

УДК 004.7: 004.9

В. В. ГНАТУШЕНКО

Національна металургійна академія України, Україна

АЛГОРИТМ МІНІМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ АКТИВНИМИ ВУЗЛАМИ В БЕЗДРОТОВІЙ СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ

Розглянуто бездротові сенсорні мережі (БСМ), дано короткий опис структури сенсорної мережі і сенсорного вузла. Проведено порівняльний аналіз роботи алгоритмів, оптимізація енергоспоживання БСМ. Запропоновано, з метою збільшення тривалості роботи мережі, використання розробленого алгоритму оптимізації максимуму кількості послідовних періодів часу, у яких БСМ на основі запитів одночасно задовольняє QoS і вимогам підключення по оптимальності вибору діапазону передачі, часу життя лічильника й розкладу активності/сну вузла для кожного періоду при кінцевому плануванні. Використання даного алгоритму в моделях бездротових мереж різного призначення може допомогти при розробці розкладу роботи елементів БСМ і підвищити загальну енергоефективність мережі.

Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, час існування, алгоритм, активний вузол, енергоспоживання.

Введення

Бездротова сенсорна мережа (БСМ) - це розподілена мережа, яка складається з мініатюрних електронних пристроїв (вузлів мережі), які здійснюють збір даних про параметри середовища й/або передачу їх на базову станцію за допомогою ретрансляції від вузла до вузла за допомогою бездротового зв'язку. Сенсорна мережа розміщується на обмеженій території й може містити до декількох тисяч вузлів. У цей час це є одним з нових актуальних напрямків в області інформаційних технологій

Мережі цього класу становлять великий інтерес із погляду їх застосування в таких важливих областях, як антитерористична діяльність, військові додатки, автоматизація керування розподіленими об'єктами, виявлення й попередження надзвичайних ситуацій, автоматизація систем життєзабезпечення, контроль і моніторинг транспортних магістралей різної фізичної природи й ін. [1-3].

Проектування й реалізація сенсорних мереж вимагають розв'язання безлічі складних проблем, що відносяться до різних областей досліджень. Одною з основних проблем є забезпечення високої відмовостійкості й тривалості життя. Це визначається, з одного боку, особливістю їх застосування, а з іншого - високою ймовірністю порушення роботи мережі внаслідок відмов вузлів і каналів зв'язки, що пов'язане як з більшою кількістю вузлів, можливістю зовнішніх несприятливих впливів, так і з обмеженнями в енергоспоживанні вузлами внаслідок обмеженості ресурсу їх джерел живлення (батареї).

Конфігурація сенсорної мережі повинна мати можливість видозмінюватися залежно від поточного положення в просторі, можливостей енергоспоживання. Мобільність вузлів, їх відмови, критичні зміни в зовнішньому середовищі вимагають високого ступеня динамічності від сенсорної мережі в цілому. Тому, топологія конкретної сенсорної мережі або її частини може змінюватися багаторазово протягом строку її функціонування [4]. Фрагменти бездротової сенсорної мережі у зв'язку із цим потребують сучасних алгоритмів, які повинні бути працездатними й адекватними до мінливих умов.

Сенсорні вузли конструюються так, щоб споживати якнайменше енергії, оскільки вони можуть функціонувати в недружньому зовнішньому середовищі й заміна джерела живлення може бути неможливою. Тому, сенсорний вузол може вийти з ладу як через критичну ситуацію в зовнішньому середовищі, так і внаслідок втрати можливості енергопостачання [5, 6]. Однак, сенсорна мережа містить тисячі сенсорних вузлів і найбільш важливою властивістю сенсорної мережі, в цілому, повинне бути виконання мережею своїх функцій навіть при виході з ладу якогось максимально можливого числа сенсорних вузлів. У зв'язку з викладеним, необхідно створювати такі алгоритми керування сенсорними вузлами, щоб мінімізувати енергоспоживання. Іншою проблемою при побудові бездротових сенсорних мереж є відстань, на яку сенсорний вузол передає інформацію. Потужність передавача повинна бути мала (це сприяє й низькому енергоспоживанню) і архітектура бездротової сенсорної мережі повинна являти собою мережу з розподіленими ресурсами.

Постановка задачі дослідження

Основна мета полягає в тому, щоб сформулювати й створити алгоритми оптимізації параметрів мережі для максимізації терміну служби БСМ, які є вимогливими до тимчасових даних. Мережа більше не функціонує, якщо вона або не в змозі задовольнити вимоги QoS або стає недоступною.

В [7] розглянуто проблему динамічного вибору швидкості передачі в бездротовій мережі загального користування таким чином, що середня витрата енергії в одиницю часу зводиться до мінімуму за умови обмеження QoS. У цій роботі черги передачі змодельовані у вигляді кінцевого буфера системи масового обслуговування M/M/1.

В [8] презентовано три моделі для визначення потужності передачі (діапазону передачі) кожного вузла таким чином, щоб існував спрямований шлях між кожною парою вузлів датчиків. Було розроблено алгоритм галузей і границь та оцінено його продуктивність дослідним шляхом з використання мережі з 150 вузлами.

Деякі з існуючих досліджень на сьогоднішній день зосереджені на коректуванні діапазону передачі й графіків активності/сну вузлів для максимізації термінів служби мережі, жодне з існуючих досліджень одночасно не враховує вибір діапазону передачі, часу життя лічильника й розкладу активності/сну вузла, беручи до уваги витрати енергії для батарей вузлів. Крім того, за винятком [9, 10], жодна з існуючих моделей не виконується спеціально для обмежень життя подій або запиту пакетів.

У зв'язку із цим розробка алгоритму оптимізації максимуму кількості послідовних періодів часу, у яких БСМ на основі запитів одночасно задовольняє QoS і вимоги підключення по оптимальності вибору діапазону передачі, часу життя лічильника й розкладу активності/сну вузла для кожного періоду при кінцевому плануванні, є актуальною.

Основна частина

Під сенсором розуміється автономний інтелектуальний пристрій, який призначено для збору, обробки, одержання й передачі даних. Сенсор може перебувати або в активному стані, виконуючи свої функції й витрачаючи енергію, або в стані сну, коли витратою енергії можна знехтувати. У бездротовій сенсорній мережі кожний сенсор має обмежений непоновлюваний запас енергії - ресурсом, який часто вимірюють у кількості тимчасових раундів, протягом яких сенсор може перебувати в активному стані або часі життя батареї. Тому що число сенсорів суттєво перевищує мінімальну кількість, необ-

хідну для збору й обробки даних, функції сенсорної мережі може виконувати підмножина її елементів. Основною функцією мережі, яку розглядаємо, є моніторинг, і об'єкт (точка області) вважається покритим, якщо він перебуває в зоні моніторингу хоча б одного сенсора. Хоча той самий сенсор може входити в різні покриття, загальний час функціонування сенсора обмежено його ресурсом. Основним завданням БСМ є оптимізація енергоспоживання, що тягне збільшення часу функціонування (життя) мережі. Таким чином, одним зі способів максимізації часу життя БСМ є визначення часу функціонування кожного покриття з урахуванням максимального часу функціонування кожного сенсора.

Розглянемо БСМ зі стаціонарними вузлами, які рівномірно розподілено у двовимірній області R площею L , тобто розташування вузлів можна розглядати як точки R , які генеровано у двовимірному просторі з пуасонівським розподілом з постійною інтенсивністю (щільністю вузлів) N/L . Якщо припустити, що кожний вузол використовує діапазон передачі γ і, що $L \gg \pi r^2$, можна ігнорувати крайовими ефектами R , щоб одержати точну ймовірність, що жоден вузол не є ізольованим. Вузли можуть бути розташовані в межах γ далеко від кожної із границь; або менше, ніж γ по одній із границь, але далеко від інших; або розташовані ближче, ніж γ по двом із границь.

Агенти події передаються від вузла до вузла за допомогою методу випадкового розповсюдження, поки або не минає подія (тобто досягає свого терміну дії), або вичерпується час життя лічильника. Вузли передають інформацію до випадково обраного вузла з набору вузлів у межах його діапазону передачі. Вузли можуть також згенерувати запити, щоб запросити дані або ресурси з мережі. Якщо запит не може визначити місцезнаходження інформованого вузла до закінчення функціонування запиту, то запит зазнає невдачі. Крім цього, якщо вузол не працює через розрядку акумулятора, то говоримо, що вузол не обслугований. У протилежному випадку, вузол є живим. Живий вузол може бути або в режимі сну (очікування) або активному режимі. У сплячому режимі вузол виключає свої можливості зчитування й комутації для збереження енергії [11].

Коли всі живі вузли датчиків є активними для всіх періодів часу, тобто $p_t=1$, для всіх $t \in T$, можемо розв'язати модель для одного періоду, щоб визначити оптимальний діапазон передачі на протязі кожного періоду, який максимізує термін служби мережі. Введемо припущення для кожного t :

D1. $\Delta(n_t, a_t)$ не збільшується в n_t ;

D2. $\psi(n_t, a_t)$ збільшується в n_t ,

де n_t - очікувана кількість активних вузлів на початку періоду t ;

a_t - рішення, прийняте на самому початку періоду t ;

$\psi(n_t, a_t)$ - імовірність того, що мережа підключена в момент часу t ;

$\Delta(n_t, a_t)$ - частина відмов запитів у момент часу t .

Представлені припущення можуть бути пояснені ефектом перевідвідування таким, що ймовірність повторного відвідування вузла запитом може бути значною. Ефект перевідвідування збільшує кількість неінформованих вузлів, час визначення інформованого вузла i , отже, частку невдалих запитів. У міру збільшення числа активних вузлів ефект

перевідвідування є менш вираженим.

Припущення D2 має місце при $\sqrt{L} > 2r_t$ і

$$\frac{n_t (4 + 3\pi^2) r_t^2}{4L\pi} \geq 1. \quad (1)$$

Помітимо, що за умови (1) має місце,

$$1 \leq \frac{n_t (4 + 3\pi^2) r_t^2}{4L\pi} = \frac{n_t r_t^2}{L\pi} + \frac{3n_t \pi r_t^2}{4L} < \frac{n_t \pi r_t^2}{4L} + \frac{3n_t \pi r_t^2}{4L} = \frac{n_t \pi r_t^2}{L}. \quad (2)$$

$$\frac{\partial \psi(n_t, \alpha_t)}{\partial n_t} = \exp \left[-c \frac{n_t (4 + 3\pi^2) r_t^2}{4L\pi} n_t \left(1 - \frac{(\sqrt{L} - 2r_t)^2}{L} \right) - \frac{\frac{n_t \pi r_t^2}{L} n_t (\sqrt{L} - 2r_t)^2}{L} \right] \times \left(-c \frac{n_t (4 + 3\pi^2) r_t^2}{4L\pi} \left(1 - \frac{(\sqrt{L} - 2r_t)^2}{L} \right) \left(1 - \frac{n_t (4 + 3\pi^2) r_t^2}{4L\pi} \right) - \frac{n_t \pi r_t^2}{L} \left(\frac{(\sqrt{L} - 2r_t)^2}{L} \right) \left(1 - \frac{n_t \pi r_t^2}{L} \right) \right) \geq 0. \quad (3)$$

Таким чином, $\psi(n_t, a_t)$ росте в n_t .

Помітимо, що умова $\sqrt{L} > 2r_t$ звичайно дотримується на практиці, тому що дальність передачі датчика є щодо маленької в порівнянні з розмірами поля мережі. Можливо інтерпретувати (1) у такий спосіб: якщо очікуваний ступінь вузлів, розташування яких менше, ніж r по одній із границь, але далеко від інших рівно принаймні одиниці, то припущення D2 має місце бути.

Відповідно до цих припущень отримано оптимальне рішення, коли кількість активних вузлів для кожного $t \in T$ досягає максимуму. Це може бути досягнуто шляхом послідовного розв'язання задачі мінімізації енергії (моделі одного періоду) для кожного часу $t \in T$.

$$\min c(n_t, \{r_t, \ell_t, 1\}), \quad \Delta(n_t, \{r_t, \ell_t, 1\}) \leq \varphi, \quad (4)$$

$$\psi(n_t, \{r_t, \ell_t, 1\}) \geq \zeta, \quad \{r_t, \ell_t, 1\} \in A,$$

де l_t - час життя лічильника подій;

A - множина можливих рішень;

φ - максимально припустимий відсоток відмов запиту;

ζ - мінімально припустима ймовірність, що мережа підключена.

Відзначимо, що після розв'язання вищезгаданої моделі в кожний $t \in T$, кількість живих вузлів і доступної енергії повинні бути змінені в такий спосіб:

$$n_{t+1} = [n_t - f_t(n_t, a_t, b_t) n_t], \quad t \in T \setminus \{T\},$$

$$b_{t+1} = b_t - c(n_t, a_t), \quad t \in T \setminus \{T\}, \quad (5)$$

де b_t - очікувана доступна енергія батареї у вузлі на початку періоду t .

Оптимальний розв'язок представленого завдання може бути отриманий повним перерахуванням. Однак пропонується алгоритм, який значно більш ефективний у порівнянні з перерахуванням. На додаток до припущень D1 і D2 накладемо наступні при-

пущення для кожного t :

D3. $c_t(n_t, a_t)$ безперервний та збільшується в r_t ;

D4. $\Delta(n_t, a_t)$ зменшується в ℓ_t ;

D5. $\Delta(n_t, a_t)$ зменшується в r_t ;

D6. $\psi(n_t, a_t)$ збільшується в r_t .

На жаль, припущення D5 та D6 важко довести аналітично, тому що структури $c_t(n_t, a_t)$, $\Delta(n_t, a_t)$ та $\psi(n_t, a_t)$ невідомі. Проте, при проведенні експериментів не виявлено випадків, у яких ці припущення порушуються. Пропонується наступний алгоритм максимізації часу життя бездротової сенсорної мережі:

Крок 0: Ініціалізація

$$t := 1; b_t := \bar{b}; r_0 := 0;$$

Крок 1: Перевірка оптимального розв'язання

$$r_{\min} := \min \{ r : r_{t-1} \leq r \leq \bar{r}, \psi(n_t, \{r, 0, 1\}) \geq \zeta \};$$

$$\ell' := \operatorname{argmin} \left\{ \begin{array}{l} c(n_t, \{r_{\min}, \ell, 1\}) : \ell \in \{1, \dots, n_t - 1\}, \\ \Delta(n_t, \{r_{\min}, \ell, 1\}) \leq \phi \end{array} \right\};$$

Якщо $\exists \ell'$, то

$$\ell_t := \ell'; r_t := r_{\min};$$

$$c^* := c(n_t, \{r_t, \ell_t, 1\});$$

Перехід до кроку 3.

Або

$$\ell := n_t - 1; c^* := M;$$

Перехід до кроку 2.

Крок 2: Пошук оптимального розв'язання

$$r' := \operatorname{argmin} \left\{ \begin{array}{l} c(n_t, \{r, \ell, 1\}) : r_{\min} \leq r \leq \bar{r}, \\ \Delta(n_t, \{r, \ell, 1\}) \leq \phi \end{array} \right\};$$

Якщо $\exists \ell'$, то

Якщо $c(n_t, \{r', \ell, 1\}) < c^*$

$$\ell^* := \ell; r^* := r';$$

$$c^* := c(n_t, \{r', \ell, 1\});$$

$$r_{\min} := r'; \ell = \ell - 1;$$

Перехід до кроку 2.

Або

$$\ell_t := \ell^*; r_t := r^*;$$

Перехід до кроку 3.

Крок 3: Перевірка здійсності

Якщо $c^* \leq b_t$, то

$$x_t := 1; b_{t+1} := b_t - c^*;$$

$$\tau := \tau + 1;$$

Перехід до кроку 1.

Або

$$x_t := 0;$$

Кінець.

У кроці 1 алгоритму r_{\min} фіксується з урахуванням обмежень підключення i , якщо $c(n_t, \{r_{\min}, \ell, 1\})$ є опуклою в l , то може використовуватися для пошуку в l простий алгоритм розподілу навіпіл, що задовольняє обмеженню QoS. Якщо існує l' для даного r_{\min} , то рішення є оптимальним через припущення D3 і D6.

З іншого боку, якщо не існує в l' , то встановлюємо $\ell = n_t - 1$, тому що в цьому випадку $\Delta(n_t, \{r, \ell, 1\})$ мінімізується для будь-якого даного r з D4. Таким чином, якщо існує припустиме розв'язання завдання, то воно може бути отримано при $\ell = n_t - 1$. На кроці 2 простий алгоритм розподілу навіпіл може використовуватися для пошуку r , який задовольняє й QoS і обмеженню підключення. На цьому кроці l зменшується на 1. Для забезпечення здійсності D4 і D5 нехай $r_{\min} \leq r$. Звернено увагу на те, що l зменшується доти, поки не здійснено (l, r) , яке одночасно задовольняє QoS і обмеженню підключення. У цьому алгоритмі використовуємо структурні властивості, прийняті в D3 – D6, отже набір припустимих значень для r стає менше на кожній ітерації Кроку 2. Тому, продуктивність алгоритму поліпшена в порівнянні з повним перерахуванням.

При використанні представленого алгоритму оптимізації енергоспоживання вузлами мережі у імітаційній моделі, яка містить від 300 до 700 вузлів, бачимо вплив оптимального вибору параметрів на тривалість життя БСМ (таблиця 1).

Таблиця 1

Середній час життя бездротової сенсорної мережі (в умовних одиницях)

№ вузлів мережі	При оптимізації	Без використання оптимізації
300	29,1	19,3
400	28,4	18,6
500	26,6	17,3
600	25,7	14,4
700	25,1	14,3

Висновки

Розроблено і реалізовано алгоритм формування розкладу функціонування сенсорних вузлів у бездротовій мережі, який забезпечує збільшення загального часу роботи БСМ до моменту її відмови. Запропонований алгоритм в якості параметрів моделі оптимізації використовує діапазон передачі, час життя лічильника й розклад активнос-

ті/сну(очікування) сенсорних вузлів, що дозволяє уникнути розв'язку NP-повного завдання й здійснення розподілених обчислень.

Література

1. Nitaigour, P. M. *Sensor networks and configuration fundamentals, standards, platforms, and applications [Text]* / P. M. Nitaigour. – Springer, 2007. – 510 p.
2. Кучерявий, Е. А. Принципы построения сенсоров и сенсорных сетей [Текст] / Е. А. Кучерявий, С. А. Молчан, В. В. Кондратьев // *Электросвязь*. – 2006. – № 6. – С. 10-15.
3. Молчанов, Д. А. Приложения беспроводных сенсорных сетей [Текст] / Д. А. Молчанов, Е. А. Кучерявий // *Электросвязь*. – 2006. – № 6. – С. 20-23.
4. Майская, В. Беспроводные сенсорные сети, малые системы – большие баксы [Текст] / В. Майская // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. – 2005. – № 10. – С. 18-22.
5. Таненбаум, Э. Компьютерные сети [Текст] / Э. Таненбаум. – СПб.: Питер, 2003. – 992 с.
6. Мочалов, В. А. Алгоритмы оценки надежности структуры сенсорной сети [Текст] / В. А. Мо-

чалов // *Информационно-управляющие системы*. – 2009. – № 5. – С. 61-66.

7. Ata, B. *Dynamic power control in a wireless static channel subject to a quality-of-service constraint. [Text]* / B. Ata // *Operations Research*. – 2005. – Vol. 53. – P. 842-851.

8. *A branch-and-cut algorithm for the strong minimum energy topology in wireless sensor networks [Text]* / Y. P. Aneja, R. Chandrasekaran, X. Li, K. P. K. Nair // *European Journal of Operational Research*. – 2010. – Vol. 204(3). – P. 604-612.

9. Degirmenci, G. *On the performance evaluation of query-based wireless sensor networks [Text]* / G. Degirmenci, J. P. Kharoufeh, R. O. Baldwin // *Performance Evaluation*. – 2013. – Vol. 70. – P. 124-147.

10. *A queueing approach to optimal resource replication in wireless sensor networks [Text]* / C. R. Mann, R. O. Baldwin, J. P. Kharoufeh, B. E. Mullins // *Performance Evaluation*. – 2008. – Vol. 65. – P. 689-700.

11. *Radio range adjustment for energy efficient wireless sensor networks [Text]* / Q. Gao, K. J. Blow, D. J. Holding, I. W. Marshall, X. H. Peng // *Ad Hoc Networks*. – 2006. – Vol. 4(1). – P. 75-82.

Надійшла до редакції 9.04.2015, розглянута на редколегії 18.06.2015

АЛГОРИТМ МИНИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ УЗЛАМИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

В. В. Гнатушенко

Рассмотрены беспроводные сенсорные сети (БСС), дано краткое описание структуры сенсорной сети и сенсорного узла. Проведен сравнительный анализ работы алгоритмов, оптимизация энергопотребления БСС. Предложено, с целью увеличения продолжительности работы сети, использование разработанного алгоритма оптимизации максимума количества последовательных периодов времени, в которых БСМ на основе запросов одновременно удовлетворяет QoS и требованиям подключения по оптимальности выбора диапазона передачи, времени жизни счетчика и расписания активности/сна узла для каждого периода при конечном планировании. Использование данного алгоритма в беспроводных сетях различного назначения может помочь при разработке расписания работы элементов БСМ и повысить общую энергоэффективность сети.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, время существования, алгоритм, активный узел, энергопотребление.

ALGORITHM ENERGY MINIMIZATION ACTIVE NODES IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

V. V. Hnatushenko

Consider wireless sensor networks (WSN), a brief description of the structure and the sensor node network. The comparative analysis was carried out for energy optimization algorithms WSN. Heightening for the lifetime of the network is to uses optimization algorithm to maximize the number of consecutive time periods in which a query-based WSN simultaneously satisfies QoS and connectivity requirements by optimally selecting the transmission range, time-to-live counter and node active/sleep schedules for each period in a finite planning horizon. Using this algorithm in wireless networks different purposes can help in the development schedule of the elements of the WSN and increase the overall energy efficiency of the network.

Keywords: wireless sensor networks, time of existence, algorithm, active node, energy consumption.

Гнатушенко Вікторія Володимирівна – канд. техн. наук, доц., докторант кафедри інформаційних технологій і систем, Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: trip@ukr.net.