

Мовчан К.О.

<https://orcid.org/0000-0001-7881-466X>

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ У СТВОРЕННІ АДАПТИВНИХ ПРОТОКОЛІВ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ТАКТИЧНИХ МЕРЕЖ UAV ТА UGV

У статті розглядається проблематика забезпечення надійного зв'язку в гетерогенних системах розподілених автономних робототехнічних мереж, для яких характерний експоненціальний ріст кількості вузлів та їх інтеграція у критично важливу військову та цивільну інфраструктуру. Акцент робиться на високій мобільності вузлів UAV і UGV, динамічному характері змін топології мережі та обмежених спектральних і енергетичних ресурсах автономних платформ, що робить традиційні протоколи маршрутизації недостатніми та створює значні ризики для стабільності зв'язку в таких сферах, як розвідка, координація вогню, радіоелектронна боротьба та операції точного удару.

Проаналізовано сучасні тенденції розвитку загроз для зв'язку, зокрема цільове радіочастотне глушіння, електронне придушення та кібератаки на мережеву інфраструктуру, які часто залишаються невиявленими через відсутність інтегрованих адаптивних систем моніторингу. Особливу увагу приділено вразливостям централізованих архітектур зв'язку, де руйнування окремих вузлів призводить до каскадних мережевих збоїв, а також фрагментації робототехнічних екосистем, що ускладнює розгортання уніфікованих систем управління зв'язком.

Визначено ключові вектори погіршення якості зв'язку на різних рівнях архітектури розподіленої роботизованої мережі, що охоплюють фізичний канал, протокол маршрутизації та рівні взаємодії додатків. У статті розглядаються вразливості апаратного забезпечення на рівні радіоінтерфейсу, атаки на рівні мережі, включаючи заглушення, а також слабкі місця програмного забезпечення в механізмах прийняття рішень щодо маршрутизації в умовах неповної топологічної інформації.

Запропоновано багаторівневі підходи до адаптивної маршрутизації, які включають механізми на основі штучного інтелекту – алгоритми навчання з підкріпленням, глибокі нейронні мережі для прогнозування маршрутизації – поряд із самовідновлювальними мережевими архітектурами, розподіленим керуванням спектром та стратегіями зв'язку проти глушіння. Підкреслюється необхідність адаптивних підходів у контексті конкретних розгортань робототехніки, включаючи ройові системи, багатодоменні гетерогенні платформи та релейні інфраструктури на базі UAV. Зроблено висновок, що комплексний підхід до проектування протоколів зв'язку для розподілених робототехнічних мереж, який враховує багатоплановість мережі, специфічні для платформи експлуатаційні вимоги та обмеження обчислювальних ресурсів, має критичне значення. Формулювання чітко структурованої класифікації обмежень маршрутизації в поєднанні з детальним описом механізмів адаптації на основі штучного інтелекту та ефективних заходів протидії електронному придушенню забезпечує цілісне розуміння вразливостей систем зв'язку, сприяє виявленню критичних точок відмови та створює основу для розробки проактивних стратегій захисту зв'язку, які дозволяють прогнозувати загрози та проектувати адаптивні, стійкі до атак роботизовані комунікаційні рішення.

Ключові слова: автономні роботизовані мережі, протоколи маршрутизації, системи зв'язку UAV та UGV, стійкі радіоканали.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток автономних робото-технічних платформ кардинально змінив сучасні системи зв'язку, які використовуються в розподілених кібер-фізичних середовищах. Серед таких технологій саме безпілотні літальні апарати (UAV – unmanned aerial

vehicles) та безпілотні наземні апарати (UGV – unmanned ground vehicles) стали ключовими елементами мережево-орієнтованих операцій як у цивільній, так і у військовій сферах [1, 2]. Такі платформи здатні виконувати розвідувальні, спостережні, картографічні, логістичні та бойові



завдання, діючи в умовах, що динамічно змінюються і зазвичай є ворожими. Як наслідок, надійний зв'язок між автономними вузлами стає одним із найважливіших технологічних завдань.

Сучасні технологічні тенденції свідчать про перехід від дистанційно керованих дронів, які працюють автономно, до розподілених мереж автономних повітряних і наземних платформ. У таких системах численні UAV і UGV взаємодіють через канали радіозв'язку, спільно виконуючи складні завдання, зокрема масштабне спостереження, розподілене зондування, скоординовані бойові операції, пошуково-рятувальні місії та розгортання тимчасової комунікаційної інфраструктури в умовах стихійних лих або на полі бою. Ці сценарії накладають жорсткі вимоги на комунікаційні мережі щодо підтримки мобільності вузлів, частих змін топології, гетерогенних можливостей зондування та обмежень енергоспоживання.

Традиційні мережі бездротового зв'язку не були розроблені для підтримки таких високодинамічних систем. Класичні протоколи маршрутизації, розроблені для статичних або відносно мобільних мереж, часто не здатні підтримувати стабільне з'єднання в мобільних конфігураціях ad-hoc через швидкий і непередбачуваний рух вузлів. Мережі UAV працюють у тривимірному просторі з принципово іншими моделями мобільності, ніж наземні системи, що призводить до появи та зникнення каналів зв'язку протягом коротких проміжків часу, а отже – до частих збоїв маршрутизації та збільшення втрат пакетів. Ця проблема набула критичного значення в сучасних конфліктах високої інтенсивності, де автономні платформи дедалі частіше використовуються як засоби розвідки, ударні системи та ретранслятори зв'язку, які працюють в умовах радіоелектронної боротьби, радіочастотних перешкод та кібератак.

Інтеграція методів штучного інтелекту та машинного навчання в мережеві протоколи є одним із найперспективніших підходів до вирішення цих проблем. Комунікаційні системи на базі штучного інтелекту дають змогу автономним вузлам навчатися на основі спостережень за навколишнім середовищем, прогнозувати майбутні стани мережі та динамічно адаптувати рішення щодо маршрутизації шляхом аналізу попередніх моделей переміщення, стану каналів та динаміки трафіку – що суттєво підвищує надійність доставки пакетів та зменшує затримку. Архітектури розподіленого зв'язку, в яких функції управління мережею децентралізовані та виконуються локально окремими вузлами, ще більше підви-

щують стійкість системи, усуваючи єдині точки відмови. Це особливо актуально для військових застосувань та гетерогенних багатодомених робототехнічних систем – включаючи UAV, UGV та морські платформи – а також для ройових конфігурацій, для яких потрібні високомасштабовані протоколи, здатні одночасно підтримувати сотні або тисячі взаємопов'язаних вузлів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Впродовж останніх двох десятиліть проблема забезпечення надійного зв'язку в високодинамічних радіомережах привертала значну увагу наукової спільноти. Поява UAV та розподілених робототехнічних систем прискорила дослідження в галузі мобільних мереж (MANET – mobile ad hoc networks) та повітряних мереж (FANET – flying ad hoc networks). За своєю динамічною топологією, обмеженою дальністю зв'язку, високою мобільністю вузлів та жорсткими енергетичними обмеженнями [3, 4] ці мережі суттєво відрізняються від традиційних систем радіозв'язку.

Перші дослідження в галузі мобільних мереж ad-hoc були зосереджені переважно на протоколах маршрутизації, розроблених для наземних мереж. Серед найбільш вивчених підходів – проактивні протоколи маршрутизації, реактивні протоколи маршрутизації та гібридні архітектури маршрутизації [5 – 7]. Проактивні протоколи, такі як Optimized Link State Routing (OLSR), використовують таблиці маршрутизації, в яких постійно зберігаються маршрути до всіх вузлів мережі. Такий підхід забезпечує швидку передачу даних, оскільки маршрути відомі ще до початку зв'язку. Однак проактивна маршрутизація створює додаткові витрати на керування, а це неефективно в мережах із топологією, яка швидко змінюється.

Реактивні протоколи маршрутизації, зокрема Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) та Dynamic Source Routing (DSR), були розроблені з метою зменшення навантаження. У цих протоколах маршрути визначаються лише тоді, коли вузол потребує передачі даних. Хоча такий підхід підвищує ефективність використання пропускну здатності, він збільшує затримку під час процедур визначення маршруту та може призвести до затримок у передачі даних у додатках, де час має вирішальне значення.

Гібридні протоколи маршрутизації намагаються поєднати переваги як проактивного, так і реактивного підходів. Наприклад, протокол Zone Routing Protocol (ZRP) підтримує проактивну інформацію про маршрутизацію в межах локальних зон, використовуючи при цьому реактивні

механізми для зв'язку з віддаленими вузлами. Такі підходи дозволяють досягти компромісу між навантаженням на маршрутизацію та затримкою зв'язку.

Хоча такі протоколи виявилися досить ефективними в класичних мережах MANET, подальші дослідження виявили значні обмеження при їх застосуванні до мереж на базі UAV [8, 9]. Мережі ad-hoc для UAV мають характеристики мобільності, значно відмінні від наземних систем. UAV зазвичай рухаються з більшою швидкістю, діють у тривимірному просторі та часто змінюють відносне положення. Ці фактори призводять до нестабільних каналів зв'язку та частих збоїв маршрутизації.

На основі цього дослідники запропонували кілька протоколів маршрутизації, спеціально розроблених для мереж UAV. Ці протоколи часто використовують географічну інформацію або прогнозування мобільності для підвищення стабільності маршрутів. Підходи на основі географічної маршрутизації використовують фізичне розташування вузлів для прийняття рішень щодо пересилання пакетів. У таких протоколах кожен вузол передає дані сусідам, які географічно знаходяться ближче до пункту призначення. Ця стратегія значно зменшує навантаження на систему маршрутизації, оскільки вузлам не потрібно вести глобальні таблиці маршрутизації.

Інший важливий напрям досліджень пов'язаний з алгоритмами прогнозування маршрутизації, які оцінюють майбутню топологію мережі на основі моделей мобільності. Оскільки траєкторії UAV часто проходять за заздалегідь визначеними маршрутами виконання завдань, прогнозні моделі можуть передбачати положення вузлів і обирати маршрути зв'язку, які залишаються стабільними протягом тривалішого часу. Такий підхід знижує ймовірність перебоїв у маршруті та підвищує надійність доставки пакетів.

Останнім часом інтеграція методів машинного навчання в мережеві протоколи вважається перспективним рішенням для високодинамічних бездротових мереж. Алгоритми машинного навчання дають змогу вузлам зв'язку аналізувати дані про мережу за минулий період, виявляти закономірності в мобільності вузлів та відповідно адаптувати стратегії маршрутизації. Зокрема, значну увагу привертає підкріплювальне навчання, оскільки воно дозволяє вузлам навчатися приймати оптимальні рішення щодо маршрутизації шляхом взаємодії з мережевим середовищем [10, 11].

У протоколах маршрутизації, основаних на підкріплювальному навчанні, кожен вузол діє як інтелектуальний агент, який оцінює якість різних маршрутів на основі таких показників, як коефіцієнт передачі пакетів, затримка передачі та споживання енергії. Згодом агент вдосконалює свою стратегію прийняття рішень, максимізуючи сукупні переваги, пов'язані з успішними результатами зв'язку. Такий адаптивний механізм дозволяє мережі ефективно реагувати на зміни топології та умов трафіку.

Інша група досліджень зосереджена на механізмах маршрутизації, заснованих на глибокому навчанні. Ці підходи використовують нейронні мережі для апроксимації складних функцій прийняття рішень, які визначають оптимальні шляхи зв'язку. Глибокі нейронні мережі здатні обробляти великі обсяги даних і виявляти приховані закономірності, які можуть бути непомітними за допомогою традиційних аналітичних моделей. Відповідно, протоколи маршрутизації на основі глибокого навчання можуть забезпечити кращу ефективність у великих UAV-мережах [12].

Окрім оптимізації маршрутизації, дослідники розглядали можливість використання штучного інтелекту для управління мережевими ресурсами, зменшення перешкод та динамічного розподілу спектра. Такі технології є особливо важливими для систем зв'язку UAV, котрі працюють у перевантажених електромагнітних середовищах. Адаптивне управління спектром дозволяє вузлам зв'язку динамічно обирати частотні діапазони з мінімальними перешкодами, тим самим підвищуючи надійність мережі та пропускну здатність [13].

Ще одним важливим напрямком досліджень є розробка архітектур комунікації роїв. У роєвих системах велика кількість UAV спільно виконують складні завдання, такі як розподілене зондування, моніторинг навколишнього середовища та скоординовані пошукові операції. Для забезпечення надійного зв'язку в таких роях потрібні масштабовані мережеві протоколи, здатні одночасно підтримувати сотні вузлів.

Дослідження в галузі комунікації роїв часто присвячені вивченню децентралізованих механізмів координації, в яких окремі UAV приймають локальні рішення на основі обмеженої інформації про стан мережі. Такий децентралізований підхід підвищує стійкість мережі, оскільки зв'язок може продовжуватися навіть у разі виходу з ладу або відключення деяких вузлів. Алгоритми розподіленого роєвого інтелекту часто поєднуються

з адаптивними протоколами маршрутизації для забезпечення надійного зв'язку в умовах невизначеності.

Інтенсивна еволюція сучасної війни ще більше активізувала дослідження в галузі стійких систем зв'язку для UAV. Сучасні військові конфлікти засвідчили стратегічне значення безпілотних платформ для розвідки, корекції вогню артилерії, радіоелектронної боротьби та операцій з нанесення точних ударів. Такі платформи мають діяти в умовах, коли канали зв'язку піддаються цілеспрямованому заглушенню, електронному придушенню та кібервтручанню.

Відповідно, сучасні дослідження дедалі більше зосереджуються на технологіях зв'язку, стійких до перешкод, та архітектурах мереж із функцією самовідновлення. Мережі із функцією самовідновлення автоматично переконфігурують маршрути зв'язку у разі втрати вузлів або порушення каналів зв'язку. Алгоритми маршрутизації на основі штучного інтелекту добре підходять для таких умов, оскільки можуть швидко адаптуватися до мінливих умов мережі.

Постановка завдання. Систематизація існуючих обмежень комунікаційних протоколів у розподілених автономних робототехнічних мережах та аналіз технологій маршрутизації на основі штучного інтелекту з метою підвищення стійкості зв'язку є одними з найактуальніших завдань у галузі тактичних систем зв'язку. Основна увага в дослідженні приділяється важливості формалізованої багаторівневої архітектури комунікаційних мереж UAV та UGV – включаючи фізичний канал, мережевий, транспортний, рівень маршрутизації та рівень застосунків – в рамках якої проявляються ключові фактори погіршення якості зв'язку. Актуальність проблеми зумовлена швидким розгортанням автономних робототехнічних платформ у критично вимогливих операційних середовищах – від військових до пошуково-рятувальних – де відмова навіть одного вузла зв'язку може призвести до зриву виконання завдання або втрати ситуаційної обізнаності. Метою цього дослідження є систематизація та класифікація обмежень протоколів маршрутизації у високодинамічних робототехнічних мережах, аналіз адаптивних механізмів маршрутизації на основі штучного інтелекту та обґрунтування ефективних стратегій стійкості зв'язку, спрямованих на зменшенні загальної вразливості мережі в умовах радіоелектронної боротьби та електромагнітних перешкод.

Виклад основного матеріалу дослідження. Автономні робототехнічні платформи, які вико-

ристовуються в сучасних операціях, створюють комунікаційні мережі, які значно відрізняються від традиційних радіосистем. Ці мережі мають низку характерних особливостей:

- мережі UAV та UGV характеризуються високою динамікою переміщення. Повітряні платформи можуть рухатися зі швидкістю, яка перевищує десятки метрів на секунду, одночасно змінюючи висоту та напрямок. Такі схеми руху призводять до постійних змін топології мережі та якості каналів зв'язку. На відміну від звичайних наземних мереж, де положення вузлів залишаються відносно стабільними, повітряні мережі потребують протоколів маршрутизації, здатних адаптуватися до змін топології, які відбуваються за дуже короткі проміжки часу;

- на канали зв'язку між автономними платформами впливають складні умови поширення сигналу. Радіосигнали, які передаються між повітряними апаратами, можуть зазнавати значних флуктуацій через багатопрореневе поширення, доплерівські зсуви та перешкоди в навколишньому середовищі. У міських або лісистих умовах затухання сигналу може суттєво зменшити дальність та надійність зв'язку;

- робототехнічні платформи зазвичай працюють в умовах значних енергетичних обмежень. Зокрема, UAV залежать від лімітованих бортових джерел живлення, які повинні забезпечувати роботу як систем руху, так і комунікаційного обладнання. Тому протоколи маршрутизації повинні мінімізувати комунікаційні накладні витрати та уникати непотрібних повторних передач з метою економії енергетичних ресурсів.

Ще однією важливою характеристикою є розподілений характер робототехнічних мереж. У багатьох сценаріях централізована інфраструктура зв'язку недоступна або ненадійна. Натомість автономні платформи повинні утворювати самоорганізовані мережі, здатні підтримувати зв'язок без зовнішнього контролю.

Такі мережі зазвичай називають самоконфігурованими робототехнічними мережами ad-hoc, у яких кожен вузол виконує як функції зондування, так і функції зв'язку. Вузли повинні бути здатні динамічно встановлювати канали зв'язку з сусідніми платформами та співпрацювати для ретрансляції даних до центрів управління місіями або інших підрозділів.

Натомість методи штучного інтелекту надають потужні інструменти для вирішення завдань, пов'язаних із динамічними мережевими середовищами. На відміну від класичних алгоритмів

маршрутизації, які базуються на статичних правилах або детермінованих метриках, протоколи маршрутизації на основі AI можуть адаптувати свою поведінку на основі спостережень у реальному часі та попередніх даних про мережу.

Один із найперспективніших підходів передбачає застосування алгоритмів навчання з підкріпленням. У цій моделі кожен мережевий вузол розглядається як інтелектуальний агент, який взаємодіє зі своїм середовищем і на основі досвіду вивчає оптимальні стратегії маршрутизації.

Процес прийняття рішень щодо маршрутизації можна представити як задачу послідовної оптимізації, в якій агент обирає шляхи зв'язку на основі даних про стан мережі. Ці дані можуть включати такі параметри, як – потужність сигналу між вузлами, затримка передачі пакетів, надійність каналу, моделі мобільності вузлів, доступність енергії.

Постійно оцінюючи результати своїх рішень щодо маршрутизації, агент поступово засвоює правила, яка максимізують довгострокову ефективність зв'язку. Такі механізми, засновані на навчанні, дозволяють мережі адаптуватися до мінливих умов без необхідності використання заздалегідь визначених таблиць маршрутизації або централізованого керування.

Інший перспективний напрямок пов'язаний із використанням глибоких нейронних мереж для прогнозування маршрутизації. Нейронні мережі можуть аналізувати великі обсяги мережевих даних для виявлення складних закономірностей у переміщенні вузлів та стані каналів. Прогнозуючи майбутні стани мережі, ці моделі дозволяють алгоритмам маршрутизації обирати шляхи зв'язку, які, ймовірно, залишатимуться стабільними протягом тривалішого часу.

Ця здатність до прогнозування значно зменшує частоту збоїв маршрутів та покращує загальну ефективність мережі.

Однією з найважливіших вимог до військових робототехнічних систем є здатність підтримувати надійний зв'язок в умовах радіоелектронної боротьби та перевантаження радіочастотного спектра. Ворог може намагатися порушити роботу каналів зв'язку шляхом створення перешкод, втручання або кібератак, спрямованих на мережеву інфраструктуру.

Для протидії цим загрозам сучасні архітектури зв'язку все частіше використовують механізми адаптивного керування радіозв'язком. Ці механізми динамічно коригують параметри передачі, такі як частота, рівень потужності, схема моду-

ляції та маршрут передачі, у відповідь на зміни в електромагнітному середовищі.

Протоколи маршрутизації на основі штучного інтелекту відіграють ключову роль у таких архітектурах, оскільки вони можуть швидко визначати маршрути зв'язку, уникаючи каналів із завадами або погіршеною якістю. Наприклад, якщо певний канал зв'язку стає ненадійним через перешкоди, алгоритм маршрутизації може автоматично переорієнтувати трафік через альтернативні вузли, розташовані поза межами ураженої зони. Завдяки динамічній адаптації до умов мережі та прогнозуванню майбутніх змін топології інтелектуальні механізми маршрутизації підвищують надійність зв'язку та зменшують операційні ризики.

Крім того, розподілені архітектури зв'язку підвищують живучість системи, усуваючи залежність від централізованих командних вузлів. Якщо певний вузол знищений або відключений, сусідні вузли можуть автономно реорганізувати топологію мережі та підтримувати потоки зв'язку.

Такі механізми самовідновлення мережі є особливо важливими в сучасних умовах бойових дій, де інфраструктура зв'язку може часто пошкоджуватися або порушуватися.

Райові технології є одним із найперспективніших напрямків у розробці автономних систем. У райових архітектурах велика кількість невеликих робототехнічних платформ спільно виконують завдання. Комунікація в таких системах повинна забезпечувати швидкий обмін інформацією між численними вузлами, мінімізуючи при цьому перевантаження мережі.

Протоколи маршрутизації на основі штучного інтелекту дозволяють ройовим мережам підтримувати ефективні комунікаційні структури навіть тоді, коли кількість платформ, залучених до процесу, стає дуже великою. Замість того, щоб використовувати глобальні таблиці маршрутизації, ройові мережі часто застосовують локальні механізми прийняття рішень, за якими кожен вузол взаємодіє переважно з найближчими сусідами.

Такий підхід значно покращує масштабованість, оскільки рішення щодо маршрутизації базуються на локальній інформації, а не на глобальних даних про мережу.

Ройові комунікаційні архітектури можуть також отримати переваги від ієрархічних мережевих структур. У таких системах певні UAV діють як комунікаційні ретранслятори або тимчасові базові станції, утворюючи магістральні мережі, які з'єднують кілька ройових кластерів. Наземні робототехнічні системи можуть отримати доступ

до цих повітряних комунікаційних ретрансляторів для обміну даними з іншими пристроями або командними центрами. Інтеграція комунікаційних рівнів UAV та UGV створює багатодоменну робототехнічну мережу, здатну підтримувати складні спільні місії.

Аналіз існуючих підходів до маршрутизації свідчить, що класичні протоколи, розроблені для традиційних мобільних мереж ad-hoc, є недостатніми для забезпечення зв'язку в мережах, утворених високомобільними платформами. Мережі UAV характеризуються швидкими змінами топології, непередбачуваними умовами зв'язку та значними енергетичними обмеженнями. Ці фактори призводять до частих перебоїв у зв'язку при застосуванні традиційних механізмів маршрутизації.

Крім того, середовище функціонування сучасних робототехнічних систем часто характеризується складними електромагнітними умовами, зумовленими природними перешкодами, перевантаженням спектру та цілеспрямованими діями в рамках радіоелектронної боротьби. За таких обставин протоколи зв'язку повинні мати розширені адаптивні можливості, які дозволяють підтримувати надійну передачу даних попри зовнішні перешкоди.

Аналіз показав, що інтеграція методів штучного інтелекту в механізми маршрутизації мережі є одним із найперспективніших напрямків для вирішення цих завдань. Протоколи маршрутизації на основі AI надають можливість аналізувати умови середовища, навчатися на попередній поведінці мережі та динамічно адаптувати стратегії зв'язку. Такі механізми дозволяють вузлам мережі передбачати потенційні збої зв'язку та проактивно обирати стабільніші маршрути зв'язку.

Однією з важливих переваг інтелектуальних протоколів маршрутизації є їхня здатність працювати в середовищах з розподіленим прийняттям рішень. Замість того, щоб покладатися на централізовані системи керування мережею, кожен вузол у мережі може самостійно оцінювати умови зв'язку та брати участь у загальному процесі маршрутизації. Цей децентралізований підхід значно підвищує живучість мережі, особливо у військових сценаріях, де інфраструктура зв'язку може бути частково знищена або порушена.

Інший ключовий результат стосується важливості архітектур мереж із самовідновленням. Автономні робототехнічні системи, розгорнуті в експлуатаційних середовищах, повинні бути здатні підтримувати зв'язок навіть тоді, коли деякі вузли виходять з ладу або канали зв'язку порушуються.

Інтелектуальні протоколи маршрутизації дають змогу мережам автоматично переконфігурувати свою топологію шляхом динамічного перерозподілу потоків зв'язку через альтернативні вузли.

Механізми маршрутизації на основі штучного інтелекту особливо підходять для мереж роїв, оскільки вони дозволяють приймати рішення на місцевому рівні на основі спостережень за навколишнім середовищем та інформації про стан мережі. Такий підхід дозволяє системам роїв підтримувати ефективність зв'язку навіть при збільшенні кількості учасників [14, 15].

З практичної точки зору, розробка стійких протоколів зв'язку для систем UAV і UGV має значний вплив на сучасні військові операції. Недавні збройні конфлікти показали ефективність безпілотних систем у розвідці, наведенні артилерії та місіях радіоелектронної боротьби. Ці платформи значною мірою покладаються на обмін даними в режимі реального часу між датчиками, операторами та командними підрозділами. Тому стабільність і безпека комунікаційних мереж безпосередньо впливають на оперативну ефективність таких систем.

Використання інтелектуальних протоколів маршрутизації може значно підвищити надійність зв'язку на полі бою, дозволяючи мережам адаптуватися до динамічних оперативних умов. Наприклад, у середовищах, де радіочастоти піддаються перешкодам або глушенню, алгоритми на основі штучного інтелекту можуть автоматично визначати альтернативні маршрути зв'язку або частотні канали, котрі забезпечують більш стабільне з'єднання.

Ще однією важливою практичною перевагою є можливість формування багаторівневих комунікаційних інфраструктур, що складаються з повітряних ретрансляційних платформ, наземних робототехнічних систем та мобільних командних вузлів. У таких архітектурах UAV можуть виступати в ролі тимчасових комунікаційних ретрансляторів, які розширюють покриття наземних мереж. Цей підхід є особливо цінним у складній місцевості, де традиційна комунікаційна інфраструктура недоступна або пошкоджена.

Інтеграція гетерогенних автономних систем – зокрема повітряних, наземних та морських платформ – також потребує розробки уніфікованих протоколів зв'язку, здатних підтримувати міждоменну взаємодію. Підходи до маршрутизації на основі штучного інтелекту забезпечують гнучку основу для досягнення такої інтеграції, оскільки можуть адаптуватися до різних характеристик платформ та вимог до зв'язку.

Незважаючи на прогрес, досягнутий у галузі інтелектуальних протоколів маршрутизації, низка важливих наукових завдань залишається невирішеною. Одне з основних обмежень стосується обчислювальних вимог алгоритмів машинного навчання. Багато сучасних моделей AI потребують значних обчислювальних ресурсів, що може бути складно реалізувати на легких автономних платформах з обмеженими обчислювальними можливостями.

Інша проблема пов'язана з доступністю навчальних даних для алгоритмів машинного навчання. У динамічних операційних середовищах умови мережі можуть швидко змінюватися, що ускладнює використання раніше зібраних наборів даних. Тому майбутні дослідження повинні зосередитися на розробці алгоритмів онлайн-навчання, здатних адаптуватися до нових умов мережі без необхідності тривалого попереднього навчання.

Безпека також залишається критично важливим питанням. Автономні комунікаційні мережі повинні бути захищені від кібератак, перехоплення даних та зловмисних вузлів, які намагаються порушити роботу мережі. Інтеграція механізмів виявлення аномалій на основі AI може забезпечити ефективні інструменти для виявлення та мінімізації таких загроз.

Тому майбутні напрямки досліджень слід зосередити на кількох ключових сферах:

- розробка легких моделей машинного навчання, спеціально призначених для вбудованих робототехнічних платформ, буде важливою для забезпечення адаптивної маршрутизації в режимі реального часу;
- необхідні подальші дослідження в галузі автономного управління спектром, де алгоритми

AI динамічно обирають частоти зв'язку у відповідь на перешкоди та перевантаження спектру;

- розробка стратегій зв'язку проти заглушення на основі моделей прогнозування поведінки мережі ставатиме дедалі важливішою у міру розвитку можливостей радіоелектронної боротьби.

Інший перспективний напрямок пов'язаний зі створенням гібридних архітектур зв'язку, що поєднують мережі UAV із супутниковими системами зв'язку та наземною інфраструктурою зв'язку. Такі гібридні мережі можуть забезпечити глобальну зв'язність, зберігаючи при цьому стійкість до локальних перебоїв.

Висновки. Проведене дослідження вказує на необхідність комплексного підходу до розробки протоколів маршрутизації для розподілених автономних робототехнічних мереж, що дозволяє оцінювати ефективність каналу зв'язку по всьому шляху взаємодії між вузлами UAV і UGV. Формулювання чітко структурованої класифікації обмежень традиційних протоколів маршрутизації у поєднанні з детальним описом адаптивних механізмів маршрутизації на основі штучного інтелекту та ефективних заходів протидії електронному глушінню забезпечує цілісне розуміння вразливостей систем зв'язку, сприяє виявленню критичних точок відмови та створює основу для розробки проактивних стратегій захисту зв'язку в бойових умовах. Такий підхід дозволяє не лише виявляти потенційні вектори погіршення якості зв'язку на різних рівнях мережевої архітектури, а й прогнозувати їх розвиток у контексті динамічної еволюції експлуатаційного середовища, що є особливо важливим для проектування адаптивних та відмовостійких систем зв'язку для розподілених робототехнічних платформ.

Список літератури:

1. Bekmezci I., Sahingoz O.K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*, 11(3), 2013, pp. 1254–1270.
2. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Nam Y.H., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2019, pp. 2334–2360.
3. Jawhar I., Mohamed N., Al-Jaroodi J., Agrawal D.P., Zhang S. Communication and networking of UAV-based systems: Classification and associated architectures. *Journal of Network and Computer Applications*, 84, 2017, pp. 93–108.
4. Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2), 2016, pp. 1123–1152.
5. Perkins C.E., Royer E.M. Ad-hoc on-demand distance vector routing. *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 1999, pp. 90–100.
6. Clausen T., Jacquet P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). RFC 3626, IETF, 2003, pp. 1–75.
7. Haas Z.J., Pearlman M.R., Samar P. The Zone Routing Protocol (ZRP) for ad hoc networks. *IETF Internet Draft*, 2002, pp. 1–27.

8. Sahingoz O.K. Networking models in flying ad-hoc networks (FANETs): Concepts and challenges. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 74(1–2), 2014, pp. 513–527.
9. Khuwaja A.A., Chen Y., Zhao N., Alouini M.S., Dobbins P. A survey of channel modeling for UAV communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(4), 2018, pp. 2804–2821.
10. Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D., Rusu A., Veness J., Bellemare M. Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518(7540), 2015, pp. 529–533.
11. Sutton R.S., Barto A.G. Reinforcement Learning: An Introduction. MIT Press, Cambridge, 2018, 552 p.
12. Zhu J., Wang X. Model and protocol for energy efficient routing in heterogeneous multi-hop wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 12(7), 2013, pp. 1294–1307.
13. Shi W., Zhou H., Li J., Xu W., Zhang N., Shen X. Drone assisted vehicular networks: Architecture, challenges and opportunities. *IEEE Network*, 32(3), 2018, pp. 130–137.
14. Akyildiz I.F., Wang X., Wang W. Wireless mesh networks: A survey. *Computer Networks*, 47(4), 2005, pp. 445–487.
15. Sharma V., Kumar R. Cooperative frameworks and network models for flying ad hoc networks: A survey. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 29(4), 2017, e3931.

Movchan K.O. CURRENT TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF ADAPTIVE COMMUNICATION PROTOCOLS FOR TACTICAL UAV AND UGV NETWORKS

This article examines the challenges of ensuring reliable communication in heterogeneous systems of distributed autonomous robotic networks, which are characterized by exponential growth in the number of nodes and their integration into critical military and civilian infrastructure. The focus is on the high mobility of UAV and UGV nodes, the dynamic nature of network topology changes, and the limited spectral and energy resources of autonomous platforms, which renders traditional routing protocols inadequate and creates significant risks to communication stability in areas such as reconnaissance, fire control, electronic warfare, and precision strike operations.

Current trends in the development of communication threats are analyzed, in particular targeted radio frequency jamming, electronic suppression, and cyberattacks on network infrastructure, which often remain undetected due to the lack of integrated adaptive monitoring systems. Particular attention is paid to the vulnerabilities of centralized communication architectures, where the destruction of individual nodes leads to cascading network failures, as well as the fragmentation of robotic ecosystems, which complicates the deployment of unified communication management systems.

Key vectors for the degradation of communication quality at various levels of the distributed robotic network architecture have been identified, covering the physical channel, routing protocol, and application interaction levels. The article examines hardware vulnerabilities at the radio interface level, network-level attacks, including jamming, as well as software weaknesses in routing decision-making mechanisms under conditions of incomplete topological information.

Multi-level approaches to adaptive routing are proposed, which include AI-based mechanisms—reinforcement learning algorithms and deep neural networks for predictive routing—alongside self-healing network architectures, distributed spectrum management, and anti-jamming communication strategies. The necessity of adaptive approaches in the context of specific robotics deployments is emphasized, including swarm systems, multi-domain heterogeneous platforms, and UAV-based relay infrastructures. It is concluded that a comprehensive approach to designing communication protocols for distributed robotic networks, which takes into account network multilayering, platform-specific operational requirements, and computational resource constraints, is of critical importance. Formulating a clearly structured classification of routing constraints, combined with a detailed description of AI-based adaptation mechanisms and effective countermeasures against electronic jamming, provides a comprehensive understanding of communication system vulnerabilities, facilitates the identification of critical points of failure, and creates a foundation for developing proactive communication protection strategies that enable the prediction of threats and the design of adaptive, attack-resistant robotic communication solutions.

Keywords: *autonomous robotic networks, routing protocols, UAV and UGV communication systems, resilient radio channels.*

Дата першого надходження статті до видання: 22.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026