

МЕТОД ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ СЕНСОРНОЇ РАДІОМЕРЕЖІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З НАДЛИШКОВОЮ КІЛЬКІСТЮ НЕОДНОРІДНИХ ВУЗЛІВ ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЗАДАНИХ ПОКАЗНИКІВ ПЕРЕКРИТТЯ ЗОН МОНІТОРИНГУ ТА ЗВ'ЯЗНОСТІ ВУЗЛІВ

Запропонований новий метод енергозбереження в сенсорних радіомережах спеціального призначення з надлишковою кількістю вузлів, який розділяє загальну сукупність вузлів на необхідну кількість підмножин, що працюють в різні періоди час, і організує їх функціонування для забезпечення зберігання енергетичних ресурсів вузлів з метою максимізації «часу життя» сенсорної радіомережі при забезпеченні заданих показників перекриття зон моніторингу та зв'язності вузлів.

Коваленко І.Г., Романюк В.А. Метод енергозбереження в сенсорних радіосетях спеціального призначення з избыточным количеством узлов при обеспечении заданных показателей перекрытия зон мониторинга и связности узлов. Предложен новый метод энергосбережения в сенсорных радиосетях специального назначения с избыточным количеством узлов, который разбивает общую совокупность узлов на необходимое количество подмножеств, которые работают в разные периоды времени, и организует их функционирование для обеспечения сохранения энергетических ресурсов узлов с целью максимизации «времени жизни» сенсорной радиосети при обеспечении заданных показателей перекрытия зон мониторинга и связности узлов.

Kovalenko I., Romanjuk V. Method of energy savings in special wireless sensor networks with an excess of number of nodes which provides the given overlapping of monitoring and connectivity nodes. A new method of energy savings in special purpose wireless sensor networks with an excess of nodes, which divides the total by the required number of subsets of nodes that operate in different time periods, and organize their functioning to ensure the conservation of energy resources of nodes and maximize the "lifetime" of the network which provides the given overlapping of monitoring and connectivity nodes.

Ключові слова: сенсорна радіомережа, вузли мережі, енергозберігання.

Актуальність. В даний час для моніторингу географічних районів, охорони об'єктів та контролю переміщень особового складу та техніки при проведенні спеціальних операцій пропонується використовувати сенсорні радіомережі спеціального призначення (СР), які складаються з сенсорних вузлів з функціями моніторингу навколишнього середовища, обробки і передачі даних [1]. Основними елементами сенсорних вузлів є: датчики контролю зовнішнього середовища, мікрокомп'ютер, батарея живлення, прийомопередавач. Вузли СР мають автономне джерело електроенергії обмеженої ємності, тому характерними вимогами до них є мінімізація витрат енергетичних ресурсів вузлів та максимізація часу функціонування мережі. Складність знаходження балансу між ефективністю енергозберігання та продуктивністю передачі інформаційних потоків вимагає розробки ряду методів енергозбереження вузлів СР [2].

Однією з проблем розгортання сенсорних мереж призначення є проблема покриття зон моніторингу [3]. Для сенсорних радіомереж спеціального призначення крім покриття визначеної зони моніторингу та основних мережевих характеристик висуваються також вимоги з оперативності розгортання, надійності, живучості, скритності, можливості протидії засобам радіоелектронної боротьби. Так для оперативного розгортання СР використовується розсіювання вузлів СР з літака, ракети або інші засоби випадкового розміщення. При цьому забезпечити необхідну зону покриття при виконанні вимог до СР та випадковому розташуванні сенсорів можливо тільки за допомогою внесення значної надлишковості кількості вузлів. Надлишковість вузлів дозволить підвищити якість покриття зони моніторингу (за охоптом і перекриттям зон моніторингу та зв'язності вузлів для забезпечення надійності та живучості СР), але призведе до зайвих енерговитрат та взаємних завад в СР. Крім того, в районі моніторингу для організації СР можуть бути задіяні неоднорідні сенсорні вузли з різними радіусами зон моніторингу та передачі даних. Тому постає актуальною задача розробки методів енергозбереження сенсорної радіомережі спеціального призначення з надлишковою кількістю неоднорідних вузлів, які

забезпечують задане перекриття зон моніторингу та задану зв'язність окремих неоднорідних вузлів в напрямку передачі даних адресату для виконання вимог до сенсорних радіомереж спеціального призначення.

Мета статті: проаналізувати існуючий досвід при розробці методів енергозбереження в сенсорних радіомережах з надлишковою кількістю вузлів, виявити переваги та недоліки окремих методів і з їх врахуванням розробити новий метод енергозбереження сенсорної радіомережі спеціального призначення з надлишковою кількістю різнотипних вузлів при забезпеченні заданого перекриття зон моніторингу та заданої зв'язності окремих вузлів для виконання вимог до сенсорних радіомереж спеціального призначення.

Аналіз публікацій. Взагалі, для енергозбереження сенсорних мереж з щільним розташуванням вузлів, перекриттям зон моніторингу та зон передачі даних використовуються методи циклічного відключення надлишкової кількості вузлів на визначений період часу [2]. Відключені вузли зберігають ресурс батарей і в подальшому можуть замінити вузли, які більше інших витрачають енергетичний ресурс. Основна задача методів даного класу полягає в виборі тих вузлів СР, які на черговому циклі роботи можуть бути відключені. Для цього можуть бути використані дані про розташування (координат) вузлів або їх зв'язність. Так метод GeRaF (Geographic Random Forwarding) використовує адаптивну випадкову схему включення/відключення вузлів СР з передачею даних активному в даний час вузлу, координати якого ближче до адресата [2]. Метод Span (An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks) на основі інформації про зв'язність вузлів вибирає «координаторів вузлів мережі», які функціонують на черговому циклі роботи мережі і здійснюють маршрутизацію інформаційних потоків [2]. В методі ASCENT (Adaptive Self-Configuring sEnsor Networks Topologies) неактивні вузли знаходяться в режимі прослуховування і при необхідності за відповідним алгоритмом переходять в активний стан [2].

Основна множина методів циклічного відключення надлишкової кількості вузлів можуть в деякій мірі збільшити час функціонування мережі, але вони не враховують вимог до СР (особливо з надійності та живучості) і не забезпечують задане перекриття зон моніторингу та зв'язності вузлів.

Проблемі забезпечення заданого перекриття зон моніторингу та заданої зв'язності окремих вузлів присвячено ряд робіт [4-8]. Були розроблені ряд методів енергозберігання при забезпеченні заданих показників мережі при застосуванні різнорідних сенсорів, з яких найбільш ефективними за результатами моделювання на даний час є методи EECCR (An Energy-Efficient m-Coverage and n-Connectivity Routing Algorithm Under Border Effects in Heterogeneous Sensor Networks) [9] та ECR (An Energy Conserving Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks) [10]. В даних методах здійснюються такі основні децентралізовані функції управління мережею:

на прикладному рівні моделі OSI на етапі планування випадковим чином загальна кількість сенсорних вузлів мережі розбивається на визначену кількість підмножин вузлів, що функціонують в різні періоди часу і забезпечують задану якість покриття зони моніторингу і зв'язність мережі;

на мережевому рівні моделі OSI на етапі оперативного управління на початковій стадії забезпечується необхідна зв'язність мережі шляхом включення, при необхідності, окремих вузлів в склад різних підмножин;

на мережевому рівні моделі OSI на етапі оперативного управління періодично в кожній підмножині забезпечується маршрутизація повідомлень в напрямку шлюзу з підтримкою визначеної кількості маршрутів;

управління включенням, відключенням вузлів здійснюється на прикладному рівні моделі OSI з використанням методів синхронізації мережі [11].

При аналізі вищезазначених методів було виявлено ряд їх недоліків, що, на думку авторів статті, не дозволяють мінімізувати енергоспоживання СР. Так метод EECCR при

призначенні маршрутів не враховує ємність батарей вузлів і використовує тільки найкоротші маршрути до шлюзу, що призводить до великого енергетичного навантаження на окремі вузли і їх передчасного виходу з ладу. Метод ECR виправляє окремі недоліки методу EECCR, але не вирішує, на погляд авторів цієї статті, задачу максимізації часу життя сенсорної мережі. Навіть в наведених в статтях прикладах видно, що вузли, які більш навантажені ретрансляцією пакетів (знаходяться ближче до шлюзу) практично не відключаються і не задіяні в механізмі енергозбереження. Особливо це стосується вузлів, які безпосередньо зв'язані зі шлюзом мережі, який передає адресату зібрані дані[2]. Випадковий характер розподілу періодів функціонування цих вузлів може призвести до збільшення їх енерговитрат і передчасного виходу з ладу, що в свою чергу, призведе до неможливості збору даних всією мережею. Періодична реконфігурація мережі в методі ECR вносить затримки в зборі даних моніторингу і не вирішує проблему підвищеного навантаження на окремі вузли. Принцип розбиття загальної кількості вузлів на підмножини і їх функціонування не достатньо використовують можливості енергозбереження. Так в зазначених методах при перевищенні необхідної кількості вузлів, наприклад, в 1,9 разів механізми енергозбереження взагалі не будуть задіяні (використовуються тільки цілі числа разів перевищення загальної кількості вузлів над необхідною). Крім того вищевказані методи не відповідають вимогам, що висуваються до сенсорних радіомереж спеціального призначення.

Постановка задачі. Розробити новий метод енергозбереження сенсорної радіомережі спеціального призначення з надлишковою кількістю різномірних вузлів, який би забезпечив задане перекриття зон моніторингу та задану зв'язність окремих вузлів для виконання вимог до сенсорних радіомереж спеціального призначення.

Суть методу полягає в тому, що на початковому етапі планування мережі на прикладному рівні моделі OSI загальна чисельність вузлів CP розділяється на визначену кількість підмножин вузлів, що працюють в різні періоди часу. Необхідна кількість підмножин вузлів та періодів їх функціонування визначаються за допомогою розроблених алгоритмів з використанням залежностей ступеня m -кратного покриття та n -кратної зв'язності від кількості вузлів, які отримуються з математичної моделі CP і приводяться нижче.

В подальшому на етапі оперативного управління мережею на мережевому рівні моделі OSI розроблений алгоритм маршрутизації організує функціонування підмножин вузлів для забезпечення зберігання їх енергетичних ресурсів та максимізації «часу життя» сенсорної радіомережі при забезпеченні заданих показників перекриття зон моніторингу та зв'язності вузлів. Для чого на початковій фазі відповідно розробленого алгоритму маршрутизації спочатку встановлюються маршрути передачі даних від кожного вузла в напрямку шлюзу, при чому, при необхідності, окремі вузли включаються в склад різних підмножин для забезпечення заданої зв'язності мережі. Після встановлення маршрутів відповідно розробленому алгоритму маршрутизації здійснюється передача даних з періодичною реконфігурацією мережі.

Спочатку розглянемо модель CP та визначимо залежності якості покриття CP від кількості вузлів.

Модель CP.

Для вирішення поставленої задачі були введені наступні обмеження. Нехай N сенсорних вузлів випадковим чином рівномірно розміщені в районі моніторингу Ω кругової форми з радіусом R . Будемо вважати, що площа району $S_{\Omega} \rightarrow \infty$ та $N \rightarrow \infty$, але $N/S_{\Omega} = const$. Будемо рахувати, що вузли розподілені по площині району Ω за Пуассоновським законом розподілу з інтенсивністю N/S_{Ω} . Шлюз розташований випадково в районі Ω . Існує M типів сенсорних вузлів. Кількість сенсорних вузлів i -го типу дорівнює $\rho_i N$ ($0 \leq \rho_i \leq 1$, $1 \leq i \leq M$, $\sum_{i=1}^M \rho_i = 1$). Радіус моніторингу сенсорного вузла типу i дорівнює r_{mi} , максимальний радіус передачі вузла типу i дорівнює r_{pi} . Будемо

рахувати, що $\forall i, j \in M, r_{mi} < r_{mj}$, якщо $i < j$. СР представимо в вигляді зв'язного графу $G = (V, E)$, де V – множина сенсорних вузлів, $|V| = N$; E – множина зв'язків між вузлами.

Очевидно, що будь-яка кількість вузлів N_x може по-різному створити зону покриття Ω_x району моніторингу Ω в залежності від розмірів та випадкового розміщення окремих зон моніторингу вузлів. Зона покриття Ω_x – випадкова, а площа цієї зони S_{Ω_x} – випадкова величина, причому $S_{\Omega_x} \leq S_{\Omega}$. Зона m -кратного покриття Ω_m теж випадкова, S_{Ω_m} – випадкова величина, причому $S_{\Omega_m} \leq S_{\Omega}$. Очевидно, що при $r_{mi} \ll R$ та випадковому розміщенні вузлів $P(S_{\Omega_m} = S_{\Omega}) \rightarrow 1$, при $N \rightarrow \infty$. Тому введемо обмеження та визначимо, що СР забезпечує m -кратне перекриття району Ω якщо кожна точка $p \in \Omega$ знаходиться в радіусі моніторингу m або більше сенсорних вузлів на площі, рівній $k_{mS_{\Omega}} S_{\Omega}$, $0 < k_{mS_{\Omega}} < 1$, де $k_{mS_{\Omega}}$ – коефіцієнт, який задає відсоток необхідного охопту району Ω з і визначається в залежності від задач, що покладаються на СР. Очевидно, що сенс мають значення $k_{mS_{\Omega}} \rightarrow 1$, тому в подальшому для проведення розрахунків будемо використовувати значення $k_{mS_{\Omega}} = 0,99$.

Якщо розглядати зв'язність вузлів, то можна доказати, що завжди для будь якої СР з випадковим розміщенням N вузлів і $r_{wi} \ll R$, буде існувати ймовірність того, що будуть існувати вузли, які фізично не мають n -кратну зв'язність. Тому визначимо, що СР забезпечує n -кратну зв'язність вузлів, якщо $k_{nE} N$ вузлів мають n -кратну зв'язність, де k_{nE} , $0 < k_{nE} < 1$ – коефіцієнт, який задає відсоток вузлів, що мають n -кратну зв'язність і визначається в залежності від задач, що покладаються на СР. Для проведення розрахунків будемо використовувати значення $k_{nE} = 0,99$.

Для отримання мінімальної достатньої кількості вузлів для забезпечення m -кратного перекриття зон моніторингу та n -кратної зв'язності вузлів були отримані відповідні залежності.

Визначення залежності відсотка покриття району моніторингу від кількості вузлів СР при забезпеченні m -кратного перекриття зон моніторингу та відсотка вузлів, що мають n -кратну зв'язність в напрямку передачі даних шлюзу при заданих типах і характеристиках вузлів та району моніторингу

Визначимо окремо розрахункові значення для $k_{mS_{\Omega}}^*$ та k_{nE}^* для розробленої моделі.

Визначення $k_{mS_{\Omega}}^*$.

Розрахункове значення $k_{mS_{\Omega}}^*$ для розробленої моделі можна визначити як відношення

$$S_{\Omega_m} / S_{\Omega} [9]: \quad k_{mS_{\Omega}}^* = \frac{1}{S_{\Omega}} \iint_{p \in \Omega} P(p \in \Omega_m) d\Omega, \quad (1)$$

Нехай, $A_x(p)$ – це подія, що точка p покрита зонами моніторингу x вузлів, а $B_{n_i}^i(p)$ – подія, що точка p покрита зонами моніторингу n_i вузлів типу i ($1 \leq i \leq M$,

$$0 \leq n_i \leq \rho_i N$$
. Тоді:
$$P(A_x(p)) = \sum_{n_1 + \dots + n_M = x} \prod_{i=1}^M P(B_{n_i}^i(p)) \quad (2)$$

та
$$P(p \in \Omega_m) = 1 - P(A_0(p) \cup A_1(p) \cup \dots \cup A_{m-1}(p)) = \quad (3)$$

$$= 1 - \sum_{x=0}^{m-1} P(A_x(p)) + \sum_{x=0}^{m-2} \sum_{y=x+1}^{m-1} P(A_x(p) A_y(p)) + (-1)^{m-2} P(A_0(p) A_1(p) \dots A_{m-1}(p))$$

В (3) події $A_x(p)$ та $A_y(p)$ несумісні, тому

$$\sum_{x=0}^{m-2} \sum_{y=x+1}^{m-1} P(A_x(p)A_y(p)) + \dots + (-1)^{m-2} P(A_0(p)A_1(p)\dots A_{m-1}(p)) = 0 \quad (4)$$

Тоді, якщо підставити (2) в (3) з урахуванням (4), отримаємо:

$$P(p \in \Omega_m) = 1 - \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{n_1+\dots+n_M=x} \prod_{i=1}^M P(B_{n_i}^i(p)) = 1 - \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{n_1+\dots+n_M=x} \prod_{i=1}^M \frac{\mu_i^{n_i}}{n_i!} e^{-\mu_i} \quad (5)$$

де $\mu_i = \rho_i N S_{\Omega(p, r_{mi}) \cap \Omega} / S_{\Omega}$ – розрахункова кількість вузлів типу i , які перекривають точку p .

Очевидно, що значення μ_i залежить від розміщення точки p та значення r_{mi} . На рис.1. відображені два варіанти розміщення точки p або в районі Ω_1 або Ω_2

Відповідно, в залежності від розміщення точки p :

$$\mu_i = \begin{cases} \rho_i N r_{mi}^2 / R^2, & 0 < r \leq R - r_{mi} \\ \rho_i N S_{\Omega(r, r_{mi})} / \pi R^2, & R - r_{mi} < r \leq R \end{cases} \quad (6)$$

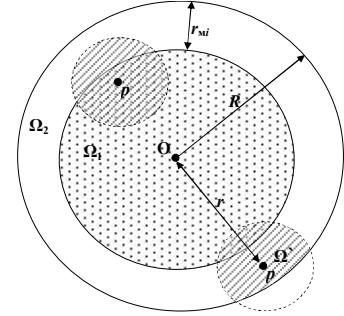


Рис.1.

де $S_{\Omega(r, r_{mi})}$ можна розрахувати [12]:

$$S_{\Omega(r, r_{mi})} = r_{mi}^2 \arccos\left(\frac{(r^2 + r_{mi}^2 - R^2)}{2rr_{mi}}\right) + R^2 \arccos\left(\frac{(r^2 - r_{mi}^2 + R^2)}{2rR}\right) - \sqrt{(r \pm (r_{mi} - R))(R + r_{mi} \pm r)} \quad (7)$$

Якщо підставити (5) в (1) отримаємо:

$$k_{mS_{\Omega}}^* = 1 - \frac{1}{S_{\Omega}} \iint_{p \in \Omega} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{n_1+\dots+n_M=x} \prod_{i=1}^M \frac{\mu_i^{n_i}}{n_i!} e^{-\mu_i} d\Omega = 1 - \frac{2}{R^2} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{n_1+\dots+n_M=x} \frac{1}{\prod_{i=1}^M n_i!} \times \left(\int_0^R \left(\prod_{i=1}^M \mu_i^{n_i} e^{-\mu_i} \right) r dr \right).$$

З урахуванням (6) та визначивши, що :

$$k_{mS_{\Omega}}^* = 1 - \frac{2}{R^2} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{n_1+\dots+n_M=x} \frac{1}{\prod_{i=1}^M n_i!} \times \left(\sum_{k=0}^M \int_{R-r_{mi(M-k)}}^{R-r_{mi(M-k+1)}} \left(\prod_{i=1}^M \mu_i^{n_i} e^{-\mu_i} \right) r dr \right) \quad (8)$$

Остаточно отримуємо:

$$k_{mS_{\Omega}}^* = 1 - \frac{2}{R^2} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{n_1+\dots+n_M=x} \left(\frac{1}{\prod_{i=1}^M n_i!} \times \sum_{k=0}^M \left(\prod_{i=1}^{M-k} \left(\frac{\rho_i N r_{mi}^2}{R^2} \right)^{n_i} e^{-\left(\frac{\rho_i N r_{mi}^2}{R^2} \right)} \right) \times \right. \\ \left. \times \int_{R-r_{mi(M-k+1)}}^{R-r_{mi(M-k)}} r \left(\prod_{i=M-k+1}^M \left(\frac{\rho_i N S_{\Omega(r, r_{mi})}}{\pi R^2} \right)^{n_i} e^{-\left(\frac{\rho_i N S_{\Omega(r, r_{mi})}}{\pi R^2} \right)} dr \right) \right) \quad (9)$$

Для СР великого розміру, коли $R \gg \max(r_{mi}), i \in (1..M)$, можна не розглядати варіант розміщення точки p на Ω_2 (рис. 1), тоді вираз (9) можна спростити:

$$k_{mS_{\Omega}}^* = 1 - \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{n_1+\dots+n_M=x} \frac{1}{\prod_{i=1}^M n_i!} \times \sum_{k=0}^M \left(\prod_{i=1}^M \left(\frac{\rho_i N r_{mi}^2}{R^2} \right)^{n_i} e^{-\left(\frac{\rho_i N r_{mi}^2}{R^2} \right)} \right) \quad (10)$$

Якщо $k_{mS_{\Omega}}^* \geq k_{mS_{\Omega}}$, можна казати, що N вузлів відповідних типів забезпечують m -кратне перекриття району моніторингу Ω з радіусом R .

Визначення k_{nE}^* .

Для розробленої моделі $G = (V, E)$ при $|V| = N \rightarrow \infty$, $k_{nE}^* = P(G, n)$, де $P(G, n)$ – це ймовірність того, що граф G забезпечує n -кратну зв'язність вузлів. Для спрощення визначення $P_{G,n}$, представимо новий граф $G(r_n^{\min})$, в якого радіуси передачі вузлів дорівнюють мінімальному значенню $r_n^{\min} = \min\{r_{ni}\}, i \in [1..M]$. Тоді очевидно, що

$$P(G, n) \geq P[G(r_n^{\min}), n]. \quad (11)$$

Доказано, що при $N \rightarrow \infty$, при умові рівномірного розміщення вузлів згідно розробленої моделі та встановлення кожним вузлом зв'язків з найближчими сусідами буде виконуватись рівність [13]:

$$P[G(r_n^{\min}), n] = P[d_{\min}(G(r_n^{\min})) \geq n], \quad (12)$$

де $d_{\min}(G(r_n^{\min}))$ – мінімальна з кількості сусідів кожного вузла $G(r_n^{\min})$ (під сусідами розуміються вузли, що знаходяться в зоні, обмеженої r_n^{\min} і з якими встановлений зв'язок).

Користуючись визначенням $d_{\min}(G(r_n^{\min}))$:

$$P[d_{\min}(G(r_n^{\min})) \geq n] = \prod_{i=1}^N P(d_i \geq n) = \prod_{i=1}^N \left(1 - e^{-\varphi} \sum_{x=0}^{n-1} \frac{\varphi^x}{x!}\right), \quad (13)$$

де d_i – кількість сусідів вузла i , $\varphi = NS_{\Omega(p, r_n^{\min}) \cap \Omega} / S_{\Omega}$ в залежності від розміщення вузла

відповідно рис.1:

$$\varphi = \begin{cases} N(r_n^{\min})^2 / R^2, & 0 < r \leq R - r_n^{\min} \\ NS_{\Omega(r, r_n^{\min})} / \pi R^2, & R - r_n^{\min} < r \leq R \end{cases}, \quad (14)$$

Відповідно розробленої моделі розподіл вузлів по району Ω незалежний, тоді:

$$P[d_{\min}(G(r_n^{\min})) \geq n] = \left(1 - e^{-\varphi} \sum_{x=0}^{n-1} \frac{\varphi^x}{x!}\right)^N \quad (15)$$

Якщо (15) об'єднати з (14), (12) та (11), врахувавши, що $k_{nE}^* = P(G, n)$

отримаємо:

$$k_{nE}^* \geq \left(1 - \left(1 - \frac{r_n^{\min}}{R}\right)^2 e^{-\frac{N(r_n^{\min})^2}{R^2} \sum_{x=0}^{n-1} \frac{\left(\frac{N(r_n^{\min})^2}{R^2}\right)^x}{x!}} - \frac{2}{R^2} \int_{R-r_n^{\min}}^R r e^{-\frac{NS_{\Omega(r, r_n^{\min})}}{\pi R^2} \sum_{x=0}^{n-1} \frac{\left(\frac{NS_{\Omega(r, r_n^{\min})}}{\pi R^2}\right)^x}{x!}} dr\right)^N \quad (16)$$

Для СР великого розміру, коли $R \gg \max(r_{mi}), i \in [1..M]$, можна не розглядати варіант розміщення вузли, розташовані в районі Ω_2 (рис. 1), тоді вираз (16) можна спростити:

$$k_{nE}^* \geq \left(1 - e^{-\frac{N(r_n^{\min})^2}{R^2} \sum_{x=0}^{n-1} \left(\frac{N(r_n^{\min})^2}{R^2}\right)^x / x!}\right)^N \quad (17)$$

Якщо $k_{nE}^* \geq k_{nE}$, можна казати, що N вузлів забезпечують n -кратну зв'язність СР відповідно вихідним даним r_n^{\min} , R .

Опис методу

Отримані вище залежності (9-10,16-17) дозволили розробити складові нового розробленого методу, а саме: механізми виявлення надлишковості вузлів СР та алгоритми визначення кількості підмножин вузлів, що функціонують в різні періоди часу.

Суть розробленого методу було розглянуто вище. Розглянемо детально етапи розробленого методу.

Етапи методу. Розроблений метод енергозбереження включає в себе наступну послідовність дій:

1. Визначення необхідної кількості необхідної кількості множин вузлів СР та часових періодів їх функціонування.

2. Розбиття вузлів СР на визначену кількість підмножин та періодів функціонування.

3. Організація та забезпечення маршрутизації повідомлень в СР з урахуванням: періодів функціонування та використання енергетичних ресурсів вузлів; вимог зменшення та рівномірності навантаження на вузли, наближені до шлюзу; вимог з відновлення зв'язності мережі при виході з ладу окремих вузлів за допомогою відповідного розробленого алгоритму.

Розглянемо окремо етапи та відповідні окремі складові методу.

1. Етап визначення необхідної кількості множин вузлів СР та часових періодів їх функціонування.

Особливістю нового методу є підвищення енергозбереження СР при надлишковості вузлів $\xi_{не} \in [1,5..2), [2,5..3)$, $\xi_{не} = N / N_{mn}$ (N_{mn} – необхідна вузлів для виконання умов з забезпечення m -кратного перекриття зон моніторингу та n -кратної зв'язності). Для цього пропонується збільшити кількість підмножини вузлів та періодів їх функціонування. При цьому кожному вузлу буде відповідати декілька періодів включення та виключення. Так для $\xi_{не} \in [1,5..2)$ необхідно визначити кількість підмножин вузлів $N_m = 3$, кількість періодів $N_T = 3$, кількість періодів включення вузлів $N_{Твкл} = 2$ періоди. Для $\xi_{не} \in [2,5..3)$ $N_m = 5$, $N_T = 5$, $N_{Твкл} = 2$. За цих умов при рівномірному розподілі елементів підмножин та періодів їх функціонування в визначений період часу буде функціонувати $\geq N_{mn}$ вузлів, що забезпечить m -кратне перекриття зон моніторингу та n -кратну зв'язність.

Для визначення необхідної кількості підмножин вузлів N_m та періодів N_T пропонується використовувати наступний алгоритм.

Алгоритм визначення необхідної кількості множин вузлів СР та часових періодів їх функціонування:

1) початок, початкове значення надлишковості вузлів $\xi_{не} = 1$;

2) доки $(k_{mS_{\Omega}}^*(N / \xi_{не}) > k_{mS_{\Omega}})$ та $(k_{nE}^*(N / \xi_{не}) > k_{nE})$: $\xi_{не} = \xi_{не} + 1$,

де $k_{mS_{\Omega}}^*(N / \xi_{не})$ – розраховується за формулою (10), $k_{nE}^*(N / \xi_{не})$ – розраховується за формулою (17), $k_{mS_{\Omega}}$ та k_{nE} – вихідні дані;

3) якщо $((\xi_{не} = 1) \text{ або } (\xi_{не} = 2))$ та $(k_{mS_{\Omega}}^*(N / (\xi_{не} + 0,5)) > k_{mS_{\Omega}})$ та

$(k_{nE}^*(N / (\xi_{не} + 0,5)) > k_{nE})$: $\xi_{не} = \xi_{не} + 0,5$;

4) якщо $(\xi_{не} = 1)$: енергозбереження з використанням надлишковості неможливе, інакше якщо $(\xi_{не} = 1,5)$: $\{N_T = N_m = 3\}$, інакше якщо $(\xi_{не} = 2,5)$: $\{N_T = N_m = 5\}$, інакше: $N_T = N_m = \xi_{не}$, кінець.

2. Етап розбиття вузлів СР на визначену кількість підмножин та періодів функціонування.

Випадковий розподіл загальної кількості вузлів на підмножини в існуючих методах енергозбереження в СР з надлишковою кількістю вузлів може привести до неякісного m -кратного покриття району моніторингу та неефективного енергозберігання в окремих зонах району покриття [9,10]. Особливо це стосується вузлів, що знаходяться в безпосередній близькості від шлюзу. В розробленому методі енергозберігання пропонується алгоритм рівномірного розподілу вузлів на визначену кількість підмножин та періодів функціонування.

Передбачається, що кожен i -й вузол СР може здійснювати передачу з різним радіусом передачі $[r_1, r_2, \dots, r_i]$, де t_i – кількість можливих радіусів передачі i -го вузла, $r_i = r_{ni}$.

Для розбиття вузлів СР на N_m підмножин пропонується використовувати наступний розроблений *алгоритм*:

1) шлюз поступово збільшуючи радіус передачі (відповідно $[r_1, r_2, \dots, r_i]$) передає запит сусіднім вузлам і чекає відповіді доки не встановить зв'язок з $\geq N_m$ вузлами, при цьому запом'ятовує ідентифікатори вузлів, які були визначені на попередніх кроках;

2) шлюз формує список призначень номерів підмножин для призначення виявленим вузлам, при цьому N_m вузлам (або кратної N_m кількості вузлів, якщо кількість вузлів $> 2N_m$) відповідає по одному номеру з $\{0, 1, \dots, N_m\}$ (або рівна кількість номерів з N_m , якщо кількість вузлів $> 2N_m$), а залишку – випадкові номери з множини $\{0, 1, \dots, N_m\}$, що не повторюються;

3) шлюз призначає номери виявленим вузлам, випадково вибираючи ідентифікатори вузлів та елементи списку призначень, при цьому номери для вибраних на попередніх кроках радіусу передачі не повинні повторюватись;

4) кожний вузол, що отримав номер підмножини виконує дії, аналогічні п.1-3, але з урахуванням наявності вузлів з вже призначеними номерами, а саме: список призначень формується з відповідних множин $\{0, 1, \dots, N_m\}$ з виключенням номерів підмножин, що вже призначені виявленим сусіднім вузлам.

5) вузли, що виявили роботу мережі при початку функціонування алгоритму маршрутизації і не мають призначеного номера підмережі, виконують дії п.4 для призначення номера собі.

Так на рис. 1 відображено приклад роботи алгоритму розбиття вузлів на 3 підмножини. Спочатку шлюз призначає сусіднім вузлам номери, в тому числі вузлу 1 (радіуси передач показані довгими рисками). На наступному етапі вузол 1 призначає сусідам номери підмножин, в тому числі вузлу 2 (радіуси передач показані короткими рисками). Далі вузол 2 призначає номери сусідам, з урахуванням вже призначених номерів. Після закінчення визначеного періоду часу всім вузлам будуть призначені номери підмножин (рис. 2). Окремих вузлам в результаті роботи алгоритму можуть бути не призначені номери. Ці вузли самі встановлюють собі номер підмножини відповідно пункту 4 алгоритму при виявленні зв'язності з іншими вузлами.

Для зменшення часу розбиття на підмножини можна встановити мінімальний радіус передачі кожного вузла $r_i = \min\{r_{mi}\}, i \in [1..N]$, але при цьому в деякій мірі може погіршитися рівномірність розподілу вузлів на підмножини.

Відповідно кожній підмножині вузлів СР призначаються періоди функціонування. Періоди функціонування вузлів вибираються за умовою, що в будь-який момент часту з N_m вузлів різних підмножин буде функціонувати $N_{T_{вкл}}$ вузлів.

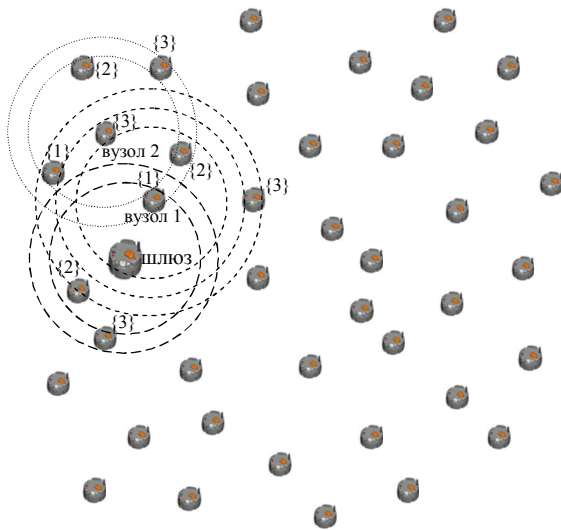


Рис. 1. Приклад розділення вузлів на підмножини

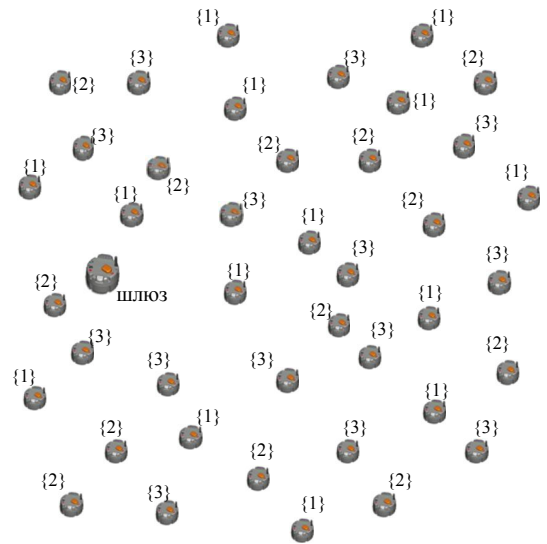


Рис. 2. Результат розділення вузлів SR на підмножини (приклад)

3. Етап організації та забезпечення маршрутизації повідомлень в SR з урахуванням: періодів функціонування та використання енергетичних ресурсів вузлів; вимог зменшення та рівномірності навантаження на вузли, наближені до шлюзу; вимог з відновлення зв'язності мережі при виході з ладу окремих вузлів.

На відміну від існуючих методів енергозбереження в SR з надлишковою кількістю вузлів новий метод та відповідний розроблений алгоритм організації та забезпечення маршрутизації на мережевому рівні використовує маршрути з меншим енергетичним навантаженням, забезпечує рівномірне навантаження наближених до шлюзу вузлів, забезпечує відновлення зв'язності мережі при виході з ладу окремих вузлів. Крім того при застосуванні методу використовуються мінімальні можливі радіуси передач вузлів.

Передбачається, що кожен вузол u при прийомі повідомлення, яке передавалось вузлом v з радіусом передачі r_{pv} може визначити радіус передачі r_{pu} , який забезпечить прийом зворотного повідомлення вузлом v . При цьому $r_{pu} = f(r_{pv}, E_{r_{pv}}^*)$, де $E_{r_{pv}}^*$ – визначений рівень сигналу при передачі вузлом v з радіусом r_{pv} , при чому $r_{pu} = 0$ якщо вузол v не може прийняти відповідь від вузла u (якщо $r_{pu} < r_{pv}$ та $r_{pu} < d_{uv}$, d_{uv} – відстань між вузлами) Кожний вузол визначає відсоток залишку ресурсу батареї живлення $\delta_{E_{ж}}$.

Для встановлення маршрутів вузли передають маршрутне повідомлення $\{N_{nm}, r_n, N_{рш}, R_{ш}^*, \delta_{E_{ж,мін}}\}$, де $\{N_{nm}\}$ – множина номерів підмножин вузла, r_n – радіус передачі вузла, $N_{рш}$ – кількість ретрансляцій до шлюзу, $R_{ш}$ – "квадратична відстань" до шлюзу, яка складається з суми квадратів визначених вузлами радіусів передач до шлюзу, $\delta_{E_{ж,мін}}$ – мінімальне значення залишку ресурсу батареї живлення. Кожний вузол входить до складу підмножини $\{N_{nm}\}$.

Алгоритм маршрутизації повідомлень складається з двох етапів: встановлення маршрутів та забезпечення маршрутизації повідомлень збору даних. **На етапі встановлення маршрутів** виконуються наступні дії:

1) шлюз на максимальному радіусі передачі $r_{пмакс}$ передає маршрутне повідомлення сусіднім вузлам $\{N_{nm}, r_{пмакс}, N_{рш} = 0, R_{ш}^* = 0, \delta_{E_{ж,мін}} = \infty\}$, де N_{nm} – будь-який номер (рис. 3);

2) всі вузли, що прийняли маршрутне повідомлення, зберігають його, визначають $r_{пу} = f(r_{пмакс}, E_{r_{пмакс}}^*)$ та якщо $r_{пу} > 0$ та до цього не було повідомлення з меншим $R_{ш}^*$ окремо для кожного значення N_{nm} передають далі повідомлення

$\{N_{nm}, r_{nmax}, N_{рш} = N_{рш} + 1, R_{ш}^* = R_{ш}^* + (r_{ш})^2, \min\{\delta_{E_{жс}^{мин}}, \delta_{E_{жс}}\}\}$, де $\delta_{E_{жс}}$ – відсоток залишку ресурсу батареї живлення $\delta_{E_{жс}}$ вузла (рис. 4);

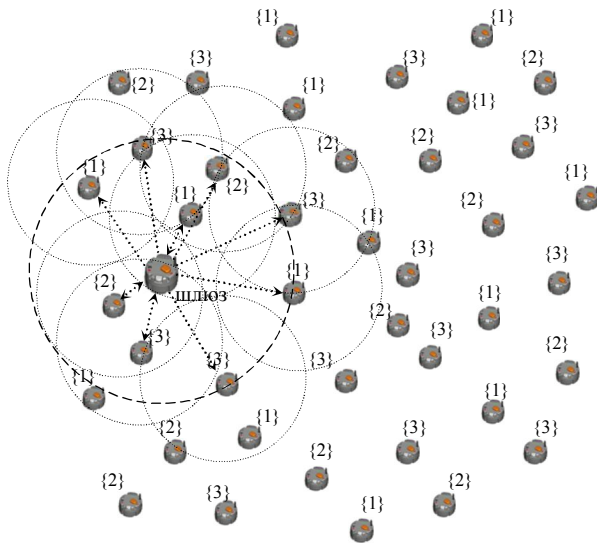


Рис. 3. Приклад передачі маршрутного повідомлення від шлюзу

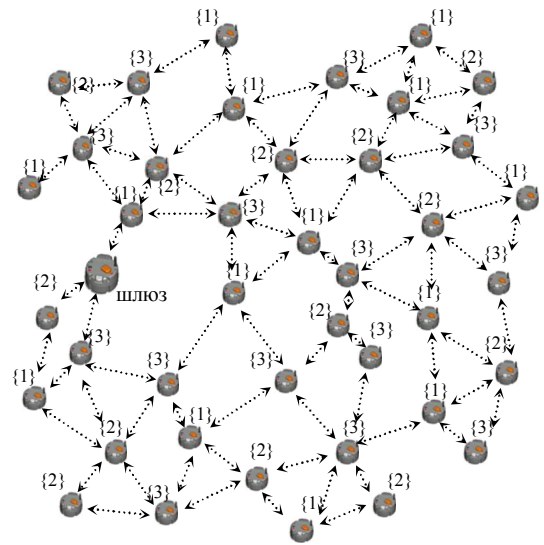


Рис. 4. Встановлення загальної зв'язності між вузлами (приклад)

3) першими встановлювати маршрути починають вузли, що знаходяться на межі району моніторингу і не отримають на протязі визначеного періоду часу відповіді на маршрутне повідомлення з $N_{рш} = N_{рш} + 1$ (рис. 5);

4) кожний вузол, що визначає маршрути, для кожного маршрутного повідомлення за номером $i \in [1..I]$, де I – кількість маршрутних повідомлень, розраховує комплексну маршрутну метрику P_i за формулою:

$$P_i = \alpha_{R_{ш}^*} \times \frac{R_{ш\min}^*}{R_{шi}^*} + \alpha_{E_{жс}} \times \delta_{E_{жс\min}} + \alpha_{N_{рш}} \times \frac{N_{рш\min}}{N_{рш}} + \alpha_{N_{nm}} \times \frac{k_{N_{nm}}}{(N_{рш})^2}, \quad (18)$$

де $\alpha_{R_{ш}^*}, \alpha_{E_{жс}}, \alpha_{N_{рш}}, \alpha_{N_{nm}}$ – вагові коефіцієнти, $0 \leq \alpha_{R_{ш}^*} \leq 1, 0 \leq \alpha_{E_{жс}} \leq 1, 0 \leq \alpha_{N_{рш}} \leq 1,$

$0 \leq \alpha_{N_{nm}} \leq 1, k_{N_{nm}} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } N_{nm} = N_{nmi}, \\ 0, & \text{якщо } N_{nm} \neq N_{nmi}. \end{cases}$

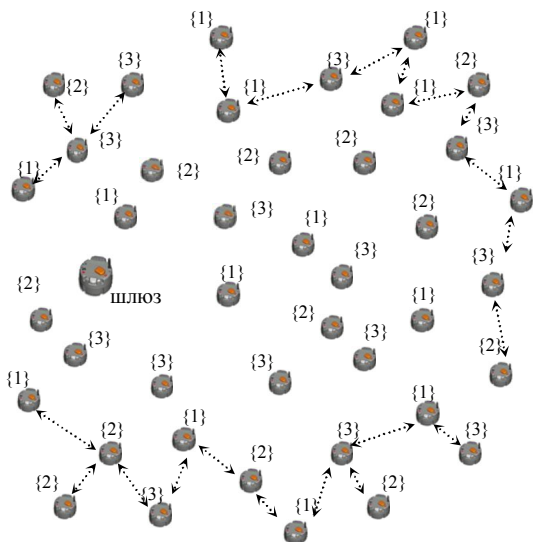


Рис. 5. Приклад призначення маршрутів між вузлами СР

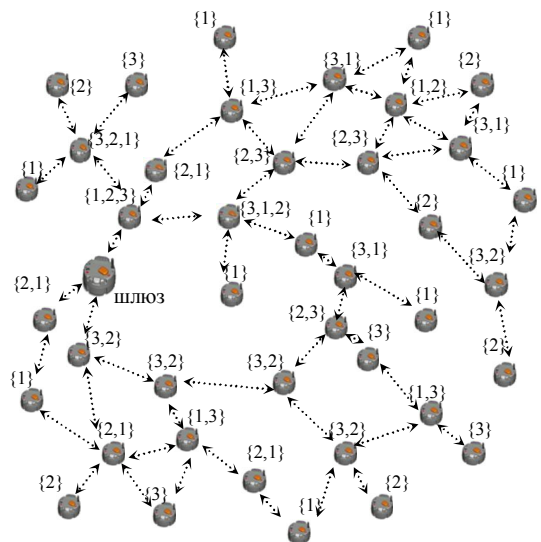


Рис. 6. Результат призначення маршрутів в СР (приклад)

Співвідношення між ваговими коефіцієнтами $\alpha_{R_{ui}^*}, \alpha_{E_{жк}}, \alpha_{N_{рш}}, \alpha_{N_{лм}}$ визначаються в залежності від енергетичної моделі вузла [14], яка в свою чергу залежить від фізичної реалізації вузлів СР. Ваговий коефіцієнт $\alpha_{N_{лм}}$ визначає доцільність включення в маршрут передачі вузла з іншої підмножини в залежності від наближення до шлюзу.

Відповідно отриманих значень P_i для передачі даних обирається маршрут, в якого $P_i = \max\{P_i\}, i \in [1..I]$. Якщо обирається маршрут через вузол, в якого $N_{лмі} \neq N_{лм}$, відповідний вузол за запитом включається в склад множини $\{N_{лм}\} = \{N_{лмі} \cup N_{лм}\}$ і буде функціонувати в періоди що відповідають включеним номерам підмножин. Якщо вузол функціонує в декілька періодів функціонування СР, вибирається маршрут для кожного періоду. Передача в напрямку шлюзу здійснюється з радіусом передачі, що визначений в маршрутному повідомленні.

На етапі забезпечення маршрутизації повідомлень збору даних здійснюється збір даних вузлами СР та передача їх шлюзу за обраними маршрутами відповідно періодів функціонування, при цьому з визначеною періодичністю виконуються наступні дії:

1) при передачі квитанцій про отримання даних шлюз ініціює оновлення значень залишку ресурсу батареї живлення $\delta_{E_{жк-мін}}$ для маршрутів;

2) кожний вузол передає $\min\{\delta_{E_{жк-мін}}, \delta_{E_{жк}}\}$, оновлює значення $\delta_{E_{жк-мін}}$ в маршрутних повідомленнях, перераховує P_i за формулою (18) та коректує обрані маршрути.

Якщо вузол не отримує квитанції про підтвердження передачі даних, він обирає наступний маршрут з максимальним значенням P_i . Приклад реконфігурування мережі при виході з ладу вузла (вузол 1) приведений на рис 7,8.

В процесі функціонування СР шлюз може управляти енергозбереженням шляхом коректування значень $\alpha_{R_{ui}^*}, \alpha_{E_{жк}}, \alpha_{N_{рш}}, \alpha_{N_{лм}}$ для всієї мережі, або для визначеної групи вузлів. Ці алгоритми управління енергозбереженням залежать від фізичної реалізації вузлів СР.

Оцінка ефективності розробленого методу.

Розробка імітаційної моделі СР, що реалізує розроблений метод

Для оцінки ефективності пропонується використовувати імітаційну модель СР і реалізувати розроблений метод на основі цієї моделі. В якості показників ефективності пропонується застосувати час життя мережі [2] та реальний відсоток m -кратного покриття. Для імітаційного моделювання пропонується використовувати програмний комплекс The Network Simulator [15]. Функціонування моделі СР залежить від багатьох параметрів: m -кратності покриття, n -зв'язності вузлів, просторових розмірів СР, радіусів моніторингу та передачі вузлів, часових характеристик, енергетичних моделей вузлів, вагових коефіцієнтів (18), а також задіяних протоколів фізичного та каналного рівня тощо. При застосуванні спрощеної моделі СР та методів, стандартних протоколів каналного та фізичного рівня (802.11), при $m = n = 2$, надлишковості $\xi_{не} > 2$ отримано результати, які дозволяють зробити висновок, що розроблений метод дозволяє підвищити час життя мережі до 15% при покращенні покриття району моніторингу до 10% площі відносно існуючих методів даного класу [9,10]. Крім того, розроблений метод, на відміну від існуючих даного класу, збільшує час життя мережі при надлишковості вузлів $\xi_{не} \in [1,5..2)$ до 25%.

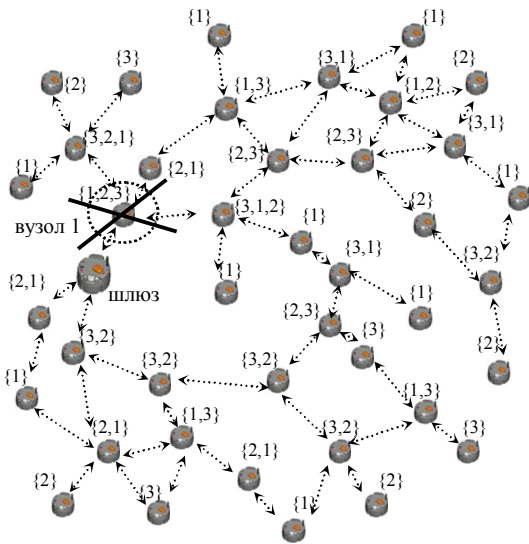


Рис. 7. Приклад виходу з ладу окремого вузла

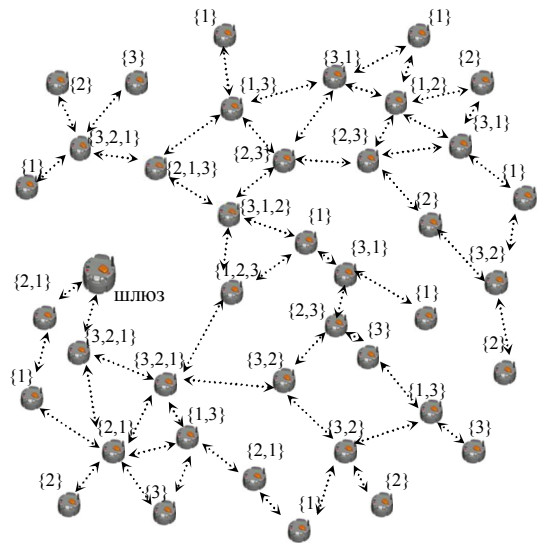


Рис. 8. Прилад реконфігурування мережі

Висновки

Розроблений новий метод енергозбереження в сенсорних радіомережах спеціального призначення з надлишковою кількістю вузлів, який розділяє загальну кількість на необхідну кількість підмножин вузлів, що працюють в різні періоди час, і організує їх функціонування для забезпечення зберігання енергетичних ресурсів вузлів та максимізації «часу життя» сенсорної радіомережі при забезпеченні заданих показників перекриття зон моніторингу та зв'язності вузлів. При розробці методу були отримані:

залежності якості покриття району моніторингу та зв'язності вузлів від їх кількості;

алгоритм визначення кількості підмножин вузлів та періодів їх функціонування;

алгоритм розбиття загальної кількості вузлів СР на підмножини та періоди функціонування;

алгоритм маршрутизації з урахуванням: періодів функціонування та використання енергетичних ресурсів вузлів; вимог зменшення та рівномірності навантаження на вузли, наближені до шлюзу; вимог з відновлення зв'язності мережі при виході з ладу окремих вузлів.

Розроблений метод енергозбереження сенсорної радіомережі спеціального призначення з надлишковою кількістю різномірних вузлів при забезпеченні заданого перекриття зон моніторингу та задану зв'язність окремих вузлів дозволяє підвищити час функціонування СР до 25% при покращенні якості покриття району моніторингу до 10% відносно існуючих методів даного класу.

Для більш точного та повного аналізу розробленого методу, а також для визначення шляхів підвищення енергозбереження СР при різних умовах функціонування пропонується розробити детальну імітаційну модель з використанням програмного комплексу Network Simulator [14].

Напрямки подальших досліджень. При розробці методу було виявлено, що при збільшенні обсягів СР (кількості вузлів), частоти та обсягу збору інформації вузлами СР значно збільшується трафік через вузли, що наближені до шлюзу. При цьому збільшується частота колізій при випадковому доступі до радіоресурсу, що призводить до зниження пропускної спроможності в напрямку шлюзу, підвищеного енергоспоживання вузлами та зменшення часу функціонування СР. Тому постає актуальною задача розробки методів енергозбереження сенсорних радіомереж спеціального призначення на каналному рівні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Міночкін А.І, Романюк В.А., Жук О.В. Перспективи розвитку тактичних сенсорних мереж// Збірник наукових праць № 4. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2007. – С. 112 – 119.

2. Коваленко І.Г., Романюк В.А., Діянчук І.М. Аналіз методів енергозбереження в сенсорних радіомережах // Збірник наукових праць № 1. – К.:ВІТІ НТУУ «КПІ». – 2011. – С. 76-84.
3. Mulligan R. Coverage in Wireless Sensor Networks: A Survey// Network Protocols and Algorithms, vol. 2, no. 2, pp. 27 – 53.
4. Gupta H., Das S.R., Gu Q.Y, Connected sensor cover: Self-organization of sensor networks for efficient query execution // IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 14, no. 1, pp. 55–67, Feb. 2006.
5. Zhou Z., Das S., Gupta H. Connected k-coverage problem in sensor networks, in Proc. ICCCN, 2004, pp. 373–378.
6. Zhang H.H., J.C. Hou. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks, Int. J. Wireless Ad Hoc Sensor Netw., vol.1, no. 1/2, pp. 89–124, 2005.
7. Wang X.R., Xing G.L., Zhang Y.F., Lu C.Y., Pless R., Gill C. Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks, in Proc. 1st Int. Conf. Embedded Netw. SENSYS, 2003, pp. 28–39.
8. Liu C., Wu K., Xiao Y., Sun B. Random coverage with guaranteed connectivity: Joint scheduling for wireless sensor networks // IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst., vol. 17, no. 6, pp. 562–574, Jun. 2006.
9. Jin Y., Wang L., Jo J., Kim Y., Yang M., Jiang Y. EECCR: An Energy-Efficient m-Coverage and n-Connectivity Routing Algorithm Under Border Effects in Heterogeneous Sensor Networks, IEEE Transactions on Vehicular Technology, March 2009, vol. 58, no. 3.
10. Dong Y., Chang H. An Energy Conserving Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks // International Journal of Future Generation Communication and Networking, Vol. 4, No. 1, March 2011, pp. 39 – 53.
11. Gautam G.C., Sharma T.P. A Comparative Study of Time Synchronization Protocols in Wireless Sensor Networks International Journal of Applied Engineering Research, Dindigul, Vol. 1, No 4, 2011.
12. <http://mathworld.wolfram.com/Circle-CircleIntersection.html>.
13. Penrose M.D. On k-connectivity for a geometric random graph, Random Struct. Algorithms, vol. 15, no. 2, pp. 145 – 164, Sep. 1999.
14. Wang Q., Hempstead M. Yang W. A realistic power consumption model for wireless sensor network devices, Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2006.
15. VINT Project, The Network Simulator – ns2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.