

ЛЕКЦІЯ № 10

Тема лекції: БЕЗДРОТОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ WSN

Питання лекції

1. Основні поняття і принципи сенсорних мереж
- 2 Базова архітектура сенсорної мережі
- 3 Вузли бездротової сенсорної мережі
- 4 Способи передачі даних в БСС
- 5 Протоколи і технології передачі даних в БСС
- 6 Типи вузлів БСС

ВСТУП

Одним із цікавих напрямків розвитку IoT є розвиток сенсорних мереж. Розглянемо особливості сенсорних мереж.

1 Основні поняття і принципи сенсорних мереж

Визначимо основні поняття сенсорних мереж.

Сенсор (англ., Sensor) - пристрій, який сприймає контрольоване вплив (світло, тиск, температуру і т. п.), вимірює його кількісні та якісні характеристики і перетворює дані вимірювання в сигнал. Сигнал може бути електричний, хімічний або іншого типу.

Датчик (англ., Transducer) - пристрій, який використовується для перетворення одного виду енергії в інший. Отже, сенсор також є датчиком, який перетворює фізичну інформацію в електричну, яка може бути передана обчислювальній системі чи контролеру для обробки.

Актуатор (англ., Actuator) - виконавчий пристрій, що реагує на сигнал, який надійшов, для зміни стану керованого об'єкта. В актуаторі відбувається перетворення типів енергії, наприклад, електрична енергія, або енергія стисненого (розрідженого) повітря (рідини, твердого тіла) перетворюється в механічну.

Сенсорний вузол (англ., Sensor node) - це пристрій, який складається, принаймні, з одного сенсора (може також включати один або декількох актуаторів), і має обчислювальні та дротові або бездротові мережеві можливості.

Сенсорна мережа - система розподілених сенсорних вузлів, взаємодіючих між собою, а також з іншими мережами для запитів, обробки, передачі та надання інформації, отриманої від об'єктів реального фізичного світу з метою вироблення відповідної реакції на цю інформацію. Таким чином, сенсорна мережа включає в себе як мінімум сенсори, актуатори і комунікаційні вузли. Основною областю застосування сенсорної мережі є контроль і моніторинг реальних показників фізичних середовищ і об'єктів та в деяких випадках - управління цими об'єктами (активація в них певних

процесів). Приклади сенсорних мереж: всепроникні сенсорні мережі (USN - Ubiquitous Sensor Network), мережі для транспортних засобів (VANET - Vehicular Ad Hoc Network), муніципальні мережі (HANET - Home Ad hoc Network), медичні мережі (MBAN (S) - Medicine Body Area Network (services)) і ін. Основні дії, що виконуються при роботі сенсорних мереж, представлені на рис.1 (пунктиром показані необов'язкові процеси).

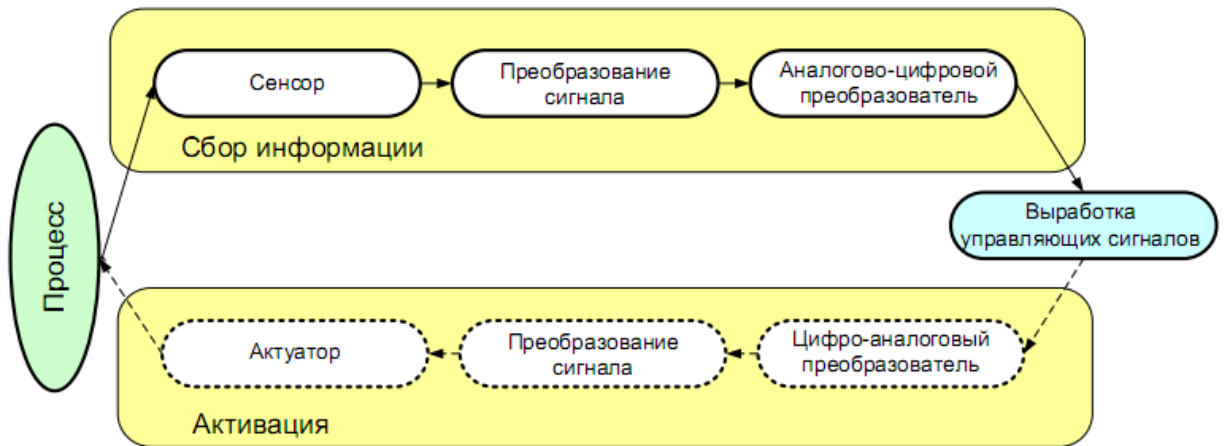


Рис.1 - Збір даних і управління в сенсорних мережах

Область покриття сенсорної мережі може становити від декількох метрів до декількох кілометрів за рахунок здатності ретрансляції повідомлень від одного елемента мережі до іншого. Сенсорна мережу має здатність до ретрансляції повідомлень по ланцюжку від одного вузла до іншого, що дозволяє в разі виходу з ладу одного з вузлів організувати передачу інформації через сусідні вузли без втрати якості. Сама мережа визначає оптимальний маршрут руху інформаційних потоків (рис. 2).

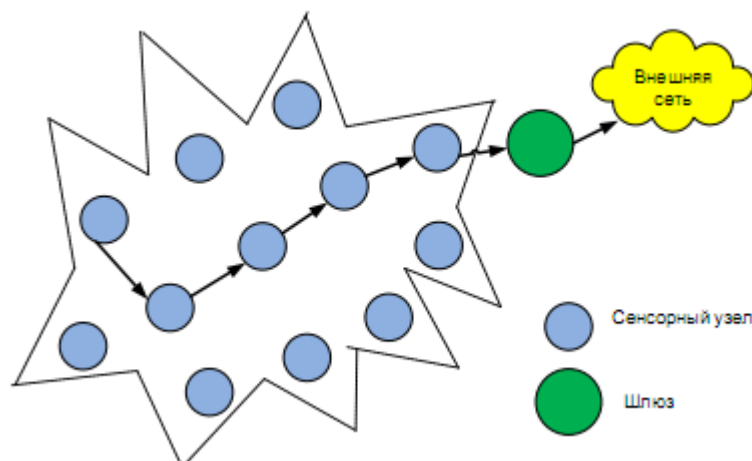


Рис. 2 - Маршрутизація інформації в сенсорній мережі

Самоорганізована (лат. Ad hoc - «за місцем») мережа зв'язку - мережа, в якій число вузлів є випадковою величиною в часі і може змінюватися від 0 до деякого максимального значення. Взаємозв'язки між вузлами в такій мережі

також випадкові у часі і утворюються для передачі інформації між подібними вузлами і в зовнішню мережу зв'язку.

Бездротова сенсорна мережа (БСС) (англ. WSN - Wireless Sensor Network) – розподілена сенсорна мережа множини сенсорів і виконавчих пристроїв, що самоорганізується, об'єднаних між собою за допомогою радіоканалів.

Переваги бездротових сенсорних мереж:

- здатність до самовідновлення та самоорганізації;
- здатність передавати інформацію на значні відстані при малій потужності передавачів (шляхом ретрансляції);
- низька вартість вузлів і їх малий розмір;
- низьке енергоспоживання і можливість електроживлення від автономних джерел;
- простота установки, відсутність необхідності в прокладанні кабелів (завдяки бездротовій технології і живленню від батарей);
- можливість установки таких мереж на вже існуючий і експлуатується об'єкт без проведення додаткових робіт;
- низька вартість технічного обслуговування.

Так як на практиці в найбільшій мірою поширені бездротові сенсорні мережі, тому основна частина матеріалу глави присвячена саме таким мережам.

2 Базова архітектура сенсорної мережі

Стандартизацією сенсорних мереж займаються багато міжнародних організацій, серед яких ISO, IEC, ITU-T, IEEE і ін. Так дослідницька група по сенсорним мереж SGSN (Study Group on Sensor Networks) об'єднаного технічного комітету №1 ISO/IEC JTC1 (Joint Technical Committee 1) визначила базову архітектуру сенсорної мережі і її основні інтерфейси (рис.3).

Як видно з малюнка, сенсорний вузол складається з:

- апаратного забезпечення;
- базового програмного забезпечення;
- прикладного програмного забезпечення.

У складі архітектури визначені чотири базових інтерфейси:

1. Інтерфейс між базовим і прикладним програмним забезпеченням сенсорного вузла.
2. Інтерфейс між базовим програмним забезпеченням і апаратним забезпеченням сенсорного вузла (сенсори, актуатори і/або комунікаційний вузол і т.д.).
3. Бездротові або провідні інтерфейси між вузлами в сенсорній мережі.
4. Інтерфейс між сенсорною мережею і зовнішнім середовищем (провайдери послуг, користувачі).

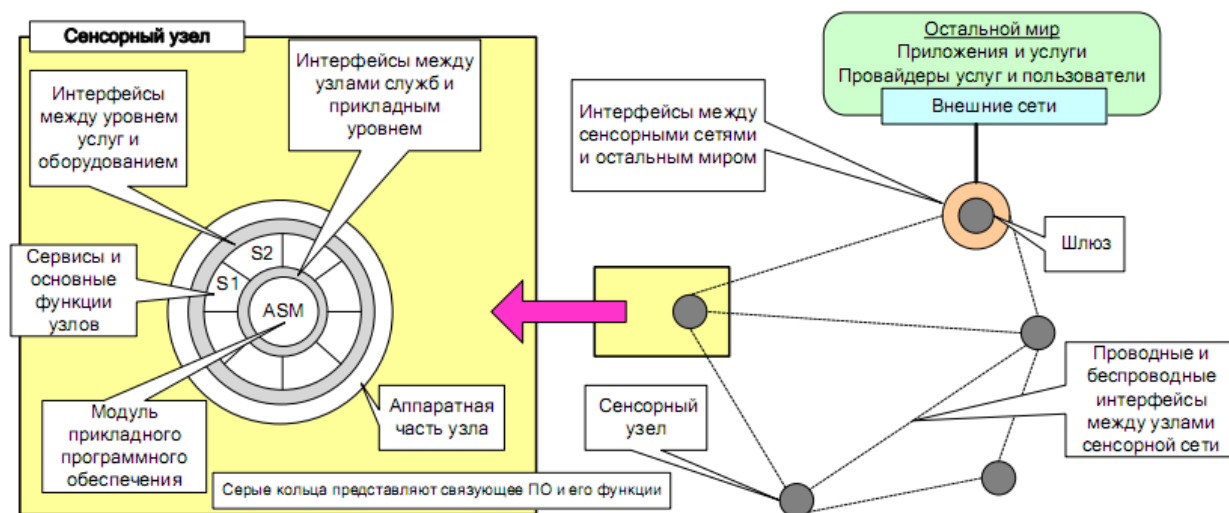


Рис.3 - Основні елементи і інтерфейси сенсорної мережі

3 Вузли бездротової сенсорної мережі

БСС складаються з мініатюрних обчислювальних пристроїв, оснащених датчиками, актуаторами і трансиверами (приймопередавачами), що працюють в заданому діапазоні радіочастот. Такий вузол БСС називають сенсорним вузлом або просто сенсором. Сенсорний вузол являє собою плату розміром звичайно не більше одного кубічного дюйма. На платі розміщуються процесор, пам'ять - флеш і оперативна, цифро-аналогові і аналого-цифрові перетворювачі, радіочастотний приймач, джерело живлення і різні датчики, актуатори. Таким чином, апаратна частина вузла бездротової мережі може бути розділена на наступні чотири підсистеми (рис. 4):

1) комунікаційна підсистема - забезпечує безпроводне з'єднання з іншими вузлами в сенсорній мережі і містить радіо трансивер;

2) обчислювальна підсистема - забезпечує обробку даних і функціональність вузла і складається з мікроконтролера MCU, до складу якого входять процесор, оперативна SRAM, незалежна EEPROM і флеш-пам'ять, аналого-цифровий перетворювач ADC, таймер, порти введення/виведення;

3) сенсорна підсистема - забезпечує з'єднання сенсорного бездротового вузла із зовнішнім світом, до складу якої можуть входити аналогові і цифрові сенсори, актуатори;

4) підсистема електроживлення - забезпечує енергетичне постачання всіх елементів бездротового сенсорного вузла і включає пристрої генерації і акумулювання енергії, а також регулювання напруги.

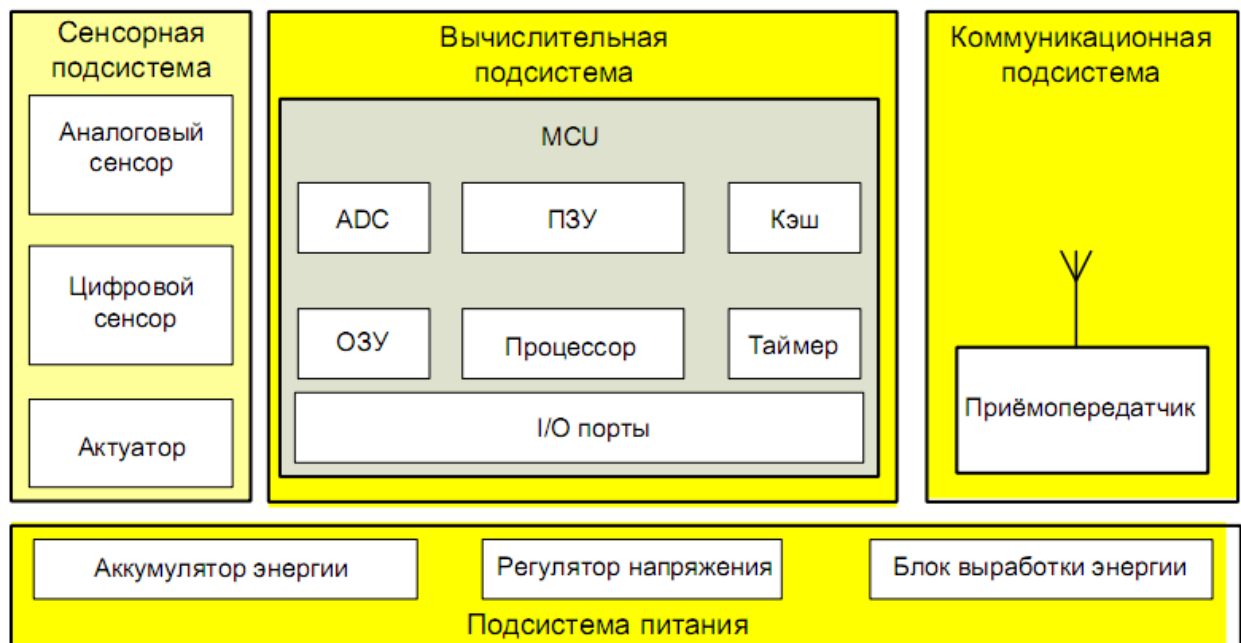


Рис.4 - Вузол бездротової сенсорної мережі

Датчики можуть бути найрізноманітнішими. Частіше за інших використовуються датчики температури, тиску, вологості, освітленості, вібрації, розташування, рідше - магнітоелектричні, хімічні (наприклад, що вимірюють вміст CO, CO₂, рівень радіаційного фону), звукові і деякі інші. Набір застосовуваних датчиків залежить від функцій, які виконуються бездротовими сенсорними мережами.

Отримані від датчика електричні сигнали часто не готові для обробки, тому вони проходять через стадію перетворення. Наприклад, сигнал часто вимагає посилення для збільшення амплітуди, можливе застосування фільтрів для усунення небажаного шуму в певних діапазонах частот і т.п. Перетворений сигнал трансформується за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) в цифровий сигнал. В результаті сигнал виходить в цифровій формі і він готовий до подальшої обробки в процесорі і зберігання в пам'яті мікроконтролера. При наявності виконавчих механізмів можлива також передача керуючих впливів від вузлів мережі до зовнішнього середовища через актуатор. Живлення сенсорного вузла здійснюється зазвичай від невеликої батареї.

Крім розміру, є й інші жорсткі обмеження для вузлів БСС. Вони повинні:

- споживати дуже мало енергії;
- працювати з великою кількістю вузлів на малих відстанях;
- мати низьку вартість виробництва;
- бути автономними і працювати без обслуговування;
- адаптуватися до навколишнього середовища.

Зовнішній вигляд сенсорних вузлів наведено на рис.5.

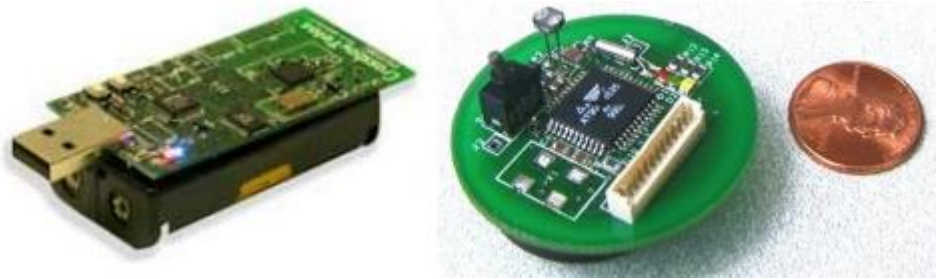


Рис.5 - Зовнішній вигляд сенсорних вузлів

Для виконання функцій на кожен сенсорний вузол встановлюється спеціалізована операційна система (ОС). Прикладом широко відомої операційної системи для сенсорних вузлів є розроблена в Університеті Берклі система з відкритим кодом **TinyOS** - це керована подіями операційна система реального часу, розрахована на роботу в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Ця ОС дозволяє сенсорам автоматично встановлювати зв'язки з сусідами і формувати сенсорну мережу заданої топології.

Як приклад в табл.1 наведені параметри сенсорних вузлів ML-Node-Z (компанії MeshLogic, Росія) і ZigBit (компанії Atmel, США). Варто зазначити, що інтегрованих сенсорних датчиків на цих платах немає.

Таблица 3.1 Характеристики сенсорных узлов

Параметры	Тип сенсорного узла:	
	ML-Node-Z	ZigBit
Микроконтроллер		
Процессор	Texas Instruments	ATmega1281

	MSP430	
Тактовая частота	От 32,768 кГц до 8 МГц	4 МГц
Оперативная память, Кбайт	10	8
Flash-память, Кбайт	48	128
Приемопередатчик		
Тип	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4
Диапазон частот, МГц	2400 - 2483,5	2400 - 2483,5
Скорость передачи данных, Кбит/с	250	250
Выходная мощность, дБм	От -24 до 0	От -28 до 3
Чувствительность, дБм	-95	-101
Антенна	Чип	1 или 2 чипа
Внешние интерфейсы		
АЦП	12-разрядный, 7 каналов	10-разрядный, 3 канала
Цифровые интерфейсы	I2C/SPI/UART /USB	I2C/SPI/UART/IR Q/JTAG
Другие параметры		
Напряжение питания, В	От 0,9 до 6,5	От 1,8 до 3,6
Размеры, мм	44x33x10	19x14x3
Температурный диапазон, °С	От -40 до 85	От 0 до 85

Оскільки однією з найважливіших функцій сенсорів є автоматичний вибір схеми організації мережі і маршрутів передачі даних, бездротові сенсорні мережі по суті є самоналагоджувальними. Найчастіше сенсорний вузол повинен мати можливість самостійно визначити своє місце розташування, по крайній мірі, по відношенню до того іншого сенсора, якому він буде передавати дані. Тобто спочатку відбувається ідентифікація всіх сенсорів, а потім вже формується схема маршрутизації.

Сенсорні вузли можуть закріплюватися стаціонарно, а також мати відносну мобільність, тобто довільно переміщатися один відносно одного в деякому просторі, не порушуючи при цьому логічної зв'язаності мережі. В останньому випадку сенсорна мережа не має фіксованої постійної топології, і її структура динамічно змінюється з плином часу.

4 Способи передачі даних в БСС

У сенсорній мережі вузли зазвичай спілкуються за допомогою бездротового зв'язку. Зв'язок може здійснюватися за допомогою радіо, інфрачервоного випромінювання (ІЧ-порту) або оптичних сигналів. Одним з найбільш поширених варіантів радіозв'язку є використання смуг частот для промислових, наукових і медичних цілей ISM (Industrial, Scientific and Medical), які визначені Сектором радіозв'язку Міжнародного союзу електрозв'язку ІТУ-Р і доступні без ліцензій в більшості країн (табл. 2). Деякі з цих частот вже використовуються в бездротових локальних мережах (WLAN).

Для сенсорних мереж малого розміру і низької вартості підсилювач сигналу не потрібно. Апаратні обмеження і знаходження компромісу між ефективністю антени і споживанням енергії накладають певні обмеження на вибір частоти передачі в діапазоні надвисоких частот. Найчастіше використовуються такі частоти ISM – 433 МГц в Європі і 915 МГц в Північній Америці. Основними перевагами використання радіочастот ISM є широкий спектр частот і доступність по всьому світу. Вони не прив'язані до конкретного стандарту, тим самим дають велику свободу для реалізації енергозберігаючих стратегій в сенсорних мережах.

Таблица 3.2 – Полосы частот ISM, определенные ITU-R

Диапазон частот		Полоса	Центральная частота	Область применения
6.765 МГц	6.795 МГц	30 КГц	6.780 МГц	Локальное применение
13.553 МГц	13.567 МГц	14 КГц	13.560 МГц	
26.957 МГц	27.283 МГц	326 КГц	27.120 МГц	
40.660 МГц	40.700 МГц	40 КГц	40.680 МГц	
433.050 МГц	434.790 МГц	1.84 МГц	433.920 МГц	Европа, Африка, Ближний Восток, Россия
902 МГц	928 МГц	26 МГц	915 МГц	Северная и Южная Америка
2.4 ГГц	2.5 ГГц	100 МГц	2.45 ГГц	
5.725 ГГц	5.875 ГГц	150 МГц	5.8 ГГц	
24 ГГц	24.25 ГГц	250 МГц	24.125 ГГц	
61 ГГц	61.5 ГГц	500 МГц	61.25 ГГц	Локальное применение
122 ГГц	123 ГГц	1 ГГц	122.5 ГГц	Локальное применение
244 ГГц	246 ГГц	2 ГГц	245 ГГц	Локальное применение

Іншим можливим способом зв'язку в сенсорних мережах є використання ІЧ-портів. ІЧ-зв'язок доступний без ліцензії і захищений від перешкод електричних приладів. ІЧ передавачі дешевше і простіше у виробництві. Багато сьогодишніх ноутбуків, КПК і мобільних телефонів використовують ІЧ-інтерфейс для передачі даних. Основним недоліком такого зв'язку є вимога прямої видимості між відправником і одержувачем. Це робить ІЧ-зв'язок небажаним для використання в сенсорних мережах через середовища передачі.

Є також вузли БСС, які використовують для передачі оптичне середовище.

Застосовуються дві схеми передачі - пасивна з використанням світловідбивачів ССР (Corner-Cube Retroreflector) і активна з використанням лазерного діода і керованих дзеркал. У першому випадку не потрібно інтегроване джерело світла, для передачі сигналу використовується конфігурації з трьох дзеркал ССР. Активний метод використовує лазерний діод і систему активного лазерного зв'язку для відправки світлових променів приймача.

Особливі вимоги до застосування сенсорних мереж роблять вибір середовища передачі складним завданням. Наприклад, морські додатки вимагають використання водного середовища передачі. Тут потрібно використовувати довгохвильові випромінювання, які можуть проникати крізь поверхню води. У важкодоступній місцевості або на поле бою можуть виникнути помилки і великі перешкоди. Крім того може виявитися, що антени вузлів не володіють потрібною висотою і потужністю випромінювання для зв'язку з іншими пристроями. Отже, вибір

передавального середовища повинен супроводжуватися надійними схемами модуляції і кодування, що залежить від характеристик передавального каналу.

5 Протоколи і технології передачі даних в БСС

За розмірами фізичної зони розміщення БСС відносяться до класу бездротових персональних обчислювальних мереж WPAN (Wireless Personal Area Networks). Найважливішим фактором при роботі бездротових сенсорних мереж є обмежена ємність батарей, що встановлюються на сенсорні вузли. Слід враховувати, що замінити батареї найчастіше неможливо. У зв'язку з цим необхідно виконувати на сенсорах тільки найпростішу первинну обробку, орієнтовану на зменшення обсягу інформації, що передається, і, що найголовніше, мінімізувати число циклів прийому і передачі даних. Для вирішення цього завдання розроблені спеціальні комунікаційні протоколи.

Найбільш відомими з протоколів БСС є протоколи альянсу ZigBee. Для вироблення стандарту стека протоколів для бездротових сенсорних мереж альянс ZigBee використовував розроблений раніше стандарт IEEE 802.15.4, який описує фізичний рівень і рівень доступу до середовища для бездротових мереж передачі даних на невеликі відстані (до 75 м) з низьким енергоспоживанням, але з високим ступенем надійності.

Стандарт IEEE 802.15.4 є базовою основою не тільки для протоколів ZigBee, але і інших більш високорівневих протоколів (6LoWPAN, DigiMesh і ін.), і дозволяє будувати за допомогою програмних надбудов на мережевому рівні і вище будь-яку топологію мережі.

На даний момент альянс ZigBee розробив єдиний в цій області стандарт, який підкріплений наявністю виробництва повністю сумісних апаратних і програмних продуктів. Протоколи ZigBee дозволяють створювати сенсорні мережі, що самоорганізуються і самовідтворюються. Пристрої ZigBee мережі завдяки вбудованому програмному забезпеченню мають здатність при включенні живлення самі знаходити один одного і формувати мережу, а в разі виходу з ладу будь-якого з вузлів можуть встановлювати нові маршрути для передачі повідомлень. Протоколи ZigBee дозволяють пристроям перебувати в сплячому режимі більшу частину часу, що значно подовжує термін служби батареї. Дальність впевненої передачі радіосигналу вузлів ZigBee мережі залежить від багатьох параметрів (в першу чергу - від чутливості приймача і потужності передавача), але в середньому відстань між вузлами мережі ZigBee на відкритому просторі становить сотні, а в приміщенні - десятки метрів.

Сенсорні мережі, що самоорганізуються, можуть бути реалізовані також на основі бездротової технології Bluetooth. Такі мережі складаються з ведучих та ведених пристроїв (ці ролі можуть поєднуватися), здатних передавати дані як в синхронному, так і в асинхронному режимах. Синхронний режим передачі передбачає прямий зв'язок між ведучим і веденим пристроями із закріпленим каналом і часовими слотами доступу.

Даний режим використовується в разі обмежених за часом передач. Асинхронний режим передбачає обмін даними між ведучим і декількома веденими пристроями з використанням пакетної передачі даних. Один пристрій (як ведучий, так і ведений) може підтримувати до 3-х синхронних з'єднань.

Спеціально для реалізації БСС є версія специфікації ядра бездротової технології Bluetooth v.4.0, що отримала назву Bluetooth з низьким енергоспоживанням (Bluetooth low energy або Bluetooth LE або BLE). Пристрої, що використовують BLE, можуть працювати більше року на одній мініатюрній батарейці типу таблетка без підзарядки. Таким чином, можна мати, наприклад, невеликі датчики, що працюють безперервно (наприклад, датчик температури), спілкуються з іншими пристроями, такими як стільниковий телефон або КПК. Ця версія специфікації Bluetooth дає можливість підтримки широкого діапазону додатків і зменшує розмір кінцевого пристрою для зручного використання в області охорони здоров'я, фізкультури і спорту, охоронних систем і домашніх розваг.

Для реалізації БСС може бути використаний також набір стандартів зв'язку IEEE 802.11 (більш відомий під торговою маркою WiFi). Бездротові мережі WiFi спочатку були задумані як спосіб заміни провідних обчислювальних мереж. Однак, відносно високі швидкості передачі (до 108 Мбіт/с) роблять перспективним можливе застосування в сенсорних мережах, що самоорганізуються, в яких необхідно передавати великі обсяги інформації в реальному часі (наприклад, відеосигналу). Для організації ієрархічних бездротових ad-hoc мереж з мобільними і статичними вузлами (mesh-мережі) розробляється протокол IEEE 802.11s. У ньому запропоновано новий протокол MAC рівня для бездротових mesh-мереж і визначено, крім усього іншого, протоколи вибору шляху і пересилання повідомлень. На відміну від традиційних мереж WiFi, в яких існує тільки два типи пристроїв - «точка доступу» і «термінал», стандарт 802.11s передбачає наявність так званих «вузлів мережі» і «порталів мережі». Вузли можуть взаємодіяти один з одним і підтримувати різні служби. Вузли можуть бути суміщені з точками доступу, портали ж служать для з'єднання з зовнішніми мережами. На основі вже існуючих стандартів IEEE 802.11 можна будувати MANET-мережі (мобільні мережі, що самоорганізуються), відмінною рисою яких можна назвати велику зону покриття (кілька квадратних кілометрів). Порівняння характеристик БСС приведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Характеристики радіотехнологій БСС

Технология (стандарт)	ZigBee (IEEE 802.15.4)	WiFi (IEEE 802.11b)	Bluetooth (IEEE 802.15.1)
Частотный диапазон	2.4-2,483 ГГц	2.4-2,483 ГГц	2.4-2,483 ГГц
Пропускная способность, кбит/с	250	11000	7131,1
Размер стека протоколов, кбайт	32-64	более 1000	более 250
Время непрерывной автономной работы от батареи, дни	100-1000	0,5-5	1-10
Максимальное число узлов в сети	65536	10	7
Диапазон действия, м	10-100	20-300	10-100
Области применения	Удаленный мониторинг и управление	Передача мультимедийной информации	Замещение проводного соединения

БСС можуть бути реалізовані також на базі бездротової технології зв'язку на малих відстанях при низьких витратах енергії UWB (Ultra-Wide Band, надширока смуга), що використовує в якості несучої надширокопосмугові сигнали з вкрай низькою спектральною щільністю потужності. Для безліцензійного використання надширокопосмугових сигналів в Російській Федерації рішенням ГКРЧ від 15 грудня 2009 р № 09-05-02 виділений діапазон 2,85 ... 10 ГГц. При цьому спектральна щільність потужності $S_{\text{нп}}$ прийомопередавача при роботі в приміщенні не повинна перевищувати -47 ... -45 дБм/МГц. Використання надширокої смуги частот (не менше 500 МГц) дозволяє UWB досягти швидкості передачі до 480 Мбіт/с на відстані до 3 м. На дистанціях до 10 м технологія дозволяє досягти лише 110 Мбіт/с.

6 Типи вузлів БСС

Типова архітектура БСС включає три типи вузлів (рис. 6):

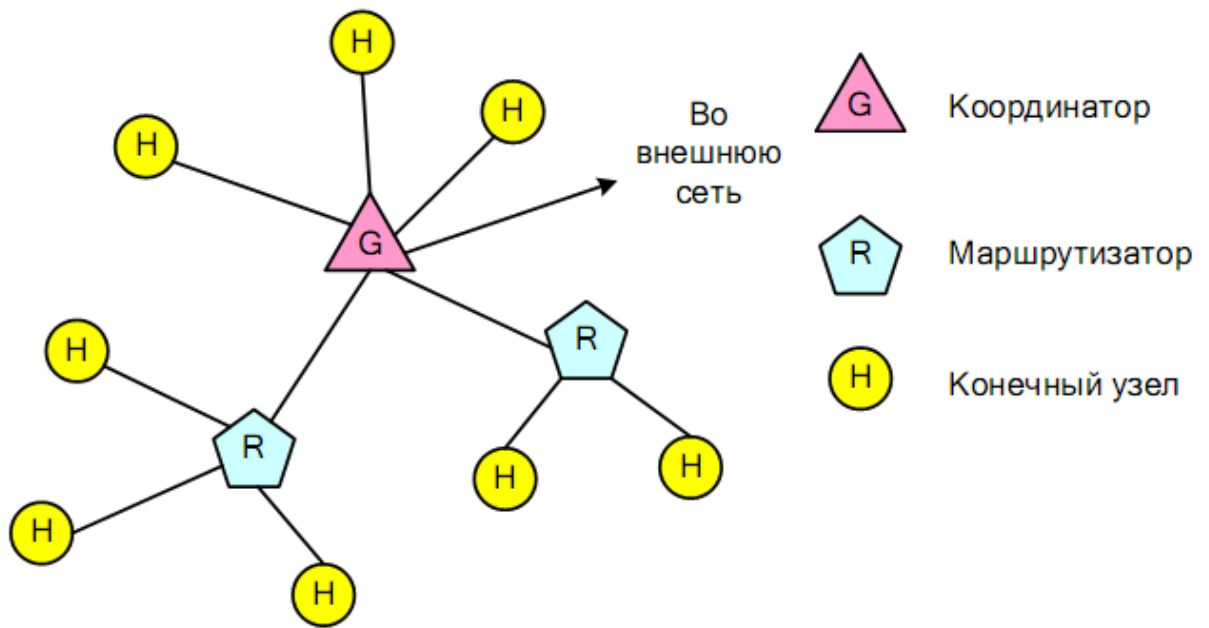


Рис. 6 - Типи вузлів БСС

1. **Координатор** - здійснює глобальну координацію, організацію та установку параметрів мережі, є найбільш складним пристроєм БСС, вимагає найбільший об'єм пам'яті і найбільшу потужність джерела живлення. В одній мережі повинен бути присутнім тільки один координатор. З координатора здійснюється вихід в зовнішню мережу (він реалізує функцію шлюзу - gateway). Часто координатор називають базовою станцією (БС).

Координатор виконує наступні функції:

визначає незадіяні канали з переліку каналів, доступних для організації мережі і визначаються розробником і організовує мережу;

передає мережеві сигнальні пакети з інформацією про існуючої мережі;

управляє мережевими підлеглими пристроями, встановлює параметри мережі - визначає максимальну глибину вкладених підмереж, число мережеских маршрутизаторів і число підлеглих пристроїв;

забезпечує маршрутизацію інформації між підлеглими пристроями;

більшу частину часу перебуває в режимі прийому;

забезпечує організацію таблиць маршрутизації;

дозволяє маршрутизаторів і кінцевим пристроям входити в мережу.

2. **Маршрутизатор** - приймає, буферизує і передає дані від інших вузлів БСС, а також визначає напрямки передачі.

Маршрутизатор виконує наступні функції:

визначає активні канали, підключається до мережі і дозволяє кінцевим пристроям входити в мережу - використовує додаткові, визначені додатком, списки активних каналів;

ретранслює сигнальні мережеві пакети з параметрами мережі від координатора;

адмініструє мережеві адреси підключених до маршрутизатора підлеглих пристроїв;

підтримує наступні класи пристроїв маршрутизації: пристрій з таблицею маршрутизації і з функцією деревовидної маршрутизації, пристрій тільки з функцією деревовидної маршрутизації, підтримка функції аварійної деревовидної маршрутизації;

підтримує два режими роботи пристроїв: без переходу в «сплячий режим» і з переходом в «сплячий» режим в періоди, які визначаються координатором мережі і параметрами мережевої синхронізації;

підтримує функції маршрутизації багато чарункових мереж: створює таблиці сусідніх мережевих вузлів з параметром якості зв'язку з кожним з них, створює таблиці мережевої маршрутизації, ретранслює пакети запиту і підтвердження визначення маршрутів між пристроями;

підтримує функції маршрутизації по деревовидному принципу - транслює повідомлення вгору і вниз по ієрархічній структурі дерева гілки в залежності від адреси одержувача повідомлення.

3. Кінцевий пристрій (сенсорний вузол) - виконує тільки прикладні дії (збір інформації та управління віддаленим об'єктом) і не здійснює ретрансляцію даних.

Сенсорний вузол має такі особливості:

завжди шукає і намагається увійти в існуючу мережу - використовує додаткові, визначені додатком, списки активних каналів і сигнальні пакети синхронізації існуючої мережі для визначення параметрів мережі та маршрутизатора для входу в мережу;

живиться від автономного джерела (батареї);

з пакетів синхронізації визначає наявність даних від координатора;

запрошує дані від координатора;

здатний знаходитися тривалий час в «сплячому» режимі (до 99,99% від всього часу роботи).

По виконуваних наборах функцій все вузли БСС можна віднести до двох видів:

1. Пристрій з повним набором функцій FFD (Fully Function Device):

підтримка стандарту IEEE 802.15.4;

додаткова пам'ять і енергоспоживання дозволяють виконувати роль координатора мережі;

підтримка всіх типів топологій («точка-точка», «зірка», «дерево», «чарункова мережа»);

здатність виконувати роль координатора мережі;

здатність звертатися до інших пристроїв в мережі.

2. Пристрій з обмеженим набором функцій RFD (Reduced Function Device):

підтримує обмежений набір функцій стандарту IEEE 802.15.4;

підтримка топології «точка-точка», «зірка»;

не виконує функції координатора;

звертається до координатора мережі і маршрутизатора.

Координатори та маршрутизатори завжди відносяться до пристроями FFD, кінцеві пристрої можуть бути RFD або FFD.

ВИСНОВКИ

Перспективним напрямком досліджень в області IoT є розвиток бездротових сенсорних мереж (БСС), які активно розвиваються на сьогодні.

Контрольні питання по лекції 5

1. Що таке сенсорна мережа? З яких елементів вона складається?
2. У чому особливість мережі зв'язку, що самоорганізується (ad hoc)?
3. Які компоненти входять до складу базової архітектури сенсорної мережі?
4. З яких підсистем складається апаратна частина вузла бездротової сенсорної мережі?
5. Які обмеження існують для вузлів БСС?
6. Які способи передачі даних використовуються в БСС?
7. Які протоколи і технології передачі даних використовуються в БСС?
8. Вкажіть відмінності основних типів вузлів БСС.

Тема лекції: ОСОБЛИВОСТІ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Питання лекції

1. Типові архітектури та топології БСС
2. Режими роботи БСС
3. Протоколи маршрутизації в БСС
4. Сполучення БСС з мережами загального користування
5. Проблеми реалізації БСС
6. Електроживлення вузлів БСС від зовнішнього середовища
7. БСС та Інтернет речей

1 Типові архітектури та топології БСС

Виділяють два типи архітектури бездротових сенсорних мереж: однорідні (однорангові) і ієрархічні (кластерні). Однорідність мережі має на увазі, що всі вузли виконують однакові функції при зборі, обробці та передачі інформації. Цей підхід дозволяє домогтися оптимальної маршрутизації. Пересилання даних відбувається по найефективнішим за деякими критеріями маршрутами, що дозволяє домогтися економії таких важливих ресурсів, як енергія (передача іде по маршруту з найвищим запасом енергії) і час (передача відбувається по найкоротшому маршруту). Для критично важливих даних може бути організована передача по найбільш надійному шляху.

Агрегування даних, якщо необхідно, відбувається у міру проходження повідомлень до координатора. Однак при такій організації мережі формування зв'язків між вузлами відбувається спонтанно, що веде до зіткнень пакетів і виникнення затримок, пов'язаних з виходом із сплячого режиму вузлів, що знаходяться на обраному шляху передачі.

Альтернативним підходом є ієрархічна (деревоподібна) маршрутизація. Вона заснована на поділі мережі на області, які називаються кластерами. кластер утворюють маршрутизатор і кінцеві вузли, у яких він запитує сенсорні дані (рис. 1).

Усередині кожного кластера маршрутизатор відповідає за збір інформації з усього кластера, її обробку і подальшу передачу. Решта вузли кластера здійснюють тільки збір даних і передачу їх маршрутизатора. Таким чином, вузли в ієрархічній мережі не рівноправні. По-перше, агрегування даних відбувається на маршрутизаторах, і, по-друге, пересилання агрегованих даних далі може проводитися тільки маршрутизаторами. Таким чином, мінімізуються затримки передачі, оскільки маршрутизатори доступні завжди. Зіткнення пакетів виключені завдяки централізованому методу створення посилань. Однак така маршрутизація не надає оптимальних шляхів передачі даних. До того ж сенсорний вузол, що виконує функції маршрутизатора, витрачає значно більше енергії, що призводить до швидкого виснаження його батарей. Існують архітектури, які передбачають використання в якості маршрутизаторів фізично виділених сенсорів, що володіють великими запасами енергії і обчислювальними потужностями, однак цей підхід застосовується лише для вузького ряду додатків. Маршрутизатор кластерів ретранслюють дані один одному і, в кінцевому рахунку, дані передаються координаторові. Координатор зазвичай має зв'язок з IP-мережею, куди і прямують дані для остаточної обробки. У кожній мережі повинно бути, щонайменше, одне повнофункціональний пристрій FFD для роботи в якості координатора.

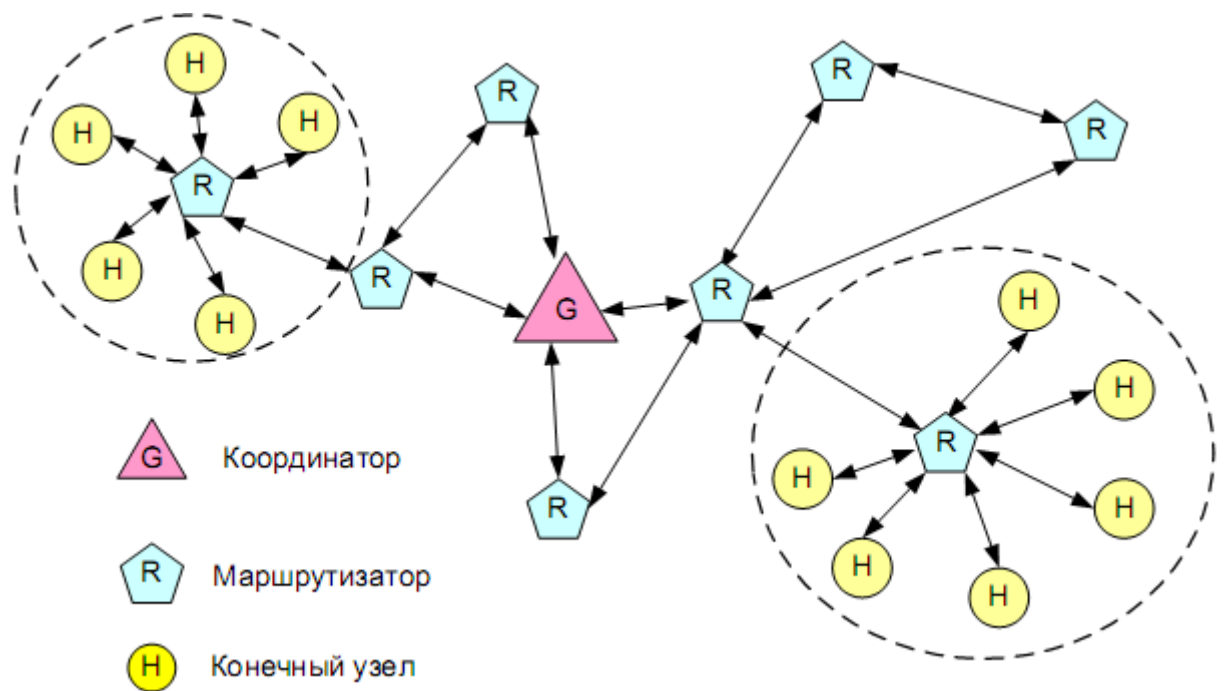


Рис. 1 - Кластерна структура БСС

Можливо також побудова тимчасових **пористих мереж** (рис. 2). У таких мережах функціональні можливості кожного сенсорного вузла однакові. Можливість самоорганізації і самовідновлення мереж комірчастої топології дозволяє в разі виходу частини сенсорів з ладу спонтанно формувати нову структуру мережі. Правда, в будь-якому випадку потрібен центральний функціональний вузол-координатор, який приймає і обробляє всі дані, або шлюз для передачі даних на обробку зовнішньому вузлу.

Спонтанно створювані мережі часто називають латинським терміном Ad Hoc, що означає «для конкретного випадку».

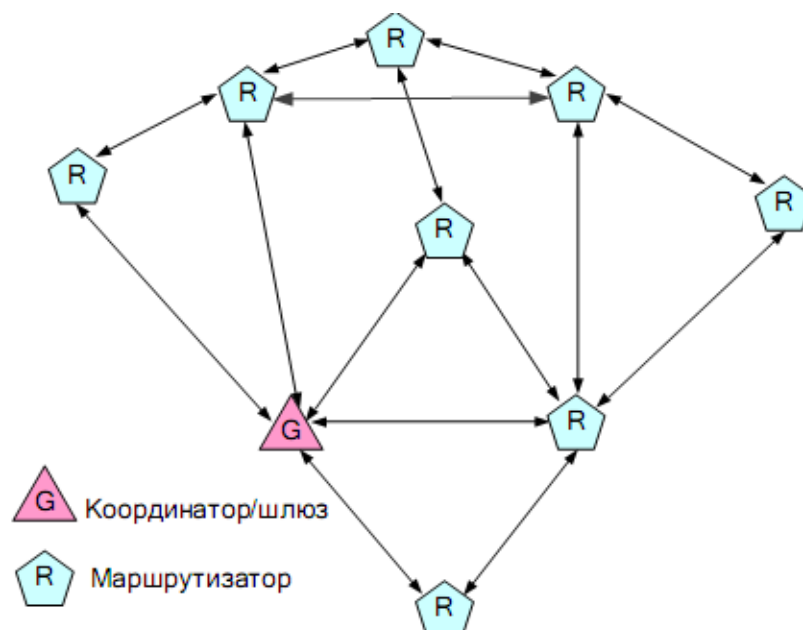


Рис. 2 - Ніздрювата структура БСС

Можливі топології сенсорної мережі наведені на рис. 3. Однорангові мережі можуть формувати довільні топологічні структури (точка-точка, зірка), обмежені тільки дистанцією між кожною парою вузлів. Mesh-мережі (Mesh Topology) - базова повнозв'язна топологія, в якій кожен маршрутизатор мережі з'єднується з декількома іншими маршрутизаторами цієї ж мережі. Характеризується високою стійкістю до відмов, але і більш складною настроюванням.

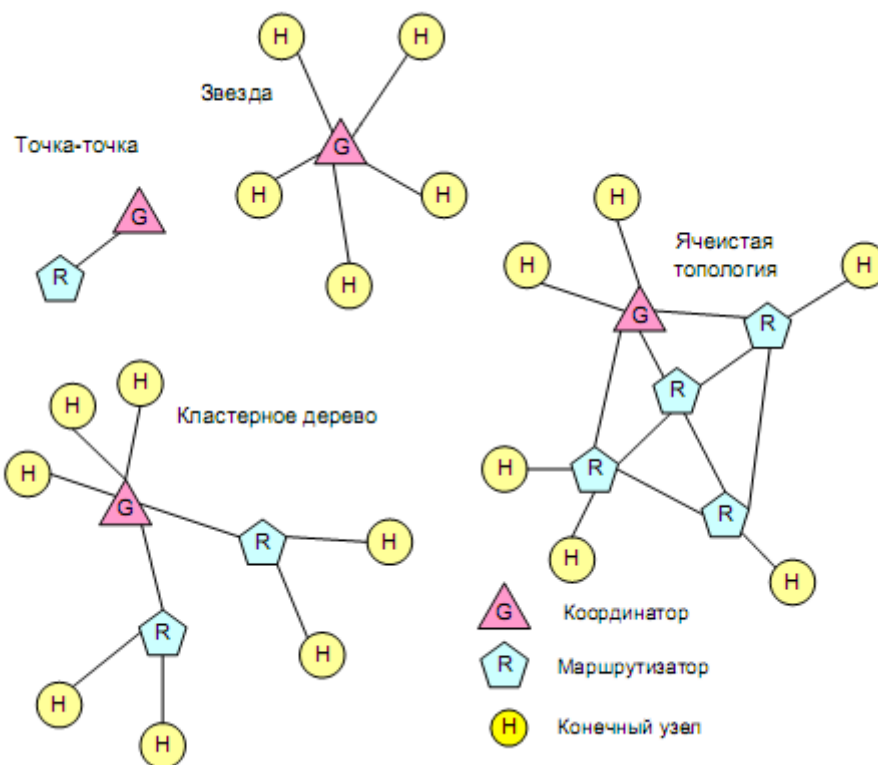


Рис. 3 - Возможні топології сенсорної мережі

Прикладом тимчасової або пирингової мережі (від англ. Peer-to-peer, P2P - рівний до рівного) є кластерне дерево. Мережа типу кластерне дерево є приватним випадком мережі P2P, в якій більшість пристроїв є FFD. Пристрої RFD підключаються до кластеру в якості кінцевих вузлів. Для приєднання до мережі віддалених від координатора нових мережевих пристроїв можуть використовуватися вже під'єднані до мережі FFD в режимі координатора. В цьому режимі вони, як і спочатку координатор PAN, «зазивають» маяками в мережу нові мережеві пристрої. В результаті формується кластер з мережевих пристроїв, які «чують» свого координатора. Проте, вся інформація про кластер доступна координатору PAN. Подібним чином можуть формуватися мультікластери з мережевих пристроїв.

2 Режими роботи БСС

Самою енерговитратній операцією для сенсорних вузлів є передача даних в бездротове оточення. Тому енергозберігаючі форми передачі є

ключовим фактором для продовження терміну служби сенсорів, так як він практично цілком залежить від терміну служби батарей.

Збір даних бездротової сенсорної мережею може здійснюватися різними способами в залежності від цільового призначення конкретної мережі. Приймаючи до уваги різні способи використання мережевих ресурсів, бездротові сенсорні мережі можна розділити на класи в залежності від виду їх функціонування і типу цільового додатки:

1. Проактивні мережі. Вузли такої мережі періодично включають свої сенсори і передавачі, знімають показання і передають їх на базову станцію. Таким чином, вони роблять "моментальну фотографію" свого оточення з певною періодичністю і використовуються зазвичай для додатків, що вимагають регулярного моніторингу деяких значень.

2. Реактивні мережі. Вузли реактивних мереж з певною періодичністю знімають показання, однак залишають поза передачею їх, якщо отримані дані потрапляють в певну область нормальних показань. У той же час відомості про несподівані і різкі зміни в показаннях датчиків або їх виході за діапазон нормальних значень негайно передаються на базову станцію. Цей вид мережі призначений для роботи з додатками реального часу.

3. Гібридні мережі. Це комбінація двох перерахованих вище типів, де сенсорні вузли не тільки періодично відправляють зняті дані, але і реагують на різкі зміни в значеннях.

3 Протоколи маршрутизації в БСС

Для визначення маршруту передачі інформації в БСС від кінцевого вузла до вузла-координатора, а також між кінцевими вузлами, використовуються спеціальні протоколи маршрутизації. Протоколи маршрутизації в БСС вирішують наступні завдання:

1. Самоорганізація вузлів мережі (самоконфігурування, самовідновлення та оптимізація).

2. Маршрутизація пакетів даних і адресація вузлів.

3. Мінімізація енергоспоживання вузлів мережі і збільшення загального часу життя всієї мережі.

4. Збір і агрегація даних.

5. Регулювання швидкості передачі і обробки даних в мережі.

6. Максимізація зони покриття мережі.

7. Забезпечення заданої якості обслуговування (QoS).

8. Захист від несанкціонованого доступу.

При виборі шляху передачі інформації в мережі в якості метрик в них можуть бути використані наступні параметри:

довжина шляху (кількість ділянок переприйому інформації);

надійність;

затримка;

пропускна здатність;

завантаження;

вартість передачі трафіку і ін.

Протоколи маршрутизації БСС відповідають за підтримку маршрутів в мережі і повинні гарантувати надійний зв'язок навіть в жорстких несприятливих умовах. Багато протоколи маршрутизації, управління електроживленням, поширення даних, були спеціально розроблені для БСС, де енергозбереження є суттєвою проблемою, на вирішення якої спрямовано протокол. Інші ж були розроблені для загального застосування в бездротових мережах, але знайшли своє застосування і в БСС.

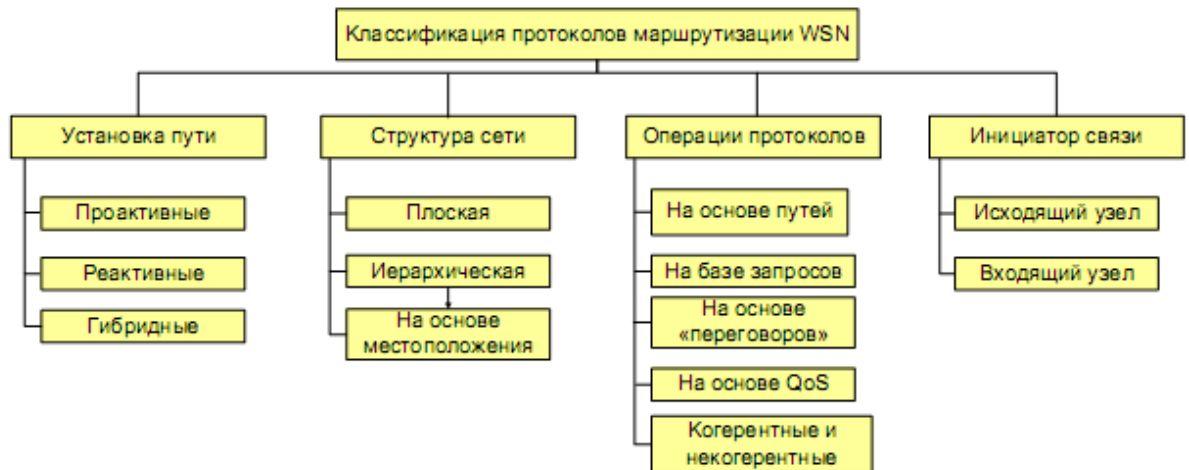


Рис. 4 - Класифікація протоколів маршрутизації БСС

Існує велика кількість протоколів маршрутизації для БСС, класифікувати їх можна за різними ознаками (рис. 4). Залежно від використовуваного режиму роботи мережі, що обумовлює необхідність передачі інформації від вузлів, всі протоколи маршрутизації можна розділити на проактивні (всі шляхи визначаються заздалегідь, до того як вони будуть потрібні), реактивні (шляху визначаються на вимогу) та гібридні (комбінація перших двох).

Протоколи, що враховують структури мережі, діляться на:

1) протоколи однорівневої (плоскої) (flat-based) маршрутизації - всі вузли БСС мають однакову функціональність, приклади: SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation), Direct Diffusion, Rumor Routing;

2) протоколи ієрархічної (hierarchical-based) маршрутизації - вузли мережі виконують різні функції, вони можуть бути і фізично різними, приклади: LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), PEGASIS (Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems), TEEN і APTEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols), SOP (Self-Organization Protocol);

3) протоколи маршрутизації на основі інформації про місцезнаходження вузла (location-based), приклади протоколів: GAF (Geographic Adaptive Fidelity), GEAR (Geographic and Energy Aware Routing).

Робота протоколу маршрутизації може ґрунтуватися на різних принципах:

1) протоколи маршрутизації з багатьма маршрутами (multipath routing) - використовуються кілька маршрутів від джерела до точки призначення, що підвищує надійність з'єднання, але збільшує накладні витрати і енерговитрати;

2) протоколи маршрутизації «на замовлення» (query-based) - вузол посилає запит на дані в мережу і інший вузол, який має запитовані дані, відповідає на запит;

3) протоколи маршрутизації, засновані на «переговорах» (negotiation routing) між вузлами;

4) протоколи, які враховують якість обслуговування (QoS-based), що дозволяє забезпечити певний рівень послуг в мережі.

У протоколах, спрямованих на агрегацію даних, проміжні вузли, що розташовуються між джерелами інформації та базовою станцією (БС), можуть здійснювати агрегацію даних і посылати БС вже зведені дані. Цей процес дозволяє сенсорним вузлів економити енергію.

Всі протоколи маршрутизації також можна розділити на два види - в одних ініціатором з'єднання є джерело інформації, а в інших - одержувач.

Класифікація протоколів маршрутизації БСС на основі типів вузлів показана на рис. 5.

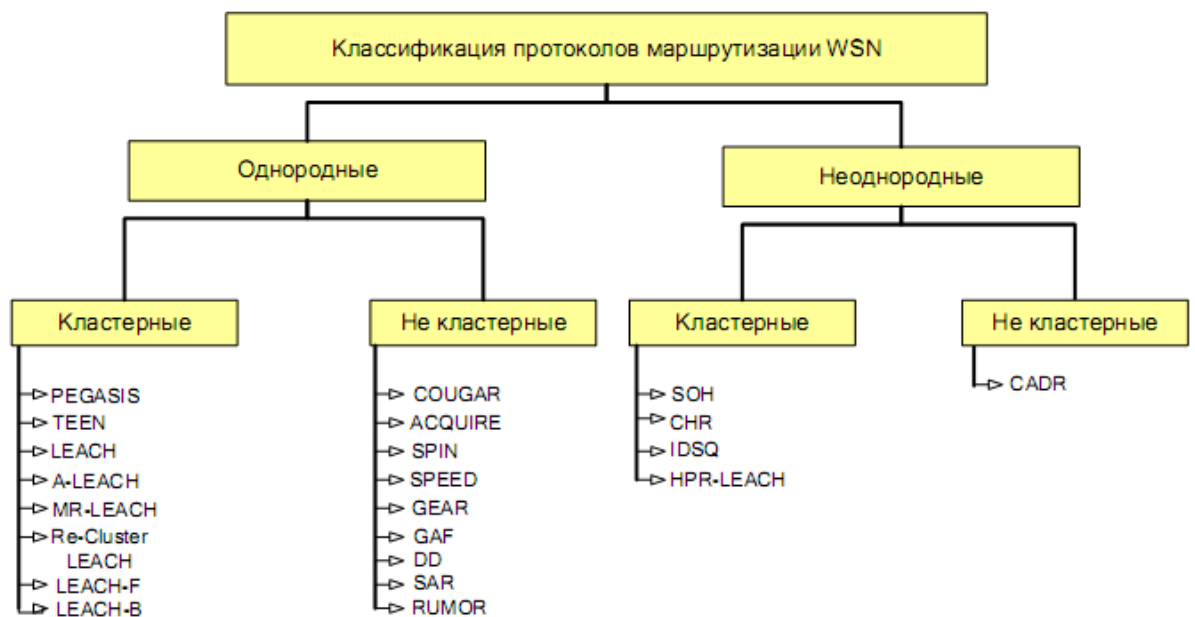


Рис. 5 - Класифікація протоколів маршрутизації БСС

В останні роки активно впроваджуються бездротові децентралізовані, що самоорганізуються мережі, що складаються з мобільних пристроїв MANET (Mobile Ad hoc NETwork). Кожен пристрій такої мережі може незалежно пересуватися в будь-яких напрямках, і, як наслідок, часто розривати і встановлювати з'єднання с сусідами.

Мережі, що самоорганізуються, MANET мають наступні переваги над бездротовими мережами традиційної архітектури:

можливість передачі даних на великі відстані без збільшення потужності передавача;

стійкість до змін в інфраструктурі мережі;

можливість швидкої реконфігурації в умовах несприятливої завадової обстановки;

простота і висока швидкість розгортання мережі.

Однак мобільність вузлів веде до додаткового підвищення динамічності топології мережі і, отже, до можливості обриву зв'язку через перешкоди або включення/вимикання вузла додається ймовірність його переміщення.

Для маршрутизації на мережевому рівні в MANET використовуються спеціальні протоколи, орієнтовані на динамічні мережі (наприклад, підтримувати маршрут, якщо поїхав проміжний вузол, і маршрут зруйнувався):

1) реактивні - знаходять маршрут в тому випадку, коли потрібно передати пакет і для нього немає відомого шляху і намагаються змінити цей шлях, якщо сталася помилка, приклади:

спеціалізований протокол вектора відстані за запитом AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector), протокол динамічної маршрутизації джерела DSR (Dynamic Source Routing) і ін.;

2) проактивні (превентивні) - знаходять маршрут заздалегідь для всіх можливих пар джерело-приймач і періодично оновлюють інформацію про маршрутизації для підтримки шляхів, приклади: протокол оптимізованої маршрутизації стану з'єднання OLSR (Optimized Link-State Routing) і ін.

Перевагу одному або іншому виду протоколів може бути віддано тільки з урахуванням обстановки і швидкостей руху абонентів. Наприклад, для автомобільної версії MANET має сенс використовувати реактивні протоколи.

Мережі MANET включають Ad hoc мережі для транспортних засобів VANET (Vehicular Ad hoc Network), в яких кожен бере участь автомобіль перетворюється в бездротовий маршрутизатор або вузол, що дозволяє автомобілям підключатися один до одного на відстані і створювати мобільну мережу. Стандарт для мереж VANET розробляється в рамках робочої групи IEEE 802.11p. Технічні засоби стандарту IEEE 802.11p повинні функціонувати на швидкості до 200 км/год і на відстані до 1 км. Фізичний рівень і MAC підрівень базуються на стандарті IEEE 802.11a. Частотний діапазон для США включає спектр від 5,859 до 5,925 ГГц, для Європи рекомендується використання двох піддіапазонів шириною по 10 МГц кожен: 5,865 - 5,875 ГГц і 5,885 - 5,895 ГГц.

Можливості по взаємодії транспортних засобів між собою і з мережею зв'язку загального користування в найближчі роки можуть привести до утворення нового, дуже масштабного сегмента Інтернету речей. Уже зараз сучасний автомобіль інтегрує в себе GPS / GLONASS приймач, різні сенсори, бортовий комп'ютер. Однак завдання, яке ставиться при створенні VANET, дещо інше. Архітектура мережі VANET передбачає взаємодію автомобіля, як

з іншими автомобілями, так і з придорожньої мережею. При цьому виділяється три групи послуг:

1. Забезпечення безпеки - допомога водію (навігація, запобігання зіткнень і зміна смуг), інформування (про обмеження швидкості або про зону ремонтних робіт), попередження (післяаварійні, про перешкоди або стані дороги).

2. Підвищення ефективності управління автомобільним трафіком - скорочення тривалості поїздки, споживання палива.

3. Підвищення рівня комфорту пасажирів і водіїв - інформація про місцезнаходження автомобіля, про поточний трафіку на дорогах, про погоду, можливість здійснення P2P з'єднань, в тому числі з власним будинком через придорожню мережу, а також інформація від придорожньої мережі про готелі, станціях заправки, меню в ресторанах і так далі.

4 Сполучення БСС з мережами загального користування

В даний час для сполучення БСС з мережами зв'язку загального користування (ССОП) зазвичай використовується протокол бездротових персональних мереж на базі мережевого протоколу IPv6 з низьким енергоспоживанням 6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks), запропонований IETF, який дозволяє інтегрувати сенсорні мережі в існуюче сімейство мереж стека протоколів TCP / IP. Даний протокол дозволяє передавати IP-пакети поверх стандарту IEEE 802.15.4 способом, що задовольняє відкритим стандартам (протокол IPv6). При цьому забезпечує взаємодія з іншими IP-каналами і пристроями. Протокол 6LoWPAN створений для малопотужних бездротових персональних мереж (LoWPANs) і описаний в документах RFC4919 і RFC4944. В архітектурі мережі 6LoWPAN (рис. 6) визначені три типи логічних пристроїв (крайовий вузол, маршрутизатор і шлюз), а також три види мереж: «Проста LoWPAN», «Розширена LoWPAN» і «Ad hoc LoWPAN». Як видно з малюнка, «Ad hoc LoWPAN» не підключена до ССОП, «Проста LoWPAN» підключена до ССОП через один шлюз, а «Розширена LoWPAN» включає в себе кілька шлюзів, пов'язаних з ССОП і один з одним за допомогою магістральної лінії зв'язку.

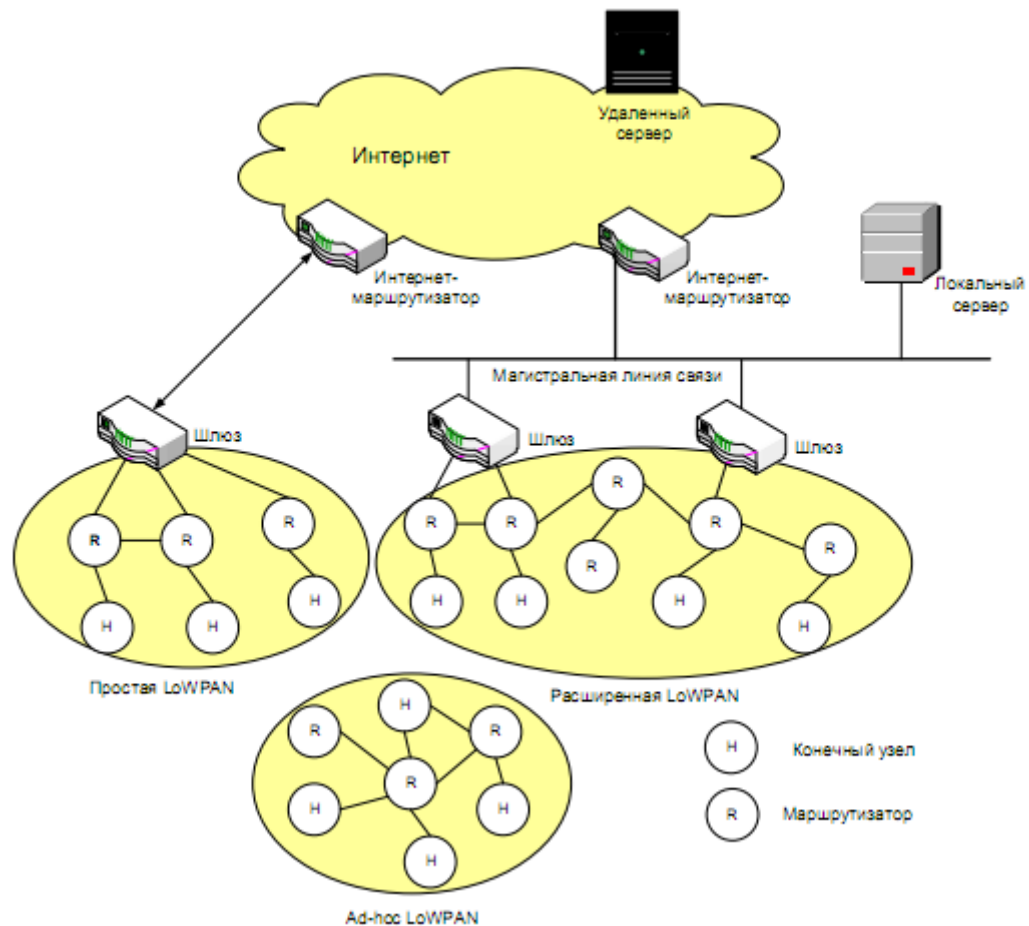


Рис. 6 - Архитектура мережі 6LoWPAN

5 Проблеми реалізації БСС

При практичній реалізації бездротових сенсорних мереж існує ряд проблем:

1. Проблема енергоспоживання.

Обмеження по енергоспоживанню пов'язаний з тим, що сенсори працюють від джерела живлення з обмеженим лімітом енергії (зазвичай батарейка). Чим рідше вони будуть замінюватися або заряджатися, тим нижчу вартість буде мати їх обслуговування. Також енергоспоживання є важливим обмеженням при використанні сенсорів, доступ до яких ускладнений, отже, джерело живлення не може бути замінений або заряджаючи. Для зменшення енергоспоживання зазвичай передбачається відключення передавачів сенсорних вузлів, коли немає необхідності передачі інформації.

На мережевому рівні використовуються оптимальні шляхи передачі інформації від сенсорного вузла до координатора (базової станції), з огляду на число проміжних вузлів, необхідну енергію і доступну енергію. Крім мережевого протоколу на споживання енергії впливає конструкція вузлів (наприклад, маленький розмір пам'яті, ефективність перемикачів між

завданнями), програмне забезпечення, механізми захисту і навіть робочі додатки.

2. Проблема самоврядування.

Сенсорні мережі часто повинні працювати у віддалених областях і в жорстких умовах, без можливості їх обслуговування і ремонту. Тому, сенсорні вузли повинні конфігуруватися самостійно, взаємодіяти з іншими вузлами, адаптуватися до полумок змін навколишнього середовища без втручання людини.

3. Проблема бездротового з'єднання.

Вибір бездротового з'єднання накладає ряд обмежень на реалізацію сенсорних мереж. Наприклад, загасання сигналу обмежує відстань передачі інформації. Так зв'язок між потужностями сигналів переданої і прийнятої інформацією описується законом зворотного квадрата відстані:

$$P_{\text{пр}} \sim P_{\text{прд}} / D^2,$$

де $P_{\text{пр}}$ - потужність прийнятого сигналу;

$P_{\text{прд}}$ - потужність переданого сигналу;

D - відстань між передавачем і приймачем.

Отже, збільшення відстані між сенсорним вузлом і маршрутизатором/координатором призводить до збільшення потужності сигналу, що передається.

Тому більш ефективно, з точки зору витрат енергії, розділити великі відстані передачі інформації в сенсорних мережах на кілька невеликих.

4. Проблема децентралізованого управління.

Алгоритми побудови багатьох сенсорних мереж будуються з централізованого принципом. При децентралізованому управлінні сенсорні вузли повинні обмінюватися інформацією з сусідніми вузлами, щоб згенерувати рішення про комутації вузлів, без глобальної інформації про всю мережі. Внаслідок цього децентралізовані алгоритми можуть бути неоптимальними, але більш ефективними щодо енергії, ніж централізовані. Наприклад, при централізованому управлінні базова станція може опитувати всі сенсорні вузли, приймати від них інформацію, повідомляти кожному вузлу свій маршрут передачі інформації. При частій зміні мережі втрати будуть значні.

Децентралізований підхід дозволяє кожному вузлу робити власне рішення при наявності невеликої інформації (список сусідніх пристроїв, що включає інформацію про відстані до базової станції). В даному випадку втрати на управління будуть значно зменшені.

5. Проблема конструкції.

Головною метою бездротових сенсорних мереж є створення маленьких, дешевих і ефективних пристроїв. Через вимоги до низького споживання енергії типовий сенсорний вузол має невеликі швидкості виконання операцій і обсяги інформації, що зберігається. Також через це небажано використання деяких пристроїв, таких як GPS-приймачі. Обмеження за розмірами впливає

на структуру протоколів і алгоритмів, реалізованих в бездротових сенсорних мережах. Наприклад, таблиця всіх маршрутів в мережі може бути слушком великий і не поміститься в пам'яті вузла. Тому тільки невелика частина інформації (наприклад, список сусідніх вузлів) може зберігатися в пам'яті вузла.

6. Проблема безпеки.

Віддалене розташування сенсорів і їх автоматична робота збільшує їх незахищеність до стороннім вторгненням і атакам. При бездротовому з'єднанні досить легко для порушника перехопити пакети, що передаються сенсорним вузлом. Наприклад, найбільш велика загроза здійснення атаки «відмови в обслуговуванні» (denial-of-service), мета даної атаки порушити коректне функціонування сенсорної мережі. Це може бути досягнуто за допомогою різних способів, наприклад, при подачі потужного сигналу, який заважає сенсорним вузлів обмінюватися інформацією («білий шум» або jamming attack). Є різні варіанти захисту систем від зловмисників, але для багатьох з них необхідні високі вимоги до апаратних ресурсів, що важкодосяжно на жорстко обмежених по багатьом вимогам сенсорних вузлах.

Отже, сенсорні бездротові мережі вимагають нових рішень для створення ключів, їх поширення, ідентифікації та захисту вузлів.

6 Електроживлення вузлів БСС від зовнішнього середовища

Одним з основних вимог, що пред'являються до вузлів сенсорної мережі, є тривалий час їх автономної роботи. Завдання зменшення енергоспоживання може вирішуватися за рахунок оптимізації конструкції і режимів роботи аналогових і цифрових схем вузлів, а також за рахунок вилучення енергії, необхідної для роботи цих схем, з довкілля. В даний час в усьому світі ведеться активний пошук нових екологічних і необмежених ресурсів енергії, які дозволять мережевим пристроям позбутися батарей або дротів і розробити автономні бездротові сенсорні мережі з теоретично необмеженим терміном служби.

В навколишньому середовищу існують чотири основних джерела енергії: механічна енергія (вібрації, деформації), теплова енергія (температурні перепади або зміни), енергія випромінювання (сонце, інфрачервоні промені, радіочастоти) і хімічна енергія (хімія, біохімія). Ці джерела характеризуються різною щільністю потужності (рис. 7).

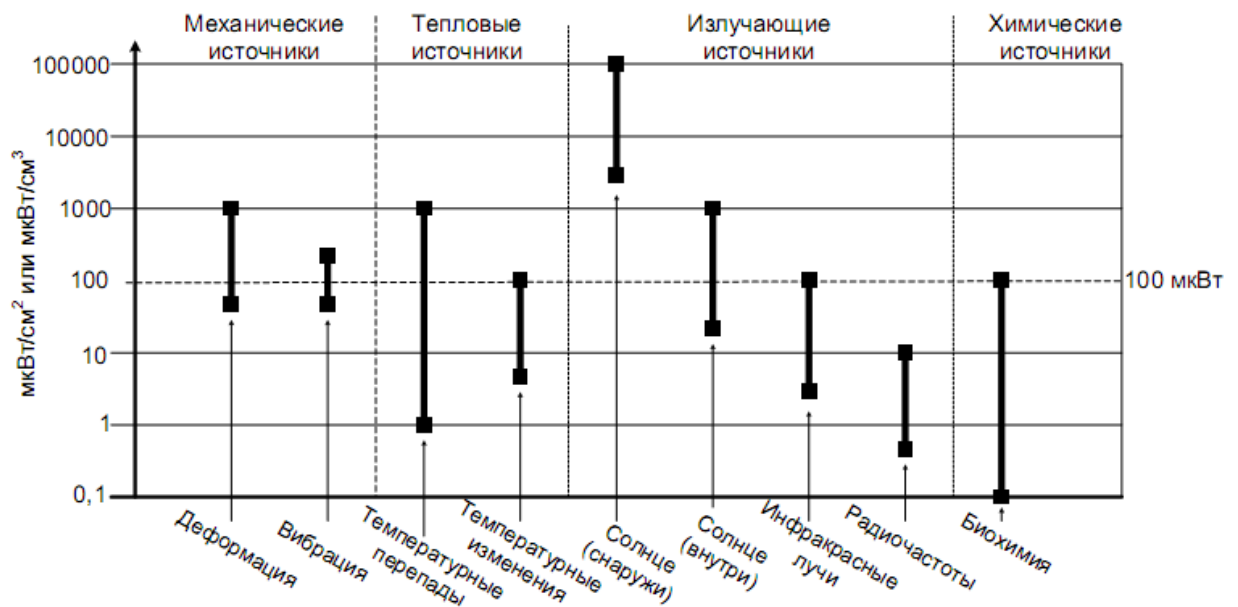


Рис. 7 - Щільність потужності (до перетворення) для різних типів джерел енергії із зовнішнього середовища

Малюнок показує, що значення вихідної потужності 10-100 мкВт є прийнятним при розмірах джерела в 1 см² або 1 см³. Отримання енергії від сонця вважається найбільш потужним (навіть якщо значення, наведені на рис. 8, повинні бути помножені на вагові коефіцієнти для перекладу ККД, рідко перевищують 20% в фотоелементах). На жаль, отримання сонячної енергії неможливо в темних ділянках (наприклад, в приміщеннях). Аналогічно неможливо отримувати енергію від температурних перепадів, якщо цих перепадів немає або від неіснуючих вібрацій. Як наслідок, джерело зовнішньої енергії повинен бути обраний відповідно до місцевим середовищем, навколишнього вузол бездротової сенсорної мережі, тобто не існує універсального джерела енергії із зовнішнього середовища.

Для живлення вузлів сенсорної мережі від навколишнього енергії необхідно знизити споживання енергії датчиками (сенсорами/актуаторами), мікроконтролером і радіо-передавачем. В останні роки значний прогрес в цьому напрямку було досягнуто виробниками мікроконтролерів і радіочастотних чипів (Atmel, Microchip, Texas Instruments і ін.) Як для робітника, так і для холостого режиму. Приклад типового споживання енергії вузлом бездротових сенсорних мереж наведено на рис. 8.

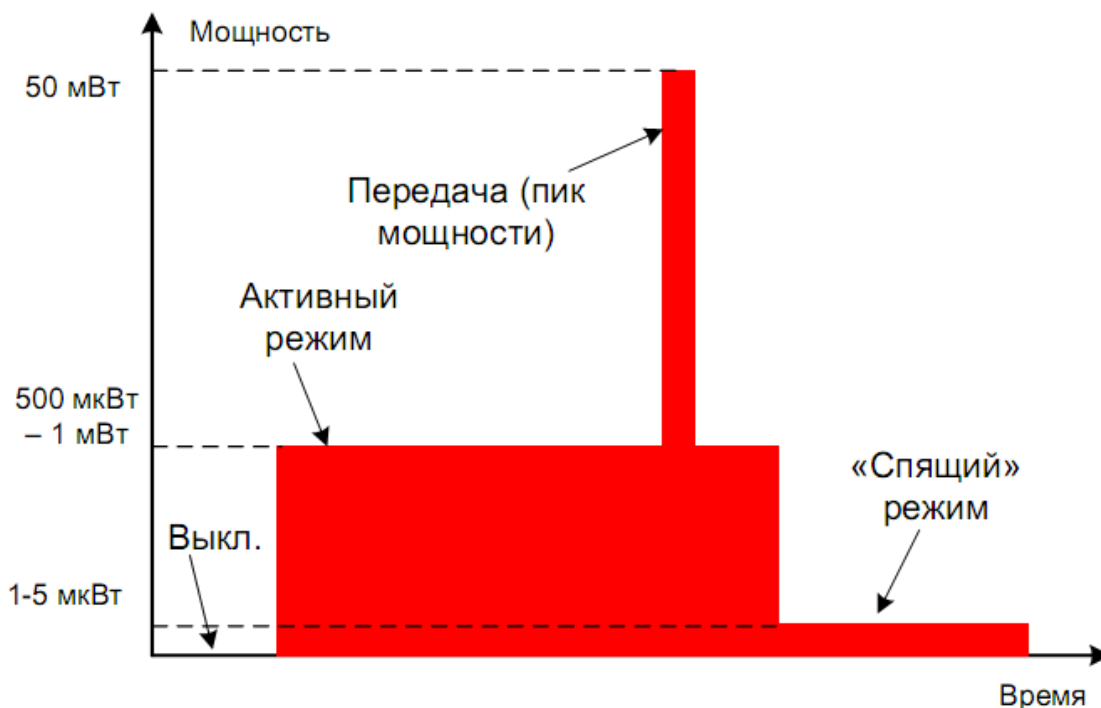


Рис. 8 - Графік споживання енергії вузлом БСС

Можна виділити три типових значення споживаної потужності:

- 1) 1-5 мкВт: споживання енергії в «сплячому» режимі;
- 2) 500 мкВт - 1 мВт: споживання енергії в активному режимі;
- 3) 50 мВт: пік передачі енергії.

Аналіз наведеної діаграми дозволяє зробити наступні висновки. По-перше, мінімальна потужність джерела енергії із зовнішнього середовища для побудови життєздатних бездротових вузлів повинна бути порядку 1-5 мкВт, що відповідає достатній величині для холостого режиму мікропроцесора і радіочастотного чіпа.

По-друге, сучасні джерела енергії із зовнішнього середовища не можуть забезпечувати бездротові сенсорні мережі енергією, достатньою для активного режиму (споживання енергії в 500 мкВт - 1 мВт проти 10-100 мкВт для вихідної потужності таких джерел). Однак, завдяки ультранизьким споживання енергії в сплячому режимі, бездротові сенсорні мережі, що живляться від зовнішнього середовища, можуть використовувати переривчастий робочий цикл, зображений на рис. 9. Енергія зберігається в буфері (а) (конденсатори, батареї) і використовується для виконання вимірювального циклу, як тільки енергії в буфері стає досить (б і в). Далі система знову повертається до сплячого режиму (г), чекаючи нового вимірювального циклу.

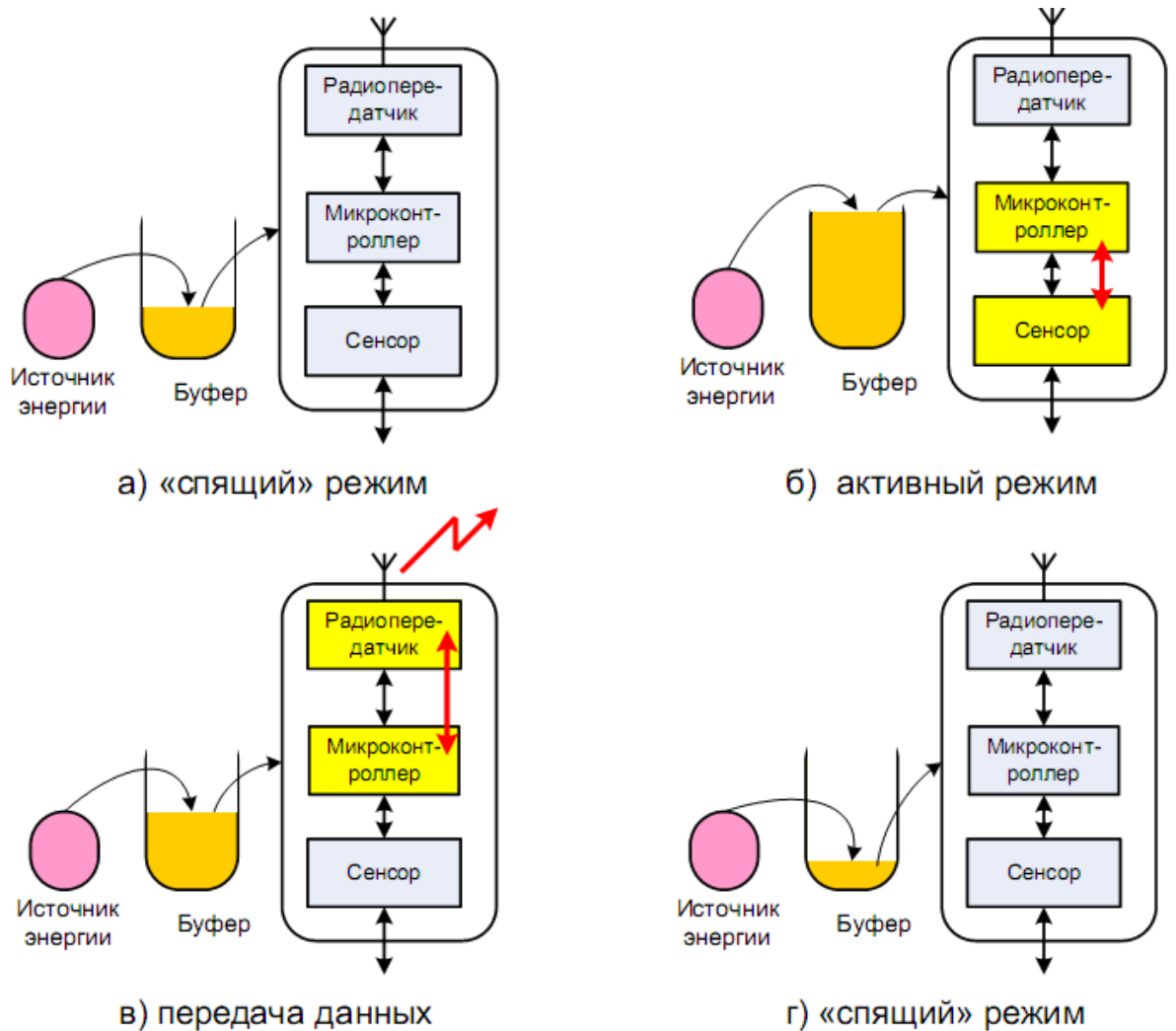


Рис. 9 - Рабочий цикл в бездротовій сенсорній мережі

Таким чином, використовуючи енергію із зовнішнього середовища можливо харчування будь-яких додатків, навіть самих неощадливих. Основною проблемою є адаптація частоти вимірювального циклу до безперервно вироблюваної енергії. Середнє енергоспоживання сенсорних вузлів (P) відповідає загальній кількості енергії, необхідної для одного вимірювального циклу (W), помножену на частоту цієї дії (f):

$$P = W f. \quad P = W \times f.$$

Ця проста зв'язок між P , W і f проілюстрована на рис. 3.16. Використовуючи логарифмічні масштаби по осі абсцис (енергія в Джоулях) і по осі ординат (частота вимірювань), середнє енергоспоживання 100 мкВт показано прямою лінією з коефіцієнтом нахилу -1. Наприклад, виконання повного циклу роботи сенсорного вузла (вимір + перетворення + передача) вимагає 250-500 мкДж. Отже, безперервно отримуючи 100 мкВт потужності, можна виконувати повний цикл роботи вузла сенсорної мережі кожні 1-10

секунд (0,1-1 Гц). Це підходить багатьом промисловим потребам, особливо тим, де обслуговування передбачувано.

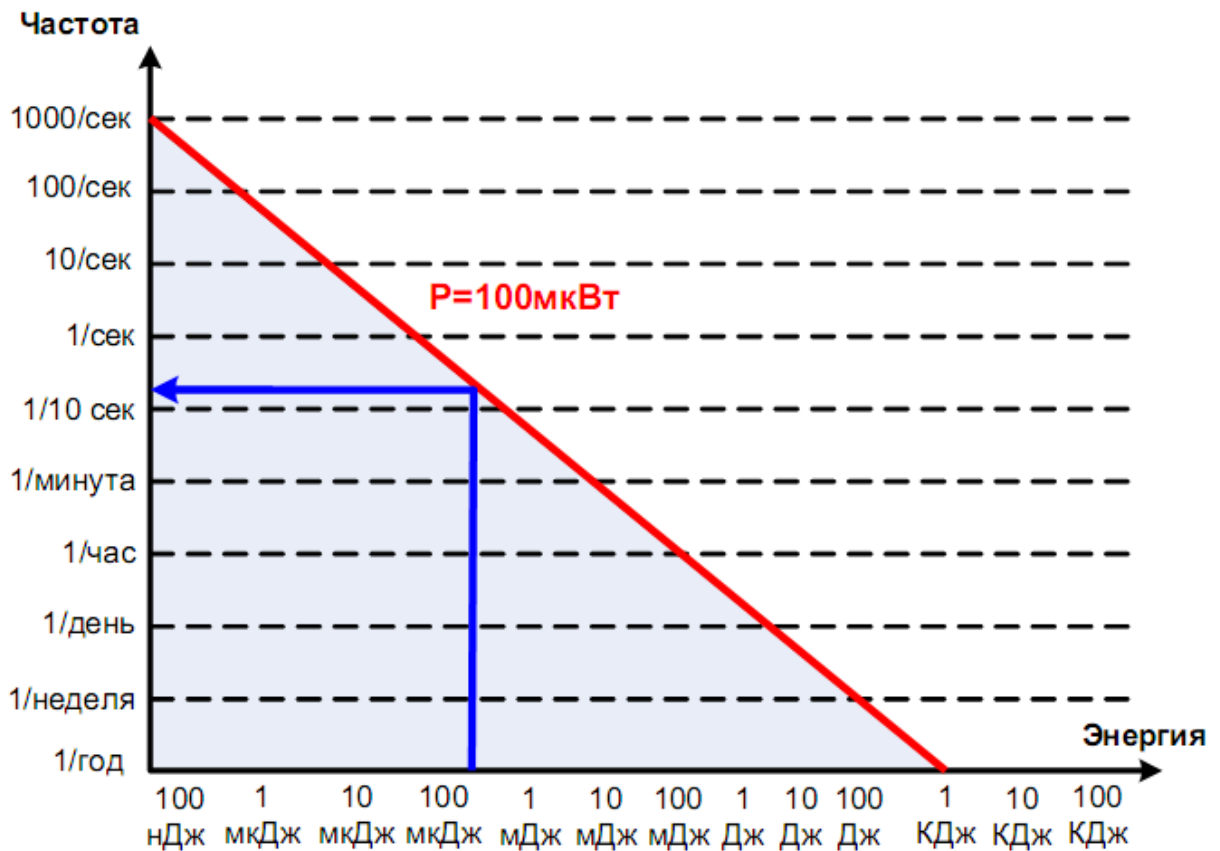


Рис. 10 - Зв'язок потужності, енергії та частоти

В цілому отримання енергії із зовнішнього середовища - за винятком фотоелемента - тільки розвивається галузь, ще не пристосована для промислового застосування. Проте, поліпшення існуючих технологій може привести в перспективі до життєздатним рішенням електроживлення автономних бездротових сенсорних мереж.

7 БСС та Інтернет речей

Завдяки таким характеристикам БСС, як мініатюрність вузлів, низьке енергоспоживання, вбудований радіоінтерфейс, достатня обчислювальна потужність, порівняно невисока вартість, стало можливим їх широке використання в багатьох сферах людської діяльності з метою автоматизації процесів збору інформації, моніторингу та контролю характеристик різноманітних технічних і природних об'єктів.

БСС доцільно застосовувати в наступних предметних областях Інтернету речей:

- моніторинг телекомунікаційної інфраструктури мереж;
- моніторинг транспортних магістралей (залізниць, метрополітену та ін.), нафто- і газопроводів, інженерних мереж енерго- і теплопостачання;

- контроль і аналіз транспортних вантажопотоків;
- екологічний, біологічний і медичний моніторинг;
- автоматизація систем життєзабезпечення в системах класу Умний дом;
- виявлення і попередження надзвичайних ситуацій (моніторинг сейсмічної активності і вулканічної діяльності, аналіз атмосфери і прогноз погоди для своєчасного попередження про настання стихійних лих) та інші.

Контрольні питання по лекції 6

1. Які типові топології використовуються в БСС? У чому їхня відмінність?
2. У яких режимах може працювати БСС?
3. Які завдання вирішують протоколи маршрутизації в БСС?
4. Поясніть принципи класифікації протоколів маршрутизації в БСС.
5. Вкажіть особливості реалізації бездротових систем, що самоорганізуються мереж мобільних пристроїв MANET.
6. Як сполучаються БСС з мережами загального користування?
7. Перерахуйте основні проблеми практичної реалізації БСС.
8. Порівняйте по щільності потужності (до перетворення) різні типи джерел енергії із зовнішнього середовища.
9. Вкажіть режими роботи вузла БСС і величини споживаної при цьому потужності.
10. Поясніть, як можна використовувати енергію із зовнішнього середовища для електроживлення вузлів БСС.
11. Наведіть приклади використання БСС для реалізації концепції Інтернету речей.