

# РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/11>**Гуржій С.В.**<https://orcid.org/0009-0006-2632-6916>Український науково-дослідного інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

## АСПЕКТИ ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ КООРДИНАЦІЇ UAV/UGV В УМОВАХ РАДІОЧАСТОТНИХ ПЕРЕШКОД

У статті представлено аналіз сучасних тенденцій розвитку та практичного застосування бездротових мереж типу “mesh” (WMN) у контексті зростаючих вимог до відмовостійких комунікаційних інфраструктур, здатних підтримувати автономні системи нового покоління. Основна увага приділяється концептуальним основам децентралізованих архітектур мереж типу “mesh”, їхнім функціональним можливостям та перспективам інтеграції з гетерогенними автономними платформами, зокрема безпілотними літальними апаратами (UAV) та безпілотними наземними транспортними засобами (UGV), а також розподіленими сенсорними масивами. Встановлено, що технологія WMN, заснована на принципах самоорганізації, розподіленої маршрутизації та функціональної надмірності, становить нову концепцію забезпечення масової роботизованої комунікації у складних, динамічних умовах застосування.

Детально розглянуто перехід від традиційних централізованих комунікаційних інфраструктур до децентралізованих мережевих моделей, в яких кожен вузол одночасно виконує функції хоста та ретранслятора. Встановлено, що такий підхід забезпечує живучість мережі навіть за умов значних втрат вузлів або навмисного порушення роботи інфраструктури, створюючи передумови для керування та координації в режимі реального часу. Особлива увага приділяється адаптивним протоколам маршрутизації, включаючи реактивні, проактивні та гібридні механізми, на яких базується гнучкість та масштабованість мережевих систем зв'язку. Розглянуто результати симуляції та експериментів, які підтверджують здатність архітектур WMN до швидкої реконфігурації топології, динамічного вибору шляху та безперервної ретрансляції даних в умовах активної радіоелектронної боротьби та завад.

Окремо розглянуто інновації в апаратних платформах та обчислювальних системах. Охарактеризовано інтеграцію повітряних ретрансляційних вузлів на базі UAV, багатопроцесорних модулів периферійних обчислень та гібридного комунікаційного обладнання в мережі mesh. Підкреслюється роль високоточних середовищ моделювання, які дозволяють моделювати великомасштабні гетерогенні топології мереж з повним урахуванням умов навколишнього середовища, тим самим створюючи стійку основу для перенесення протоколів з моделювання на діючі апаратні системи.

Значна увага приділяється безпеці зв'язку та стійкості електронних систем. Досліджується застосовність топології мереж ad-hoc, когнітивного управління спектром та багатоканальних архітектур, в яких використовуються радіочастотні та оптичні канали. Розглянуто багаторівневі механізми криптографічного захисту, призначені для забезпечення стійкості системи до глушіння, спуфінгу та скоординованих кібер атак.

Окрему увагу приділено інтеграції методів машинного навчання в керування мережею. Проведено оцінку ефективності алгоритмів прогнозування маршрутизації, вибору каналів на основі підкріплювального навчання та оптимізації топології за допомогою штучного інтелекту для зменшення затримки зв'язку та підвищення адаптивності мережі в динамічних умовах. Експериментальні результати підтверджують здатність інтелектуальних mesh систем підтримувати цілісність зв'язку при частковій відмові вузлів та виконувати автономне перемаршрутування в критично важливих для операції часових рамках.

Наголошено на тому, що бездротові сіткові мережі є критично важливою технологією для майбутніх військових, автономних робототехнічних та багатодомених оперативних застосувань. Злиття інновацій в області апаратного забезпечення, сучасних платформ моделювання та управління мережами на основі штучного інтелекту створює основу для розробки стійких, масштабованих та готових до оперативного розгортання автономних систем зв'язку.

**Ключові слова:** бездротові mesh-мережі, децентралізований зв'язок, адаптивна маршрутизація, платформи UAV/UGV, периферійні обчислення.



**Постановка проблеми.** Інтенсивна трансформація сучасних комунікаційних мереж відбувається під вплив високодинамічних експлуатаційних середовищ, зокрема у військовій сфері, системах реагування на надзвичайні ситуації та автономних робототехнічних системах [1]. Сучасні військові та безпекові операції дедалі більше використовують розподілені технологічні екосистеми, до яких входять UAV, UGV, автономні сенсорні платформи та мобільні робототехнічні системи. Для таких систем потрібен надійний комунікаційний інфраструктурний комплекс, здатний стабільно функціонувати в умовах, за яких традиційна централізована інфраструктура зв'язку може бути недоступною, пошкодженою або навмисно виведеною з ладу засобами радіоелектронної боротьби.

Традиційні мережі бездротового зв'язку зазвичай базуються на стаціонарних елементах інфраструктури, таких як базові станції, централізовані маршрутизатори або супутникові шлюзи [2]. Хоча такі архітектури забезпечують високу пропускну здатність та структуроване керування, вони мають обмежену адаптивність під час роботи в умовах, за яких відбувається швидка зміна обстановки, яка характеризується мобільністю, порушенням роботи інфраструктури та перешкодами в електромагнітному спектрі. У сучасних бойових ситуаціях інфраструктура зв'язку часто стає однією з головних цілей ворожих дій, що значно знижує надійність централізованих мережевих архітектур.

У цьому контексті бездротові mesh-мережі (WMN - Wireless Mesh Network) представляють перспективну модель зв'язку, здатну підтримувати децентралізовані, адаптивні та самоорганізовані мережеві структури [3]. WMN функціонують за розподіленою топологією, в якій мережеві вузли динамічно встановлюють багатоступеневі канали зв'язку, що дозволяє пакетам даних поширюватися через проміжні вузли без опори на централізований маршрутизатор. Такі мережі мають властиві їм характеристики, зокрема самоконфігурацію, здатність до самовідновлення, масштабованість та високу відмовостійкість, що робить їх особливо придатними для середовищ, критичних для виконання місій.

Значення цих властивостей стає особливо очевидним у військових та автономних робототехнічних застосуваннях [4]. Наприклад, сучасні бойові операції часто передбачають залучення різномірних груп робототехнічних систем, включаючи розвідувальні рої UAV, автономні наземні транспортні засоби, які забезпечують логістичну підтримку, та

розподілені сенсорні мережі, котрі контролюють стратегічні райони. Надійна координація між цими системами передбачає постійний обмін даними попри мобільність, перешкоди у навколишньому середовищі та потенційні перешкоди для сигналу. WMN надають можливість цим розподіленим платформам формувати адаптивні комунікаційні структури, де кожен вузол одночасно виконує функції хоста та ретранслятора.

Крім того, концепція різнопланових військових операцій створює додаткові завдання для систем зв'язку [5]. Сучасні умови операцій об'єднують багато рівнів, включаючи наземні платформи, повітряні засоби, супутникові системи та морські ресурси. Ця багаторівнева архітектура утворює складні системи зв'язку, де вузли мають різнопланові можливості, дальність передачі та обчислювальні ресурси. За таких умов традиційні протоколи зв'язку часто не можуть забезпечити стабільне з'єднання через зміну топології та фрагментацію мережі.

Бездротові mesh-мережі пропонують ефективне рішення цих задач, забезпечуючи розподілені механізми маршрутизації та формування адаптивної топології [6]. У mesh-архітектурі автономні платформи можуть динамічно переконфігурувати шляхи зв'язку, обходячи пошкоджені вузли або заблоковані канали зв'язку. Така гнучкість гарантує обмін інформацією навіть за умови часткового погіршення стану мережі. Ця особливість є надзвичайно важливою для забезпечення ситуаційної обізнаності, координації автономних систем та функціонування каналів управління та контролю під час операцій у реальному часі.

Іншим важливим аспектом, що підкреслює актуальність технологій WMN, є зростаюча інтеграція пристроїв Інтернету речей (IoT) та систем периферійних обчислень у військову інфраструктуру [7]. Сучасні сенсорні мережі, розгорнуті в розвідувальних місіях, генерують великі обсяги даних, які необхідно ефективно обробляти та передавати. У централізованих архітектурах зв'язку цей процес може спричинити значну затримку та створювати вузькі місця. Архітектури мереж типу mesh у поєднанні з розподіленими обчислювальними можливостями забезпечують локальну обробку даних та ефективне поширення даних між вузлами мережі.

Попри перспективні можливості бездротових mesh-мереж, низка фундаментальних завдань залишається невирішеною. Зростаюча складність сучасних систем зв'язку породжує проблеми, пов'язані з масштабованістю мережі, оптиміза-

цією маршрутизації, розподілом ресурсів, зменшенням перешкод та кібербезпекою. Крім того, інтеграція гетерогенних автономних платформ потребує нових протоколів зв'язку, здатних підтримувати різноманітні експлуатаційні вимоги, зберігаючи при цьому низьку затримку та високу надійність.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Стрімкий розвиток технологій бездротового зв'язку сприяв широким дослідженням моделей децентралізованих мереж, здатних підтримувати динамічні мережі зв'язку, які не залежать від інфраструктури [8]. Серед цих моделей бездротові mesh-мережі (WMN) привернули значну увагу науковців завдяки своїй спроможності створювати адаптивні багатоступеневі структури зв'язку, здатні ефективно функціонувати в умовах мобільності вузлів, фрагментації мережі та обмеженої доступності інфраструктури. Попередні дослідження мереж типу “mesh” зосереджувалися переважно на цивільних застосуваннях, таких як розширення ширококутового доступу, комунікаційні платформи «розумних міст» та розподілені сенсорні мережі. Однак останні технологічні та геополітичні події значно підвищили важливість технологій WMN у системах оборони, автономній робототехніці та відмовостійких тактичних комунікаційних мережах.

Однією з фундаментальних характеристик, на якій акцентували увагу в попередніх дослідженнях, є самоорганізований характер мереж типу “mesh”, де вузли мережі динамічно формують канали зв'язку та колективно підтримують функціональність маршрутизації без централізованої координації. Ця властивість дозволяє мережам типу “mesh” підтримувати зв'язок навіть у разі виходу з ладу окремих вузлів або недоступності частин топології мережі. Початкові архітектурні концепції WMN значною мірою базувалися на стаціонарних маршрутизаторах типу “mesh”, які підтримували стаціонарних клієнтів. Пізніші розробки запровадили гібридні архітектури мереж, інтегруючи як стаціонарні, так і мобільні вузли, що значно розширило можливості застосування цих мереж у високодинамічних умовах.

Важливу частину досліджень було присвячено розробці ефективних протоколів маршрутизації для мереж [9]. Традиційні підходи до маршрутизації, розроблені для мобільних мереж ad-hoc (MANET), такі як Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) та Dynamic Source Routing (DSR), спочатку були адаптовані для мережевих середовищ. Ці протоколи базуються на реактивних

механізмах виявлення маршрутів, де маршрути встановлюються лише тоді, коли потрібна комунікація. Хоча такий підхід зменшує навантаження на маршрутизацію в мережах з низькою щільністю, він може спричинити затримку під час встановлення маршруту, що може бути проблематичним у додатках, де час має критичне значення.

Для усунення цих обмежень були запроваджені проактивні протоколи маршрутизації, такі як Optimized Link State Routing (OLSR) [10]. OLSR підтримує оновлені таблиці маршрутизації за допомогою періодичних повідомлень обміну топологією, що забезпечує швидше встановлення маршруту за рахунок збільшення трафіку управління. Також були запропоновані гібридні протоколи маршрутизації, які поєднують реактивні та проактивні механізми, з метою збалансування швидкості реагування мережі та навантаження на комунікацію. Такі гібридні рішення є особливо актуальними для мереж, які складаються з гетерогенних вузлів з різними обчислювальними можливостями та діапазонами зв'язку.

Останні тенденції в наукових дослідженнях дедалі більше зосереджуються на адаптивних механізмах маршрутизації, здатних реагувати на динамічні зміни топології мережі, інтерференцію сигналів та мобільність вузлів [11]. Ці адаптивні підходи часто поєднують оцінку якості каналу зв'язку в режимі реального часу та методи прогнозного моделювання для покращення рішень щодо маршрутизації. Інтеграція алгоритмів машинного навчання в механізми маршрутизації є одним із нових напрямків досліджень, спрямованих на підвищення адаптивності та продуктивності мережі в надзвичайно складних середовищах.

Інша важлива область досліджень стосується багатошарових структур зв'язку, яка об'єднує повітряні, наземні та супутникові комунікаційні платформи [12]. Такі архітектури часто описують у рамках інтегрованих мереж «космос–повітря–земля» (SAGIN), де канали зв'язку між супутниками, UAV та наземними вузлами утворюють ієрархічну систему зв'язку. У цьому контексті технології мереж типу “mesh” забезпечують гнучку основу для встановлення зв'язку між різнорідними вузлами, розташованими на різних висотах та з різним рівнем мобільності.

Особлива увага приділяється використанню ретрансляторів зв'язку на базі UAV, які можуть динамічно розширювати покриття мережі та відновлювати зв'язок у районах з перебоями. UAV, оснащені модулями мережевого зв'язку, можуть виступати як повітряні ретрансляційні

вузли, створюючи тимчасові коридори зв'язку між наземними підрозділами або забезпечуючи зв'язок у регіонах, де наземна інфраструктура зв'язку була зруйнована. Такі підходи активно досліджуються в сучасних дослідженнях систем зв'язку для реагування на надзвичайні ситуації та військових тактичних мереж.

Поява автономних робототехнічних систем, включаючи рої UAV і платформи UGV, ставить додаткові вимоги до комунікаційних мереж [13]. Такі системи потребують зв'язку з низькою затримкою для спільного навігації, розподіленого зондування та скоординованого виконання місій. Дослідження в галузі робототехніки роїв підкреслюють необхідність масштабованих архітектур зв'язку, спроможних підтримувати десятки або навіть сотні взаємопов'язаних робототехнічних агентів. Мережі типу mesh пропонують ефективне рішення, розподіляючи комунікаційне навантаження між численними вузлами та усуваючи єдині точки відмови.

Інший важливий напрямок досліджень пов'язаний з інтеграцією периферійних обчислень та розподіленої обробки даних у мережі mesh. Периферійні обчислення дозволяють виконувати обчислювальні завдання локально на вузлах мережі, зменшуючи потребу в централізованій обробці даних та мінімізуючи затримки зв'язку. У військових застосуваннях ця здатність забезпечує обробку в реальному часі даних датчиків, зібраних розвідувальними платформами UAV або наземними системами спостереження. Таким чином, поєднання периферійних обчислень з мережами mesh утворює технологічну основу для децентралізованих інфраструктур обробки інформації.

**Постановка завдання.** З огляду на стрімкий розвиток технологій бездротових мереж з mesh-структурою (WMN) та їхній значний потенціал подвійного призначення, основною метою цього дослідження є критичний аналіз сучасних розробок із особливим акцентом на їхній застосовності у військовій та оборонній сферах. Незважаючи на значний потенціал архітектур WMN у цивільних сферах – зокрема в інфраструктурі «розумних міст», промислових системах Інтернету речей та системах зв'язку для реагування на надзвичайні ситуації – найбільш актуальні наукові та технологічні завдання виникають у військовій сфері, де надійність, оперативна стійкість та адаптивна реконфігурація в умовах протидії мають першочергове значення.

Відповідно, дане дослідження переслідує кілька взаємопов'язаних цілей:

– аналіз концептуальних та архітектурних основ бездротових мереж, з ціллю з'ясувати, як децентралізовані, самоорганізовані механізми зв'язку можуть бути адаптовані для підтримки військових місій – включаючи розвідку, спостереження та розвідку, скоординовані багаторівневі операції, автономний супровід конвоїв та завдання ретрансляції зв'язку, які здійснюються в умовах електронних перешкод або відсутності зв'язку;

– проведення систематичного огляду сучасних апаратних платформ та фреймворків для мережевого моделювання, з метою проведення оцінки їхньої технологічної зрілості та готовності до широкомасштабного оперативного розгортання у складних сценаріях з високою мобільністю;

– визначити основні невирішені технічні завдання, які обмежують перехід від експериментальних прототипів mesh-мереж до оперативно розгортаємих систем оборонного зв'язку. До них належать: забезпечення надійної адаптивної маршрутизації в умовах високої мобільності вузлів та частих змін топології; підтримка безпечного та стійкого зв'язку за наявності загроз електронної війни, таких як глушіння та спуфінг; досягнення масштабованого керування мережею в гетерогенних групах вузлів, які включають UAV, UGV та розподілені масиви датчиків; а також підтримка зв'язку під час тривалих операцій з обмеженими енергетичними ресурсами.

Нарешті, у роботі оцінюються перспективні напрямки досліджень – включаючи алгоритми маршрутизації, доповнені машинним навчанням, інтеграцію периферійних та хмарних обчислень, архітектури багатопланових інтегрованих мереж «космос-повітря-земля» (SAGIN - space-air-ground integrated network) та протоколи широкосмугового зв'язку наступного покоління - які мають значний потенціал для подолання поточних обмежень розгортання військових WMN.

**Виклад основного матеріалу.** Бездротові мережі типу “mesh” ґрунтуються на принципі розподіленої комунікації, де кожен вузол одночасно виконує функції хоста та маршрутизатора. Ця подвійна функціональність дозволяє вузлам мережі пересилати пакети даних для сусідніх вузлів, утворюючи багатоступеневі шляхи зв'язку по всій мережі. Такий підхід усуває необхідність у централізованій інфраструктурі та дозволяє топології мережі динамічно розвиватися у міру переміщення вузлів або приєднання до мережі нових вузлів.

У військових умовах mesh-мережі можуть складатися з різних типів вузлів зв'язку, вклю-

чаючи мобільні командні пункти, ретрансляційні платформи UAV, наземні роботизовані підрозділи та розподілені сенсорні пристрої. Ко-жен з цих елементів сприяє формуванню топології зв'язку, яка постійно адаптується до оперативних умов. Наприклад, коли UAV входить у зону проведення розвідки, він може тимчасово виконувати роль повітряного ретрансляційного вузла, розширюючи радіус дії наземних підрозділів, що діють у місцевості, де прямий радіозв'язок обмежений.

Подібна розподілена архітектура надає кілька критично важливих переваг для військових систем зв'язку. По-перше, відсутність централізованих вузлів управління значно підвищує стійкість мережі до цілеспрямованих атак або руйнування інфраструктури. По-друге, багатоступеневий зв'язок дозволяє мережі розширити покриття за межі прямої дальності передачі окремих радіостанцій. По-третє, динамічна реконфігурація маршрутів дозволяє мережі підтримувати зв'язок навіть тоді, коли певні вузли стають недоступними.

Впровадження платформ UAV та UGV у архітектури мережевої комунікації призвело до появи концепції багаторівневих мережевих систем, в яких комунікаційні вузли функціонують на різних просторових рівнях оперативного середовища. Наземні вузли зазвичай утворюють основну комунікаційну магістраль, тоді як повітряні вузли забезпечують динамічне розширення зони покриття та створення комунікаційних мостів.

Платформи UAV, оснащені модулями ретрансляції зв'язку, можуть значно покращити мережеву зв'язність, забезпечуючи канали зв'язку в межах прямої видимості на великі відстані. Повітряні вузли особливо ефективні в середовищах зі складним рельєфом, таких як міські райони, ліси або гірські регіони, де наземні канали зв'язку можуть бути перекриті.

У таких архітектурах UAV функціонують не лише як розвідувальні платформи, а й як динамічні ретранслятори зв'язку, здатні змінювати своє положення для підтримки оптимальної мережевої зв'язності. Корежуючи траєкторії польоту, UAV можуть компенсувати фрагментацію мережі, спричинену мобільністю вузлів або перешкодами в навколишньому середовищі.

З іншого боку, платформи UGV часто працюють ближче до зони бойових дій і можуть нести додаткове комунікаційне обладнання, здатне підтримувати передачу даних з високою пропускну здатністю. Такі наземні платформи можуть слугувати локальними комунікаційними вузлами, які з'єднують розподілені сенсорні мережі, роботи-

зовані розвідувальні модулі та термінали управління.

Утворена таким чином структура зв'язку формує тривимірну комунікаційну мережу, де інформація проходить як через горизонтальні, так і вертикальні рівні зв'язку. Такі архітектури значно підвищують надійність та гнучкість тактичних систем зв'язку.

Як наголошувалось, однією з головних технічних проблем, пов'язаних із бездротовими мережами типу "mesh", є розробка алгоритмів маршрутизації, здатних підтримувати стабільні канали зв'язку в середовищах, що характеризуються високою мобільністю та частими змінами топології. Традиційні підходи до маршрутизації, розроблені для статичних мереж, часто не здатні ефективно адаптуватися до таких умов.

Механізми адаптивної маршрутизації, розроблені для мереж типу "mesh", використовують різні метрики для оцінки якості каналів зв'язку між вузлами [14]. Ці метрики можуть включати силу сигналу, рівень втрати пакетів, затримку передачі та моделі мобільності вузлів. Постійно відстежуючи ці параметри, алгоритми маршрутизації можуть динамічно обирати оптимальні канали зв'язку для передачі даних.

Сучасні дослідження все частіше вивчають інтеграцію методів машинного навчання в алгоритми маршрутизації з метою покращення їхніх прогнозних можливостей. Наприклад, прогнозні моделі можуть аналізувати попередні моделі зв'язку, щоб передбачити погіршення якості каналу та завчасно перенаправити трафік даних через більш надійні канали.

Такі інтелектуальні механізми маршрутизації є особливо корисними у військових системах зв'язку, де переривання зв'язку може поставити під загрозу виконання місії. Прогнозуючи нестабільність мережі та відповідно адаптуючи стратегії маршрутизації, mesh-мережі можуть підтримувати безперервний зв'язок навіть у дуже динамічних умовах.

Слід зазначити, що ключовою вимогою до військових систем зв'язку є здатність зберігати боєздатність за умов умисних перешкод зв'язку та електронної війни. Архітектури мереж типу "mesh" за своєю суттю мають низку особливостей, які підвищують їхню стійкість у таких умовах.

Оскільки mesh-мережі підтримують кілька альтернативних шляхів зв'язку, вихід з ладу одного каналу зв'язку не обов'язково призводить до порушення роботи всієї мережі. При впливі перешкод або глушіння на конкретний вузол або

канал зв'язку алгоритми маршрутизації можуть автоматично перенаправляти трафік даних через альтернативні вузли або частотні канали.

Крім того, сучасні mesh-мережеві системи часто містять механізми частотної адаптивності, завдяки чому вузли можуть динамічно змінювати робочі частоти у відповідь на виявлення перешкод. Такі можливості значно знижують ефективність методів вузькосмугового глушіння.

Іншим важливим аспектом стійкості мережі є механізми розподіленого прийняття рішень, де кожен вузол бере участь у підтримці робочого стану мережі. На відміну від централізованих архітектур зв'язку, де вихід з ладу одного вузла управління може вивести з ладу всю систему, сіткові мережі розподіляють завдання керування мережею між декількома вузлами, зменшуючи вразливість до цілеспрямованих атак.

Протоколи бездротових мереж типу “mesh” мають важливе значення для розгортання розподілених сенсорних мереж, призначених для розвідки, спостереження та оцінки обстановки. Сучасні військові операції дедалі більше використовують мережі різнотипних датчиків, здатних контролювати умови навколишнього середовища, виявляти рух та ідентифікувати потенційні загрози.

У таких системах сенсорні вузли взаємодіють між собою за допомогою протоколів мереж типу “mesh”, утворюючи разом розподілену сенсорну інфраструктуру. Дані, зібрані окремими датчиками, передаються через проміжні вузли, поки не досягають командних центрів або блоків обробки даних.

Інтеграція розвідувальних платформ UAV з наземними сенсорними мережами ще більше розширює можливості таких систем [15]. UAV можуть збирати зображення з високою розділь-

ною здатністю та ретранслювати дані датчиків з віддалених місць до командних підрозділів через канали зв'язку “mesh”. Такий підхід забезпечує ситуаційну обізнаність у реальному часі навіть у районах, де прямий зв'язок з командними центрами інакше був би неможливим.

Крім того, інтеграція можливостей периферійних обчислень у вузли сіткової мережі дозволяє здійснювати попередню обробку даних на місцевому рівні. Це зменшує обсяг переданих даних та прискорює процеси прийняття рішень у ситуаціях, де час має критичне значення.

**Висновки.** Бездротові mesh-мережі (WMN) є базовою платформою для надійних, децентралізованих архітектур військового зв'язку, які забезпечують самоорганізовану, відмовостійку взаємодію між гетерогенними автономними платформами – зокрема, ретрансляційними вузлами UAV, UGV та розподіленими масивами датчиків. Розподілена топологія WMN робить їх за своєю суттю стійкими до цілеспрямованих електромагнітних перешкод, а майбутня інтеграція адаптивної маршрутизації з використанням машинного навчання ще більше покращує здатність до автономної реконфігурації в умовах протидії. Однак перехід від експериментальних прототипів до оборонних систем, придатних для оперативного розгортання, залишається обмеженим через невирішені проблеми масштабованої маршрутизації в топологіях з високою мобільністю, безпечного з'єднання, стійкого до перешкод, стійкого керування та міжплатформної сумісності протоколів – питання, вирішення яких за допомогою периферійних обчислень, широкосмугових протоколів зв'язку та керування мережею на основі штучного інтелекту визначає основний вектор майбутніх досліджень у цій галузі.

#### Список літератури:

1. Akyildiz I., Wang X., Wang W. Wireless Mesh Networks: A Survey, *Computer Networks*, vol. 47, no. 4, 2005, pp. 445–487.
2. Gupta P., Kumar P. The Capacity of Wireless Networks, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 2, 2000, pp. 388–404.
3. Bruno R., Conti M., Gregori E. Mesh Networks: Commodity Multihop Ad Hoc Networks, *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 3, 2005, pp. 123–131.
4. Bekmezci I., Sahingoz O., Temel S. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Survey, *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 3, 2013, pp. 1254–1270.
5. Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone Networks: Communications, Coordination, and Sensing, *Ad Hoc Networks*, vol. 68, 2018, pp. 1–15.
6. Clausen T., Jacquet P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR), RFC 3626, IETF, 2003.
7. Shi W., Cao J., Zhang Q., Li Y., Xu L. Edge Computing: Vision and Challenges, *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 5, 2016, pp. 637–646.
8. Perkins C., Royer E. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing, *Proceedings of IEEE WMCSA*, 1999, pp. 90–100.
9. Johnson D., Maltz D., Hu Y. The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks, IETF RFC 4728, 2007.
10. Clausen T., Jacquet P., Laouiti A. Optimized Link State Routing Protocol Performance in Mobile Ad Hoc Networks, *IEEE INMIC Conference*, 2001, pp. 57–62.

11. Jiang J., Han G., Guizani M. Machine Learning-Based Routing Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 1, 2021, pp. 445–472.
12. Zhang N., Zhang S., Yang P., Al-Dhahir N. Software Defined Space-Air-Ground Integrated Vehicular Networks: Challenges and Solutions, *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 7, 2017, pp. 101–109.
13. Chung S., Paranjape A., Dames P., Shen S., Kumar V. A Survey on Aerial Swarm Robotics, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 4, 2018, pp. 837–855.
14. De Couto D., Aguayo D., Bicket J., Morris R. A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing, *Wireless Networks*, vol. 11, no. 4, 2005, pp. 419–434.
15. Guo H., Liu J., Zhang J. UAV-Enabled Intelligent Transportation Systems for the Smart City: Applications and Challenges, *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 10, 2018, pp. 40–47.

### **Hurzhiy S.V. ASPECTS OF DECENTRALIZING THE COMMUNICATION SYSTEM FOR COORDINATING UAVs/UGVs IN THE PRESENCE OF RADIO FREQUENCY INTERFERENCE**

*This article presents a comprehensive analysis of current trends in the development and practical application of wireless mesh networks (WMNs) in the context of growing demands for fault-tolerant communication infrastructures capable of supporting next-generation autonomous systems. The focus is on the conceptual foundations of decentralized mesh network architectures, their functional capabilities, and prospects for integration with heterogeneous autonomous platforms, in particular unmanned aerial vehicles (UAVs) and unmanned ground vehicles (UGVs), as well as distributed sensor arrays. It has been established that WMN technology, based on the principles of self-organization, distributed routing, and functional redundancy, represents a new concept for enabling mass robotic communication in complex, dynamic operational environments.*

*The transition from traditional centralized communication infrastructures to decentralized network models, in which each node simultaneously performs the functions of a host and a repeater, is examined in detail. It has been established that this approach ensures network resilience even under conditions of significant node losses or deliberate disruption of the infrastructure, creating the prerequisites for real-time control and coordination. Particular attention is paid to adaptive routing protocols, including reactive, proactive, and hybrid mechanisms, upon which the flexibility and scalability of network communication systems are based. The results of simulations and experiments are discussed, confirming the ability of WMN architectures to rapidly reconfigure topology, dynamically select paths, and continuously relay data under conditions of active electronic warfare and interference.*

*Innovations in hardware platforms and computing systems are considered separately. The integration of UAV-based aerial relay nodes, multiprocessor edge computing modules, and hybrid communication equipment into a mesh network is described. The role of high-precision simulation environments is emphasized; these environments allow for the simulation of large-scale heterogeneous network topologies with full consideration of environmental conditions, thereby creating a robust foundation for porting protocols from simulation to operational hardware systems.*

*Significant attention is paid to communication security and the resilience of electronic systems. The applicability of ad-hoc network topologies, cognitive spectrum management, and multi-channel architectures utilizing radio frequency and optical channels is investigated. Multi-level cryptographic protection mechanisms designed to ensure system resilience against jamming, spoofing, and coordinated cyberattacks are examined.*

*Special attention is given to the integration of machine learning methods into network management. The effectiveness of predictive routing algorithms, channel selection based on reinforcement learning, and topology optimization using artificial intelligence is evaluated to reduce communication latency and improve network adaptability under dynamic conditions. Experimental results confirm the ability of intelligent mesh systems to maintain communication integrity during partial node failures and perform autonomous rerouting within time frames critical to the operation.*

*It is emphasized that wireless mesh networks are a critical technology for future military, autonomous robotic, and multi-domain operational applications. The convergence of innovations in hardware, modern simulation platforms, and AI-based network management creates the foundation for developing resilient, scalable, and operationally deployable autonomous communication systems.*

**Keywords:** *wireless mesh networks, decentralized communication, adaptive routing, UAV/UGV platforms, edge computing.*

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026