

УДК

**О. Л. НАЛАПКО, ад'юнкта***(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)*

## Порівняльний аналіз функціональних можливостей самоорганізуючих мереж передачі даних

*Проводиться аналіз функціональних можливостей мереж з можливою самоорганізацією. Визначено мережі військового призначення оптимального типу. Проаналізовано сучасні тенденції розвитку мереж військового призначення.*

*Ключові слова: мережі з можливою самоорганізацією, Ad hoc, маршрутизація, хост, вузол, MANET, WANET, MCN, QoS, спеціальні безпроводні мережі, мережі військового призначення, гібридні архітектури, передача даних, інтелектуальні мобільні вузли.*

*Проводится анализ функциональных возможностей сетей с возможной самоорганизацией. Определены сети военного назначения оптимального типа. Проанализированы современные тенденции развития сетей военного назначения.*

*Ключевые слова: сети с возможной самоорганизацией, Ad hoc, маршрутизация, хост, узел, MANET, WANET, MCN, Qos, специальные беспроводные сети, сети военного назначения, гибридные архитектуры, передача данных, интеллектуальные мобильные узлы.*

На теперішній час технології безпроводних мереж широко використовуються в нашому повсякденному житті та в мережах військового призначення, й, як свідчить проведений в джерелах [1–29] аналіз, у подальшому їх відсоток буде лише збільшуватися. Зазначена особливість обумовлює актуальність цього напрямку для проведення наукових досліджень.

На теперішній час активно ведуться роботи з впровадження систем передачі даних з використанням мереж з можливістю самоорганізації (Ad hoc Networks).

Основним завданням мереж з можливістю самоорганізації передачі даних є:

побудова стійкої до відмов мережної інфраструктури; підвищення використання радіо- та радіочастотного ресурсу;

забезпечення адаптації мереж до дії зовнішніх факторів;

зменшення вартості розгортання та функціонування мережі в порівнянні з класичними принципами побудови.

Аналіз останніх публікацій [9, 19, 28] вказує на те, що на даний момент ведуться активні роботи з дослідження, вдосконалення та активного впровадження мереж із сучасними технологіями передачі даних.

Децентралізована мережа з можливістю самоорганізації складається з маршрутизаторів та мобільних пристроїв, що зв'язані між собою і одночасно виконують функції як клієнта, так і маршрутизатора. На відміну від класичного варіанта побудови безпроводних мереж, де всі клієнти зв'язуються з маршрутизатором та передача даних відбувається лише через нього, у децентралізованій мережі кожен з цих пристроїв може переміщуватися в різних напрямках, при цьому в результаті переміщення розривати та встановлювати нові з'єднання із сусідніми пристроями.

Отже **метою** статті є проведення всебічного аналізу технічних характеристик Ad hoc мереж.

Безпроводна мережа з можливістю самоорганізації (Ad hoc wireless network, WANET) – це безпроводна децентралізована мережа, що не вимагає задалегідь створеної інфраструктури, а також не має постійної структури, де клієнтські пристрої (node – вузол) є рівнозначними і динамічно з'єднуються поміж собою, формуючи мережу. Кожен цих пристроїв бере участь у маршрутизації, пересилаючи інформації до адресату через інші пристрої. При цьому визначення, якому пристрою необхідно передавати інформацію, визначається зв'язністю мережі.

Хоча Ad-hoc безпроводні мережі призначені для роботи за відсутності інфраструктури, останні досягнення в архітектурі безпроводних мереж показують рішення, що дозволяють Ad-hoc вузлам працювати з наявною мережною інфраструктурою [1, 2, 5, 6]. Для прикладу можна навести багатointервальні стільникові мережі (Multi-hop Cellular Networks – MCNs) та пакетні радіомережі з можливістю самоорганізації з накладенням (Self-organizing Packet Radio Ad hoc Networks with Overlay – SOPRANO). Ці гібридні архітектури (поєднують переваги стільникових та Ad-hoc безпроводних мереж) значно підвищують продуктивність системи.

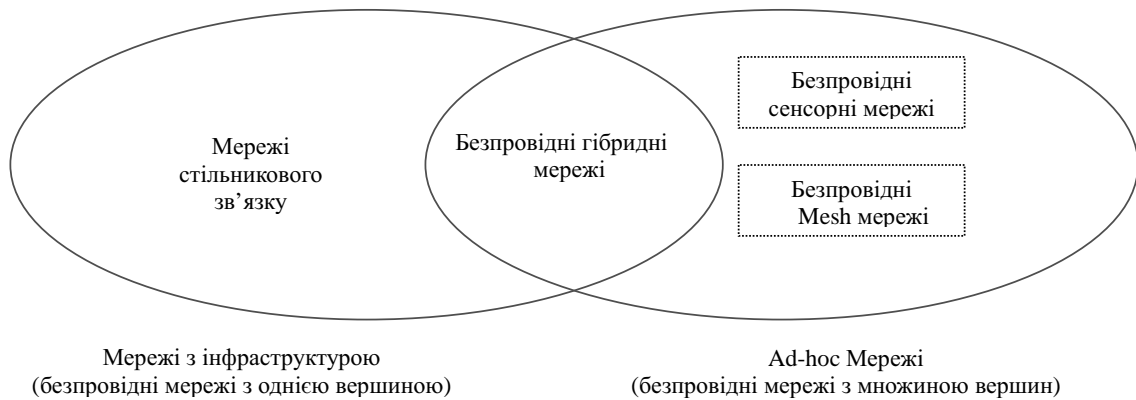


Рис. 1. Різновиди безпроводних мереж

Навіть з перевагами, що надають Ad-hoc мережі, залишається багато питань, які необхідно вирішити, включаючи підтримку системи пріоритизації трафіку (QoS – Quality of Service) для програм реального часу, зменшення ціни, енергоефективної ретрансляції, балансування навантаження, підтримки багатоадресного (Multicast) трафіку (рис. 1) тощо.

Стільникові безпроводні мережі (рис. 1) класифікуються як мережі, що залежать від інфраструктури. Визначення шляху для виклику між двома клієнтськими вузлами, скажімо між вузлом А та вузлом В, виконується через базову станцію (рис. 2).

Безпроводні Ad-hoc мережі належать до безпроводних мереж, що використовують множини хопів (Multi-Hop) для ретрансляції та здатні працювати без підтримки будь-якої фіксованої інфраструктури (їх також називають безінфраструктурними безпроводними мережами).

Відсутність базової станції робить маршрутизацію складною в порівнянні зі стільниковими мережами.

Прокладання шляху для виклику між двома вузлами А та В виконується через проміжний мобільний вузол С (рис. 3). Безпроводні Mesh мережі та безпроводні сенсорні мережі є конкретними прикладами безпроводних Ad hoc мереж.

Наявність базових станцій спрощує маршрутизацію та управління ресурсами в стільниковій мережі, оскільки пошук та визначення маршруту до адресата виконується централізовано базовою станцією.

Але в Ad-hoc безпроводній мережі управління маршрутизацією та ресурсами здійснюється розподіленним способом, в якому всі вузли координуються, щоб забезпечити з'єднання між собою [5].

Це вимагає, щоб кожен вузол був більш інтелектуальним, міг функціонувати й як мережний хост для передачі та отримання даних, так і маршрутизатор для маршрутизації пакетів до інших вузлів адресатів. При цьому повинно враховуватися багато складових, таких як потужність сигналу, випадковість зміни в топології та її коригування, змінність кількості вузлів, принцип

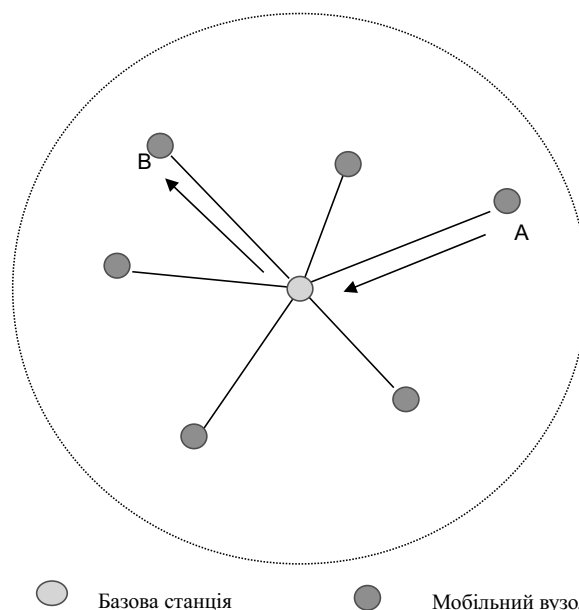


Рис. 2. Встановлення з'єднання в стільниковій мережі (Single-hop – з єдиною вершиною) від мобільного вузла А до мобільного вузла В через базову станцію

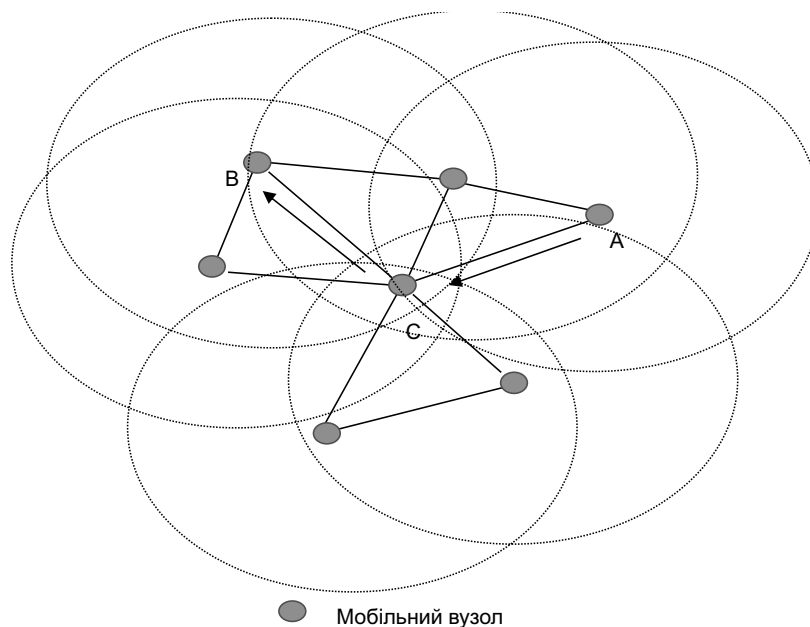


Рис. 3 Приклад встановлення з'єднання в Ad-hoc мережі (з множиною вершин) від мобільного вузла *A* до мобільного вузла *B* через мобільний вузол *C*

організації передачі інформації, багатоканальність мереж, пошук оптимальних маршрутів та маршрутизація пакетів до отримувача, пріоритизація даних, що передаються, балансування навантаження передачі даних, заряд батареї мобільного вузла, різниця обчислювальних ресурсів, зміна діаграми спрямованості антени, забезпечення гарантованої доставки пакета тощо. Отже, мобільні вузли в Ad-hoc безпроводних мережах суттєво складніші у порівнянні з їхніми аналогами в стільникових мережах (табл. 1) та вимагають подальшої оптимізації управляючих алгоритмів та протоколів для забезпечення належної взаємодії вузлів та обміну пакетними даними між собою [6, 8, 9, 29].

Розглянемо порядок застосування Ad-hoc безпроводних мереж. Ad-hoc безпроводні мережі завдяки швидкому та дешевшому розгортанню знаходять застосування в кількох сферах діяльності: військові операції, спільні та розподілені обчислення, пошуково-рятувальні операції під час надзвичайних ситуацій, безпроводні mesh мережі, безпроводні сенсорні мережі та безпроводні мережі з гібридною архітектурою.

**Спеціальні безпроводні мережі** використовуються для встановлення зв'язку між групою солдатів під час тактичних операцій, де неможливо організувати фіксовану інфраструктуру [9]. У таких середовищах спеціальні безпроводні мережі швидко забезпечують необхідний механізм зв'язку. Іншим прикладом застосування може бути координація руху військових об'єктів на високій швидкості, таких як літаки або військові кораблі.

Ще однією галуззю, де можуть використовуватися Ad-hoc мережі є **мережі спільного та розподіленого обчислення**, де вимагається швидка побудова комунікаційної інфраструктури для з'єднання вузлів з мінімальними налаштуваннями. Цей вид комунікацій, на відміну до військових мереж спеціального призначення, не має

таких вимог до забезпечення захисту з'єднання але потребує багатоадресної передачі даних та гарантованої доставки даних, а передача поточкових мультимедійних даних також вимагає підтримки безперервного зв'язку в режимі реального часу [14].

Зважаючи, що, як правило, в таких ситуаціях мобільні вузли є неоднорідними: ноутбуки, планшети, смартфони, кишенькові портативні комп'ютери з високою процесорною потужністю – та мають обмежений запас заряду акумуляторних батарей, то їх взаємодія є доволі важкою проблемою.

В галузі ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій **застосування Ad-hoc мереж в екстремальних ситуаціях**, таких як координація та керування пошуково-рятувальними операціями внаслідок стихійного лиха, де зруйнована (пошкоджена) або просто відсутня інфраструктура з організації зв'язку, негайне розгортання спеціальних безпроводних мереж може стати гарним рішенням для координації рятувальних дій. Оскільки спеціальні безпроводні мережі вимагають мінімальної початкової конфігурації для їх функціонування, то час на побудову мережі дуже малий або взагалі не потрібен на побудову мережі для її функціонування.

Іншим видом безпроводних мереж з можливістю до самоорганізації є **mesh мережі**. Mesh мережі є спеціальними безпроводними мережами, що використовуються для забезпечення надлишкової інфраструктури зв'язку як для мобільних, так і для фіксованих вузлів, без обмежень повторного використання спектру і вимог мережного планування стільникових мереж.

Топологія mesh мережі забезпечує багато альтернативних шляхів для передачі даних між джерелом і адресою призначення, призводячи до швидкої реконфігурації шляху, коли існуючим шляхом неможливо передати повідомлення. Mesh мережі забезпечують найбільш

Таблиця 1. Відмінності між стільниковими та Ad-hoc безпроводними мережами

Стільникова безпроводна мережа	Ad-hoc безпроводна мережа
Потребує фіксованої інфраструктури	Не потребує фіксованої інфраструктури
З'єднання в одному стільнику	З'єднання з багатьма переходами (Multi-hop)
Гарантована смуга пропускання (призначена для голосового трафіку)	Спільний радіоканал (найбільше підходить для передачі даних)
Централізована маршрутизація	Розподілена маршрутизація
Стільникова комутація (розвивається в бік пакетної комутації)	Пакетна комутація (розвивається до емуляції стільникової комутації)
Безшовне з'єднання (мала кількість обривів з'єднання)	Багато обривів зв'язку через мобільність
Висока ціна та час розгортання	Низька ціна та час розгортання
Повторне використання частотного ресурсу за допомогою просторового рознесення	Динамічне використання єдиного радіочастотного ресурсу
Легше досягати синхронізації часу	Синхронізація часу є складною і споживає трафік (bandwidth)
Легке використання резервної пропускної здатності	Резервування пропускної спроможності вимагає складних протоколів для керування доступом до середовища
Галузі застосування в основному є цивільними та комерційного сектору	Галузі застосування є: пошуково-рятувальні операції, рятувальні операції, спільні обчислення, організація зв'язку спецоперації, використання там, де неможливе використання інфраструктури, тощо
Висока вартість обслуговування мережі (резервування джерела живлення, обслуговуючий персонал тощо)	Властивості самоорганізації та технічного обслуговування вбудовані в мережу
Мобільні вузли мають відносно низьку складність	Мобільні вузли вимагають більшої інтелектуальності (повинні мати передавач з можливістю маршрутизації та комутації)
Основними цілями маршрутизації та вхідного виклику є максимізація коефіцієнта прийому дзвінків та мінімізація коефіцієнта розриву викликів	Основною метою маршрутизації є пошук шляхів з мінімальними накладними витратами, а також швидке перенаштування недійсних маршрутів
Широко використовується та на даний час вже є п'яте покоління в еволюції	Для успішного комерційного розгортання слід розробити декілька підходів, має широке застосування в армії

економну можливість передачі даних разом із свободою мобільності [4].

Оскільки побудована інфраструктура у формі невеликих ретрансляційних пристроїв, встановлених, наприклад, на дахах будинків у житловій зоні (рис. 4) чи подібних пристроях, встановлених на стовпах освітлення вздовж вулиці, є більш економічною у порівнянні з побудовою класичної стільникової мережі.

Такі мережі утворюються шляхом розміщення безпроводного ретрансляційного обладнання, що розміщується по всій території, яку треба покрити мережею.

Можливі сценарії розгортання mesh мережі включають: житлові зони (де потрібне широкосмугове підключення до Інтернету), автошляхи (де потрібні засоби зв'язку для переміщення автомобілів), бізнес-зони (де потрібна альтернативна система зв'язку стільниковим мережам), важливі цивільні регіони (де потрібний високий ступінь доступності послуг), а також університетські містечка (для забезпечення дешевого покриття мережею в університетському містечку).

Основними перевагами mesh мережі є підтримка високої швидкості передачі даних, швидка та низька вартість розгортання, розширені сервіси, висока масштабованість, зручність розширення, висока доступність та низька ціна за біт переданої інформації. Mesh мережі працюють у діапазоні частот, що не потребують ліцензування, а саме 2,4 ГГц та 5 ГГц. Залежно від технології, яка використовується для забезпечення зв'язку на фізичному рівні та каналному рівні моделі OSI (open systems interconnection basic reference model – базова еталонна модель взаємодії відкритих систем), може забезпечувати швидкості передачі даних від 2 Мбіт/с до 1 Гбіт/с.

Час для розгортання, необхідний для мережі, набагато менший, ніж той, який досягається при побудові класичних мереж на основі інфраструктури. Mesh мережі забезпечують дуже економічну комунікаційну інфраструктуру з погляду витрат на розгортання та передачу даних. Mesh мережі добре масштабовані, що забезпечує велику кількість вузлів у мережі. Навіть при дуже

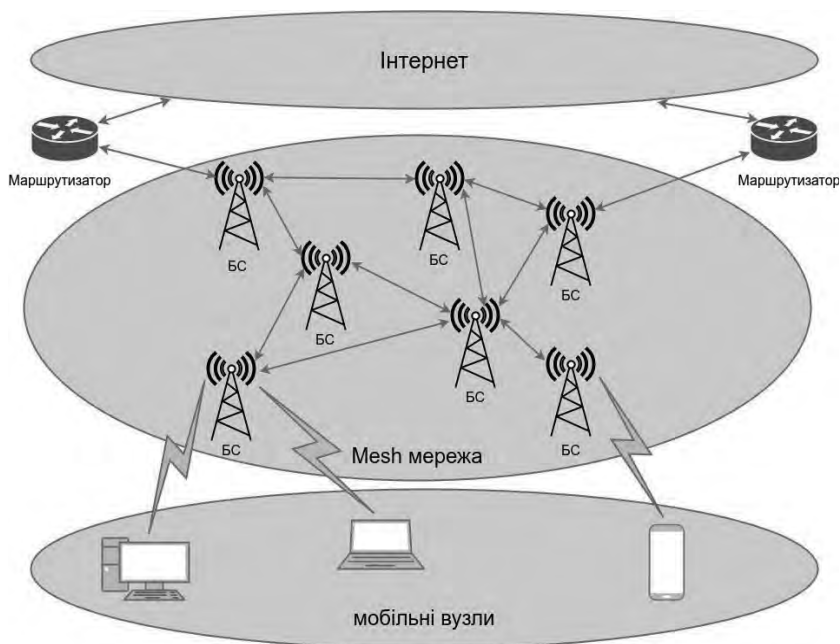


Рис. 4. Приклад mesh мережі

високій щільності мобільних вузлів, використовуючи управління потужністю в мобільних вузлах та вузлах ретрансляції, можна досягти більшої пропускної спроможності системи та доступності для великої кількості користувачів. Але у випадку стільникових мереж, поліпшення масштабованості вимагає додаткових інфраструктурних затрат на побудову вузлів, що, у свою чергу, передбачає високу вартість [12, 13].

Mesh мережі забезпечують високу доступність у порівнянні з існуючою стільниковою архітектурою, де наявність фіксованої базової станції, що охоплює набагато більшу площу, передбачає ризик виникнення єдиної точки відмови, що, у свою чергу, впливає на всі мобільні вузли, підключені до неї, [26].

**Сенсорні мережі** є спеціальною категорією Ad-hoc мереж для забезпечення інфраструктури безпроводної комунікації серед датчиків, що розгортаються в специфічних місцях застосування. Вузли датчиків –

це крихітні пристрої, що мають можливість відстежувати фізичні параметри, обробляти зібрані дані та зв'язуватися мережею для обміну отриманими даними зі станцією моніторингу (рис. 5) [19].

Сенсорні вузли мають два основні режими зондування: періодичне або спорадичне. Періодичним типом дії є відстеження фізичних параметрів навколишнього середовища, таких як температура, вологість та радіаційне випромінювання, а також обмін даними через постійний період часу. Спорадичним типом дії є відстеження фізичних параметрів та їх обробка, а обмін даними виникає лише при зміні фізичних параметрів навколишнього середовища чи події. Наприклад, виявлення порушення кордону держави чи периметра об'єкта, відстеження температури печі на виробництві для запобігання перевищенню параметрів, а також вимірювання напруги на критичних конструкціях або машинах тощо. Сфера застосування сенсорних мереж є досить широкою: військова справа, охорона здоров'я, охорона будівлі, моніторинг довкілля, виробництво тощо [6, 7].

Особливостями, що відрізняють сенсорні мережі від решти Ad-hoc мереж, є:

- кількість вузлів у сенсорній мережі може бути набагато більшою, ніж у звичайних безпроводних мережах;
- щільність розгортання сенсорних вузлів може бути досить високою при використанні надлишковості сенсорних вузлів;

- обмеження щодо живлення сенсорних вузлів є доволі суворіші у порівнянні з іншими Ad-hoc мережами, що обумовлено їх роботою в суворих географічних та екологічних умовах з мінімальним наглядом або в автономних умовах;

- обмеження до смуги частот та потужностей живлення вимагає реалізації агрегації бітів і інформації на вузлах, що відповідають за ретрансляцію;

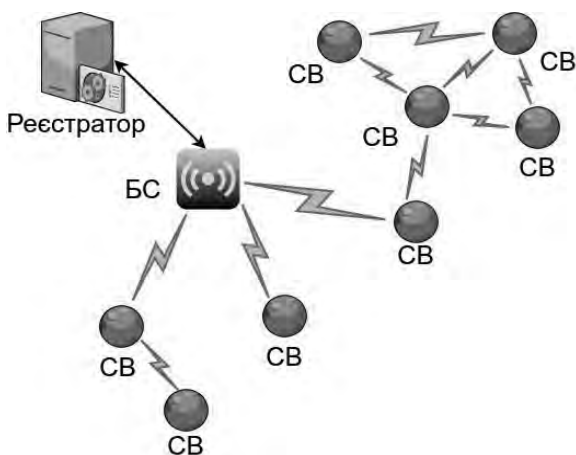


Рис. 5. Приклад сенсорної мережі

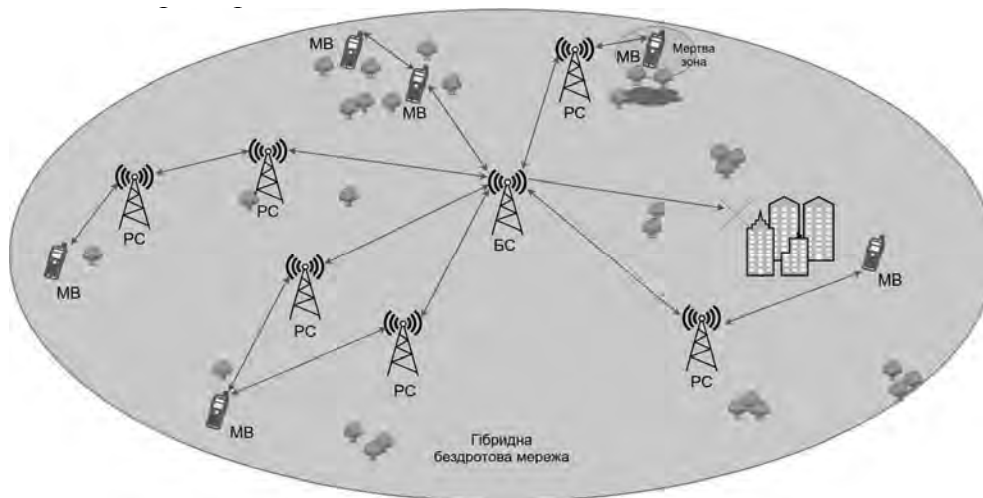


Рис. 6. Приклад гібридної безпроводної мережі [28]

вимоги щодо розповсюдження трафіку в залежності від галузі застосування сенсорних мереж.

Однією з найпоширеніших галузей застосування Ad-hoc безпроводних мереж є гібридні безпроводні архітектури, такі як multi-hop стільникові мережі (MCN – Multihop Cellular Network) та стільникові мережі з інтегрованими ретрансляторами (iCAR – Intersection-based connectivity aware routing) [27].

Величезне зростання абонентської бази існуючих стільникових мереж змушене зменшувати розмір комірок до рівня піко-стільників (pico-cell). Основна концепція стільникових мереж – географічне багатократне використання каналу. Для збільшення пропускної здатності стільникових мереж було запропоновано кілька методів, таких як сегментація комірок на сектори, зміна розміру стільників та застосування багаторівневих стільників (multi tier cells) [29].

Більшість із цих технологій також суттєво збільшує вартість обладнання. Потужність (максимальна пропускна здатність) стільникової мережі може бути збільшена, якщо мережа включає в себе властивості ретрансляції з декількома маршрутами з підтримкою передачі інфраструктурою фіксованого зв'язку. MCN поєднують надійність та підтримку фіксованих базових станцій стільникових мереж з гнучкістю та мульти-хоповою ретрансляцією Ad-hoc безпроводних мереж (рис. 6) [28].

MCN можуть допомогти уникнути таких сценаріїв, як обмежений спектр, дуже низький сигнал до перешкод, а також завади, нерівномірності розподілення навантаження трафіку, що може призводити до проблем перевантаження каналу. Використання багатопотокової ретрансляції в стільникових мережах вважається ключовим для збільшення швидкості передачі даних та максимального охоплення в безпроводних системах типу 4G. Multihop з'єднання відбувається, коли дані рухаються від джерела до цільового вузла на відстані більше ніж два хопи. Ця функція дозволяє значно збільшити географічний діапазон мережі, а розділення трафіку на декількох маршрутах дозволяє підвищити швидкість передачі даних [10, 28].

Основними перевагами гібридних безпроводних мереж є:

вища ємність, ніж стільникові мережі, отримана завдяки кращому повторному використанню радіоресурсу, що забезпечується зменшенням потужності передачі, оскільки мобільні вузли використовують діапазон потужності, що є часткою радіуса стільника [29];

підвищена гнучкість та надійність у маршрутизації. Гнучкість полягає у виборі вузлів, що найкраще підходять для маршрутизації, яка виконується через кілька мобільних вузлів або через базові станції, або комбінацією обох способів. Підвищена надійність полягає в стійкості до несправності базових станцій, і в цьому випадку вузол може досягати інших сусідніх базових станцій, використовуючи Multi-hop маршрутизацію [11];

підвищення рівня покриття та підключення в мертвих зонах (ділянках, які не охоплені через труднощі з передачею чи охопленням антени) може бути забезпечене за допомогою кількох хопів через проміжні вузли в стільнику.

Спеціальна безпроводна мережа складається з множини мобільних вузлів (хостів), що підключені безпроводними зв'язками. Топологія такої мережі може постійно змінюватися непередбачувано та випадково. Протоколи маршрутизації, які визначають шляхи передачі від вихідного вузла до вузла призначення, що використовуються в традиційних провідних мережах, не можуть бути безпосередньо застосовані в спеціальних безпроводних мережах через їх високо динамічну топологію, відсутність встановленої інфраструктури централізованого адміністрування (базової станції або точки доступу), обмежену пропускну здатність безпроводних зв'язків, виникнення помилкових пакетів під час трансляції радіоканалом, а також наявність вузлів, в яких обмежений ресурс живлення.

**Висновки.** У статті проаналізовано типи ad-hoc мереж та визначено, що для застосування в мережах спеціального призначення з високою динамічністю зміни графа топології внаслідок мобільності вузлів, що

характерно для мереж військового призначення, як правило, використовуються технології MANET і а також гібридні мережі, такі як MCN, що, у свою чергу, мають переваги як стільникових, так і безстільникових мереж. Гібридні мережі дозволяють поєднати в собі високу динамічність адаптації до зміни структури мережі, підвищену живучість такої мережі, швидкість її розгортання та вищу прихованість за рахунок використання менш потужних сигналів передавальними пристроями. Відповідно до викладеного необхідно приділити увагу подальшим науковим дослідженням гібридних протоколів маршрутизації для використання їх у спеціалізованих мережах воєнного призначення.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Techopedia "Piconet" : фахове Інтернет видання. URL: <https://www.techopedia.com/definition/5081/piconet>.
2. Бездротові мережі ad hoc. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Бездротові\\_мережі\\_ad\\_hoc](https://uk.wikipedia.org/wiki/Бездротові_мережі_ad_hoc).
3. Cairns P. Addressing wireless challenges // net.work. March 2008. URL: <http://www.netdotwork.co.za/article.aspx?pkarticleid=5044>.
4. Режимы работы WLAN-сетей. URL: <http://www.techattri.bute.ru/terats-499-3.html>.
5. Publishers B.V. Quality of service provisioning in ad hoc wireless networks: a survey of issues and solutions. // Ad Hoc Networks. Vol. 4. Issue 1. January 2006. P. 83–124.
6. Kathirvel A. Adhoc & Sensor Networks Unit – III. Chennai CS6003 // Презентація конференції. URL: <https://www.slideshare.net/ayyakathir/cs6003-ad-hoc-and-sensor-networks>.
7. Jagannathan Sarangapani. Wireless Ad Hoc and Sensor Networks Protocols Perfomance and Control. The University of Missouri-Rolla Rolla. Missouri, U.S.A., 2007 Pages 310–350.
8. Siva C., Murthy Ram, Manoj B.S., Ad Hoc wireless networks: architectures and protocols//TK5103.2.M89. 2004. P. 206–228.
9. Гаркуша С. В. Огляд та класифікація протоколів маршрутизації в mesh-мережах стандарту IEEE 802.11 // Збірник наук. праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. 2012. № 1. С. 14–28.
10. Papadakis G., Surligas M. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing & DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks. November 2011. // Презентація конференції. URL: <https://www.slideserve.com/raleigh/ad-hoc-on-demand-distance-vector-routing-aodv>.
11. Moltchanov D. Routing protocols for ad hoc networks. Ad hoc networks // TUT. 2009. URL: <http://www.cs.tut.fi/kurssit/TLT-2756/>.
12. Орлов В. Г., Фадеев А. Н. Протоколы маршрутизации в мобильных ad-hoc сетях // МИРЭА : материалы международной научно-технической конференции. 3–7 декабря 2012. Ч. 6. М. : Intermatic, 2012. С. 208–212.
13. Gavrilovska L. Ramjee Prasad Springer, Ad-Hoc Networking Towards Seamless Communications // Science & Business Media, 2007. 289 с.
14. Chen Chen, Yanan Jin, Qingqi Pei, Ning Zhang, A connectivity-aware intersection-based routing in VANETs // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. December 2014. 16 с. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1186%2F1687-1499-2014-42.pdf>.
15. Tie Qiu, Ning Chen, Keqiu Li, Daji Qiao, Zhangjie Fu, Heterogeneous ad hoc networks: Architectures, advances and challenges // Ad Hoc Networks. Vol. 55. February 2017. P. 143–152.
16. Jesús M.T., Portocarrero, Flavia C. Delicato, Paulo F. Pires, Bruno Costa, Wei Li, Weisheng Si, Albert Y. Zomaya, RAMSES: A new reference architecture for self-adaptive middleware in Wireless Sensor Networks // Ad Hoc Networks. Vol. 55. February 2017. P. 3–27.
17. A Survey Arun Kumar, Hnin Yu Shwe, Kai Juan Wong, Peter H. J. Chong, Location-Based Routing Protocols for Wireless Sensor Networks // Scientific Research Wireless Sensor Network. 2017. Vol. 9. P. 25–72.
18. Naeem Raza, Muhammad Umar Aftab, Muhammad Qasim Akbar, Omair Ashraf, Muhammad Irfan, Mobile Ad-Hoc Networks Applications and Its Challenges // Communications and Network. 2016. Vol. 8. P. 131–136.
19. Report Concerning Space Data System Standards. Wireless Network Communications Overview For Space Mission Operations : Informational Report Ccsds 880.0-G-3. Green Book. May 2017. 185 с.
20. Lijun Wang, Tao Han, Qiang Li, Jia Yan, Xiong Liu, Dexiang Deng, Cell-less Communications in 5G Vehicular Networks Based on Vehicle-Installed Access Points // IEEE wireless communications. December 2017. Vol. 24. no 6. P. 64–71.
21. Pescosolido L., Conti M., Passarella A. Performance Analysis of a Device-to-Device Offloading Scheme in a Vehicular Network Environment. Italian National Research Council. Institute for Informatics and Telematics (CNR-IIT) Via Giuseppe Moruzzi 1. 56124 Pisa, Italy. arXiv:1801.09082v1 [cs.NI]. Cornell University. 27 Jan 2018. 30 с. // Cornell University Library : електронна б-ка. URI: <https://arxiv.org>.
22. Madhja A., Nikolettseas S., Voudouris A. A. Mobility-aware, adaptive algorithms for wireless power transfer in ad hoc networks. Networking and Internet Architecture (cs.NI). Multiagent Systems (cs.MA). arXiv:1802.00342v1 [cs.NI]. Cornell University. 1 Feb. 2018 // Cornell University Library : електронна б-ка. URI: <https://arxiv.org>.
23. Poularakis K., Iosifidis G., Tassiulas L. SDN-enabled Tactical Ad Hoc Networks: Extending Programmable Control to the Edge. Networking and Internet Architecture (cs.NI). arXiv:1801.02909v1 [cs.NI]. Cornell University. 9 Jan. 2018 // Cornell University Library : електронна б-ка. URI: <https://arxiv.org>.
24. Islam N., Shaikh Z. A. A study of research trends and issues in wireless ad hoc networks, Networking

- and Internet Architecture (cs.NI). ArXiv:1711.08405 [cs.NI]. Cornell University. 1 Nov 2017 // Cornell University Library : електронна б-ка. URI: <https://arxiv.org>.
25. Trung Kien Vu, Sungoh Kwon, On-Demand Routing Algorithm with Mobility Prediction in the Mobile Ad-hoc Networks, School of Electrical Engineering University of Ulsan Ulsan, Korea. arXiv:1609.08141v1 [cs.NI]. Cornell University. 26 Sep 2016 // Cornell University Library : електронна б-ка. URI: <https://arxiv.org>.
26. Li M., Yu F. R., Si, Sun E., Zhang Y. Machine to Machine (M2M) Communications in Virtualized Vehicular Ad Hoc Networks. Networking and Internet Architecture (cs.NI). arXiv:1611.04017 [cs.NI]. Cornell University. 12 Nov. 2016 // Cornell University Library : електронна б-ка. URI: <https://arxiv.org>.
27. Torrieri D., Talarico S., Valenti M. C. Performance Comparisons of Geographic Routing Protocols in Mobile Ad Hoc Networks. Networking and Internet Architecture (cs.NI). arXiv:1509.01205v1 [cs.IT]. Cornell University. 3 Sep. 2015 // Cornell University Library : електронна б-ка. URI: <https://arxiv.org>.
28. Hossain E., Rasti M., Tabassum H. Amr Abdelnasser, Evolution Towards 5G Multi-tier Cellular Wireless Networks: An Interference Management Perspective, arXiv:1401.5530v2 [cs.NI]. Cornell University. 17 February 2014 // Cornell University Library : електронна б-ка. URI: <https://arxiv.org>.
29. Gozalvez J., Coll-Perales B. Experimental Evaluation of Multi-Hop Cellular Networks using Mobile Relays. DOI:10.1109/MCOM.2013.6553688. | UWICORE. Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory. URI: <http://www.uwicore.umh.es>. Miguel Hernandez University of Elche. Avda. de la Universidad.,s/n, 03202 Elche. Spain.

**Рецензент М. І. Луханін**, д-р техн. наук, проф.  
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України)