

УДК 004.056:061.068

Є. М. СНИЖКО – к. т. н., доцент, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, kef.dnu@gmail.com

Н. П. БОЦЬВА – к. б. н., доцент, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, kef.dnu@gmail.com

Д. В. ЧЕРНЕТЧЕНКО – асистент, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, kef.dnu@gmail.com

М. П. МОЦНИЙ – к. б. н., доцент, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, kef.dnu@gmail.com

ПОБУДОВА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ НА ОСНОВІ РАДІОКАНАЛУ ТА ОС CONTIKI

Вступ

Сенсорні мережі – це поєднання недорогих, енергоефективних мікроконтролерів, датчиків і актуаторів, які інтегруються в різні електричні прилади і виконують обмін даними між собою за допомогою стандартів бездротового зв'язку [1-5].

Сенсорні мережі останнім часом широко застосовують у системах моніторингу параметрів навколишнього середовища. Вони можуть використовуватися також у промисловості, на транспорті, зокрема і залізничному, для моніторингу пересування, ідентифікації та охорони потягів, окремих вагонів і вантажів, обліку показів лічильників і витратомірів енергії та інших ресурсів.

В таких системах часто використовують інтернет-протоколи та стандарти Wi-Fi, Bluetooth або Zigbee. Зазначені протоколи мають високу складність і потребують як потужних мікроконтролерів, так і підвищеного енергоспоживання для обміну через радіоканали, тому для поліпшення економічності вузлів мережі та енергоефективності каналів радіозв'язку можуть бути використані більш прості протоколи та радіомодуль. Сьогодні випускають багато різних типів радіомодулів та програмного забезпечення сенсорних мереж на основі мікроконтролерів, тому для вибору оптимальної структури треба дослідити можливості таких варіантів [6-9].

Вирішення проблеми передбачає вибір мікроконтролера та програмного забезпечення, насамперед, операційної системи реального часу (ОСРЧ), які здатні забезпечити мінімальні енерговитрати [10, 11].

Сучасні операційні системи реального часу у вбудованих системах

Існують різні ОСРЧ: FreeRTOS, QNX, RTLinux, mbed, RIOT, Mongoose та ін., основна задача яких полягає в інтеграції у прилади, що потребують швидкої реакції на події (табл. 1).

Contiki – компактна, вільна, переносима, багатозадачна операційна система для вбудованих систем та ПК, зокрема розробляється для використання в пристроях з обмеженими ресурсами (в основному, пам'яті), 8-бітових комп'ютерах для вбудованих систем на мікроконтролерах.

Contiki спроектована для вбудованих систем з обмеженим обсягом пам'яті. При конфігурації за замовчуванням Contiki використовує 2 Кб ОЗУ і 40 Кб ПЗУ. ОС складається з ядра, яке управляється подіями, програми під час виконання завантажуються і вивантажуються динамічно. Процеси використовують полегшену поточкову модель – протопотоки, які забезпечують лінійний потоковий стиль ініціалізації ядра. Contiki виконують на різноманітних платформах і архітектурі TI MSP430 і

Atmel AVR. При цьому обсяг займаного місця знаходиться в межах декількох кілобайт, використання пам'яті легко налаштується і може бути знижено до десятків байт.

Таблиця 1

Характеристики ОС реального часу

ОСРЧ	Архітектура	Переваги мікроядра, розмір пам'яті	Цільові платформи
Contiki	Планувальник, який здійснює диспетчеризацію подій; процеси; обробник опитування процесів	Протопотоки, витісняюча багатозадачність, 30 кБ ОЗУ	MSP430 Atmel AVR
RIOT	Мікроядро (microkernel)	Багатопоточність, 1,5 кБ ОЗУ і 5 кБ флеш пам'яті	PIC32 AVR MSP430 x86 ARM7
MicroC	Портативна, завантажувана із ПЗУ	Багатопоточність, передача повідомлень, менеджер пам'яті, багатозадачність, 1 кБ ОЗУ і 6...24 кБ флеш пам'яті	ARM Cortex, MSP430 SMT32

Contiki підтримує витісняючу пріоритетну багатозадачність і міжпроцесову комунікацію, використовуючи передачу повідомлень через системні події [6,7].

Повна установка Contiki містить такі інструменти:

- багатозадачне ядро;
- витісняюча багатозадачність;
- протопотоки (Protothreads);
- TCP/IP комп'ютерна мережа;
- віддалений доступ до робочого столу комп'ютера з Virtual Network Computing;
- веб-браузер;
- персональний веб-сервер;

– простий telnet-клієнт.

Існують різні мікроконтролери, на яких будуються модулі для Інтернету речей, – AVR, PIC, ARM, – але всі вони потребують значних ресурсів.

Мікроконтролери MSP430 менш популярні, ніж PIC та AVR, але можуть бути використані там, де дуже важливо забезпечити мінімальне споживання струму, наприклад, в апаратурі з низьковольтним акумуляторним або батарейним живленням. Це зробило їх незамінними в розробці автономних датчиків.

Мікроконтролери MSP430 мають 16-бітну архітектуру. Діапазон напруги живлення варіюється від 1,8 до 3,6 В. Споживання мікросхем становить близько 2 мкА при живленні напругою 2,2 В і тактовій частоті 4 кГц та близько 250 мкА при тактовій частоті 1 МГц. У режимі сна мікроконтролер може споживати 0,7...1,6 мкА. Навіть при напрузі живлення 3,3 В та максимальній тактовій частоті 8 МГц типовий струм живлення не перевищує 2,8 мА. За оцінками спеціалістів, застосування цих мікроконтролерів дозволяє забезпечити автономну роботу портативних пристроїв протягом декількох років без зміни гальванічних елементів [10,11]. Ще одна особливість даного сімейства мікроконтролерів – тактування від генератора з «часовим» кварцовим резонатором 32,768 кГц. У складі мікроконтролерів є PLL-пристрій, що дозволяє помножувати тактову частоту до величини в декілька мегагерц.

Мікроконтролери MSP430 з самого початку орієнтовані на асинхронну роботу процесора і периферійних модулів. Для розробників це означає, що для тактування процесора, таймерів, АЦП, інтерфейсних модулів можна використати різні джерела тактового сигналу, яких в одному мікроконтролері є до 4 штук. Таким чином можна досягти оптимального співвідношення продуктивності та енергоспоживання.

Додаткова функціональна зручність, одержувана при такому формуванні тактування, – перехід з режиму зниженого спо-

живання в робочий режим з будь-якою тактовою частотою. Коли мікроконтролер знаходиться у стані очікування виконання задачі, енергоспоживання знижується, але периферійні пристрої продовжують працювати, і це сприяє швидкому виходу мікроконтролера у робочий режим при надходженні в ядро даних для обробки [10,11].

Постановка задачі

Метою роботи є розробка апаратних та програмних засобів вузлів мережі з мінімальними витратами ресурсів мікроконтролера та енергоспоживання. Канал радіозв'язку працює в діапазоні 2,4 ГГц у режимах одноточкової, багатоточкової або багатокрокової передачі. Стенди для вивчення енергоефективності окремих вузлів та сенсорної мережі в цілому базуються на мікроконтролері MSP430 та модулях радіозв'язку CC2500 з використанням протоколу, вбудованого в операційну систему реального часу Contiki.

Апаратно-програмні засоби сенсорної мережі

Для створення окремого вузла сенсорної мережі обрана плата MSP-EXP430G2553 LaunchPad та прийомо-передавач CC2500. MSP-EXP430G2553 має 16 Кб flash-пам'яті; 512 байт ОЗУ; 16 ліній введення-виведення з підтримкою ємнісного сенсорного інтерфейсу; два 16-бітових таймера; сторожовий таймер; детектор зниженої напруги; аналоговий компаратор; 10-бітний АЦП; модуль універсального послідовного інтерфейсу.

Радіомодем CC2500 (рис. 1) – це модуль прийомо-передавач, який забезпечує простий у використанні радіочастотний зв'язок на частоті 2,4 ГГц [12]. Він може бути використаний для передавання та отримання даних на різних швидкостях від будь-якого стандартного джерела CMOS/TTL.

Модуль працює в полудуплексному режимі, тобто забезпечує зв'язок в обох напрямках, але не одночасно, а тільки в од-

ному напрямку в певний момент. Перемикання від режиму приймача до режиму передавача здійснюється автоматично. Перешкоди є однією з найбільших проблем, діапазон буде варіюватися залежно від розміру та типу перешкод.

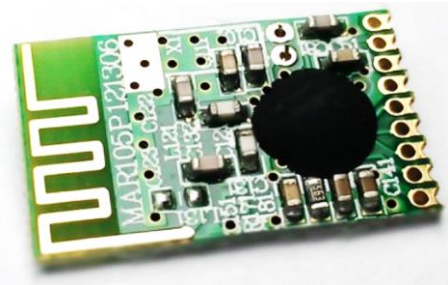


Рис.1. Зовнішній вигляд плати CC2500

Особливості радіомодема CC2500 [12]:

- підтримує різні швидкості передачі даних;
- працює у смузі ISM (2,4 ГГц), яка зарезервована на міжнародному рівні, тому не потрібно подавати заявку на отримання ліцензії;
- підтримує декілька частот в межах одного діапазону, таким чином уникаючи ефекту накладення даних;
- не потребує зовнішньої антени;
- має стандартний інтерфейс UART.

Під час роботи модема сигнал з антени посилюється підсилювачем із низьким рівнем шуму, оцифровується і демодулюється. Демодулятор приймача, так само як і модулятор передавача, цифровий, що дозволяє налаштовувати їх на різні типи модуляції, управляти смугою частот каналу передачі і, таким чином, підвищити стійкість і оптимізувати роботу трансивера для вирішення конкретних завдань при варіюванні числа каналів. Робоча частота каналу задається вбудованим синтезатором частоти з ФАПЧ, що тактується кварцовим генератором з зовнішнім резонатором частотою 26-27 МГц. Особливих вимог до стабільності частоти резонатора немає, оскільки в мікросхемі передбачено режим підстроювання частоти каналу прийому під несучу частоту віддаленого передавача.

Плата MSP-EXP430G2553 як компактна та дешева дещо обмежена периферійними пристроями (має лише два таймери) та оперативною пам'яттю, тому для заощадження пам'яті скорочено та спрощено низку функцій та модулів Contiki: Energest (розрахунок споживання енергії); uIPv6; Rimestats (модуль вивільнив 72 байти оперативної пам'яті); rasketbuf/Rime як такий, що займає багато місця і не використовується в цій роботі. Модуль датчиків (sensors module) як складний та такий, що потребує багато пам'яті для додавання нових датчиків, замінено на загальний ADC-модуль.

Для попереднього моделювання сенсорної мережі та перевірки працездатності розробленої програми з метою недопущення помилок в реальному пристрої застосовано симулятор Сооґа, розроблений для моделювання сенсорних мереж, що працюють на основі ОС Contiki [13]. Симулятор реалізований в Java, проте дозволяє писати програми для мережевих пристроїв мовою С.

Сооґа дозволяє одночасно здійснювати моделювання на трьох різних рівнях: мережі, ОС та інструкцій машинного коду, – та може запустити програму на виконання центральним процесором або емулятором MSP430. У симуляторі всі взаємодії з модельованими вузлами здійснюються за допомогою певних плагінів, наприклад:

– Network показує розташування кожного вузла у мережі, може показувати статус кожного вузла, включаючи колір, ідентифікаційний номер вузла, адресу, виходи і т.д., але спочатку потрібно заповнити порожнє вікно його вузлами (сенсорами);

– Simulation Control використовується, щоб розпочати, зупинити, поставити на паузу симуляцію, також показує час виконання та швидкість симуляції, а це означає, що можна запускати події в кілька разів швидше, ніж вони будуть виконуватися в режимі реального часу;

– Mote output показує весь вихід послідовного інтерфейсу вузлів, можна мати одне вікно для кожного вузла в симуляції;

– Timeline відображає на часовій шкалі моделювання такі повідомлення та події, як зміна каналу, зміну прийому (передачі).

Результати моделювання зберігаються в XML-файлі з розширенням «csc», який містить інформацію про середовище моделювання, плагіни, розташування та характеристики вузлів сенсорної мережі.

Дослідження споживання струму вузлами сенсорної мережі

Для дослідження енергоспоживання сенсорної мережі розроблено макет мережі у складі трьох плат MSP-EXP430G2553 LaunchPad з підключеними до них модулями CC2500 (табл.2). Для організації годинника реального часу для модулів додатково встановлено кварцові резонатори з резонансною частотою 32,768 кГц, яка поділена на 15-розрядному двійковому лічильнику, що дає інтервал часу в 1 с.

Для здійснення передачі на кожному модулі запускали спеціально розроблений програмний код, в якому для економії оперативної пам'яті кожна адреса має всього 2 байти (для порівняння, IPv6 або IPv4 адреси набагато довші).

Таблиця 2

Підключення контактів CC2500 до MSP-EXP430G2553 LaunchPad

номер	Контакти модуля CC2500		Контакти LaunchPad
	назва	призначення	
1	VDD	Живлення 1,9-3,6 В	VCC
2	SI	Сигнал SPI Mosi	P 1.7
3	SCLK	Сигнал SPI Clock	P 1.5
4	SO	Сигнал SPI Miso	P 1.6
5	GDO2	Цифровий вихід загального призначення	P 1.0
6	VSS	Земля	GND
7	GDO0	Цифровий вхід загального призначення	P 2.5
8	CSn	Цифровий вхід – вибір модуля	P 2.3
9	OSCO	Аналоговий вихід генератора	P 1.3

Таблиця 3

**Споживання струму
складовими системи**

Режим	Струм
Модуль CC2500	
Передача інформації	21,8 мА
Отримання інформації	13,3 мА
Очікування	160 мкА
MSP-EXP430G2553 LaunchPad	
Активний	220 мкА
Очікування	0,5 мкА

Радіозв'язок реалізовано за допомогою логічних каналів. Щоб одержувач знав, як інтерпретувати пакет, номери каналів вбудовані в кожен заголовок кадру. Через це з'єднання має бути відкритим з унікальним номером каналу.

Для кожного з'єднання також потрібно визначити зворотні виклики, які будуть викликатися коли, наприклад, прийнято чи відправлено пакет або перевищено максимальну кількість повторних передач. Коли пакет даних отримано, вміст знаходиться в пакетному буфері, packetbuf. Функція packetbuf_dataptr() повертає (void *) у дані. Довжина в байтах задається функцією packetbuf_datalen(). Модулі періодично передають повідомлення, яке може прийматися будь-яким модулем, що його «чує» та має відкриту передачу на цьому каналі.

Прийом або відправлення повідомлення MSP-EXP430G2553 LaunchPad сигналізує загоранням червоного світлодіода.

Кожна плата MSP-EXP430G2553 LaunchPad з модулем CC2500 у макеті працювала у двох режимах:

– одноадресному (unicast) – один модуль MSP-EXP430G2553 LaunchPad передає повідомлення іншому MSP-EXP430G2553 LaunchPad;

– ширококомовному (broadcast) – один модуль передає всім іншим модулям, які є у зоні, повідомлення з заголовком, що ідентифікує відправника, а інші модулі це повідомлення приймають.

При визначенні енергоспоживання системи виміряні значення струмів споживання окремими складовими у різних режимах роботи модулів (табл.3).

Під час роботи в одноадресному режимі модуль MSP-EXP430G2553 LaunchPad вмикає CC2500 для отримання повідомлень вісім разів за секунду на 4 мс, тобто час роботи вузла становить 32 мс в секунду (3,2% всього часу). Решту часу (96,8%) модуль CC2500 перебуває в режимі очікування. Відповідно кожен модуль споживає 425,6 мкА при отриманні інформації та 154,9 мкА у режимі очікування.

У режимі одноадресної передачі повідомлень час роботи вузла становить 125 мс в секунду (12,5%), решта – час очікування (87,5%). Відповідно кожен модуль споживає 2,725 мА при передачі інформації та 140 мкА у режимі очікування.

У ширококомовному режимі CC2500 щосекунди 125 мс передає повідомлення (12,5% всього часу), 32 мс (3,2%) отримує повідомлення, якщо щось було відправлено, та решту часу (84,3%) перебуває у режимі очікування. Відповідно кожен модуль споживає 2,725 мА при передачі інформації, 425,6 мкА при отриманні інформації та 134,9 мкА у режимі очікування.

Таким чином, загальне споживання струму за 1 с у режимі одноадресного прийому становить 580,5 мкА, одноадресної передачі – майже 2,9 мА, у ширококомовному режимі – майже 3,3 мА.

Узагальнені дані про енергоспоживання модуля у різних режимах роботи наведено на рис.2.



Рис.2. Дані енергоспоживання модуля CC2500 у різних режимах роботи системи

Висновки

Рівень сучасної елементної бази, зокрема наявність недорогих енергоефективних мікроконтролерів, дозволяє розробляти та використовувати у промисловості та на транспорті компактні та зручні системи моніторингу на базі бездротових сенсорних мереж.

Розроблено та виготовлено макет бездротової сенсорної мережі, що складається з трьох вузлів, кожний з яких має в основі плату MSP-EXP430G2553 LaunchPad з підключеним до неї радіомодемом CC2500.

Така комбінація елементів дозволяє значно знизити вартість кінцевої системи та підвищити час її автономної роботи за рахунок використання простих та дешевих мікроконтролерів та нескладних протоколів обміну інформацією.

Застосування ОС Contiki забезпечує роботу мережі у реальному часі, а здійснені у розробленому програмному забезпеченні скорочення та спрощення низки функцій та модулів Contiki суттєво заощаджують оперативну пам'ять.

Тестування програмного коду та моделювання системи в симуляторі Cooja показали ефективність застосованої методики розробки та дослідження сенсорної мережі.

Проведені експерименти з розробленими вузлами бездротової мережі показали її енергоефективність як в одноадресному, так і у ширококомовному режимах відправки повідомлень.

Перевагою запропонованого рішення є забезпечення працездатності бездротової сенсорної мережі на мікроконтролерах з дуже обмеженими ресурсами та дуже низьким енергоспоживанням.

Досліджені значення споживання струму вузлами сенсорної мережі показали можливість її автономної роботи протягом року при обмеженому потоці даних, зокрема у системах моніторингу, що не потребують передачі даних частіше, ніж декілька разів в секунду.

Розроблена структура системи має високу стабільність, ефективність, дозволяє подальше масштабування.

Розроблену систему доцільно використовувати як автономні вузли бездротових сенсорних мереж для моніторингу на промислових підприємствах та транспорті.

Бібліографічний список

1. Verdone R. Wireless Sensor and Actuator Networks [Text] / R. Verdone, D. Dardari, G. Mazzini, A. Conti. – Academic Press, 2008. – 392 p.
2. Sarangapani O. Wireless Ad Hoc and Sensor Networks [Text] / O.Sarangapani. – CRC Press, 2007. – 486 p.
3. Yick J. Wireless Sensor Network Survey [J] / J. Yick, B. Mukherjee & D. Ghosal // Computer Networks. – 2008.– V.52, N.12. – P. 2292-2330.
4. Буров Є. М. Комп'ютерні мережі [Текст] / Є.М. Буров. – Львів: Магнолія, 2010. – 262 с.
5. Росляков А. В. Интернет вещей [Текст] / А. В. Росляков, С. В. Ваняшин, А. Ю. Гребешков. – Самара: ПГУТИ, 2015. – С. 107–109.
6. Buschmann F. Pattern Oriented Software Architecture, Volume 1: A System of Patterns [Text] / F. Buschmann, R. Meunier, H. Rohnert, P. Sommerlad & M. Stal. – John Wiley & Sons, 1996. – P. 339–343.
7. Birman K. Exploiting virtual synchrony in distributed systems / K. Birman & T. Joseph // ACM Symposium on Operating systems principles (SOSP '87). – 1987. – P. 123–138.
8. Qing L. Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor network [Text] / L. Qing, Q. Zhu & M. Wang // Computer Communications. – 2006. – Vol. 29. – P. 2230-2237.
9. Energy-balanced density control to avoid energy hole for wireless sensor networks [Text] / J.Jia et al. // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2012. – Vol. 20. – P. 112.
10. MSP430FG4618/F2013 Experimenter's Board User Guide [Online]. Available: <http://focus.ti.com/lit/ug/slau213a/slau213a.pdf>

11. Texas Instruments, MSP430G2553, SLAS735J [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlin/msp430g2453.pdf>.
12. Texas Instruments, CC2500 datasheet, 2005. [Online]. Available: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2500.pdf>
13. Якушев И.Ю. Применение симулятора Сооја для исследования сенсорных сетей / И. Ю. Якушев, В. В. Марамзин // Молодежный научный форум: Технические и математические науки. – М.: МЦНО. – 2014. – № 4(11). – С.42-45. [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.nauchforum.ru/archive/MNF_tech/4\(11\).pdf](http://www.nauchforum.ru/archive/MNF_tech/4(11).pdf)

Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, мікроконтролер MSP430, модуль радіоканалу CC2500, операційна система реального часу.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, микроконтроллер MSP430, модуль радиоканала CC2500, операционная система реального времени.

Keywords: wireless sensor network, microcontroller MSP430, radio channel module CC2500, real-time operating system.

Рецензенти:

д.ф.-м.н., проф. В. І. Гаврилюк,
д.т.н., проф. А. Б. Бойнік.

Надійшла до редколегії 20.05.2019.
Прийнята до друку 27.05.2019.