

УДК 351.321

Алексеева І.В.,

К. фіз.-мат. н., доцент;

Заруцька А.О.,

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут";

Кисельов В.Б.,

д.т.н., професор, АМУ

МЕТОД ПРЕЦИЗИЙНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ В БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ШВИДКИХ І ПОВІЛЬНИХ ЛОКАЛЬНИХ ГОДИННИКІВ

Анотація. У науковій статті розглядається суть методу синхронізації в бездротових сенсорних мережах з використанням швидких і повільних локальних годинників. Запропонований метод дозволяє досягти попарної синхронізації вузлів БСМ. Детально досліджено калібрування повільних годинників по швидким та розглянуто алгоритм підтримки синхронізації локальних годинників сенсорних вузлів БСМ.

Ключові слова: бездротові сенсорні мережі, локальні годинники, прецизійна синхронізація

Алексеева И.В.,

К. физ.-мат.н., доцент;

Заруцкая А.А.,

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт";

Кисельов В.Б.,

д.т.н., профессор, АМУ

МЕТОД ПРЕЦИЗИОННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЫСТРЫХ И МЕДЛЕННЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ЧАСОВ

Аннотация. В научной статье рассматривается суть метода синхронизации в беспроводных сенсорных сетях с использованием быстрых и медленных локальных часов. Предложенный метод позволяет достичь попарно синхронизации узлов БСС. Подробно исследовано калибровка медленных часов по быстрым и рассмотрен алгоритм поддержки синхронизации локальных часов сенсорных узлов БСС.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, локальные часы, прецизионная синхронизация

Alekseeva I.V.,**Zarutska A.A.,**

National Technical University of Ukraine

"Kyiv Polytechnic Institute";

Kiselev V.B.

Ph.D., professor, AMA

METHOD OF PRECISION SYNCHRONIZATION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS USING THE FAST AND SLOW LOCAL TIME

Annotation. In the scientific article discusses the essence of the method of synchronization in wireless sensor networks using the fast and slow local clocks. The proposed method allows synchronization of nodes in pairs. Detailed the calibration slow hours on a fast and reviewed algorithm to support the synchronization of local clocks of sensor nodes WSN.

Keywords: wireless sensor networks, local clock, precisionsynchronization

Вступ. Найбільш поширеними є бездротові сенсорні мережі з автономним електроживленням сенсорних вузлів. 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 виконуючи ніяких операцій та дій; періодично вузли переходять в активний режим, зчитують інформацію з навколишнього середовища, наприклад знімають показники температури, та обмінюються даними з сусідніми вузлами. Для проведення сеансу зв'язку необхідно, щоб всі сенсори, що беруть участь в цьому сеансі, одночасно включили свої прийомопередавачі, а ця процедура вимагає синхронізації локальних годинників сенсорних вузлів. Крім того, точний час на сенсорному вузлі необхідний для формування часових міток даних, зчитаних з сенсорів.

Аналіз досліджень і публікацій. У [1] запропоновано простий алгоритм синхронізації годинників, за допомогою якого досягається точність синхронізації локальних годинників, що дорівнює 500 мс. Автори роботи принесли в жертву точність, проводячи синхронізацію локальних годинників вузлів як можна рідше. Використання цього підходу призведе до сильного збільшення інтервалу прослуховування пакета, що означає зростання енергоспоживання вузлом. У дослідженні [2], досягається точність синхронізації локальних годинників вузлів порядку 50 мкс. Експеримент проводиться на сенсорних вузлах МІСА, на яких встановлено мікроконтролер АТМЕГА103L, що працює на частоті 4 МГц. Дана частота дозволяє вимірювати час з точністю до 0,25 мкс. У [3] той же підхід застосовується на вузлах Міса2, обладнаних мікроконтролером, що працює на частоті 7,37 МГц, у середньому досягається точність порядку 20 мкс. В [4] алгоритм запускався на теж на сенсорному вузлі Міса2. Годинники працюють з частотою 921 КГц. Досягається середня точність порядку 15 мкс.

Останні три описані дослідження мають один спільний недолік - у всіх них використовуються швидкі годинники, що працюють постійно. Хоч при цьому і з'являється можливість досягти високої точності синхронізації часу, але одночасно серйозно страждає енергетична ефективність, оскільки постійно працюючий швидкий генератор споживає порівняно багато енергії.

У деяких розподілених системах, наприклад, в SDH в якості засобу синхронізації часу використовуються системи глобального позиціонування GPS або Глонасс. Система GPS забезпечує точність визначення часу порядку 240 нс [5]. Однак установка GPS -модуля призведе до значного збільшення вартості вузла сенсорної мережі, а також до зростання енергоспоживання вузла, зводячи, таким чином, нанівець виграш від високоточної синхронізації годин. Крім того, стійка робота GPS неможлива всередині будівель.

У мережі Інтернет для задач синхронізації часу успішно використовується алгоритм NTP [6]. Але він погано пристосований до роботи в умовах обмежених комунікаційних і обчислювальних можливостей вузлів сенсорної мережі.

Таким чином, у пропонованих підходах досягається або низьке енергоспоживання, або висока точність. Однак необхідно домогтися досить високої точності, не жертвуючи при цьому енергоспоживанням.

Постановка завдання. Розглянемо сеанс зв'язку: приймач сенсорного вузла починає прослуховувати ефір трішки раніше, ніж передаючий вузол вмикає передавач і починає відправку пакету. Такий сеанс зв'язку буде успішним. Розглянемо сеанс зв'язку, коли поступова розсинхронізація локальних годинників сенсорів приводить до того, що приймач сенсорного вузла починає прослуховувати ефір набагато раніше, ніж передаючий вузол вмикає передавач і починає відправку пакету. Цей сеанс буде неефективним оскільки сенсорний вузол витрачає набагато більше часу на прослуховування, ніж на отримання переданого пакету. Також розглянемо неуспішний сеанс зв'язку: приймаючий сенсор закінчив сеанс прослуховування ефіру раніше, ніж передаючий вузол почав відправляти пакет. В цьому випадку синхронізація вузлів порушена, тому передача пакетів не відбулася.

Приймач - основне джерело витрат енергії в сенсорному вузлі. Мінімізуючи час його роботи, можна отримати суттєвий виграш щодо економії енергії.

На рис. 1 представлена залежність середнього енергоспоживання вузла БСМ від тривалості інтервалу прослуховування. Обчислення виконано для швидкості 250 Кбіт/с. Період сеансів зв'язку дорівнює 15 с. Прийнято, що енергоспоживання в режимі прийому становить 13,2 мА, в режимі сну - 0,02 мА.

Слід відзначити, що витрати енергії при скороченні тривалості інтервалу прослуховування з 100 мс до 1 мс зменшуються в ~ 20 разів при довжині пакета 127 байт.

Тобто чим краще синхронізовані між собою годинник передавального і приймаючого вузлів, тим менший запас в інтервалі прослуховування може допускати приймаючий вузол, і тим менше енергії він витратить на

порожнє прослуховування ефіру. Погана синхронізація сприяє неефективній витраті енергії на приймаючому вузлі.

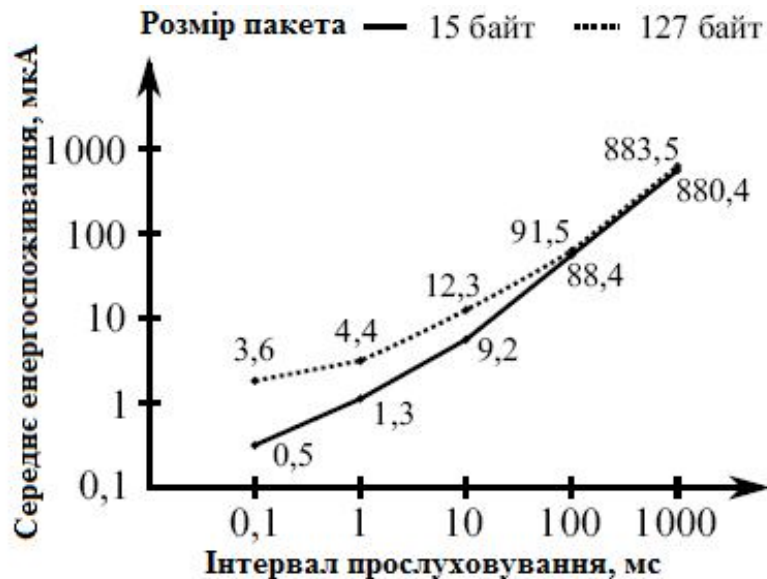


Рисунок 1. Залежність середнього енергоспоживання вузлом сенсорної мережі від тривалості інтервалу прослуховування

З вище наведеного аналізу випливає, що необхідно використовувати як можна точніший метод синхронізації для забезпечення мінімального енергоспоживання сенсорними вузлами, а отже і максимального терміну їх роботи.

Виклад основного матеріалу

Суть методу прецизійної синхронізації з використанням двох локальних годинників. Пропонований підхід ґрунтується на використанні специфічної апаратної платформи для створення сенсорного вузла. Вузол матиме два локальні годинники, а саме:

- швидкий (1 МГц), що має високу стабільність (3,3 ppm), але й порівняно високе енергоспоживання (близько 1 мА);
- повільний (32768 Гц), що має низьку стабільність (36 ppm) але і низьке енергоспоживання (0,01 мА).

Передбачається, що повільний годинник працює постійно і забезпечує вихід сенсорного вузла з режиму сну. Повільні локальні годинники сенсорних вузлів тактуються від кварцового резонатора камертонного типу. Для цих резонаторів характерна значна зміна частоти в залежності від температури.

Швидкий годинник в режимі сну не працює, що забезпечує мінімізацію енергоспоживання. У періоди сеансів зв'язку швидкий годинник використовуються для визначення точного часу включення прийомопередавача.

Для зменшення швидкості розходження локальних годинників сенсорних вузлів, кожен з вузлів автономно виконує калібрування

повільних годинників по швидким, також слід враховувати температурну поправку при розрахунку часових інтервалів, про яку йтиметься далі. Для усунення розбіжності, що залишається, при кожному сеансі зв'язку проводиться синхронізація.

Запропонований метод дозволяє досягти попарної синхронізації вузлів БСМ. Це означає, що кожен з вузлів сенсорної мережі підтримує актуальну інформацію про розходження його власного годинника з годинником тільки тих вузлів, з якими даний вузол зв'язується або знаходиться по-сусідству. Існують моделі синхронізації часу, в яких час підтримується синхронізованим по всій мережі, але це ускладнює алгоритми і призводить до більшої витрати енергії, в більшості випадків, не даючи значних переваг.

Калібрування повільних годинників по швидких. Процедура калібрування полягає в тому, щоб виміряти один і той же досить тривалий часовий проміжок і повільним, і швидким локальними годинниками, а потім обчислити коефіцієнт, який дозволить компенсувати розбіжність повільних годинників. Цей випадок - єдиний в робочому циклі пристроїв БСМ, коли швидкий годинник використовується для вимірювання настільки тривалого часового проміжку, тому також має сенс застосовувати до них процедуру врахування температурних поправок.

Процедура передбачає наступні дії:

(1) Відключається звичайний перехід пристрою в режим сну. Це необхідно для того, щоб швидкий годинник під час калібрування не зупинявся.

(2) Відбувається зчитування показників повільного годинника, в цей же момент знімаються показники швидкого годинника.

(3) Відбувається очікування протягом відносного великого часового інтервалу (>900 мс).

(4) Відбувається зчитування показників повільного годинника, в цей же момент також знімаються показники швидкого годинника.

(5) На основі отриманих значень часу для обох годинників, обчислюється калібрувальний коефіцієнт за формулою (1):

$$C_c = 1 + \frac{\Delta_f - \Delta_s}{\Delta_s} (1)$$

де C_c - шуканий калібрувальний коефіцієнт;

Δ_f - час, що минув між пунктами 2 і 4 згідно швидкому годиннику;

Δ_s - час, що минув між пунктами 2 і 4 згідно повільному годиннику.

Процедура проводиться замість одного з довгих (> 900 мс) періодів сну вузла БСМ. Таким чином тривала монополізація процесора залишається непоміченою і не заважає роботі інших процесів, що відбуваються для сенсора. Отриманий калібрувальний коефіцієнт щоразу застосовується при зверненні до показань повільних годинників.

Процедура калібрування дозволяє мінімізувати вплив відхилення робочої частоти конкретного екземпляра кварцового резонатора від номінальної.

Калібрування проводиться один раз при старті вузла БСМ, але періодично може повторюватися для компенсації можливого накопичення помилки.

За даними отриманими експериментальним шляхом, відомо, що відкалібровані повільні локальні годинники двох вузлів розходяться зі швидкістю ~ 4 ppm. Таким чином, швидкість розбіжності практично доведена до мінімально можливої (3,3 ppm) для конкретної апаратної платформи.

Алгоритм підтримки синхронізації локальних годинників сенсорних вузлів БСМ. Описані вище механізми дозволяють добитися мінімальної розбіжності локальних годинників на одному сенсорі, але з часом годинники різних пристроїв будуть розходитися один щодо іншого. Основною причиною цього є зміна температури пристроїв. Іншою причиною є тимчасова нестабільність кварцових резонаторів (зміна робочої частоти з часом), з якою не вдається боротися методом калібрування, так як і швидкий, і повільний кварцові резонатори, згідно з паспортними даними, мають однакову часову нестабільність, рівну ± 3 ppm / рік.

Це говорить про необхідність введення методу корекції розбіжностей годинників під час роботи сенсорів в реальних умовах.

Початкова синхронізація локальних годинників сенсорів досягається під час процедури конфігурації - при підключенні нового сенсорного вузла до існуючої мережі. Після цього є актуальним питання підтримки синхронізації. Для цього було розроблено і запропоновано алгоритм, що описаний нижче:

(1) Приймаючий вузол під час планування чергового сеансу зв'язку оцінює час, через який має відбутися сеанс. Тривалість інтервалу прослуховування тим більше, чим більше час до наступного сеансу. Сеанс планується таким чином, щоб момент прийому пакета від передавального вузла припадав точно на середину інтервалу.

(2) Настає час сеансу, передаючий вузол виконує одну з дій:

(а) якщо є дані для відправки, то вузол передає звичайний пакет з даними;

(б) якщо даних немає, то для підтримки синхронізації передається пакет мінімальної довжини (15 байт для мереж 802.15.4)

(3) Приймаючий вузол, використовуючи переривання RX_START, зберігає тимчасову мітку початку отримання пакета (рис.2). Пакет обробляється пристроєм як звичайно. Після цього обчислюється різниця D

між фактичним і очікуваним часом початку отримання пакету і проводиться зсув часу наступного сеансу за формулою (2):

$$C'_s = C_s + D \quad (2)$$



Рисунок 2. Час початку отримання пакета зберігається обробником переривання RX_START

Крім того, якщо отримуюмо $D \neq 0$, то це означає, що годинники сенсорів йдуть з різною швидкістю. Можна оцінити швидкість розходження годинників і використовувати її при плануванні часу наступного сеансу. Шукана швидкість розбіжності визначається формулою (3):

$$S = \frac{D}{T_{sync}} \quad (3)$$

де T_{sync} - час, що минув з моменту попередньої синхронізації.

Знак S показує напрямок розходження.

Величина компенсації буде обчислюватися наступним чином:

$$C_d = T_{next} \times S \quad (4)$$

де T_{next} - час до наступного сеансу зв'язку.

Відзначимо також, що запропонований спосіб синхронізації - пасивний, що означає відсутність спеціально переданих в цілях синхронізації даних.

Таким чином, необхідно, щоб при плануванні сеансу зв'язку, спираючись на показники локального годинника, сенсор БСМ враховував:

C_c - калібрувальна поправка;

C_t - температурну поправку;

C_s - поправку на відому розбіжність;

C_d - компенсацію різниці швидкостей годинників;

C_u - запас на максимальне розходження годинників за час, що минув з моменту останньої синхронізації.

При отриманні показань повільних годинників враховуються калібрувальна і температурна поправки:

$$t = t' \times C_c + C_t \quad (5)$$

де t' - початкові показання повільного годинника;

t – показники повільного годинника з урахуванням поправок.

Нехай наступний сеанс зв'язку по протоколу повинен відбутися через час T . Тоді по локальному годиннику сенсора сеанс слід провести через час:

$$T' = T + C_s + C_d - \frac{C_u}{2} \quad (6)$$

Слід врахувати, що тривалість інтервалу прослуховування для одного сеансу зв'язку повинна бути також збільшена на $\frac{C_u}{2}$. Базова тривалість інтервалу прослуховування T_w приймається рівною подвоєнній точності синхронізації.

Швидкість розходження, що визначає поправку C_d , може відносно швидко змінюватися під час роботи пристроїв (наприклад, в результаті зміни температури одного з пристроїв). Тому поправка C_d не застосовується, якщо швидкість розбіжності була обчислена на основі даних, отриманих більше, ніж за N секунд назад, де N - параметр, який задається адміністратором мережі.

Час від часу запланований сеанс зв'язку може не відбутися, наприклад, через дії потужної перешкоди в момент часу, що вибраний для сеансу зв'язку. У такому випадку чергова синхронізація годинників не відбудеться, і при плануванні наступного сеансу зв'язку приймаючий вузол повинен попередньо збільшити запас T_w . Збільшення T_w також відбувається, якщо не застосовувалася поправка C_d .

Висновки. Розв'язана актуальна наукова задача щодо розвитку метода прецизійної синхронізації у бездротових сенсорних мережах із використанням швидких та повільних локальних годинників.

Запропоновано, для зменшення швидкості розбіжності локальних годинників сенсорних вузлів, враховувати температурну поправку при розрахунку часових інтервалів, доопрацьовано алгоритм калібрування повільних годинників по швидким. Для усунення розбіжності, що залишається, запропоновано алгоритм підтримки синхронізації в БСМ.

Запропонований метод дозволяє досягти попарної синхронізації вузлів БСМ. Це означає, що кожен з вузлів сенсорної мережі підтримує актуальну інформацію про розходження його власного годинника з годинником тільки тих вузлів, з якими даний вузол зв'язується або знаходиться по-сусідству. Існують моделі синхронізації часу, в яких час підтримується синхронізованим по всій мережі, але це ускладнює алгоритми і призводить до більшої витрати енергії, в більшості випадків, не даючи значних переваг.

Використані джерела інформації:

1. Janavan Greunen, Rabaey J. Lightweight Time Synchronization for Sensor Networks // Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications, 2003

2. Ganeriwal S., Kumar R., Srivastava M. B. Timing-sync Protocol for Sensor Networks // Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2003
3. Maroti M., Kusy B., Simon G., Ledeczi A. The Flooding Time Synchronization Protocol // Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2004
4. Sommer P., Wattenhofer R. Gradient Clock Synchronization in Wireless Sensor Networks // Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2009
5. GPS Standard Positioning Service Performance Standard, <http://www.pnt.gov/public/docs/2008/spgps2008>
6. Mills D. L. Internet time synchronization: the network time protocol // IEEE Transactions on Communications, 1991

References:

1. Janavan Greunen, Rabaey J. Lightweight Time Synchronization for Sensor Networks // Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications, 2003
2. Ganeriwal S., Kumar R., Srivastava M. B. Timing-sync Protocol for Sensor Networks // Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2003
3. Maroti M., Kusy B., Simon G., Ledeczi A. The Flooding Time Synchronization Protocol // Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2004
4. Sommer P., Wattenhofer R. Gradient Clock Synchronization in Wireless Sensor Networks // Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2009
5. GPS Standard Positioning Service Performance Standard, <http://www.pnt.gov/public/docs/2008/spgps2008>
6. Mills D. L. Internet time synchronization: the network time protocol // IEEE Transactions on Communications, 1991

Рецензент: Лисенко О.І.