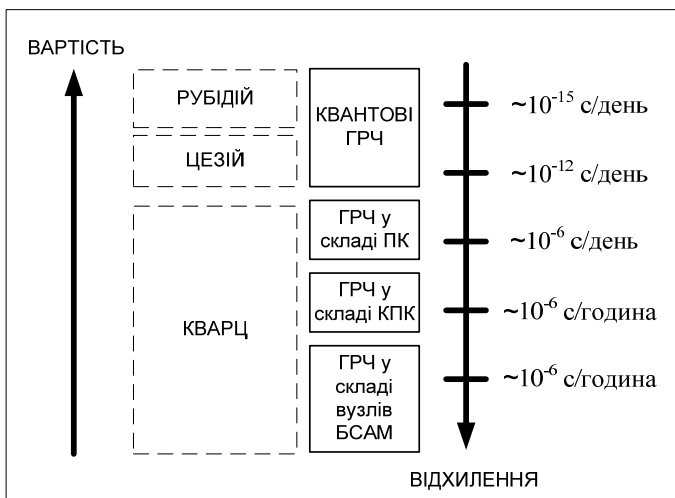


Рис. 3. Похибки для способу синхронізації за допомогою ГРЧ

Протоколи методів синхронізації

Існують протоколи синхронізації, такі, що шляхом надсилання службових пакетів дозволяють досягти певного рівня синхронізації між вузлами. В ідеальному випадку будь-який протокол синхронізації повинен працювати оптимально і забезпечувати виконання усіх без винятку вимог, що ставляться до БСМ, включаючи енергоефективність, масштабованість, детермінованість, захищеність, надійність, «витривалість», гнучкість. Складність БСМ не дозволяє оптимізувати протокол для всіх вимог одночасно [4].

Протоколи синхронізації поділяють:

За напрямленістю:

Ведучий-ведений (Master-Slave): синхронізація можлива лише після організації деревовидної топології мережі та тільки між сусідами однієї ланки

Синхронізація можлива між двома довільними вузлами мережі

За властивостями тактування:

Функціональність синхронізації у вузлі змінюється кожного разу після перебігу процесу синхронізації (зміна такту)

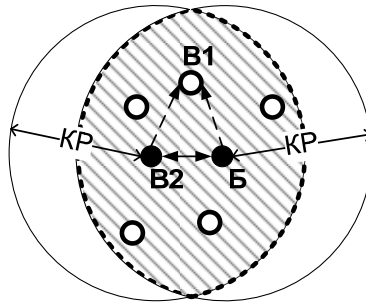
Кожен вузол має незмінне джерело тактування, використовує таблицю перетворення тактів інших вузлів.

За принципом дії.

Приймач-передавач – один з двох вузлів є джерелом тактових імпульсів, інший є його приймачем (рис.4)

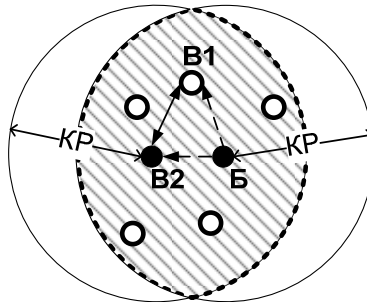
Приймач-приймач – опорний вузол надсилає сигнали синхронізації, два інші синхронізуються між собою на основі цих сигналів (рис.5)

Лише приймач – група вузлів може синхронізуватись, отримуючи сигнали синхронізації окремої пари вузлів. (рис.4).



- ← - - - Синхронізація „Лише Приймач” (стрілка вказує напрям передачі)
- ← — Синхронізація „Приймач-Передавач” (стрілка вказує напрям передачі)
- В1, В2, Б** Деякі вузли БСМ, Б – батьківський вузол у випадку синхронізації „Приймач-Передавач”
- Область дії попарної синхронізації
- КР** Комунікаційний радіус

Рис. 4. Синхронізація «Лише приймач» та «Приймач-Передавач»



- В1, В2, Б** Деякі вузли БСМ, Б – батьківський вузол
- Область дії попарної синхронізації
- КР** Комунікаційний радіус
- ← - - - Тактові сигнали з батьківського вузла (стрілка вказує напрям передачі)
- ← — Синхронізація „Приймач-Приймач” (стрілка вказує напрям передачі)

Рис. 5. Синхронізація «Приймач-Приймач»

За ступенем локалізації

Попарна – протоколи призначені для забезпечення синхронізації між парою вузлів, але поширюються на групи вузлів, що розміщені в межах комунікаційного радіусу – фізичними сусідами:

- Timing-Sync Protocol for Sensor Networks (TPSN)
- Tiny-Sync and Mini-Sync
- Reference Broadcast Synchronization (RBS)
- Flooding Time Synchronization Protocol (FTSP)

Широкомовна – протоколи призначені для синхронізації усіх, або більшості вузлів мережі.

- Extension of TPSN
 - Lightweight Time Synchronization (LTS)
 - Extension of RBS
 - Extension of FTSP
 - Pairwise Broadcast Synchronization (PBS)
 - Time Diffusion Protocol (TDP)
 - Synchronous and Asynchronous Diffusion Algorithms
 - Protocols Based on Pulse Transmissions
- Адаптивна
- Rate-Adaptive Time Synchronization (RATS)
 - RBS-Based Adaptive Clock Synchronization
 - Adaptive Multi-Hop Time Synchronization (AMTS)

Висновок

Синхронізацію вузлів мережі з бездротовим доступом можливо реалізувати, використовуючи додаткове програмне або апаратне забезпечення. Проте при цьому підвищується енергоспоживання, що може бути критичним для часу життя безпроводних сенсорних мереж.

1. *Зеляновський М.Ю., Тимченко О.В.* Інтелектуальна система для бездротових спеціалізованих сенсорних та мереж персонального радіусу дії: програмно-апаратна платформа вузла бездротової мережі // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.49. – К.: 2008. – С. 185-193.
2. *Зеляновський М.Ю.* Методи самоорганізації у спеціалізованих та сенсорних мережах бездротового доступу // Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.50. – К.: 2009. – С. 182-186.
3. *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS).* – IEEE 802.15.4 2006 Specification.
4. *Ivan Stojmenovic' (Editor).* Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures, 2005.

Поступила 27.08.2018р.