

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТАЕВРИСТИЧНОЇ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЕКТУ РОЗГОРТАННЯ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Представлено шляхи удосконалення метаевристичної кластеризації при реалізації проекту розгортання бездротових сенсорних мереж. Запропоновано при ініціалізації алгоритмів попередньо застосовувати метод k-середніх, а при побудові фітнес-функції враховувати міжкластерну відстань. Показана ефективність запропонованого підходу в протоколах маршрутизації. Рис. 8., табл. 3., дж. 17.

Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, кластеризація, метаевристичні алгоритми, протоколи маршрутизації.

JEL C63

Постановка проблеми в загальному вигляді. Однією із складових частин сучасних розподілених інформаційних систем є бездротові сенсорні мережі (БСМ), які особливо актуальні коли є необхідність збору інформації протягом тривалого часу без безпосередньої участі людини в важкодоступних місцях, при аналізі технологічних процесів небезпечних виробництв та ін. Завдяки впровадженню БСМ ставати можливим досліджувати явища або процеси шляхом отримання інформації різної природи та складності. Найбільш важливими застосуваннями БСМ є військові завдання, транспорт, сільське господарство, навколишнє середовище, охорона здоров'я та ін. [1, 2].

Аналіз останніх досліджень та невирішені частини проблеми. Для реалізації проекту розгортання БСМ потрібно враховувати наступне: по-перше через те, що БСМ можуть розгортатися у віддалених і важкодоступних середовищах, до реалізації програмного забезпечення і комунікаційних протоколів висуваються жорсткі вимоги: вони повинні забезпечувати максимальний час функціонування вузлів, відмовостійкість та автоматичне конфігурування мережі; по-друге, сенсорні вузли мають обмежену обчислювальну потужність – канали передачі даних, що використовуються в бездротових сенсорних мережах, накладають жорсткі обмеження по пропускну здатності, а також дальності і стабільності зв'язку [3].

Проведений аналіз споживаної потужності (рис. 1) у різних режимах роботи БСМ показав, що найбільш енерговитратними є операції збору даних (прийому та передачі) та простою. Операція обчислення вносить вагомий внесок у разі необхідності здійснення обчислень безпосередньо у вузлах мережі та залежить від типу інформації, яка обробляється. У даній статті увага зосереджена на розробці ефективних моделей і алгоритмів збору даних для бездротової сенсорної мережі з метою скорочення часу збору даних з її сенсорних вузлів та зменшення їх енергоспоживання і підвищення часу експлуатації до заміни джерел живлення є актуальним науково-практичним завданням.

Сьогодні існує кілька шляхів вирішення цього завдання, одним з яких є розробка енергоефективних комунікаційних протоколів.

Протоколи БСМ значно відрізняються від традиційних. Це пояснюється низкою особливостей, серед яких можна відзначити такі: будь-яке застосування сенсорних мереж вимагає потоку даних, отриманих від декількох джерел; сенсорні вузли в бездротових мережах можуть переміщатися, що призводить до непередбачуваних і частим топологічним змінам. Ці особливості обумовили при

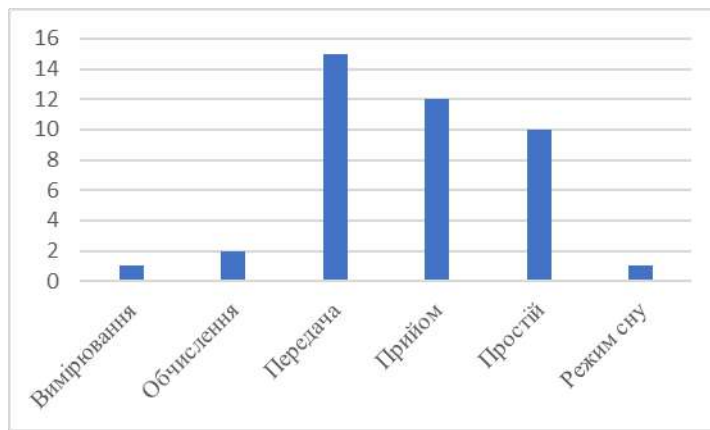


Рис. 1. Споживана потужність режимів роботи БСМ (мВт)

реалізації енергоефективних комунікаційних протоколів застосування кластерної топології, при якій вся мережа може розбиватися на сегменти. Існуючі протоколи маршрутизації на основі кластеризації складаються з двох етапів, які передбачають: вибір головного вузла кластера СН (Cluster Head), формування кластера, агрегування даних і передача даних. До таких протоколів можна віднести такі як LEACH (Low Energy Adaptive Cluster. Hierar-chy), SEP (Stable Election Protocol), HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed pro-tocol), IHCR (Intelligent Hierarchical Cluster-based Routing), ERP (Evolutionary Based Routing Protocol) та інші [4-7].

Мета статті. Дослідити ефективність метаевристичної кластеризації в проектах розгортання бездротових сенсорних мереж

Виклад основного матеріалу. Проведений аналіз довів, що підвищення енергоефективності існуючих протоколів може відбуватися за рахунок удосконалення алгоритмів кластеризації. Кластеризацію можна розглядати як задачу оптимального розбиття об'єктів на групи. З формальної точки зору алгоритм кластеризації можна визначити наступним чином:

Нехай X – множина об'єктів, а Y – множина міток кластерів. Тоді алгоритмом кластеризації є функція $\alpha: X \rightarrow Y$, яка будь-якому об'єкту з множини X ставить у відповідність мітку (номер) кластера з множини Y .

Кластеризація, як правило, включає в себе наступні етапи: виділення інформативних характеристик, визначення метрики, розбиття на групи, відображення результатів [8-11]. Сьогодні відома низка алгоритмів кластеризації: ієрархічні алгоритми, алгоритм k-середніх, алгоритми нечіткої кластеризації, нейромережеві алгоритми, метаевристичні алгоритми. Останні найбільш часто використовуються для кластеризації БСМ завдяки тому, що вони надають близьке до оптимального рішення, вимагаючи невеликі ресурси (час та обчислювальну складність). Практично усі сучасні метаевристичні алгоритми імітують найкращі риси природи, особливо біологічні системи, які еволюціонують на основі природного відбору на протязі багатьох років. Такі алгоритми розробляються з урахуванням двох важливих характеристик: інтенсифікації (пошук найкращого рішення) та диверсифікації (ефективна робота у пошуковому просторі). У статті обговорені наступні метаевристичні алгоритми:

– генетичні алгоритми. Особливістю генетичного алгоритму є операторі «схрещення», що передбачають рекомбінацію рішень-кандидатів, їх мутацію та відбір по аналогії з живою природою [12, 15];

– мурашиний алгоритм. Суть підходу полягає в аналізі та використанні моделі поведінки мурах, що шукають шляхи від колонії до джерела живлення і являє собою метаевристичну оптимізацію [13];

– та біогеографія [14]. Алгоритм заснований на теорії острівної біогеографії – наукової дисципліни на стику біології та географії, що вивчає закономірності географічного розподілу флори, фауни і мікроорганізмів в біосфері. У статті описується обчислювальна модель біогеографії. Наводиться постановка задачі цілочисельної глобальної умовної оптимізації в термінах і позначеннях моделі біогеографії: кожен острів представляє одне рішення, значення цільової функції є індекс придатності острова-рішення, гарне рішення ототожнюється з островом, що мають високий індекс придатності, а погане – навпаки, з островом з низьким значенням цього індексу.

Незважаючи на те, що зовні метаевристичні алгоритми сильно відрізняються один від одного, але всі вони можуть бути описані схожим правилом – на кожному кроці алгоритм обчислює чергове рішення x_{t+1} згідно правилу [5]:

$$x_{t+1} = A(x_t, p(t)),$$

де A - деяке відображення, x_t - рішення на кроці t , а $p(t)$ - параметри, що залежать від конкретного алгоритму, які також можуть залежати від номера кроку t . Також в параметри $p(t)$ в тому чи іншому вигляді може входити інформація про рішення, отриманих на попередніх кроках [1, t-1].

Аналіз існуючих алгоритмів довів, що основними їх недоліками є наступні:

– випадковість ініціалізації початкової популяції, що як правило, не враховує початкову топологію вузлів датчиків. Від вибору початкової популяції залежить швидкість збіжності алгоритму, тому випадкова ініціалізація неефективна;

– залежність роботи алгоритмів від раціонального вибору фітнес-функції.

Для усунення першого недоліку запропоновано комбінований метод, що поєднує переваги метаевристичних алгоритмів, що виконуються за загальноприйнятою схемою, і метод k -середніх. Для усунення другого досліджено та обґрунтовано вибір фітнес-функції.

Симуляція бездротової сенсорної мережі. Для перевірки запропонованих алгоритмів використано модель бездротової сенсорної мережі в наступній симуляції:

– датчики випадковим чином розгорнуті по всій зоні;

– вузли датчиків неоднорідні за початковою енергією. БСМ містить вузли трьох типів: з нормальною енергією (Normal Node), з підвищеною енергією – розширені вузли (Advanced Node) та “померлі” вузли, тобто вузли з вичерпаною енергією (Sink);

– енергоспоживання датчика під час передачі даних залежить від відстані між відправником і отримувачем, а також від розміру даних;

– як розрахунок відстані використовується Евклидова метрика;

– вузли передають інформацію базової станції через відповідні головні вузли кластерів;

– співвідношення числа сенсорів з більшою енергією до загального числа сенсорів задається коефіцієнтом гетерогеності M ;

– вузли стаціонарні.

Для дослідження протоколів маршрутизації в БСМ використано 2D модель (рис. 2). Вузли мережі випадковим чином розміщуються на сенсорному полі

розміром 100 на 100 метрів. Базова станція (BS) – шлюз знаходиться у центрі поля (табл. 1).

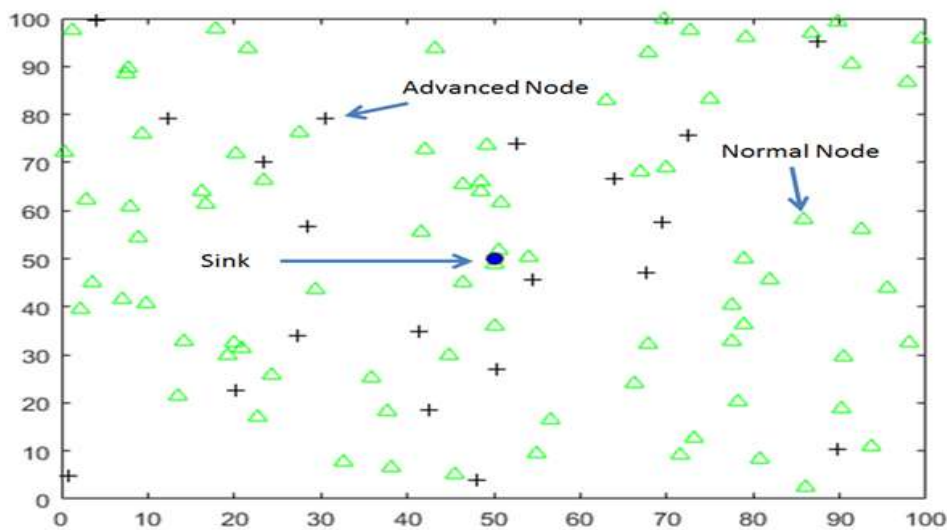


Рис. 2. Елементи БСМ

Таблиця 1

Параметри симуляції мережі

Параметри	Позначення	Значення
Розмір мережі	M x M	100 x 100 m ²
Координати базової станції	BS	(50, 50)
Кількість вузлів (датчиків)	n	100
Початкова енергія вузлів	E ₀	0.5 J
Коефіцієнт гетерогеності	m ₀	0.1
Енергія при передачі біт-біт	E _{elec}	50 nJ/bit
підсилювач потужності при d _{BS} ≤ d ₀	ε _{fs}	10pJ/bit/ m ²
підсилювач потужності при d _{BS} > d ₀	ε _{mp}	0.0013pJ/bit/ m ⁴
Розмір пакета даних		4000 bits

У роботі використано просту модель радіопередачі [5]. Необхідна енергія (E_{tx}) для передачі даних передатчиком розраховується згідно виразу:

$$E_{tx}(1,d)=E_{elec} * l + \epsilon_{fc} * l * d^2, \quad d \leq d_0$$

$$E_{tx}(1,d)=E_{elec} * l + \epsilon_{fc} * l * d^4, \quad d > d_0,$$

де l – довжина даних, які передаються;

E_{elec} – енергія, яка споживається передатчиком;

d – відстань між передаючим та приймаючим вузлами.

d_0 обчислюється як:

$$d_0 = (\varepsilon_{fc} / \varepsilon_{mp})$$

де ε_{fc} и ε_{mp} – коефіцієнти підсилювача потужності при $d_{BS} \leq d_0$ и $d_{BS} > d_0$ відповідно.

Необхідна енергія для прийому даних передатчиком визначається згідно виразу:

$$E_{rx}(1, d) = E_{elec} * l,$$

де l – довжина даних;

E_{elec} – енергія, яка споживається при прийомі.

Таким чином, для зниження електроспоживання мережі потрібно мінімізувати відстані між вузлами, які беруть участь в комунікації.

Для оцінки алгоритмів кластеризації був розроблений симулятор роботи бездротової сенсорної мережі з використанням мови програмування C++.

Параметри симуляції мережі наведені у таблиці 1.

Програма реалізує концепцію об'єктно-орієнтованого програмування, що дозволяє забезпечити необхідний рівень абстракції для конфігурації принципу роботи мережі та її структури.

При симуляції автоматизовані процеси генерування випадкових даних, визначаються координати розташування вузлів і енергетичні параметри.

Ефективність запропонованих рішень оцінювалась шляхом застосування розроблених алгоритмів кластеризації з використанням метаевристичних технік у енергоефективних комунікаційних протоколах.

Для оцінки якості комунікаційних протоколів використані наступні метрики:

– тривалість життя мережі (Network Lifetime) – визначається як кількість раундів, коли всі вузли вичерпують свою енергію і “вмирають”;

– період стійкості (Stability Period) – визначає інтервал часу від початку роботи мережі (перший раунд) до того поки перший вузол не вичерпає енергії;

– залишкова енергія (Residual Energy) – залишкова енергія мережі в кожному раунді, яка розраховується шляхом віднімання енергії, споживаної вузлами, від загальної енергії за раунд.

– кількість живих вузлів за раунд (Number of alive nodes per round). Це відноситься до ряду розширених вузлів або нормальних вузлів, чиї залишкові енергетичні значення перевищують нуль.

– пропускну спроможність (Throughput): це кількість пакетів, отриманих з вузлів кластера з головного вузла (CHs).

Розроблений протокол маршрутизації на основі метаевристичної кластеризації традиційно складаються з двох етапів: ініціалізації та прийому та передачі. На етапі ініціалізації вузли сенсорів розбиваються на кластери згідно з протоколом LEACH та відбувається вибір головного вузла кластера CH (Cluster Head), тобто проходить узагальнення даних. При дослідженні авторами для кластеризації застосовані метаевристичні алгоритми. На другому етапі відбувається передача даних між сенсорами та головним вузлом їх кластера даних з урахуванням розкладу TDMA, та передача від CH на базову станцію (BS).

Авторами досліджено доцільність такого підходу при побудові протоколів маршрутизації БСМ з використанням кластеризації, що основана на генетичному алгоритмі [17], моделі біогеографії [16] та методу рою частинок.

Удосконалення метаевристичної кластеризації. Розглянемо особливості удосконалення метаевристичної кластеризації на прикладі комбінування ройового алгоритму оптимізації методу рою частинок – PSO (Particle Swarm Optimization) з методів k-середніх (KPSO)

У методі рою частинок (Particle Swarm Optimization) агентами є частинки, які в кожен момент часу мають в просторі параметрів задачі деякий стан і швидкість. Правила, за якими частка змінює своє положення і швидкість, визначаються на основі обчислення цільової функції частинки. Канонічний метод рою частинок був запропонований в 1995 р в роботі J. Kennedy, R. Eberhart [7], в основі якого лежить наступний принцип: на кожній ітерації для визначення наступного положення частинки враховується інформація про найкращу частку від «сусідів» і інформація про дану частинку на тому етапі, коли цієї частинки відповідало оптимальне значення цільової функції (ζ) [11].

У канонічному методі рою частинок [9], що використовує метричне шкалювання, нова позиція частинки і визначається за такою формулою:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1),$$

де $v_i(t+1)$ – швидкість переміщення частинки і з позиції $x_i(t)$ в позицію $x_i(t+1)$.

Початковий стан визначається як: $x_i(0)$, $v_i(0)$. Наведена формула представлена в векторній формі. Кращі частки з точки зору цільової функції оголошуються «центром тяжіння». Вектори швидкостей всіх частинок спрямовуються до цих центрів.

Розглянемо представлення частинок, ініціалізація і функціональність населення в запропонованому алгоритмі KPSO для кластеризації БСМ.

У алгоритмі PSO частинка (розв'язок) представляє собою набір СНs, нормальних вузлів і мертвих вузлів. СН кодується як 1, не-СН-вузол як 0, а мертвий вузол як -1.

Алгоритм ініціалізації населення наведено нижче на рис. 3.

```

Population_initialization()
  for each particle i in a swarm
    for each node j in a particle i
      if node(j).energy < 0
        particle(i, j) = -1
      else
        if node(j).energy > 0
          k = round((Alive nodes * 0.2)); 20% of alive nodes
          if k > 0
            ids = apply K-means with sensor nodes
    and k
      particle(i, j) = 1 if j ∈ ids
      particle(i, j) = 0 if otherwise
    end
  end
end

```

Рис. 3. Ініціалізації населення в KPSO

Аналіз евристичних та метаевристичних алгоритмів для кластеризації показав їх залежність від вибору фітнес функції, яка пов'язана з якістю кластеризації. Тому враховувалось наступне. Вибір показника якості кластеризації, що відображає відповідність результатів кластеризації, є однією з важливих проблем, важливих для успіху кластеризації. Компактність і роздільність є двома важливими параметрами при оцінці результатів кластеризації. Компактність – елементи кластера повинні бути якомога ближче один до одного, можна виразити через відстані між елементами кластера, щільністю в середині кластера або ж обсягом, займаним кластером в багатовимірному просторі. Роздільність – відстань між різними кластерами повинна бути якомога більше. Відстань між кластерами зазвичай вимірюється одним з трьох наступних способів: 1) як відстань між найближчими елементами кластерів, 2) як відстань між найбільш віддаленими один від одного елементами кластерів і 3) як відстань між центрами кластерів.

У роботі у якості фітнес-функції запропоновано як показники компактності так і роздільності.

У запропонованому алгоритмі KPSO, фітнес - функція f визначена наступним чином:

$$f = \text{minimize}(\text{distance within a cluster} / (\text{distance within clusters})),$$

$$((\text{distance within a cluster}) = \sum_{i=1}^{CH_k} \sum_{S_j \in C_i} d(S_j, CH_i)$$

$$(\text{distance within clusters}) = \sum_{C_i, C_j, C_i \neq C_j} d(CH_i, CH_j),$$

де CH_j, CH_i – головні вузли j -го та i -го кластерів; C_i – головний вузол i -го кластера; $d(S_j, CH_i)$ – мінімальна відстань між сенсором S_j та головним вузлом CH_i

Одержана кластерна структура БСМ приведена на рис. 4.

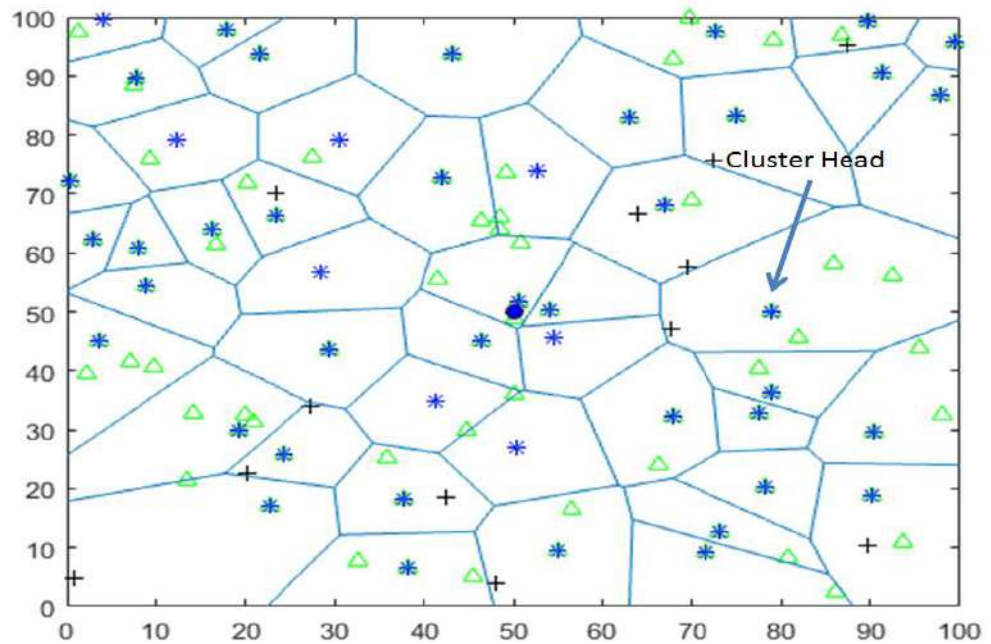


Рис. 4. Одержана кластерна структура БСМ

Для дослідження запропонованого алгоритму кластеризації розроблено на його основі протокол маршрутизації KPSO. Його ефективність порівнювалася з відомими алгоритмами маршрутизації, які враховують кластерну структуру мережі, такими як SEP, IHCR і ERP.

При дослідженні обчислювались вище перераховані метрики.

Тривалість життя мережі (Network Lifetime). Тривалість життя мережі досліджена шляхом фіксування кількості вузлів, які вижили в кожному раунді. У кожному з сценаріїв KPSO показує кращу продуктивність, ніж інші протоколи SEP, IHCR, ERP. У табл. 2, 3 наведені результати досліджень тривалості життя при коефіцієнті гетерогенності $M=0,1$ та $M=0,2$ відповідно.

Таблиця 2

Тривалість життя БСМ ($M=0,1$)

% померлих вузлів	SEP	IHCR	ERP	KPSO
10	1153	1047	1205	7567
20	1204	1099	1256	7761
30	1232	1159	1295	8173
40	1278	1255	1364	8358
50	1300	1303	1390	8613
60	1328	1372	1432	8764
70	1370	1459	1535	9080
80	1445	1940	1683	9414
90	1494	1956	2445	9855
100	1563	3220	3317	18361

Таблиця 3

Тривалість життя БСМ ($M=0,2$)

% померлих вузлів	SEP	IHCR	ERP	KPSO
10	1185	1050	1190	7283
20	1219	1146	1258	7745
30	1250	1208	1312	7998
40	1284	1276	1364	8352
50	1323	1353	1408	8587
60	1368	1430	1480	8863
70	1424	1569	1572	9270
80	1529	1928	1887	9747
90	1791	2529	2747	15404
100	2236	3536	3673	20546

З табл. 2 можна спостерігати, що в SEP, IHCR, ERP вузли гинуть набагато раніше, ніж KPSO. Так у запропонованому алгоритмі KPSO 10% вузлів вмирають у 7567-му раунді, а в протоколах SEP, IHCR, ERP вузли гинуть на 1153-му, 1047-

му і 1205-му раундах відповідно. Всі вузли БСМ гинуть в ERP на 3317-му раунді, забезпечуючи кращу продуктивність, ніж SEP і IHCR, тоді як в KPSO цей процес значно затримується. У KPSO всі вузли гинуть на 18361 раунді.

Аналогічно, при коефіцієнті гетерогенності $M = 0,2$ продуктивність KPSO значно краща, ніж ERP. Всі вузли гинуть лише у 20456-му раунді в KPSO (таб. 3).

Залишкова енергія. Проведено дослідження ефективності алгоритму KPSO щодо залишкової енергії (Total Residual Energy) мережі в кожному раунді (Number of Rounds), яка розраховується шляхом віднімання енергії, споживаної вузлами, від загальної енергії за раунд. На рис. 5, 6 наведені результати досліджень кількості залишкової енергії при коефіцієнтах гетерогенності $M=0,1$ та $M=0,2$ відповідно. Слід зауважити, що менша крутість кривої обумовлена рівномірністю розподілу енергетичного навантаження та поступовою втратою енергії. Дослідження показали, що на 1200-му раунді залишкова енергія КПСО становить 13,4 джоуля, тоді як в інших протоколах вона становить не перевищує 6,5.

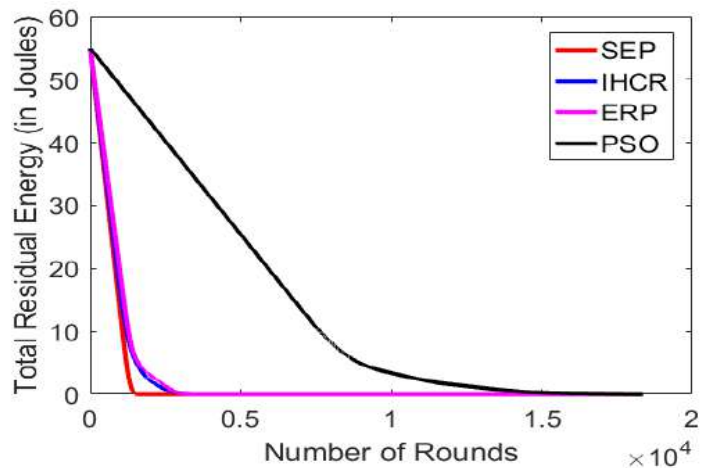


Рис. 5. Залишкова енергія. $M=0,1$

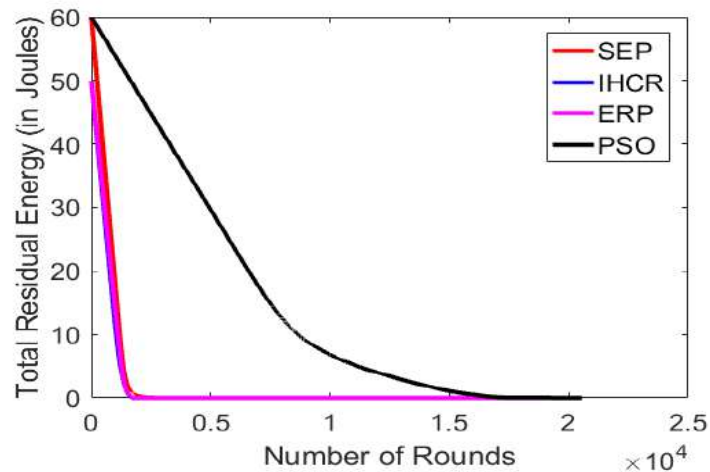


Рис. 6. Залишкова енергія. $M=0,2$

Пропускна спроможність (Throughput). Проведено дослідження кількості пакетів даних, що приймаються базовою станцією від вузлів головних вузлів СН на кожен раунд при коефіцієнтах гетерогенності $M=0,1$ та $M=0,2$ доки всі вузли не помруть (рис. 7, 8). Аналіз одержаних залежностей показав, що у порівнянні з SEP, IHCR та ERP, KPSO працює краще в управлінні пропускнуною спроможністю.

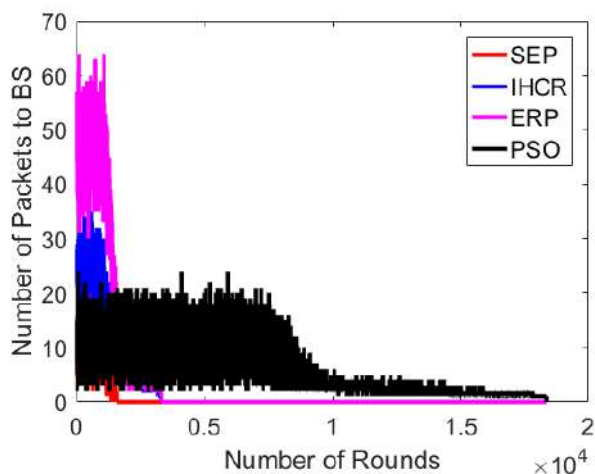


Рис. 7. Пропускна спроможність. $M=0,1$

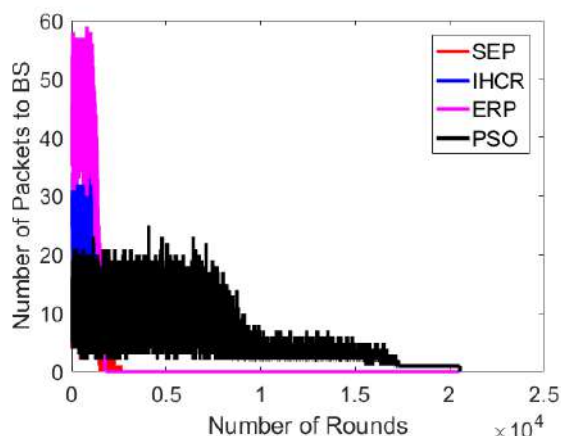


Рис. 8. Пропускна спроможність. $M=0,2$

Висновки і перспективи подальших досліджень у даному напрямку. Кластеризація є ефективним засобом для збереження енергії та продовження терміну служби бездротових сенсорних мереж. Незважаючи на те, що існує велика кількість алгоритмів кластеризації на основі різноманітних методів, таких як евристичні, мета-евристичні, детерміністичні та інші методи, не в повній мірі вирішена задача зменшення енергоспоживання бездротових сенсорних мереж і підвищення часу експлуатації до заміни джерел живлення сенсорів. У роботі запропоновано гібридний підхід до метаевристичної кластеризації. Особливістю

якого є застосування методу k-середніх до визначення навчальної популяції та врахування міри компактності і роздільності кластеру при побудові фітнес функції. Авторами досліджено доцільність такого підходу при побудові протоколів маршрутизації БСМ з використанням кластеризації, що основана на генетичному алгоритмі, моделі біогеографії та методу рою частинок. У статті наведено особливості та проведено дослідження для методу рою частинок. Одержані результати довели кращу ефективність розробленого протоколу з існуючими.

ЛІТЕРАТУРА

1. Баскаков, С. С. Распределенные системы мониторинга на базе беспроводных сенсорных сетей [Текст] // Конференция «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения», г. Москва, 2012
2. David, K. 2020 Vision [Text] / K. David, D. Dixit, N. Jefferies // IEEE Vehicular Technology Magazine. – 2010. – Т. 5. – №. 3. – С.
3. Зеленин, А. Н. Беспроводные сенсорные сети как часть инфокоммуникационной структуры [Текст] / А. Н. Зеленин, В. А. Власова – ООО «Компания СМИТ», 2013.
4. Mahajan, S. Clustering in Wireless Sensor Networks: A Review [Text] / S. Mahajan, P. K. Dhiman // International Journal. – 2016. – Т. 7. – №. 3.
5. Heinzelman, W. B. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [Text] / W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, H. Balakrishnan // IEEE Transactions on wireless communications. – 2002. – Т. 1. – №. 4. – С. 660-670.
6. Smaragdakis, G. SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks [Text] / G. Smaragdakis, I. Matta, A. Bestavros – Boston University Computer Science Department, 2004.
7. Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization // Proceedings of IEEE International conference on Neural Networks. – 1995. – P. 1942-1948.
8. Chand, S. Heterogeneous HEED protocol for wireless sensor networks [Text] / S. Chand, S. Singh, B. Kumar // Wireless personal communications. – 2014. – Т. 77. – №. 3. – С. 2117-2139.
9. Matin, A. W. Intelligent hierarchical cluster-based routing [Text] / A. W. Matin, S. Hussain // life. – 2006. – Т. 7. – С. 8.
10. Bara'a, A. A. A new evolutionary based routing protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks [Text] / A. A. Bara'a, E. A. Khalil // Applied Soft Computing. – 2012. – Т. 12. – №. 7. – С. 1950-1957.
11. Basagni, S. A. generalized clustering algorithm for peer-to-peer networks [Text] // Proc. Workshop on Algorithmic Aspects of Communication, July 1997. – 1997.
12. Goldberg, D. E. Genetic algorithms and machine learning [Text] / D. E. Goldberg, J. H. Holland // Machine learning. – 1988. – Т. 3. – №. 2. – С. 95-99.
13. Kennedy, J. Particle swarm optimization [Text] // Encyclopedia of machine learning. – Springer US, 2011. – С. 760-766.
14. Boussaid, I. Hybridizing biogeography-based optimization with differential evolution for optimal power allocation in wireless sensor networks [Text] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2011. – Т. 60. – №. 5. – С. 2347-2353.
15. Demiriz, A. Semi-supervised clustering using genetic algorithms [Text] / A. Demiriz, K. P. Bennett, M. J. Embrechts // Artificial neural networks in engineering (ANNIE-99). – 1999. – С. 809-814.
16. Bhushan, S. A hybrid approach to energy efficient clustering for heterogeneous wireless sensor network [Text] / S. Bhushan, S. Antoshchuk // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре, 2018, № 2, С.15-20. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2018.2.15>
17. Бхушан, Ш. Кластеризация беспроводной сенсорной сети на основе генетического алгоритма [Text] / Ш. Ш. Бхушан, И. А. Шамин, С. Г. Антошук // Електротехнічні та комп'ютерні системи, 2018, № 28(104), С.193-200.

Рецензент статті
д.т.н., доц. Данченко О.Б.

Стаття рекомендована до
публікації 15.05.2018р.