

Розвиток радіотехнічного забезпечення, АСУ та зв'язку Повітряних Сил

УДК 621.396.946

С.М. Чумаченко¹, С.Л. Данилюк²

¹ Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Київ

² Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, Київ

ПИТАННЯ ОПЕРАТИВНОГО РОЗГОРТАННЯ СЕНСОРНИХ РАДІОМЕРЕЖ НА ТЕРИТОРІЯХ ВЕДЕННЯ БОЙОВИХ ДІЙ

У статті розглядається питання розгортання безпроводових сенсорних мереж для оперативного моніторингу територій ведення бойових дій. Запропоновано два способи локалізації вузлів мережі за допомогою пілотованої та безпілотної авіації. Розглядається математична задача синтезу раціональної топології безпроводових сенсорних мереж із застосуванням ретрансляторів на основі малих БПЛА; розроблено метод рішення задачі на основі застосування бази знань спеціально розроблених правил, що дозволяє уникнути повного перелічення графів мережі й отримати близьке до оптимального рішення в режимі реального часу.

Ключові слова: забруднення, моніторинг, сенсор, мережа, база знань, розгортання, топологія, БПЛА.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді.

Останнім часом широкого застосування набувають дистанційні методи контролю для оперативного виявлення радіаційної, хімічної й біологічної обстановки у випадках екстремально високого забруднення навколишнього природного середовища на територіях ведення бойових дій (БД) [1 – 3].

Дані методи можуть знайти своє застосування в безпроводових сенсорних мережах (БСМ) [3, 4], оснащених безпроводовим інтерфейсом (наприклад, стандарту IEEE 802.15.4), що з'єднуються з центром обробки даних (ЦОД) через шлюз (координатор) безпосередньо (у зоні прямої радіовидимості) або із ретрансляцією пакетів через проміжні вузли (маршрутизатори). Такі сенсорні комплекси можуть оснащуватися набором випромінювачів (лідарів, радіометрів тощо), що дозволяють здійснювати зондування в широкому спектральному діапазоні випромінювання, починаючи від ультрафіолетового й закінчуючи далеким інфрачервоним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Лазерні системи контролю забруднення атмосфери в районах розміщення хімічно-небезпечних об'єктів та адаптивні інтегровані системи екологічної розвідки розглянуті в [1 – 4]. Теоретичні основи проектування комп'ютерних мереж розглянуті в [5, 6].

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою статті є наукове обґрунтування нових методів оперативного розгортання та синтезу топології безпроводових сенсорних мереж для моніторингу забруднених територій районів ведення БД.

Виклад основного матеріалу досліджень

Одним із ключових питань застосування сенсорних радіомереж є питання розгортання мережі, а саме, розміщення вузлів на забрудненій території ведення БД, оскільки безпосереднє застосування людського ресурсу неприпустиме через небезпеку для життя та здоров'я військовослужбовців. Тому одним з можливих способів розгортання мережі може бути застосування пілотованої авіації, наприклад, із застосуванням переобладнаної під сенсори вертольотної системи мінування ВСМ-1 (рис. 1, а) або робототехніки – безпілотної літальних апаратів (БПЛА) міні та мікро класу, як показано на рис. 1, б.

Такий компактний мобільний сенсорний комплекс, розміщений за допомогою пілотованої авіації або БПЛА, дозволить визначати й прогнозувати подальшу трансформацію й переміщення будь-яких небезпечних речовин, у тому числі біологічної природи. Точне географічне позиціонування забезпечує приймач ГЛОНАСС/GPS, що входить до складу наземної системи керування. Програмний комплекс надає можливість у швидкій і зручній для операторів формі виконувати всі операції налаштування лазерного, оптичного, електронного й електромеханічного обладнання й одержувати результати лідарного чи іншого зондування не тільки у вигляді діаграм і графіків, й за допомогою розробленої системи картографування, а також накладати результати вимірів на карту місцевості, використовуючи сучасні геоінформаційні системи та краудсорсингові технології (ArcGIS, MapInfo, Intergraph, Ushahidi та ін.).

Усе це дозволить вчасно проводити заходи щодо захисту військ ЗС України, населення й територій у районах ведення БД у випадках загрози й виникнення надзвичайних ситуацій природного, воєнно-техногенного й терористичного характеру.



а



б

Рис. 1. Приклад розміщення сенсорів за допомогою пілотованої авіації (а) та БПЛА (б)

Однією із ключових задач телекомунікаційного профілю під час розгортання БСМ є задача пошуку раціональної топології мережі вузлів-ретрансляторів (маршрутизаторів), а саме, визначення їх положення на місцевості та взаємозв'язків між ними.

Актуальність і практична значимість задачі проектування раціональної топології БСМ обумовлена вищезазначеними чинниками. Положення кінцевих пристроїв (КП) мережі не може вибиратися довільно і визначається конкретними умовами задачі адаптивного моніторингу. Обмежений радіус дії радіопередавачів цих вузлів обумовлює необхідність включення до складу мережі ретрансляторів, що здійснюють передачу інформаційних повідомлень від КП до шлюзу (ЦОД). Маючи обмежену можливість вибору кількості, розміщення і технічних характеристик таких вузлів і бажаючи мінімізувати затрати на створення та обслуговування БСМ, зберігаючи при цьому

її працездатність і надійність на заданому рівні, ми стикаємось із проблемою оптимізації технічного рішення – топології мережі. Раціональна топологія БСМ дозволить скоротити трафік і знизити енергоспоживання на вузлах, що, у свою чергу, дозволить збільшити тривалість безвідмовної роботи мережі і знизити загальні витрати на її обслуговування.

Розглянемо приклад архітектури БСМ із застосуванням БПЛА (рис. 2). БСМ складається із сукупності N сенсорів, кінцевих вузлів (КП), розміщених з координатами $(x_i, y_i), i = \overline{1, N}$, на деякій території ведення БД розміром r , яку часто називають сенсорним полем. Для того щоб зібрати дані з сенсорів і передати на шлюз, використовується сукупність K ретрансляторів (маршрутизаторів) на основі мініатюрних БПЛА, розміщених на висоті h з координатами проєкції $(x_{0k}, y_{0k}), k = \overline{1, K}$ і радіусом зони радіопокриття R . Якщо сенсор знаходиться в зоні радіопокриття БПЛА, дані мережею ретрансляторів потрапляють на шлюз, а потім через корпоративні мережі в центр обробки даних екологічного моніторингу ЗС чи ДСНС України.

Під топологією мережі будемо розуміти сукупність геометричного розташування її вузлів та ймовірностей використання комунікацій між ними для доставки повідомлень: $(\|R_i\|, \|p_{ij}\|), i, j = \overline{1, N}$, де $\|R_i\|$ – множина вузлів БСМ; $\|p_{ij}\|$ – множина ймовірностей використання комунікацій між вузлами.

Таким чином, БСМ можна представити у вигляді спрямованого зваженого графа, що складається з вершин (вузлів) і ребер (каналів зв'язку) (рис. 3).

Побудова маршрутів від КП до шлюзу здійснюється за допомогою алгоритму динамічного програмування – методу Беллмана-Форда. Критеріальна функція цього алгоритму (функція Беллмана) визна-

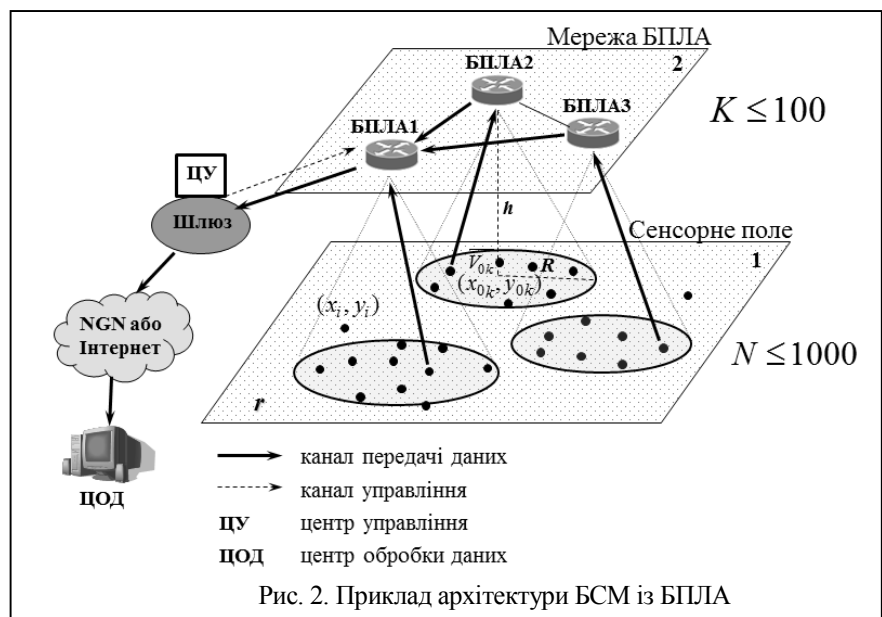


Рис. 2. Приклад архітектури БСМ із БПЛА

чає умовну вартість транспортування потоку даних між сусідніми вузлами маршруту:

$$W = C_m + C_r \frac{1}{\|R_i\|} \rightarrow \min, \quad C_m = C_m^{\text{пот}} \text{ або } 0,$$

$$C_r = \begin{cases} 0, & \text{якщо } (U_{RX}^* + U_{TX}^*) > (U_{\max} - U_w^*); \\ \frac{U_{RX}^* + U_{TX}^*}{U_{\max} - U_w^*} C_m^{\text{пот}}, & \text{інакше,} \end{cases}$$

де C_m – умовна вартість вузла СР, що приймає нульове значення у разі повторного використання вузла в топології (чим досягається мінімізація кількості ретрансляторів), $C_m^{\text{пот}}$ – умовна номінальна вартість вузла, C_r – умовна вартість ретрансляції, U_{RX}^*, U_{TX}^* – фактичний трафік через вузол з урахуванням повторних ретрансляцій, U_{\max} – максимальний трафік через вузол, U_w^* – еквівалентна щільність потоку даних, випромінюваного сусідніми вузлами з урахуванням конкуренції за доступ до середовища передачі (радіоканалу).

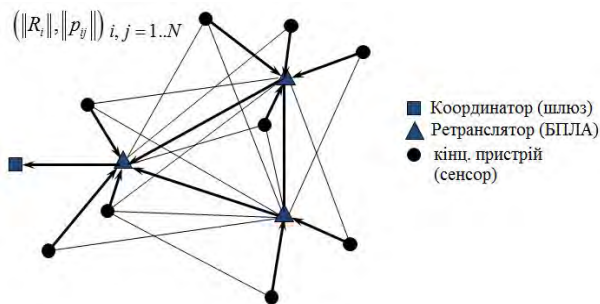


Рис. 3. Приклад графу мережі БСМ

Таким чином, можемо сформулювати математичну постановку задачі: знайти таку топологію мережі (місце розташування ретрансляторів), яка мінімізує вартість транспортування потоків даних від сенсорів до шлюзу, при виконанні обмежень на ресурси мережі, забезпеченні структурної зв'язності і показників функціонування мережі:

$$X_0 = \arg \min_{X_0 \in \Omega_{1,2}} C(X) = \arg \min_{X_0 \in \Omega_{1,2}} \sum_{i=1}^{N+K} \sum_{j=1}^{N+K} W_{ij}, i \neq j,$$

$$\Omega_1 : \{X \in r, p_{ij} \leq \text{PER}^0, P \leq P^0, N \leq 1000, K \leq 100\},$$

$$\Omega_2 : \{s(m_{ab}) \geq s^0, t_3(m_{ab}) \leq t_3^0, a, b = \overline{1, N}\},$$

де X – вектор координат проєкцій розміщення множини БПЛА; PER^0 – граничне значення ймовірності пакетної помилки в радіоканалі; P, P^0 – надійність і обмеження надійності мережі; $s(m_{ab}), t_3(m_{ab}), s^0, t_3^0$ – пропускна здатність (ПЗ) і затримка в маршруті m_{ab} і відповідні обмеження.

Задача проектування раціональної топології БСМ з формальної точки зору аналогічна задачі

формування топологічної структури будь-якої бездротової мережі, яка є однією з основних під час її проектування та полягає у виборі оптимальної схеми з'єднання вузлів комутації та концентрації, виборі пропускної здатності ліній та оптимальних маршрутів передачі інформації.

Відомі на сьогодні підходи до вирішення подібних задач засновані на застосуванні апарату комбінаторного аналізу [4]. Подібні алгоритми спираються на представлення мережі передачі даних у вигляді кінцевого графу без петель і кратних ребер, вершини якого відповідають вузлам мережі, а ребра – лініям зв'язку. Використання теорії перерахування графів для вирішення задачі топологічної оптимізації останнім часом знаходить дедалі ширше застосування, що зв'язано з підвищенням продуктивності ЕОМ, розробкою нових високоефективних алгоритмів генерації графів із заданими властивостями. Основною перевагою даного підходу є можливість отримання точного рішення, тому для невеликих мереж цей підхід є ефективним. Крім того, наявність точного рішення дозволяє оцінити якість існуючих та розроблюваних підходів для оптимізації топології.

Основний недолік алгоритмів конструктивного перерахування графів полягає в неможливості їх застосування для побудови топології мереж великої розмірності, оскільки число графів, що генеруються зростає експоненційно по мірі зростання кількості вузлів мережі. Це обумовлює доцільність розробки альтернативних підходів до проектування раціональної топології БСМ. Для вирішення даної задачі розроблено метод, детально описаний у [5], який являє собою обчислювальну процедуру, що включає такі основні етапи:

1. Оцінка зв'язності мережі. У разі мобільних сенсорів спочатку прогнозується тривалість їх перебування в зоні радіовидимості ретрансляторів, а в разі фіксованих – відразу оцінюється ступінь покриття сенсорів ретрансляторами мережі. У разі невиконання умов по зв'язності і надійності мережі виконується відповідна процедура розміщення БПЛА.
2. Оцінка заданих функціональних показників (затримка, ПЗ маршрутів).
3. Удосконалений алгоритм пошуку раціональної топології БПЛА.

Суть удосконалення полягає в тому, що для скорочення повного перебору топології застосовується сукупність правил такого розміщення ретрансляторів, яке дає раціональне рішення і мінімізує час його пошуку.

Правила являють собою правила продукційного типу, які складаються з умови і дії. За однакового ефекту декількох правил застосовуються метаправила. Правила можуть бути класифіковані залежно від необхідної мети – для забезпечення зв'язності, користувальницької або системної оптиміза-

ції. Наприклад, для забезпечення зв'язності мережі необхідно розміщувати БПЛА таким чином, щоб покрити якомога більше вузлів. Для максимізації ПЗ мережі – перерозподілити потоки за недовантаженими маршрутами.

Таким чином, застосування методу дозволить скоротити перебір можливих графів і отримати раціональні рішення (які відрізняються від оптимальних на 5–7%) у режимі реального часу (одиниці/десятки секунд).

З практичної точки зору подібні БСМ можуть бути реалізовані на основі сучасної елементної бази, наприклад, налагоджувальної плати Arduino з вбудованим процесором АТМЕГА328 (де може бути реалізований згаданий вище метод), радіомодулів XBee, набору сенсорів (рис. 4). Зібрані на їх основі макети дозволяють вирішувати низку прикладних задач, наприклад, моніторинг параметрів навколишнього природного середовища, керування рухом шасі автомобіля або БПЛА.

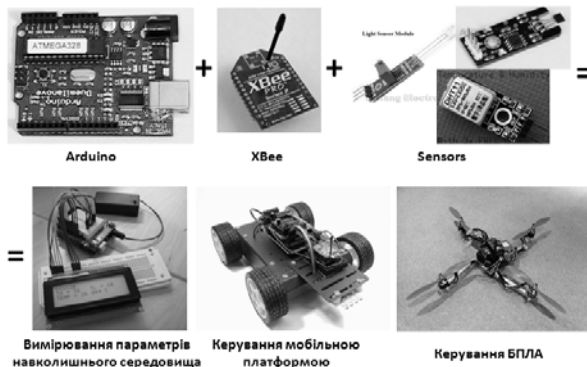


Рис. 4. Побудова БСМ із застосуванням налагоджувальних плат Arduino та радіомодулів XBee

ВИСНОВКИ

Запропоновано два способи локалізації вузлів мережі за допомогою пілотованої та безпілотної авіа-

ції в зоні ведення бойових дій, а також метод планування раціональної топології бездротової сенсорної мережі із застосуванням бази правил для скорочення повного перебору графів мережі. Застосування методу дозволить отримати раціональні рішення (які відрізняються від оптимальних на 5–7%) в режимі реального часу (одиниці/десятки секунд). Також запропоновано варіант практичної реалізації сенсорної радіомережі із застосуванням налагоджувальних плат Arduino і радіомодулів XBee.

Список літератури

1. Лазерные системы контроля загрязнения атмосферы в районах размещения химически опасных объектов // Технологии гражданской безопасности [Текст] / В.А. Алексеев, В.В. Батырев, Т.Г. Габричидзе, И.М. Янников. – 2006. – № 4 (10). – С. 94–96.
2. Адаптивні інтегровані системи екологічної розвідки. Монографія [Текст] / Г.М. Педченко, Г.В. Лисиченко, І.С. Романченко, А.І. Семенченко, О.І. Лисенко, С.М. Чумаченко, Ю.Л. Забулонов, С.А. Станкевич, С.Г. Бутенко, С.Л. Борисюк. – К.: ІГНС НАНУ та МНС, 2008. – 400 с.
3. Sensor Networks for Emergency Response: Challenges and Opportunities [Текст] / K. Lorincz, D.J. Malan, T.R.F. Fulford-Jones, A. Nawoj, A. Clavel, V. Shnayder, G. Mainland, M. Welsh, S. Moulton // Pervasive computing. – 2004. – № 10-11. – P. 16–23.
4. Ramesh, M.V. Wireless Sensor Network for Landslide Detection [Текст] / M.V. Ramesh, S. Kumar, P.V. Rangan // 2009 Int. Conf. on Wireless Networks (ICWN'09): conf., June 14, 2009; proc. – Las Vegas, 2009. – P. 1–7.
5. Вишневицкий, В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей [Текст] / В.М. Вишневицкий. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
6. Lysenko, O.I. Capacity increasing of sensor telecommunication networks [Текст] / O.I. Lysenko, S.V. Valuiyskiy // Telecommunication Sciences. – 2012. – vol. 3. – № 1. – P. 5–11.

Надійшла до редколегії 3.08.2015

Рецензент: д-р техн. наук проф. О.І. Лисенко, Національний технічний університет України “КПІ”, Київ.

ВОПРОСЫ ОПЕРАТИВНОГО РАЗВЕРТЫВАНИЯ СЕНСОРНЫХ РАДИОСЕТЕЙ НА ТЕРРИТОРИИ ВЕДЕНИЯ БОЕВЫХ ДЕЙСТВИЙ

С.Н. Чумаченко, С.Л. Данилюк

В статье рассматривается вопрос развертывания беспроводных сенсорных сетей для оперативного мониторинга территорий ведения боевых действий. Предложено два способа локализации узлов сети: с помощью пилотируемой и беспилотной авиации. Рассматривается математическая задача синтеза рациональной топологии беспроводных сенсорных сетей с применением ретрансляторов на основе малых БПЛА; разработан метод решения задачи на основе применения базы знаний специально разработанных правил, что позволяет избежать полного перечисления графов сети и получить близкое к оптимальному решению в режиме реального времени.

Ключевые слова: загрязнение, мониторинг, сенсор, сеть, база знаний, развертывание, топология, БПЛА.

QUESTIONS OF RAPID DEPLOYMENT OF WIRELESS SENSOR NETWORKS IN COMBAT AREAS

S.M. Chumachenko, S.L. Daniluk

This paper addresses the questions of deploying wireless sensor networks for operational monitoring of combat areas. Proposed two ways of localizing nodes using manned and unmanned aircraft. Also it is considered mathematical problem of constructing of rational topology of wireless sensor networks using repeaters on the basis of miniature UAVs; proposed a method of solving the problem using the knowledge base of specially designed rules of such repeaters placement, which avoids exhaustive search of network graphs to get close to the optimal solution in real time.

Keywords: contamination, monitoring, sensor, network, knowledge base, deployment, topology, UAV.