

В.В. Гнатушенко, О.І. Михальов

ОПТИМІЗАЦІЯ ТОПОЛОГІЇ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

Анотація. Математично формалізовано задачу оптимального вибору найкращої топології бездротової сенсорної мережі при заданій множині покриттів для максимізації області покриття та визначення місцезнаходження кластерних центрів.

Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, кластер, топологія, модель.

Постановка проблеми

Великий інтерес до вивчення бездротових сенсорних мереж (БСМ) обумовлений широкими можливостями їх застосування: моніторинг навколишнього середовища, автоматизація виробництва, пожежна безпека, військова розвідка, медицина і т.д. Використання в цих галузях традиційних провідних мереж не завжди ефективно через високу вартість монтажних і пуско-налагоджувальних робіт, а також технічного обслуговування. Крім того, у деяких ситуаціях взагалі неможлива прокладка кабелів по технологічних або організаційним причинам, тому все більше застосування знаходять БСМ.

Як наслідок, встають проблеми обмеженої пропускної здатності вузлів, надійності доставки інформаційних повідомлень, а також вартості розгортання й обслуговування БСМ. Вирішення цих проблем може бути забезпечене вибором топології мережі, що є актуальним завданням. Це дозволить скоротити трафік і знизити енергоспоживання на вузлах, що, у свою чергу, збільшить час безвідмовної роботи мережі й знизить загальні витрати на її обслуговування, що полягають у заміні встаткування й/або елементів живлення.

Аналіз останніх досліджень

Завданню побудови оптимальної топології БСМ присвячена велика кількість робіт [1-3]. У роботах використані різні стратегії вибо-

ру вузлів ретрансляторів, визначається оптимальний ступінь зв'язності вузлів мережі. Однак більшість досліджень не розглядають цільовою функцією радіус охопту й вибір центрів кластерів, а пропонують окремі правила побудови топології, яка буде мати ті або інші властивості.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою роботи є зниження ресурсних витрат при проектуванні, розгортанні й експлуатації БСМ за допомогою алгоритмічної реалізації розрахунків топології мережі з урахуванням можливості її практичного відтворення.

Основна частина

Основною функцією бездротової сенсорної мережі є моніторинг, і об'єкт (точка області) вважається покритим, якщо він перебуває в зоні бачення хоча б одного сенсора. Підмножину сенсорів, що виконує функції мережі, називають покриттям. Хоча той самий сенсор може входити в різні покриття, загальний час функціонування сенсора обмежене його ресурсом. Залежно від додатка, мети мережі можуть різнитися. У деяких випадках потрібно покрити задану область або її частину, в інших – безліч об'єктів. Часто на покриття накладаються додаткові обмеження (зв'язність [4], наявність певної структури [5, 6] і ін.).

Розглянемо БСМ з N вузлами сенсорів, які спочатку хаотично розподілені в евклідовому двовимірному просторі. Однак, вузли рухаються, і їх розташування змінюється відповідно до безперервного часу. Відбувається безупинно стохастический процес. Для простоти розглядаємо тільки квадратне поле сенсорів $R \subseteq R^2$, але ця ж модель може бути використана, якщо $R \subseteq R^3$. Нехай $\mathbb{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ - безліч вузлів сенсорів і кожний вузол у мережі використовує однаковий кінцевий діапазон передачі r (метрів). Крім того, існує кінцеве число точок в R , які претендують на центри кластерів. Нехай $K = \{1, 2, \dots, K\}$ - набір міток потенційних місць центрів кластерів. Для більшості n ($n \leq K$), K може бути обране в якості потенційного місця розташування кластерних центрів.

Планування складається з T ($T < \infty$) періодів однакової тривалості, тобто кінцева множина $\Upsilon = \{1, 2, \dots, T\}$, де кожний елемент Υ являє собою рішення. Під час кожного періоду $t \in \Upsilon$, сенсор вузла

$j \in \mathbb{N}$ генерує детерміновану d_j вимогу, яка повинна бути виконана його кластерним центром. Наприклад, ця вимога може представляти зведення даних, про які необхідно повідомити на центр кластера (наприклад, середнє значення тиску, спостережуваного під час періоду). Якщо вузол датчика перебуває в межах діапазону, принаймні, одного кластерного центру, задовольняючого вимогам, то вузол покритий. Передбачається, що сенсори тільки передають дані центрам кластерів. У данному випадку не розглядається маршрутизація: жоден сенсор не працює як передавальна станція для інших сенсорів у цій моделі. Наступні позначення використовуються в основній моделі:

d_j – вимога періода, яка сгенерована датчиком $j \in \mathbb{N}$;

p – імовірність відмови зв'язку між будь-яким кластерним центром і датчиком ($0 < p < 1$);

C – вартість одиниці розміщення одного центру кластера або вартість переналагодження;

Z_{ijt} – випадкова змінна, яка вказує близькість центру кластера i до сенсора j у період t ;

$$Z_{ijt} = \begin{cases} 1, & \text{якщо центр кластера } i \text{ розташований у} \\ & \text{межах досяжності датчика } j \text{ у період } t, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases}$$

Ціль моделі полягає в тому, щоб визначити місцезнаходження й перемістити туди центри кластерів, перевизначити сенсори для центрів кластерів кожного періоду. Тому, введемо наступні змінні:

x_{it} – бінарна змінна для визначення місця розташування передбачуваного центру кластера,

$$x_{it} = \begin{cases} 1, & \text{якщо центр кластера поміщений у місце} \\ & \text{розташування } i \text{ у період } t, \\ 0, & \text{інакше;} \end{cases}$$

v_{jkt} – бінарна змінна, що вказує охоплення сенсора принаймні k кластерами в період t ,

$$v_{jkt} = \begin{cases} 1, \text{ якщо сенсор } j \text{ покритий принаймні } k \\ \text{кластерними центрами в період } t, \\ 0, \text{ інакше;} \end{cases}$$

w_{it} - бінарна змінна, що описує чи очолює даний сенсор кластер i у періоді t ,

$$w_{it} = \begin{cases} 1, \text{ якщо центр кластера розташований в } i \\ \text{період } t - 1, \text{ але не в період } t, \\ 1, \text{ якщо центр кластера розташований в } i \\ \text{період } t, \text{ але не в період } t - 1, \\ 0, \text{ інакше.} \end{cases}$$

Пропонується наступна математична модель, щоб максимізувати область охопту й звести до мінімуму витрати на визначення місцезнаходження й переміщення кластерних центрів, що дозволить оптимізувати топологію БСМ.

$$\max \sum_{t \in Y} \sum_{j \in \mathbb{N}} \sum_{k=1}^K (1-p)p^{k-1} d_j v_{jkt} - C \sum_{i \in K} \sum_{t \in Y} w_{it} \quad (1)$$

$$P\left(\sum_{k=1}^K v_{jkt} - \sum_{i \in K} z_{ijt} x_{it > \psi}\right) \leq k \quad j \in \mathbb{N}, t \in Y \quad (2)$$

$$\sum_{i \in K} x_{it \leq n} \quad t \in Y \quad (3)$$

$$w_{it} \geq x_{it-1} - x_{it} \quad i \in K, t \in Y \setminus \{1\} \quad (4)$$

$$w_{it} \geq x_{it} - x_{it-1} \quad i \in K, t \in Y \setminus \{1\} \quad (5)$$

$$w_{it} \geq 0, x_{it} \in \{0, 1\} \quad i \in K, t \in Y \quad (6)$$

$$v_{jkt} \in \{0, 1\} \quad j \in \mathbb{N}, k \in K, t \in Y \quad (7)$$

Цільова функція (1) представляє собою очікувану вимогу покриття центрами кластерів мінус повна вартість переміщення сенсорів. Компонент $\sum_{k=1}^K (1-p)p^{k-1} d_j v_{jkt}$ є очікуване покриття сенсора j у період t , враховуючи якість зв'язку. Обмеження (2) гарантує, що якщо сенсор j покритий k кластерами в момент часу t , то кожна зі змінних $v_{j1t}, v_{j2t}, \dots, v_{jk't}$ приймає значення 1, оскільки цільова функція містить компонент v_{jkt} . Відзначимо, що в обмеженні (2) z_{ijt}

є випадковою величиною, яка описує забезпечення зв'язку центру кластера i і датчика j під час t . Тут ψ ($\psi > 0$) розглядається як «мала» сума неприпустимості й k ($0 < k < 1$) введена користувачем імовірність. Більші значення k можуть розв'язати проблему, але це будуть не високоякісні рішення. З іншого боку, коли $n=0$, то не існує жодного шансу порушення обмежень і одержуємо консервативне рішення. Обмеження (3) гарантує, що максимальне число кластерних центрів не може перевищити n під час будь-якого періоду. Обмеження (4) і (5) визначають переміщення центрів кластерів і змушують прийняти $w_i t$ рівної 1, якщо є зміна місця розташування центру кластера i з погляду кластерного визначення в момент часу t . Припустимі значення змінних гарантуються обмеженнями (6) та (7).

Математичне формулювання можна розглядати як узагальнення моделі, представленої в [7]. Зокрема, розглядається стохастична еволюція розташування датчиків із часом, а не припускається, що позиції їх відомо в будь який час. Таким чином, замість вказівки детермінованих обмежень для забезпечення зв'язку сенсорів і кластерних центрів, використовується імовірнісне обмеження (2). Якщо на початку кожного періоду часу при проведенні експеримента розташування сенсорів відомі, то (2) стає детермінованим обмеженням, роблячи завдання оптимізації моделі еквівалентним запропонованому в [7].

Висновки та перспективи подальших досліджень

У результаті досліджень одержав подальший розвиток підхід до розв'язку оптимізації топології БСМ на основі кластеризації. Математично формалізовано задачу оптимального вибору найкращої топології бездротової сенсорної мережі при заданій безлічі покриттів для максимізації області покриття й відомості до мінімуму витрат на визначення місцезнаходження й переміщення кластерних центрів. Подальші дослідження будуть присвячені порівняльному аналізу обраних топологій реальних БСМ з визначенням кількісних показників, зокрема QoS.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kumar, V. Energy efficient clustering algorithms in wireless sensor networks. / V. Kumar, S. Jain, and S. Tiwari// International Journal of Computer Science Issues.– 2011.– vol.8.– P.259-268
2. Liu, X. Clustering routing algorithms in wireless sensor networks. / X. Liu, J. Shi // KSII Transactions on Internet and Information Systems.–2012.–vol. 6.–P.1735-1755.
3. Younis, O. Node clustering in wireless sensor networks. /O. Younis, M. Krunz, S. Ramasubramanian // Recent developments and deployment challenges. IEEE Network.–2006.–vol.20.–P.20-25.
4. Inancm. Power optimal connectivity and coverage in wireless sensor networks / Inancm., Magdon-ismailm., Yenerb // Department of Computer Science, Rensselaer Polytechnic Institute.– NY.– 2003.– 534 p.
5. Астраков, С.Н. Сенсорні мережі й покриття площини колами / С.Н.Астраков, И.Ерзина, В.Залюбовский// Дискрет. аналіз і дослід. операцій.– 2009.– Т. 16.– № 3. – С. 3-19.
6. Segalm. Improving lifetime of wireless sensor networks //Netw. Protocols Algorithms. – 2009. – Vol. 1.– N 2. – P 48-60.
7. Patel, D. J. Clustering sensors in wireless ad hoc networks operating in a threat environment./ D. J. Patel, R. Batta, R. Nagi // Operations Research.– 2005. – vol. 53.– P.432-442.