

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИБОРУ ГОЛОВНОГО ВУЗЛА КЛАСТЕРА В РАДІОМЕРЕЖАХ КЛАСУ MANET

В статті проаналізовані методи кластеризації та вибору головного вузла кластера, які застосовуються в мобільних радіомережах класу MANET. Сформульовані вимоги до них. Проведена класифікація, визначені їх переваги та недоліки. Визначені можливі (перспективні) напрямки їх подальшого розвитку та вдосконалення.

Лукина Е.В., Сова О.Я., Марылив Е.А., Олексенко В.П. Анализ методов выбора главного узла кластера в радиосетях класса MANET. В статье проанализированы методы кластеризации и выбора главного узла кластера, используемые в радиосетях класса MANET. Сформулированы требования к ним. Проведена классификация, определены их достоинства и недостатки, а также перспективы дальнейшего развития и усовершенствования.

K. Lukina, O. Sova, O. Maryliv, V. Oleksenko Analysis of methods of selection of the clusterhead in radio networks of MANET class. This article demonstrates the data clusterization methods, their features and possibilities for clustering of MANET mobile ad-hoc networks. An analysis of the algorithms for cluster head selections was also done, which can be used to determine the coordinator node in mobile radio networks of MANET class.

Ключові слова: кластеризація, вузол-координатор, мобільні радіомережі, MANET, Mobile Ad-hoc Networks, ГВК, координація, цільова функція.

Безпроводові технології широко застосовуються в сучасних телекомунікаційних системах та мережах. Одним з представників цих технологій є мобільні радіомережі (МР) класу MANET (Mobile Ad-Hoc Networks) [1], які характеризуються динамічною топологією, передбачають відсутність базових станцій та фіксованих маршрутів передачі інформації, а також надають можливість мобільним абонентам самоорганізовуватися в радіомережу без завчасно розгорнутої мережевої інфраструктури. Їх застосування охоплює сфери як спеціального (мережі зв'язку тактичної ланки управління, безпроводові мережі пунктів управління, аварійні мережі, що розгортаються в умовах надзвичайних ситуацій та ін.), так і цивільного призначення (мережі підприємств, домашні мережі, тощо) [2].

Управління мобільною радіомережею потребує створення ефективної системи управління нею. Тому, метою забезпечення інформаційного обміну з заданою якістю, в ході попередніх досліджень [3, 4] було запропоновано представлення системи управління (СУ) у вигляді сукупності мобільних вузлів.

Система управління радіомережі являє собою сукупність СУ мобільних вузлів, які взаємодіють між собою та повинні забезпечити інформаційний обмін із заданою якістю. Критерії оптимальності управлінських рішень вузлових СУ є цільові функції (ЦФ) управління, що відображають ступінь досягнення поставленої мети визначені в [5]. Однак, відмінності в технічних характеристиках вузлів МР, нерівномірність використання ними вузлових та мережевих ресурсів, а також у параметрах та функціональному призначенні підсистем вузлових СУ призводять до необхідності вирішення нової задачі, яка полягає в координації ЦФ вузлів, які приймають участь у передачі інформації [6].

Першим, і найважливішим, етапом процесу координації є вибір головного вузла зони, який буде реалізовувати функції координатора ЦФ вузлових СУ.

Тому, актуальною є задача розробки методів визначення вузла, який буде виконувати роль координатора. При цьому повинні бути враховані особливості, притаманні мобільним радіомережам класу MANET [7].

Метою даної статті є огляд та аналіз методів вибору вузла-координатора, які використовуються в радіомережах класу MANET. **Об'єктом дослідження** є процес вибору головного вузла кластера. **Предметом** – методи вибору головного вузла кластера.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Головний вузол (вузол-координатор) обирається (виділяється) серед інших за певною ознакою (апаратні характеристики, місцезнаходження в топології радіомережі, кількість сусідів тощо). Крім функцій, притаманних звичайному вузлу (прийом, передача та ретрансляція інформації в МР), на вузол-координатор (ВК) покладається завдання створення оптимальних умов для досягнення цілей управління всіма вузлами МР. Ще однією з головних задач ВК є формування бази знань, де повинні зберігатися дані про параметри підлеглих вузлів та їх цільові функції, шляхом об'єднання інформації, отриманої від вузлів.

У цілому, ВК може бути визначений організаційним способом на етапі планування мережі. Однак, в процесі функціонування МР можливі випадки, коли зазначений вузол не може залишатися координатором протягом всього часу роботи існування створеної мережі. Це може бути пов'язано з: виходом з ладу обладнання вузла, що виконує функцію координатора (розрядження батареї, фізичне знищення тощо); втратою зв'язності з іншими вузлами, що може бути викликано діями засобів РЕБ супротивника, географічними властивостями рельєфу місцевості, збільшенням допустимої відстані радіозв'язності між вузлами та ін.

За таких умов виникає потреба у виборі нового вузла-координатора. Як показує аналіз функціонування мереж зв'язку, в т.ч. МР класу MANET, здійснення вибору нового вузла-координатора неможливе без наявності наступної інформації:

1. Дані про структуру мережі.
2. Характеристики кожного вузла мережі.
3. Ознаки (критерії), значення яких є пріоритетними при подальшому виборі вузла-координатора.

В [8] показано, що, враховуючи динамічний характер мобільних радіомереж класу MANET та непередбачувану природу їх функціонування, зазначену задачу можна вирішити за допомогою методів кластеризації.

Кластеризація – задача розбиття множини об'єктів на групи, які називаються кластерами. В середині кожної групи повинні опинитися „схожі” об'єкти, а об'єкти різних груп повинні бути якомога більше відмінні [9].

Кожен кластер складається з головного вузла (*Cluster Head* – СН), вузлів нижчого рангу – членів кластера (*Cluster Member* – СМ) та шлюзів (*Gateway*) – вузлів, які можуть чути два або більше головних вузлів кластерів. На головний вузол кластера (далі – ГВК) покладено функції координації для всіх інших вузлів кластера.

Задачу визначення вузла-координатора МР або її зони за допомогою методів кластеризації можна поділити на два етапи:

1. Поділ мережі (зони) на оптимальну кількість кластерів.
2. Вибір вузла-координатора з-поміж інших вузлів в обраному кластері. Кластеризація є ефективною тільки при умові раціонального вибору ГВК. Вибір алгоритму вибору вузла повинен бути обумовлений властивостями мережі (зони), а саме: територіальним розподілом вузлів мережі (зони), їх характеристиками та взаємним розташуванням, параметрами тощо.

Враховуючі особливості функціонування МР класу MANET, методи кластеризації повинні відповідати наступним вимогам:

1. Стабільність кластерів до допустимих змін топології, тобто вихід із кластера одного вузла не повинен викликати перерахунок всіх кластерів, а також викликати переобрання головних вузлів.
2. Мінімальне споживання енергії.
3. Можливість створення кластерів різного діаметра.
4. Мінімальне споживання ресурсів.
5. Створення мінімальної кількості кластерів.

Вибір вузла-координатора (головного вузла) в кластері для радіомереж класу MANET є дуже проблематичним у зв'язку з особливостями функціонування мережі, мобільністю вузлів, що входять до кластера. Постійно ведеться робота по розробці нових та модифікацій вже існуючих методів кластеризації, які використовують різні підходи для вибору ГВК. Зауважимо, що загальноприйнятої класифікації цих методів немає, але виділяють ряд класифікаційних ознак, які умовно можна поділити на шість категорій [10] (рис. 1).



Рис. 1 Класифікація методів кластеризації, що використовуються в радіомережах класу MANET

Коротка характеристика методів та параметри, що враховуються, представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристика алгоритмів вибору ГВК

№ з/п	Вид методів кластеризації	Параметри, що враховуються	Принцип вибору ГВК
1	Identifier-based clustering (на основі ідентифікаторів ID)	ID вузла	Кожному вузлу присвоюється ID. ГВК обирається вузол з найнижчим ID.
2	Connectivity-based clustering (на основі зв'язності)	відстань між вузлами кількість сусідів	Враховується кількість сусідів, які бачить вузол. Вузол з максимальною їх кількістю обирається головним
3	Mobility-aware clustering (на основі мобільності)	рухливість вузлів дистанція між вузлами	Головним вузлом обирається вузол з найменшою рухливістю
4	Low-cost of maintenance clustering (на основі найменших витрат ресурсів)	ID вузла CID-ID головного вузла кластеру	ГВК обирають за найнижчим ID, вибір відбувається за подією
5	Power-aware clustering (енергозберігаюча кластеризація)	ID вузла, VID вузла, кількість сусідів	Вибір ГВК відбувається за найбільшим VID
6	Combined-weight based clustering (на основі комбінованої ваги)	мобільність, потужність передачі, потужність акумулятора кожного вузла	Головним вузлом обирається вузол з найменшою вагою.

Розглянемо представників кожного виду методів кластеризації та механізми вибору ГВК, що в них застосовуються:

1. Методи кластеризації, побудовані на основі ідентифікаторів – LID, *Max-Min d-cluster formation algorithm* та ін. В методах цієї категорії кожному вузлу присвоюється окремий ідентифікатор. Вузли знають ID своїх сусідів і головний вузол кластера обирається за певними правилами, вказаним нижче.

1.1. В алгоритмі LID (*Low ID cluster algorithm*) головою кластера обирається вузол з найменшим ID. Тобто, ID всіх сусідів повинні бути вище, ніж у голови кластера. Вузол, який може чути дві або більше голови кластера є шлюзом. Шлюзи, зазвичай використовуються для взаємодії між кластерами. Інші вузли є звичайними членами кластера.

1.2. В алгоритмі *Max-Min d-cluster formation* задається d – максимальне число кроків (віддалень) від голови кластера, в той час як у більшості підходів до кластеризації всі вузли кластеру знаходяться на відстані одного кроку від головного вузла. Це викликає утворення великої кількості кластерів та, відповідно, великої кількості їх головних вузлів, що дуже перевантажує мережу. В алгоритмі *Max-Min d-cluster formation* за рахунок завдання числа кроків d зменшується кількість кластерів та головних вузлів, кластер формується кількістю вузлів, які знаходяться на відстані до d -кроків від головного вузла. Зменшення загальної кількості головних вузлів кластерів полегшує їх взаємодію між собою. Алгоритм підходить для випадків асинхронної роботи вузлів. Головний вузол такого кластера обирається також за ID, як і у методі LID. Тобто, якщо вузол А має найбільший ID в множині вузлів, утворених вузлом В, то вузол А обирається головним вузлом кластера, навіть якщо його ID не є найвищим в його власній зоні дії.

Особливістю та одночасно недоліком схем із застосуванням ID є те, що ID вузлів призначається довільним чином і при цьому не враховуються особливості та характеристики вузлів. Тобто, головним вузлом призначається вузол, якому випадковим чином дістався найменший ID.

2. Методи кластеризації на основі мобільності – MOBIC, MobDHor та ін.

Мобільність є однією з найважливіших особливостей радіомереж класу MANET та є важливим фактором, який впливає на зміну топології всієї мережі. Фактор мобільності (рухливості) є основним для характеристики ступеню стабільності кластера. Кластеризація на основі мобільності вказує на те, що структура кластера визначається за рухливістю вузлів.

2.1. Одним з алгоритмів, що враховують рухливість вузлів, є алгоритм MOBIC (*Mobility-based Metric for clustering*) [10, 11]. Він ґрунтується на базі алгоритму LCC (*Least Cluster change Algorithm*), який буде розглянутий нижче. В MOBIC пропонується застосовувати показник мобільності вузлів для формування кластерів. При цьому, вузли, які мають низьку швидкість відносно своїх сусідів, мають шанс бути обраними головним вузлом кластера. Локальна швидкість мобільного вузла обчислюється за допомогою дисперсії швидкості мобільного вузла відносно сусідів. Низьке значення дисперсії вказує на те, що цей мобільний вузол є відносно менш мобільним для своїх сусідів. Вузли з найменшим значенням дисперсії обираються головним вузлом кластера. Цей алгоритм підходить для групової мобільності, тобто, коли група вузлів рухається в одному напрямку з приблизно однаковою швидкістю. Хаотичне переміщення вузлів знижує ефективність алгоритму у зв'язку з непередбачуваністю руху вузлів.

2.2. Алгоритм MobDHor (*Mobility-based d-hop clustering algorithm*) [10, 12] формує кластери змінного діаметра на основі моделей руху вузлів в MANET. На відміну від існуючих алгоритмів кластеризації, діаметр кластерів не обмежується жодним попередньо встановленим значенням. Замість цього діаметр кластерів є гнучким і визначається стійкістю кластерів. Вузли, що мають подібні рухомі структури, згруповані в один кластер для досягнення максимальної стійкості кластера. На відміну від існуючих алгоритмів групової кластеризації, для MobDHor достатньо знань лише 1-крокового середовища. Це робить MobDHor дійсно адаптивним, розподіленим та локалізованим алгоритмом. Вузол стає головою кластера, якщо він є найбільш стабільним серед сусідів. Всі інші є звичайними членами кластера. Кластери, які утворює цей алгоритм є більш стабільні, ніж кластери, що утворюються такими алгоритмами кластеризації як Lowest-ID та Max Connectivity.

3. Кластеризація на основі зв'язності – HCC, K-CONID та ін.

Ступінь зв'язності вузла в таких алгоритмах обчислюється на основі його відстані від інших.

3.1. В алгоритмі HCC (*Highest connectivity clustering algorithm*) кожен вузол надсилає свій ID вузлам, які знаходяться у межах його діапазону дії. Вузол з максимальною кількістю сусідів (т.з. максимальна зв'язність) обирається головним вузлом кластера. Його сусіди стають членами кластера та більше не приймають участь в процесі виборів. В кластері дозволяється обирати тільки один головний вузол. Кожен вузол кластера напрямку

пов'язується з головним вузлом. Тобто, вузли в кластері можуть виконувати роль або головного вузла кластера, або члена кластера. Якщо два або більше вузлів мають однакову кількість сусідів, то головою обирається вузол з найнижчим ID.

У зв'язку з високою мобільністю вузлів в мережі, що викликано особливістю функціонування радіомереж класу MANET, в кластерах постійно відбувається процес перерахунку вузлів. При цьому алгоритм має низьку швидкість зміни голови кластера та низьку пропускну здатність. Тому, вузол, обраний в якості головного вузла кластера за ознакою зв'язності, не втрачає свою роль при втраті одного сусіда (одного з сусідів).

Зазвичай, на кожен кластер виділяється певний ресурс, який розподіляється між вузлами. Чим більше вузлів в кластері, тим менше його пропускну здатність.

3.2. Алгоритм K-CONID (*K-hop connectivity ID clustering algorithm*) поєднує в собі два алгоритма кластеризації: Lowest ID та НСС [13]. Головний вузол в цьому алгоритмі обирається за двома критеріями: перший критерій – зв'язність, другий – найнижчий ID. Застосування тільки однієї зв'язності в якості критерія викличе утворення багаточисельних зв'язків між вузлами. Застосування тільки показників ID викличе утворення великої кількості кластерів і, відповідно, головних вузлів. Поєднання двох критеріїв дозволить мінімізувати кількість кластерів, що утворюються. Зв'язність в цьому алгоритмі враховується для вузлів на відстані до k-кроків. Метою алгоритму є мінімізація кількості кластерів в мережі.

4. Кластеризація на основі найменших витрат ресурсів – LCC, 3-hBAC та ін.

4.1. LCC (*Least Cluster Change*) – алгоритм найменшої зміни кластеру. Цей алгоритм є значно кращим, порівняно з алгоритмами LID та НСС, по затратах на обслуговування кластера. Він використовує ініціалізацію мережі, засновану на алгоритмі найнижчого ID, як в LID, або алгоритмі найвищого ступеня, як в НСС, що робить процес кластеризації достатньо стабільним. Проте, факторів, що використовуються в цьому алгоритмі, занадто мало. Крім того, це алгоритм пасивної кластеризації – він активізується тільки тоді, коли вузол включається в кластер або виходить з кластера. Більшість протоколів процедуру кластеризації виконують періодично та час від часу повторно кластеризують вузли для того, щоб головний вузол кластера задовольняв необхідним умовам. В НСС кластеризація виконується періодично, щоб перевірити максимальну ступінь вузлів та переконались, що вузол з максимальною кількістю зв'язків є головним або перепризначити головний вузол кластера, якщо попередній головний вузол вже не задовольняє вимозі максимальної кількості зв'язків. Цей механізм, передбачає часту повторну кластеризацію [12].

В LCC алгоритм кластеризації поділяється на два кроки: формування кластеру та обслуговування кластера. Формування кластера відбувається, як в алгоритмі LID, тобто головою кластера обирається вузол з найнижчим ID. Рекластеризація відбувається тільки в двох випадках:

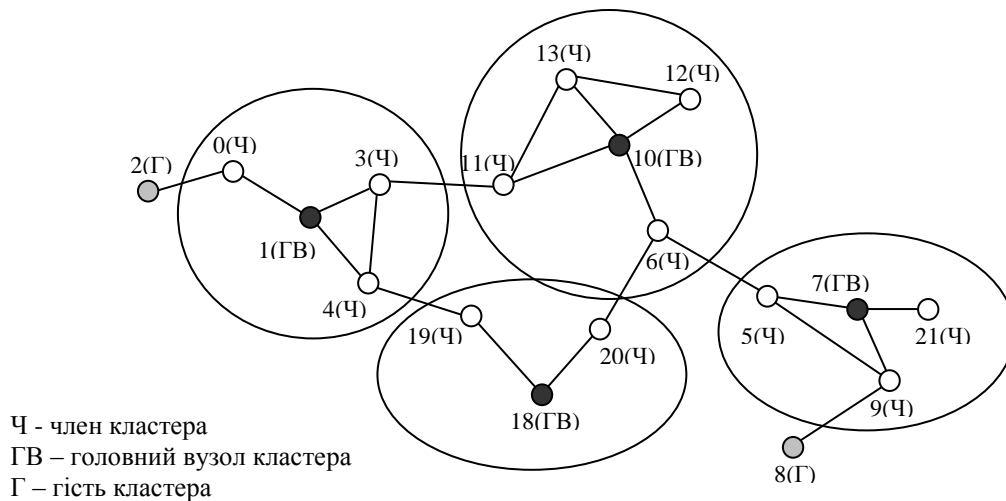
- коли два головних вузла кластерів попадають в зону дії один одного. В цьому випадку один з вузлів відмовляється від ролі головного вузла;
- коли мобільний вузол не може отримати доступ до головного вузла жодного кластеру. Тоді кластерна система відновлюється згідно алгоритму LCC.

Таким чином, алгоритм LCC значно поліпшує стабільність кластера, за рахунок нехтування параметрами до головного вузла кластера. З іншого боку, переміщення одного вузла може викликати рекластеризації, що є в основному ресурсозатратним.

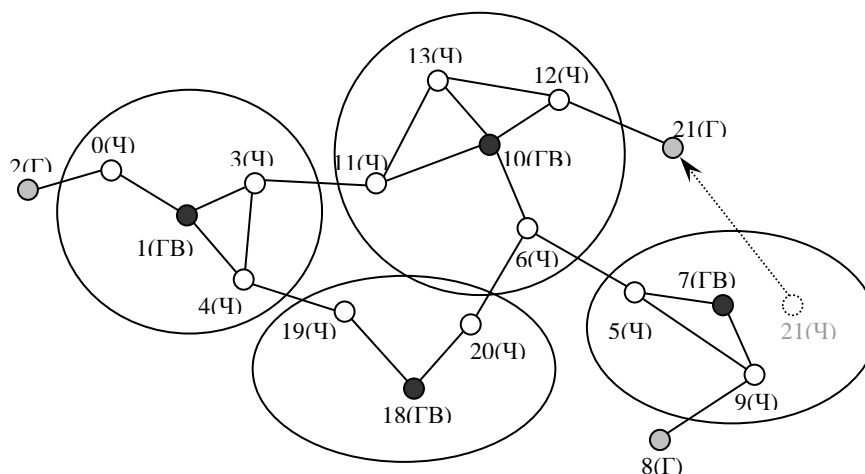
4.2. В алгоритмі 3-hBAC (*3-hop between adjacent clusterhead*) [11] пропонується новий статус вузла „гість кластера” (*clusterguest*), який означає, що цей вузол не знаходиться в зоні досяжності (діапазоні передачі) жодного головного вузла кластера, але є в зоні досяжності декількох членів кластеру. Формування кластера завжди починається з визначення серед обраних вузлів вузла з найменшим ID (припускаючи, що це мобільний вузол m_0) в MANET. Мобільний вузол з найбільшою кількістю зв'язків (сусідів) (найвищою зв'язністю) з діапазону дії вузла m_0 обирається першим ГВК. Всі прямі (безпосередні) сусіди ГВК змінюють статус на „член кластера”. Після завершення формування першого кластера,

подальше формування кластерів може виконуватися паралельно в мережі. Члени кластера або прямі сусіди будь-якого члена кластера зі статусом „невизначений” „*unspecified*” (означає, що він ще не включений до жодного кластера) не можуть бути обраними в якості головного вузла (відмовляються від ролі головного вузла кластера).

Коли мобільний вузол дізнається, що він не може бути кластером або приєднатися до будь-якого кластера, але його сусід є членом деякого кластеру, то він може приєднатися до цього кластера як „гість кластера” „*clusterguest*”. Для підтримки (обслуговування) кластеру, цей алгоритм підтримує суміжні головні вузли кластерів на відстані, принаймні, на два стрибки. Тому, коли два головних вузла попадають в зону дії один одного, то головним повинен залишитись тільки один. Завдяки введенню статусу „гостя кластера” в алгоритмі 3-hBAS, при переміщенні вузла між кластерами, не виникає ланцюгової реакції повторної кластеризації, що означало б перевибори головного вузла кластеру, тобто це переміщення не впливає на статус мобільних вузлів всередині цих двох кластерів. Коли мобільний вузол виходить з зони дії всіх кластерів, він може як „гість кластера” приєднуватися до тих кластерів, до членів яких він може дістатися. Отже, немає необхідності в формуванні нового кластера для того, щоб покрити один вузол як в LCC і кластерна топологія не змінюється. Це зменшує кількість кластерів та виключає формування дрібних непотрібних кластерів.



а) Формування кластера



б) Поновлення членства в кластері

Рис. 2. Алгоритм 3hBAS.

На рис. 2 а показано, що вузол m_2 є „гостем кластера” і знаходиться на відстані двох кроків від ГВК m_1 . Зв'язок з ГВК m_1 він підтримує через вузол m_0 . На рис. 5 б бачимо, що

вузол m_{21} переміщується на нове місце, яке не покривається головним вузлом його кластера, але вузол m_{21} може приєднатися до кластера з головним вузлом m_{10} як „гість кластера” через вузол m_{12} .

5. Енергозберігаюча кластеризація – LBC, PACDC та ін.

5.1. LBC (*Load balancing clustering*) – кластеризація з балансуванням навантаження.

Коли вузол обирається головою кластера, то оптимальним буде, якщо він їм залишатиметься до певної максимальної відмітки часу або бюджету. Бюджет – це встановлене користувачем обмеження на алгоритм, він може бути модифікований для забезпечення унікальних характеристик системи, таких як, наприклад, час автономної роботи окремих вузлів. В цьому алгоритмі кожен мобільний вузол має змінний віртуальний ID – VID і значення VID спочатку встановлюється як число ID. Спочатку, мобільні вузли з найбільшими ID виграють право бути головними вузлами в своїх зонах дії. LBC лімітує (обмежує) час, безперервного виконання мобільним вузлом функцій головного вузла кластера, тому, коли головний вузол витрачає свій бюджет тривалості, алгоритм скидає його VID на 0 і він перестає бути головним вузлом. Коли два головних вузла потрапляють в зону загальної дії, то перемагає вузол з вищим VID. Коли головний вузол кластера перестає ним бути, то вузол з найвищим VID з його оточення відновлює функцію кластера (стає головним вузлом). Новий обраний вузол має мінімальну попередню тривалість служби, порівняно з іншими вузлами, що повинно гарантувати хороший рівень енергії для виконання функцій нового головного вузла. Однак, недоліком є те, що тривалість обслуговування головного вузла кластеру не є показником його енергоспоживання.

5.2. PACDC (*Power-aware connected domination set*) – домінуюча множина з підключенням до джерела живлення. Це енергозберігаюча схема кластеризації, яка зменшує розмір домінуючої множини (*Dominating Set*), не порушуючи її функції. Під домінуючою множиною розуміють множину вузлів, що виконують функції голів кластерів в мережі. Непотрібні вузли видаляються з DS для того, щоб зберегти енергію, необхідну для виконання функцій головних вузлів кластерів. Мобільні вузли всередині домінуючої множини DS потребляють більше енергії акумуляторів, ніж вузли, що знаходяться зовні, у зв'язку з виконанням додаткових завдань, таких як, наприклад, оновлення інформації про маршрутизацію. Тобто, необхідно мінімізувати споживання енергії домінуючою множиною DS. В цій схемі для визначення того, чи може вузол бути ГВК, використовується рівень енергії (*Energy level (el)*), а не ідентифікатор вузла або його ступінь зв'язності. Мобільний вузол повинен бути видалений із домінуючої множини, коли його найближчі сусіди покриті одним чи кількома домінуючими сусідами, та, при тому, він має менше залишкової енергії, ніж домінуючі сусіди. Цей алгоритм не може збалансувати велику різницю в споживанні енергії між домінуючими вузлами (ГВК) та звичайними вузлами у зв'язку з тим, що його метою є мінімізація DS, а не балансування споживання енергії між всіма мобільними вузлами. Отже, мобільні вузли в DS швидше витрачають свою енергію.

6. **Методи кластеризації на основі комбінованої ваги** – WCA, WBACA [14, 15, 16] та ін. Алгоритми цього типу обирають головний вузол кластера, оцінюючи вагу кожного вузла. Під вагою розуміють набір певних показників, характеристик, можливостей вузла.

6.1. Алгоритм WCA (*Weighted Cluster Algorithm*) – зважений алгоритм кластеризації, обирає головний вузол кластера у відповідності з кількістю вузлів, які він може обслуговувати, а також мобільністю, потужністю передачі та потужністю акумулятора кожного вузла. Цей алгоритм не є періодичним, процедура вибору головного вузла здійснюється або у зв'язку з переміщенням вузла, або коли вже обраний за вагою вузол стає неспроможним обслуговувати всі вузли. Щоб головні вузли кластерів не перевантажувались, використовують (застосовують), заздалегідь, визначену межу (поріг), що вказує оптимальну кількість вузлів, яку кожен головний вузол кластера може підтримувати. Алгоритм WCA обирає головний вузол кластера оцінюючи (порівнюючи) вагу кожного вузла. Вага вузла v визначається як:

$$W_v = w_1 \Delta v + w_2 D_v + w_3 M_v + w_4 P_v \quad (1)$$

Вагові коефіцієнти обираються таким чином, щоб

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1 \quad (2)$$

M_v – міра мобільності (рухливості). Обчислюється середня швидкість руху кожного вузла за певний проміжок часу T .

Δv – різниця ступенів. Спочатку обчислюється кількість сусідів кожного вузла. Результатом цього обчислення є ступінь вузла v , dv . Щоб забезпечити балансування навантаження обчислюється різниця ступенів Δv , як $|dv - \delta|$ для кожного вузла v , де δ – допустимий поріг.

Параметр D_v обчислюється як сума відстаней від даного вузла v до всіх його сусідів. Цей фактор пов'язаний із споживанням енергії.

Параметр P_v – сумарний час перебування вузла головою кластера. P_v – є міра того, скільки витримає батарея звичайного вузла у разі покладання на нього виконання додаткових завдань у якості головного.

Головою кластера обирається вузол з найменшою вагою.

6.2. Алгоритм WBACA (Weight-based adaptive clustering algorithm) – адаптований зважений алгоритм кластеризації. Недоліком алгоритму WCA є те, що кожен вузол повинен знати ваги всіх інших вузлів ще до початку процесу кластеризації. Цей процес потребує багато часу. Також, дві голови кластерів можуть бути найближчими сусідами на відстані одного кроку, що призводить до того, що кластери не обов'язково поширюються в мережі. Підхід, запропонований в алгоритмі WBACA ґрунтується на залученні глобальної системи навігації GPS (Global Position System) для отримання інформації про місцезнаходження вузлів. В WBACA для визначення головного вузла кластера враховуються наступні параметри: потужність передачі, швидкість передачі, мобільність, потужність батареї та ступінь. Кожному вузлу присвоюється вага, яка вказує на його придатність виконувати роль головного вузла кластера. Вузол з найменшою вагою обирається головним. Вага вузла N визначається як:

$$W_N = w_1 M + w_2 B + w_3 T_x + w_4 D + w_5 / TR \quad (3)$$

де w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 – вагові коефіцієнти для відповідних параметрів, вказаних нижче:

M – мобільність (рухливість) вузла; B – потужність батареї; T_x – потужність передачі; D – різниця ступенів; TR – швидкість передачі.

Також цей алгоритм не дозволяє, щоб головні вузли кластерів знаходились один від одного на відстані одного кроку. Головні вузли кластерів, що перетинаються, зв'язуються один з одним через шлюз. Звичайні вузли знаходяться на відстані 1 крок від голови кластеру.

Переваги та недоліки описаних алгоритмів представлені в таблиці 2 [17 – 29].

Таблиця 2

Переваги та недоліки алгоритмів кластеризації

№з/п	Алгоритм	Параметри	Переваги	Недоліки
1	2	3	4	5
1	LID	ID	Простота реалізації	Випадковий характер присвоєння ID
2	Max-Min d cluster formation	ID	Зменшує кількість кластерів та головних вузлів	Невідомі
3	MobDHor	Мобільність	Формування кластерів різного діаметра	Зменшення пропускнуої здатності кластера при збільшенні кількості вузлів
4	MOVIC	Мобільність	Зручний для використання	Складність обчислення при

№з/п	Алгоритм	Параметри	Переваги	Недоліки
1	2	3	4	5
			при груповій мобільності	хаотичному русі вузлів
5	HCC	Зв'язність	Низька швидкість зміни головного вузла	Низька пропускну здатність при збільшенні кількості вузлів
6	K-CONID	Зв'язність ID	Мінімізує кількість кластерів в мережі	Невідомі
7	LCC	ID	Стабільність кластера	Переміщення одного вузла може викликати повторну кластеризацію
8	3-hBAC	ID вузла	Зменшує кількість кластерів, виключає формування дрібних непотрібних кластерів	Невідомі
9	LBC	ID вузла, VD вузла	Алгоритм обмежує максимальний час, який вузол може бути ГВК. Після витрачення ліміту VID скидається на 0 і вузол перестає бути головним.	Тривалість обслуговування ГВК не є показником його енергоспоживання
10	PACDC	Енергетичний рівень вузла	Алгоритм змінює розмір DS без змін в його функціонуванні. Непотрібні вузли видаляються з DS, зберігаючи енергію всередині DS.	Неможливість збалансувати велику енергетичну різницю між домінуючими та не домінуючими вузлами
11	WCA	Мобільність Потужність передачі Потужність акумулятора	Захист від перевантаження	Необхідність попереднього знання ваги кожного вузла.
12	WBACA	Мобільність Потужність передачі Потужність акумулятора Швидкість передачі Різниця ступенів	Застосування GPS. Виключення ситуацій, коли головні вузли кластерів знаходяться на відстані 1-крок один від одного	Невідомі

Аналіз відповідності методів кластеризації до вимог, що висуваються до них при функціонуванні в радіомережі класу MANET представлений в таблиці 3.

Таблиця 3

Аналіз методів кластеризації

Вимоги Метод	Стабільність кластера	Мінімальне споживання енергії	Кластери змінного діаметра	Мінімальне споживання ресурсів	Мінімальна кількість кластерів
LID	низька	-	-	-	-
Max-Min d cluster formation	низька	-	+	-	+
MobDHor	дуже висока	-	+	+	+
MOVIC	відносно висока	-	-	+	-
HCC	дуже низька	-	-	-	-
K-CONID		-	+	-	+
LCC	низька	-	-	+	-
3-hBAC	низька	-	-	-	+
LBC	висока	+	-	-	-
PACDC	висока	+	-	-	-
WCA	низька	+	-	-	-
WBACA	дуже висока	+	-	+	-

Висновки: У статті сформульовані вимоги до методів кластеризації для ефективного застосування їх в радіомережах класу MANET. Проведений аналіз цих методів та механізмів вибору ГВК, що в них застосовуються з врахуванням вимог та особливостей функціонування в радіомережах класу MANET. Зроблено висновок, що вірний вибір ГВК забезпечує ефективну та тривалу роботу кластера. При цьому треба враховувати головну особливість радіомереж класу MANET – високу динаміку зміни їх топології. Алгоритми вибору ГВК повинні передбачати в своїй роботі можливість постійної ротації вузлів кластера під час всього періоду життєвого циклу мережі. При цьому необхідно формувати якомога більш стабільні кластери, які мінімально споживають енергію. Процес вибору нових головних вузлів повинен бути високошвидкісним, для того, щоб не переривати функціонування кластерів. Аналіз показав, що при виборі ГВК неефективно застосовувати такий параметр вузла як ID, у зв'язку з тим, що він присвоюється вузлам випадково і наявність найменшого ID не забезпечує відповідність інших параметрів вузла для виконання функцій ГВК. Взагалі менш ефективними є методи вибору вузла, де використовується для вибору ГВК один показник. Комбінований аналіз кожного вузла кластера дозволить зробити більш обґрунтований та ефективний вибір ГВК. При цьому вибір конкретного методу обумовлюється завданнями кластера, його розташуванням та мобільністю. Розрахунок комбінованої ваги вузлів вдає змогу враховувати різні вимоги до мережі, в залежності від умов функціонування, поточного стану мережі, кількості вузлів тощо та обирати ГВК найефективніше, до того ж з мінімальним використанням енергії.

У ході подальших досліджень буде розроблено методи вибору ГВК, що ґрунтуються на розрахунках комбінованої ваги, на базі методів WCA та WBACA.

ЛІТЕРАТУРА

1. Романюк В.А. Направления развития тактических сетей связи / В.А. Романюк // Зв'язок. – 2001. – № 3. – С. 63 – 65.
2. Романюк В.А. Еволюція тактичних радіомереж: Тези доповідей та виступів учасників VI науково-практичного семінару [„Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”] / В.А. Романюк // –К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2011. – С. 45 – 52.
3. Романюк В.А. Концепция иерархического построения интеллектуальных систем управления тактическими радиосетями класса MANET: сборник тезисов докладов и выступлений участников XXII Международной Крымской конференции [„СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”], (КрыМиКо). / Романюк В.А., Сова О.Я., Жук П.В., Романюк А.В. – Севастополь, 2012. – С. 265.
4. Архітектура системи управління мережами MANET: Тези доповідей та виступів учасників V Міжнародної конференції [„Проблеми телекомунікацій – 2011”], (Київ, 19 – 22 квітня 2011р.) / В.А. Романюк, О.Я. Сова, О.В. Жук – К.: ІТС НТУУ „КПІ”, 2011. – С. 58 – 60.
5. Романюк В.А. Цільові функції оперативного управління тактичними радіомережами / В.А. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – К., 2012. – № 1. – С. 109 – 117.
6. Романюк В.А. Координація цільових функцій інтелектуальних систем управління тактичними радіомережами класу MANET/ В.А. Романюк, Я.А. Стемковська, О.А. Симоненко, О.Я. Сова // Збірник наукових праць ХУПС. – 2014. – № 3 (40). – С. 85 – 92.
7. Романюк В.А. Інтелектуальні мобільні радіомережі: збірник матеріалів V науково-технічної конференції [„Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”] / – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2010. – С. 28 – 36.
8. Сова О.Я. Аналіз методів кластеризації для визначення вузла-координатора в мобільних радіомережах класу MANET / О.Я. Сова, К.В. Лукіна, В.П. Олексенко, Шаповал О.М. // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ. – К., 2017. – № 4. – С. 121 – 128.
9. Нейский И. М. Классификация и сравнение методов кластеризации // Интеллектуальные технологии и системы. Сб. учебно-методических работ и статей аспирантов и студентов. Вып. 8. М: Изд-во ООО „Эликс +”, 2008. С. 111 – 122.

10. Ratish Agarwal, Dr. Mahesh Motwani. Survey of clustering algorithms for MANET. // International Journal on Computer Science and Engineering. – 2009, Vol. 1(2), 98 – 104.
11. Jane Y. Yu, Peter H.J. Chong A Survey of Clustering Schemes for Mobile Ad Hoc Networks. The Electronic Magazine of Original Peer-Reviewed Survey Articles. – 2005, Vol. 7 (1), 32 – 47.
12. Nilesh Goriya, Indr Jeet Rajput, Mihir Mehta A Survey Paper on Cluster Head Selection Techniques for Mobile Ad-Hoc Network IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE) e-ISSN: 2278-0661, p-ISSN: 2278-8727, Volume 17, Issue 1, Ver. II (Jan-Feb. 2015), 34 – 39 www.iosrjournals.org.
13. G.Chen, F.Nocetti, J.Gonzalez, I. Stojmenovic, Connectivity based K-hop clustering in wireless networks. // Proceedings of the 35 th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Vol.7, pp. 188.3, 2002.
14. S.K. Dhurandher, G.V. Singh Weight-based adaptive clustering in wireless ad hoc networks, IEEE, 2005.
15. Perna Malhotra, Ajay Dureja A Survey of Weight-Based Clustering Algorithms in MANET IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE) e-ISSN: 2278-0661, p-ISSN: 2278-8727, Volume 9, Issue 6, Ver. II (Mar.– Apr. 20153), PP 34 – 40 www.iosrjournals.org.
16. Deepak Kumar Gupta, Jay Prakash Cluster Head selection algorithms in MANET: a survey. // International Journal on Computer Science and Engineering. – 2017, Vol. 6, Issue №2, 342 – 350.
17. Mrunal Gavhale, Pranay D. Saraf Survey on Algorithms for Efficient Cluster Formation and Cluster Head Selection in MANET. // Procedia Computer Science 2016 №78, 477 – 482.
18. Renu Popli, Dr. Kanwal Garg, Sahil Batra A Hierarchical Classification of Various Clustering Schemes for MANETs. // International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE) ISSN: 2349-2163 Issue 7, Volume 2 (July 2015), 110 – 113.
19. Mohammad Shayesteh, Nima Karimi An Innovative Clustering Algorithm for MANETs Based on Cluster Stability. // International Journal of Modeling and Optimization. – 2012, Vol. 2, №3, 239 – 244.
20. Sapna Pal, S.P. Singh Survey On Mobility Based Clustering Algorithms in MANET. // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2012, Vol. 1, Issue 10.
21. V.V. Neethu, Awadhesh Kumar Singh Mobility Aware Loose Clustering for Mobile Ad hoc Network // Procedia Computer Science. – 2015, Vol. 54, 57 – 64.
22. Mrunal Gavhale, Pranay D. Saraf Survey on Algorithms for Efficient Cluster Formation and Cluster Head Selection in MANET. // Procedia Computer Science. – 2016, Vol. 78, 477 – 482.
23. Priyanka Chatterjee, Nikhil Agarwal. Energy aware, scalable, K-hop based cluster formation in MANET // Computer Science & Engineering.- Durgapur, 2011. – 49 p.
24. Amit Savyanavar, Mohini Borate Survey of clustering schemes in mobile ad-hoc networks. // International Journal of Science and Research (IJSR). – 2014, Vol. 3, Issue 11, 2407 – 2410.
25. Abinaya N., Ajikumar K. A renovated survey on clustering schemes in mobile ad-hoc network // International Academy of Engineering and Medical Research. – 2017, Vol. 2, Issue 2.
26. Poonam Thakur Clustering schemes in Wireless Sensor Networks and Mobile Ad Hoc Network: classification and comparison. // International Journal of Computer Networks and Wireless Communications. – 2012, Vol. 2, No6., 671 – 674.
27. Abdelhak Bentaleb, Abdelhak Boubetra, Saad Harous Survey of clustering schemes in mobile ad-hoc networks // Communications and Network, 2013, Vol. 5, 8 – 15.
28. Khalid Hussain, Abdul Hanan Abdullah, Khalid M. Awan, Faraz Ahsan, Akhtab Hussain Cluster Head election schemes for WSN and MANET: A Survey // World Applied Sciences Journal. – 2013, Vol. 23, Issue 5, 611 – 620.
29. M. Chatterjee, S. Sas, and D. Turgut An on-demand weighted clustering algorithm (WCA) for ad hoc networks // in Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '00), 2000.

