

УДК 621.396.4

Заруцька А.А.,

Макарук Б.М.,

Георгін Д.А.,

НТУУ «КПІ»

Дрига Н.Д.,

здобувач, Київський інститут автоматики

## МЕТОДИ СИНХРОНІЗАЦІЇ У БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

*Запропоновано шляхи адаптації сучасних телекомунікаційних технологій до вимог безпроводних сенсорних мереж, розробку методу прецизійної синхронізації у безпроводних сенсорних мережах із використанням швидких та повільних локальних годинників.*

*Предложены пути адаптации современных телекоммуникационных технологий к требованиям беспроводных сенсорных сетей, разработка метода прецизионной синхронизации в беспроводных сенсорных сетях с использованием быстрых и медленных локальных часов.*

*The ways of adaptation of modern telecommunication technologies to the requirements of wireless sensor networks and development of method of precision synchronization via using fast and slow local clocks in wireless sensor are proposed.*

**Вступ.** Бурхливий розвиток телекомунікаційних технологій сприяє пошуку нових оптимальних рішень, які є рушійною силою прискорення розвитку економіки та соціального середовища суспільства.

Вихід за межі можливостей традиційних мереж зв'язку, обумовлений характером сьогоденного мультимедійного трафіку і потребами в мультисервісному обслуговуванні, сприяв якісному перетворенню всієї мережевої структури, внаслідок чого з'явилася концепція мережі наступного покоління NGN (Next Generation Network). Це, у свою чергу, дозволить значно розширити горизонти діяльності та збільшити спектр послуг.

Україна є частиною світової телекомунікаційної спільноти, тому продовжує впроваджувати новітні технології, що сприяє зміцненню економіки та дозволяє удосконалювати інформаційну базу суспільства. Однією з таких технологій є мережі, які побудовані на основі сенсорів.

Актуальність теми. Одним з важливих складових елементів телекомунікаційних систем (ТКС) є безпроводної сенсорні мережі (БСМ) - мережі, які являють собою специфічну структуру, що забезпечує вирішення задач моніторингу, збирання, зберігання та обробки інформації.

Безпосереднє використання існуючих технологій для побудови БСМ є проблематичним через специфіку функціонування цих мереж в умовах критичних ситуацій (пожежа, аварія тощо).

Більшість існуючих сьогодні сенсорних мереж побудовані за принципом виділених каналів, за якими на пульт чергового надходить інформація від сенсорів, які фіксують факт наявності або відсутності очікуваних подій. Відомі також сенсорні мережі, в яких здійснюється більш детальний моніторинг, коли окрім сигналів «1» або «0» передаються додаткові дані, корисні сигнали про зміну тих або інших параметрів спостереження. Як свідчить аналіз, різні сенсорні мережі з передачею факту події, з передачею даних від об'єкта або передачею мови і відеозображень будуються автономно. Спроби інтеграції таких мереж призводять до втрати якості передачі тієї або іншої інформації. Більш того, використання сучасної телекомунікаційної технології Triple Play (передача даних, мови і відео) призводить до необхідності врахування специфічних вимог до інформаційних сенсорних мереж (ІСМ).

Індивідуальні пристрої сенсорних мереж мають обмежені ресурси (швидкість обробки даних, обсяг пам'яті, пропускну здатність комунікацій), тому необхідно навчитися спільно використовувати ці обмежені можливості для досягнення потужного сумарного ефекту. Сенсорні мережі повинні функціонувати в автономному безпроводному режимі протягом тривалого часу, обмеженому терміном дії джерел живлення.

Також існує низка відкритих питань, пов'язаних з принципами організації взаємодії між вузлами БСМ. Одним з таких питань є реалізація схеми синхронізації, що забезпечує одночасне перемикавання пасивного і активного режимів функціонування вузлів. Порушення даної умови призводить до виникнення фіксованого часового розходження між локальними годинниками окремих сенсорних вузлів, яке супроводжується відсутністю взаємодії між ними. Синхронізація мережі забезпечується коректними схемами і протоколами взаємодії.

Отже, розробка науково-обґрунтованих пропозицій щодо побудови сенсорних мереж з урахуванням сучасних можливостей і специфічних вимог в умовах можливих перевантажень мережі, розвиток методів синхронізації з метою підвищення тривалості роботи БСМ є актуальною.

**Адаптація існуючих телекомунікаційних технологій для побудови БСМ на основі LAN.** Безпроводні локальні мережі призначені для організації збору інформації в межах одної або декількох будівель, тобто характерні для нього дальності дії – сотні метрів. Технології WLAN представлені сімейством стандартів 802.11, основні характеристики яких наведено в табл. 2.4 [9].

Таблиця 2.4.  
Технічні характеристики сімейства стандартів IEEE 802.11

Параметр	IEEE 802.11 a	IEEE 802.11b	IEEE 802.11g	IEEE 802.11n
Частота, ГГц	5,15 - 5,25 5,725 - 5,825	2,400 – 2,483	2,400 – 2,483	2,400 – 2,483
Швидкість передачі, Мбіт/с	54	11	54	540
Радіус дії, км	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5
Потужність передавача, мВт	40 (2,5 мВт/МГц) (5,15 - 5,25) 200 (12,5 мВт/МГц) (5,725 - 5,825) 800 (50 мВт/МГц) (5,725 – 5,825)	30 –500	30 –500	30 –500
Методи модуляції сигналу	FHSS, OFDM, 16QAM, 64QAM, BPSK, QPSK	DSSS BPSK QPSK	OFDM 16QAM 64QAM	OFDM 16QAM 64QAM
Ширина смуги каналу передачі, МГц	60 МГц 5,15 - 5,25	22	22	22
Чутливість приймача (при $P = 10^{-6}$ ), дБм	-82 ... -65	-89 ... - 79	- 73	- 73

Стандарт 802.11 описує протокол організації безпроводної локальної системи в діапазоні 2,4 ГГц зі швидкостями 1 і 2 Мбіт/с. Передбачається використання технології розширення спектру зі стрибкоподібною зміною частоти (FHSS) або технології розширення спектру за методом прямої послідовності (DSSS). У зв'язку з невисокою пропускнуою здатністю він не отримав широкого розповсюдження.

Стандарт IEEE 802.11a передбачає використання частотного діапазону 5 ГГц і модуляції за методом ортогонального мультиплексування з поділом частот OFDM. Застосування цього стандарту дозволяє збільшити швидкість передачі в кожному каналі до 54 Мбіт/с. Стандарт 802.11a в діапазоні 5 ГГц використовує смугу частот шириною 300 МГц, розділяючи її на три ділянки по 100 МГц кожна: 5,15-5,25 ГГц (нижній), 5,25-5,35 ГГц (середній) і 5,725 - 5,825 ГГц (верхній). У кожному з них можуть бути організовані чотири канали, які не перекриваються тобто у всій смузі – 12 частотних каналів. Сумарна ширина доступного спектру в ньому приблизно в чотири рази вище, ніж в діапазоні 2,400-2,48354 ГГц (83 МГц).

Протокол IEEE 802.11b є розширенням базового протоколу 802.11 і крім швидкостей 1 і 2 Мбіт/с передбачає швидкості 5,5 і 11 Мбіт/с.

Стандарт IEEE 802.11g є розвитком стандарту 802.11b/b+ і передбачає передачу даних в тому ж частотному діапазоні, але з більш високими швидкостями. Крім того, стандарт 802.11g повністю сумісний з

802.11b. У протоколі 802.11g передбачена передача на швидкостях 1, 2, 5,5, 6, 9, 11, 12, 18, 22, 24, 33, 36, 48 і 54 Мбіт/с. Деякі з даних швидкостей є обов'язковими, а деякі – опціональні. Крім того, одна і та ж швидкість може реалізовуватися при різній технології кодування.

Стандарт 802.11n має швидкість передачі даних до 540 Мбіт/с. Пропонується використовувати технології OFDM і QAM - подібний підхід забезпечить сумісність і знизить вартість розробки, а також використання технології з множинним вводом/виводом MIMO (multiple input multiple output) [1, 2, 3].

Таким чином, мережі WLAN надають швидкості передачі даних від 1 до 540Мбіт/с, що значно перевищує показники стандарту 802.15.4 (рис. 2.1). Отже, такі мережі можуть бути використані для передачі агрегованих потоків інформації від декількох координаторів, які об'єднують десятки або сотні кінцевих вузлів.

**Адаптація існуючих телекомунікаційних технологій для побудови БСМ на основі MAN.** Для зручності доступу до даних, зібраних з сенсорних мереж, та їх обробки, дані необхідно зберігати централізовано. Передачу даних до центру обробки даних забезпечують мережі MAN або WAN, створені поверх безпроводної технології WiMAX (IEEE 802.16) [4].

Стандарт IEEE 802.16 призначений для реалізації широкосмугових каналів останньої милі в міських мережах (MAN). Його завданням є забезпечення мережного рівня між локальними мережами (IEEE 802.11) і регіональними мережами (WAN), де планується застосування розроблюваного стандарту IEEE 802.20. Ці стандарти спільно з IEEE 802.15 (Bluetooth) і 802.17 (мости рівня MAC) утворюють взаємоузгоджену ієрархію протоколів безпроводного зв'язку [5].

Стандарт IEEE 802.16 передбачає передачу даних у частотному діапазоні 10 – 66 ГГц систем. Основні технічні характеристики стандарту наведені в таблиці 2.5 [4].

Таблиця 2.5.

Основні характеристики сімейства стандартів IEEE 802.16

Назва стандарту	802.16	802.16a	802.16e
Частотний діапазон	10-66 ГГц	2-11 ГГц	2-6 ГГц
Швидкодія	32-135 Мбіт/с для 28МГц-канала	до 75 Мбіт/с для 28 МГц-канала	до 15 Мбіт/с для 5 МГц-канала
Модуляція	QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM 256, QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM 256, QPSK, 16QAM, 64QAM
Ширина каналу	20, 25 і 28 МГц	Регульована 1,5-20МГц	Регульована 1,5-20МГц
Радіус дії	2-5 км	7-10 км макс. радіус 50 км	2-5 км
Умови роботи	Пряма видимість	Робота на відображеннях	Робота на відображеннях

БСМ, що функціонує на основі стандартів IEEE 802.16, є двоспрямованою системою, тобто передбачені спадний (downlink, від базової станції до абонентів) і висхідний (uplink, до базової станції) потоки. Канали є ширококуговими (близько 25 МГц), а швидкості передачі близько 120 Мбіт/с.

У діапазоні 10 – 66 ГГц стандарт IEEE 802.16 передбачає схему з модуляцією однієї несучої (у кожному частотному каналі). Стандарт допускає три типи квадратурної амплітудної модуляції: чотирьохпозиційну QPSK і 16-позиційну QAM (обов'язкові для всіх пристроїв), а також 64-QAM (опціонально). Оскільки відповідно до стандарту IEEE 802.16 передбачена двонаправлена передача даних, існує дуплексний механізм, що забезпечує як частотний (FDD – frequency division duplex), так і часовий (TDD - time division duplex) поділ висхідного і низхідного каналів, при чому в режимі FDD стандарту IEEE 802.16 допускається застосування як дуплексних, так і напівдуплексних режимів абонентських станцій. Абонентські станції отримують доступ до середовища передачі за допомогою механізму часового розділення каналів (TDMA - time division multiple access).

Важлива особливість стандарту IEEE 802.16 – система контролю радіотракту, завдяки якій базова станція здатна контролювати синхронність, несучу частоту і потужність кожної автономної станції і при необхідності змінювати/ коригувати ці параметри за допомогою службових сигналів.

У стандарті IEEE 802.16 надання доступу до каналу проводиться за запитом призначення множинного доступу DAMA (Demand Assigned Multiple Access). Стандарти 802.11 і 802.16 мають високе енергоспоживання. Тому для економії енергії в мобільних станціях, в цих стандартах, як і в 802.15.4 передбачено кілька режимів роботи – активний режим, пасивний режим і неробочий режим.

Отже, мережі стандарту IEEE 802.16 використовуються для передачі даних в межах міста або для узгодження формату даних, для передачі по провідним магістральним лініям. Прикладом використання таких мереж може служити не тільки побудова транзитної мережі для передачі даних від LAN, а й створення сенсорної міської мережі (рис. 1.5) для управління міським транспортом, розподілу потоків пасажирів, оповіщення пожежних та інших екстрених служб у разі події.

**Розробка методу прецизійної синхронізації з використанням двох локальних годинників.**

**Постановка задачі.** Найбільш поширеними є безпроводові 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.

Як зазначалося в другому розділі магістерської дисертації розглядаємо сенсорні мережі, побудовані з використанням стандарту IEEE 802.15.4[7]. Під розгляд також підпадає будь-яка мережа, що працює в імпульсному режимі з метою економічного використання джерела живлення.

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 і він представлений на рис.4.1.



Рисунок 4.1. Успішний сеанс зв'язку: приймаючий вузол починає прослуховувати ефір лише трішки раніше, ніж передаючий вузол починає відправку пакету

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. Такий сеанс зв'язку представлений на рис.4.2. Цей сеанс буде неефективним оскільки сенсорний вузол витрачає набагато більше часу на прослуховування, ніж на отримання переданого пакету.



Рисунок 4.2. Неефективний сеанс зв'язку: приймаючий вузол витрачає забагато часу на очікування пакету (прослуховування ефіру)

На рис.4.3 представлений 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.

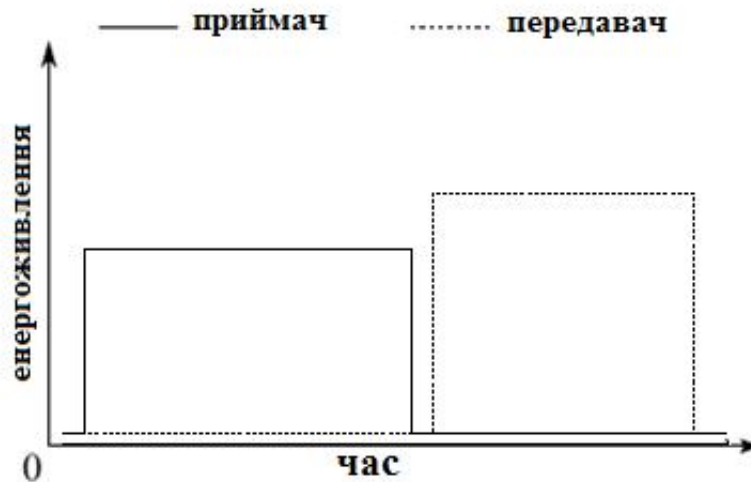


Рисунок 4.3. Невдалий сеанс зв'язку: приймаючий вузол закінчив сеанс прослуховування ефіру раніше, ніж передаючий вузол почав відправку пакетів

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

На рис. 4.4 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.

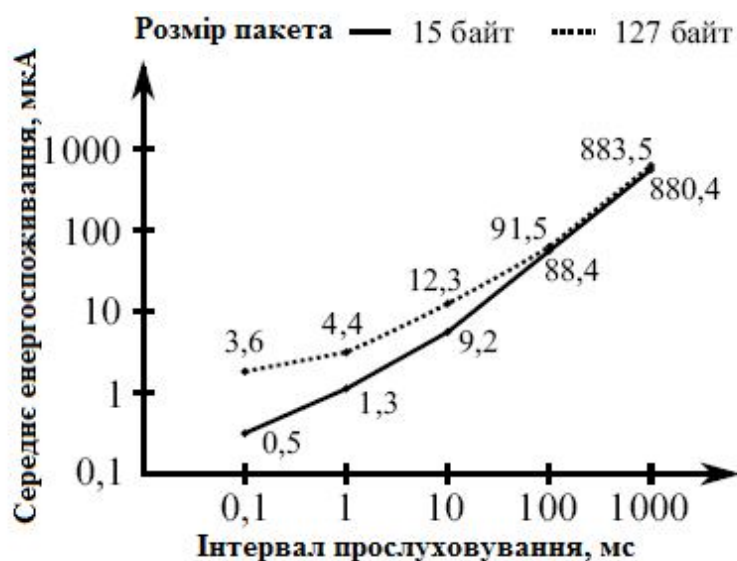


Рисунок 4.4. Залежність середнього енергоспоживання вузлом сенсорної мережі від тривалості інтервалу прослуховування

Слід відзначити, що витрати енергії при скороченні тривалості інтервалу прослуховування з 100 мс до 1 мс зменшуються в  $\sim 20$  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.

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. Проведемо аналіз деяких існуючих методів, так у [7] 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 [8], 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 [9] той же підхід застосовується на вузлах МІСА2, обладнаних мікроконтролером, що працює на частоті 7,37 МГц, у середньому досягається точність порядку 20 мкс. В [10] 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 SDN в якості засобу синхронізації часу використовуються системи глобального позиціонування GPS або Глонасс. Система GPS забезпечує точність визначення часу порядку 240 нс [11]. Однак установка GPS -модуля призведе до значного збільшення вартості вузла сенсорної мережі, а також до зростання енергоспоживання вузла, зводячи, таким чином, нанівець вигреш від високоточної синхронізації годин. Крім того, стійка робота GPS неможлива всередині будівель.

У мережі Інтернет для задач синхронізації часу успішно використовується алгоритм NTP [12]. Але він погано пристосований до роботи в умовах обмежених комунікаційних і обчислювальних можливостей вузлів сенсорної мережі.

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

**Суть методу.** 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 (рис. 4.5).

Швидкий годинник в режимі сну не працює, що забезпечує мінімізацію енергоспоживання. У періоди сеансів зв'язку швидкий годинник використовується 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.

Слід зазначити, що в результаті роботи описаних алгоритмів насправді не відбувається наведення локальних годинників сенсорних вузлів, а знаходяться лише коефіцієнти, що впливають на обчислення часових інтервалів, і розрахунок часу наступного сеансу зв'язку.

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.

**Висновки.** Запропоновано рекомендації щодо застосування сучасних технологій в задачах побудови сенсорних мереж, вирішено задачі адаптації сучасних телекомунікаційних технологій до вимог сенсорних мереж.

Також розв'язана актуальна наукова задача щодо розвитку методу прецизійної синхронізації у безпроводних сенсорних мережах із використанням швидких та повільних локальних годинників. Завдяки методу прецизійної синхронізації у безпроводних сенсорних мережах із використанням швидких та повільних локальних годинників підвищено енергетична ефективність функціонування БСМ, тим самим збільшено термін служби окремих сенсорних вузлів і мережі в цілому.

*Використані джерела інформації:*

1. Алгулиев Р.М. Сенсорные сети: состояние, решение и перспективы / Р.М.Алгулиев, Т.Х. Фаталиев, Б.С. Агаев, Т.С. Алиев // ISSN 1684-2588 Телекоммуникации. Ежемесячный научно-технический информационно-аналитический и учебно-методический журнал. — 2007. — № 4. — С. 27—32.
2. Варгаузин В. Радиосети для сбора данных от сенсоров, мониторинга и управления на основе стандарта IEEE 802.15.4 / В. Варгаузин // ТелеМультиМедиа. — 2005. — № 6.
3. Горяева С.М. Застосування сенсорних мереж зв'язку для дистанційного контролю психічного стану рятувальника / С.М. Горяева, Г.В. Щербак // Проблеми екстремальної та кризової психології. Збірник наукових праць. Вип. 3.Ч.1. — Х.: УЦЗУ, — 2007. — С. 122—126.
4. Столингс В. Беспроводные линии связи и сети / В. Столингс. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.
5. Barbara Liskov. Practical uses of synchronized clocks in distributed systems. In 10th Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC'91), pages 1–10, August 1991.

6. IEEE 802.15.4 Standard, [http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4\\_2003.pdf](http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4_2003.pdf).
7. Jana van Greunen, Rabaey J. Lightweight Time Synchronization for Sensor Networks // Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications, 2003
8. 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
9. 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
10. Sommer P., Wattenhofer R. Gradient Clock Synchronization in Wireless Sensor Networks // Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2009
11. GPS Standard Positioning Service Performance Standard, <http://www.pnt.gov/public/docs/2008/spgps2008>
12. Mills D. L. Internet time synchronization: the network time protocol // IEEE Transactions on Communications, 1991