

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396.946

Лисенко О.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Новіков В.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Петрова В.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ПРОЦЕДУРА СИНТЕЗУ ТОПОЛОГІЇ БЕЗПРОВІДНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ МОНІТОРИНГУ ЦІЛЕЙ ІЗ МІНІМІЗАЦІЄЮ ЗАГАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ВУЗЛІВ

Запропоновано нову математичну модель процедури побудови енергозберігаючої топології безпроводної сенсорної мережі моніторингу цілей шляхом управління потужністю передачі вузлів БСМ. Для підвищення ефективності функціонування БСМ моніторингу цілей мережевий рівень еталонної моделі OSI пропонується реалізувати на двох підрівнях: на верхньому рівні проводиться оперативне управління топологією мережі; на нижньому – управління побудовою і підтримкою маршрутів в отриманій топології. Основне завдання у разі побудови топології БСМ полягає в отриманні зв'язної топології та задоволенні показників якості обслуговування потоків даних за мінімізації загальної потужності передачі вузлів у сенсорній мережі.

Ключові слова: безпроводна сенсорна мережа, управління топологією, управління потужністю передачі.

Вступ. Електроживлення вузлів безпроводних сенсорних мереж (БСМ) здебільшого здійснюється від батарей. У зв'язку з цим у системі управління БСМ виділена підсистема управління витратами енергоресурсу вузлів [1]. Метою її функціонування є мінімізація та перерозподіл витрат енергоресурсу вузлами для максимізації тривалості функціонування БСМ. Наявні методи управління витратами енергоресурсів БСМ не враховують особливостей БСМ і тому не забезпечують максимізацію тривалості їх функціонування за виконання вимог до якості інформаційного обміну. У зв'язку з цим задача розробки нових та удосконалення наявних методів управління витратами енергоресурсів для використання в БСМ є актуальною на сучасному етапі розвитку безпроводних телекомунікацій.

Основна частина. Управління витратами енергоресурсу вузлів БСМ може бути реалізоване за рівнями еталонної моделі OSI із використанням різних методів, які в загальному випадку можна поділити на дві групи: методи збереження енергії батарей і методи управління потужністю передачі. У роботі [2] було запропоновано новий енергозберігаючий метод моніторингу цілей у зонах спостереження сенсорів БСМ, який відноситься до першої групи методів і складається з трьох етапів:

1. Знаходження верхньої межі максимальної тривалості функціонування сенсорної мережі $T_{\Phi_{БСМ}}$ та матриці спостереження $|T|_{n \times m}$ (яка визначає інтервал часу, протягом якого сенсори спостерігають за цілями у зонах спостереження).

2. Визначення сесій спостереження – розбиття матриці спостереження $|T|_{n \times m}$ на послідовність

матриць (сесій) спостереження $T_{n,m} = T_1 + T_2 + \dots, T_t$, які не зменшують отримане значення максимальної тривалості функціонування сенсорної мережі та забезпечують виконання умови: один сенсор – одна ціль.

3. Визначення маршрутів передачі зібраної інформації за сесіями спостереження.

Для підвищення ефективності енергозберігаючого методу моніторингу цілей пропонується використати в ньому нову енергозберігаючу процедуру побудови топології мережі шляхом управління потужністю передачі вузлів БСМ. Під топологією мережі розуміють сукупність вузлів на місцевості і каналів, що сполучають їх, у взаємному розташуванні. Топологія визначає потенційні можливості мережі з доставки даних між взаємодіючими вузлами. Передбачається, що кожен вузол може змінювати потужність передачі $p_i = [p_{i,\min} \dots p_{i,\max}]$ з певним кроком дискретизації Δ_p .

Відповідно, під управлінням топологією БСМ розумітимемо управління U_T , що змінює топологію БСМ у процесі її функціонування за рахунок перерозподілу потужностей передач вузлів p_i з метою забезпечення цільової функції $Z_k, k = \overline{1, K}$ [1, 2]:

Z_1 – мінімізація потужностей передачі вузлів ($\min p_i$) і загальної потужності сенсорної мережі $P_{\text{заг}}$ у цілому.

Z_2 – забезпечення зв'язності мережі (зв'язності між вузлами i та $u - cv_{iu} = 1$);

Z_3 – мінімізації часу затримки передачі повідомлень ($\min \bar{t}_3$);

Z_4 – максимізації пропускної спроможності мережі ($\max S$);

Для підвищення ефективності функціонування БСМ моніторингу цілей мережевий рівень еталонної моделі OSI (як складову частину системи управління) пропонується реалізувати на двох підрівнях: на верхньому рівні проводиться оперативне управління топологією мережі (створюються потенційні маршрути передачі інформації); на нижньому – управління побудовою і підтримкою маршрутів у отриманій топології (реалізується конкретний метод маршрутизації) [3].

Верхній і нижній рівні працюють у різних часових інтервалах. Цикл управління маршрутами значно менший за цикл управління топологією. Співвідношення циклів управління мусить бути таким, що на кожному кроці топологічних змін має відбуватися весь цикл управління маршрутами. Тільки в цьому разі можливе досягнення ефективності реалізованої топології.

Розглянемо математичну модель процедури побудови топології БСМ моніторингу цілей.

БСМ уявляється у вигляді графа $G = (V, E)$ з множиною вершин $V = \{i\}$ і множиною ребер $E = \{(i, j) | p_{iu} \approx (d_{iu})^{-\alpha}\}$, що визначають матрицю зв'язності $CV = \|cv_{iu}\|$, де $cv_{iu} = \{0, 1\}$ – булева змінна, d_{iu} – відстань між вузлами i та u для $i \uparrow u, i = \overline{1, N}, u = \overline{1, N}, p_{iu}$ – потужність передачі вузла i , яка необхідна для забезпечення радіозв'язності з вузлом $u, 0 < p_{iu} < p_{\text{пор}}$ для $0 < i < n, \alpha$ – параметр, що приймає значення між 2 та 4. $P(CV) = \sum_{i=1}^n p_i$ – загальна потужність передачі сенсорної мережі, що витрачається.

Параметри БСМ моніторингу цілей такі: кількість вузлів N ; кожен вузол графа i у момент t описується сукупністю параметрів: координати розташування (x_i, y_i) ; потужність передачі p_i ; ємність батареї E_i^b ; маршрутна таблиця найкоротших шляхів $\Pi_i = \|\eta(\pi_{iu}^{(b)})\|$, де $b \in D, (i, u) \in E, \pi_{iu}^{(b)} = \{0, 1\}$ – маршрутна змінна, що визначає відсутність (наявність) маршруту від відправника i до адресата b через сусідній вузол $u \in N_i, l_{\eta}$ – довжина найкоротшого маршруту, $\eta = \overline{1, N}$ – позитивні метрики (наявність радіозв'язності – η_1 , енергія батарей вузлів – η_2 , потужність передачі вузлів – η_3 , відстань – η_4 , затримка передачі – η_5 , пропускна спроможність – η_6). Інтенсивність вхідних потоків визначається матрицею тяжіння $Q^{\xi} = \|Q_{ab}^{\xi}\|, \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N q_{ab}^{\xi} \leq q_{\text{max}}^{\xi}$, де $a \in S$ – відправник; $b \in D$ – базова станція; $q_{iu}^{\xi} \leq s_{\text{max}}$ – пропускна спроможність радіоканалу $\forall (i, u) \in E$; радіозв'язність між вузлами мережі підтримується одним із детермінованих протоколів каналного рівня.

Множина вимог до процедури побудови топології $\{Bq\}, q = \overline{1, 4}$ така: мінімізація потужностей передач вузлів і загальної потужності сенсорної мережі у цілому; забезпечення зв'язності мережі; мінімізація часу затримки передачі повідомлень; максимізація пропускної спроможності мережі.

Необхідно у режимі реального часу знайти матрицю зв'язності CV^* (визначити потужність передачі p_i для кожного вузла $i - 0 \leq i \leq N$, що забезпечує виконання цільової функції $Z_k, k = \overline{1, K}$):

$$C_k^* = \arg \min_{U_T \in \Omega_T} Z_k(CV) \quad (1)$$

за виконання обмежень на множині управляючих впливів і ресурси мережі Ω_T

$$\Omega_T : \left\{ \begin{array}{l} t_3^{\xi}(m_{ab}) \leq t_{\text{доп}}^{\xi} (l_{ab}^{\xi}(m_{ab}) \leq l_{\text{доп}}^{\xi}), \\ q_{iu}^{\xi} \leq s_{\text{доп}}(cv_{iu}), \\ p_i \leq p_{\text{пор}}, \\ E_i^b \leq E_{i\text{max}}^b, \text{ для } i \in C - D \end{array} \right. \quad (2)$$

де t_3^{ξ} – затримка передачі трафіка ξ -го типу, q_{iu}^{ξ} – інтенсивність потоків пакетів, що надхо-

дять за всіма маршрутами m_{ab} , які проходять через цей вузол $i - q_{iu}^{\xi} = \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}$; $(i, u) \in m_{ab}$ – маршрут з відправником у вузлі a і одержувачем b ; $a, b, i, u \in V$, p_i – потужність передачі i -го вузла відповідно до прийнятих маршрутних рішень P_i ; $s(cv_{iu}^{\xi})$ – пропускна спроможність радіоканалу; l_{ab}^{ξ} – кількість ретрансляцій для пари вузлів (a, b) повідомлень за маршрутом m_{ab} ; $p(m_{ab}) = \sum_{(i,u) \in m_{ab}} (k_1 d_{ij}^{\pm} + k_2)$, $a = 2 \dots 4$, k_1 і k_2 – константи; $p_{\text{пор}}$, $t_{\text{доп}}$, $l_{\text{доп}}$ – допустимі значення вищезазначених параметрів.

Основне завдання у побудові топології БСМ полягає в отриманні зв'язної топології та задоволенні показників якості обслуговування потоків даних за мінімізації загальної потужності передачі вузлів у сенсорній мережі.

У цьому разі цільова функція виглядає так:

$$CV^* = \|cv_{iu}^*\| = \arg \min_{U_T \in \Omega_T} P(CV) = \arg \min_{U_T \in \Omega_T} \sum_{m=1}^M \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N p(m_{ab}(CV)) \quad (3)$$

де $P(CV)$ – загальна потужність передачі вузлів сенсорної мережі; $a, b, i, u \in V$; за виконання обмежень (2).

Висновки.

1. Завдання пошуку матриці зв'язності CV^* (1) відноситься до класу NP-повних. Застосування для його вирішення класичних методів приводить до експоненціальної складності. Отримання точного рішення для мережі, яка налічує десятки (сотні) вузлів, пов'язане зі значними часовими витратами. Тому для скорочення перебору топо-

логії в подальших дослідженнях планується розробити множину правил, об'єднаних у базу знань, що змінюють зв'язність мережі для поліпшення її параметрів [4]. Це дає змогу отримати в реальному масштабі часу близькі до оптимальних рішення і використовувати методику для побудови топології БСМ моніторингу цілей. Критерієм визначення моменту перебудови топології мережі є невиконання однієї з умов обмеження Ω_T .

2. Жоден сенсор не може забезпечити повне покриття всіх цілей на всіх дистанціях. Доцільно застосовувати багаторівневий підхід, тобто одночасне розгортання кількох різних типів повністю взаємопов'язаних сенсорів з метою отримання якомога більшого обсягу інформації (мультисенсорну мережу).

Поєднання декількох сенсорів в одному вузлі (акустичні, оптико-електронні, інфрачервоні, сейсмічні, магнітні детектори тощо) дає змогу виявляти повітряні і наземні цілі. Систему, яка може відстежувати людей і машини через акустичні і сейсмічні датчики, можна поєднати з оптико-електронною системою, яка спрямовуватиметься на об'єкт, виявлений радаром. У свою чергу радар можна приєднувати до супутників засобами зв'язку дальньої дії для передачі даних іншим користувачам.

Мультисенсорні мережі потребують багаторазового застосування процедури енергозберігаючої оптимізації, що враховує особливості функціонування кожного сенсора зі складу мультисенсорного блока. Узгоджена енергозберігаюча оптимізація мультисенсорної мережі є перспективою подальших досліджень.

Список літератури:

1. Лисенко О.І. Функціональна модель системи управління безпроводною сенсорною мережею із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища / О.І. Лисенко, К.С. Козелкова, В.І. Новіков, Т.О. Прищепа, А.В. Романюк. Системи обробки інформації. 2015. Вип. 10. С. 222–225.
2. Новіков В.І. Метод збільшення часу життя безпроводної сенсорної мережі з надлишковою кількістю вузлів під час стеження за цілями моніторингу. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2017. Том 28 (67) № 2 С. 38–43.
3. Романюк В.А. Активная маршрутизация в мобильных радиосетях. Зв'язок. № 3. 2002. С. 21–25.
4. Романюк В.А. Підходи до розробки нової архітектури системи управління неоднорідними безпроводними сенсорними мережами / В.А. Романюк, О.І. Лисенко, І.В. Алексєєва, А.В. Романюк, В.І. Новіков. Математичні машини і системи, 2017, № 2. С. 15–23.

ПРОЦЕДУРА СИНТЕЗА ТОПОЛОГІИ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ МОНИТОРИНГА ЦЕЛЕЙ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ОБЩЕЙ МОЩНОСТИ ПЕРЕДАЧИ УЗЛОВ

Предложена новая математическая модель процедуры построения энергосберегающей топологии беспроводной сенсорной сети мониторинга целей путем управления мощностью передачи узлов БСМ. Для повышения эффективности функционирования БСМ мониторинга целей сетевой уровень эталонной модели OSI предлагается реализовать на двух подуровнях: на верхнем уровне проводится оперативное управление топологией сети; на нижнем – управление построением и поддержкой маршрутов

при полученной топологии. Основная задача при построении топологии БСМ состоит в получении связной топологии и удовлетворении показателей качества обслуживания потоков данных при минимизации общей мощности передачи узлов в сенсорной сети.

***Ключевые слова:** беспроводная сенсорная сеть, управление топологией, управление мощностью передачи.*

PROCEDURE FOR FORMATION THE ENERGY-SAVING LAYOUT TOPOLOGY OF THE WIRELESS SENSOR CIRCUIT MONITORING OF THE TARGETS

It is proposed a new mathematical model of procedure for formation the energy-saving layout topology of the wireless sensor network (WSN) monitoring of the targets. Construction of network topology is carried out by controlling the transmission power of nodes WSN. To improve the effectiveness of the operation of the WSN for monitoring purposes, the network level of the reference model OSI proposed to be implemented on two sublevels: at the upper level is carried out operational management of the network topology, on the bottom – management of the construction and support of routes in the received topology. The main task in constructing topology WSN is to obtain a coherent topology and satisfaction of service quality indicators for data flows while minimizing the total transmitting power of nodes in the sensor network.

***Key words:** wireless sensor network, topology control, transmission power control.*