УДК 621.396.96:629.7
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/15

Середа С.С.
https://orcid.org/0009-0008-0460-1678
Харківський національний університет радіоелектроніки

Кравченко П.О.
https://orcid.org/0000-0002-0456-3295
Харківський національний університет радіоелектроніки

МЕТОДИ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ МІЖ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ РОЮ

У цій статті досліджуються сучасні методи та технології бездротової передачі даних між безпілотними літальними апаратами (БПЛА) у складі рою, що є критичним питанням для забезпечення ефективної координації та взаємодії дронів під час виконання різноманітних задач. Розглядаються основні концепції побудови літаючих спеціалізованих мереж (Flying Ad-Hoc Networks, FANET), які характеризуються високою мобільністю вузлів у просторі, низькою щільністю мережі та швидкою зміною топології, що відрізняє їх від традиційних мереж MANET та транспортних мереж VANET.

Детально аналізуються технології короткого діапазону, такі як Wi-Fi на базі стандарту IEEE 802.11 з mesh-топологією для швидкої передачі відео та ZigBee (IEEE 802.15.4) для ефективного енергоспоживання під час передачі телеметрії з дальністю до 100 метрів. Розглядається використання систем оптичного позиціонування для забезпечення безпеки у щільних формаціях та можливість інтеграції мереж 4G LTE та 5G з пропускною здатністю до 10 Гбіт/с та затримкою менше 1 мс для підтримки machine-to-machine комунікацій. Особлива увага приділяється протоколам маршрутизації FANET, включаючи реактивні протоколи AODV та DSR, що встановлюють маршрути лише на вимогу (on-demand), проактивний протокол OLSR з концепцією багатоточкових ретрансляторів, та гібридний підхід типу Reactive-Greedy-Reactive. Досліджуються архітектури мереж БПЛА-роїв, а саме: централізовані з використанням базових станцій, децентралізовані з прямими каналами UAV-to-UAV та ієрархічні мережі з підтримкою кластеризації вузлів. Розглядаються питання енергоефективності для збільшення часу польоту.

Проаналізовано перспективи використання супутникових та стільникових мереж для використання БПЛА на вкрай великих відстанях. Результати дослідження показують, що вибір найоптимальнішого методу передачі даних залежить від різноманітних вимог виконуваної задачі, які можуть включати в себе дальність зв'язку, швидкість передачі даних, енергоефективність тощо. Гібридні підходи та біоінспіровані алгоритми краще адаптуються до змін топології у високодинамічних мережах. Вони забезпечують найкращу надійність та гнучкість для складних задач, які стоять перед БПЛА рою.

Ключові слова: *БПЛА-рій, бездротова передача даних, FANET, Wi-Fi, ZigBee, протоколи маршрутизації, mesh-мережі, оптичне позиціонування.*

Постановка проблеми. Сучасні безпілотні системи дедалі рідше працюють поодинці – натомість операції планують із розрахунком на групу апаратів, які діють скоординовано. Такий підхід, відомий як роєва парадигма, дозволяє покрити велику територію за короткий час, забезпечити взаємне резервування і підвищити загальну стійкість системи до відмов окремих вузлів. Але за цими перевагами стоїть складна технічна проблема: як організувати надійний зв'язок між десятками або сотнями апаратів, що постійно рухаються у тривимірному просторі?

На відміну від класичної схеми «дрон – наземна станція», де топологія стабільна і передбачувана, рій є динамічною системою. Апарати змінюють взаємне розташування, частина з них може тимчасово втрачати зв'язок із сусідами, а деякі вимушені ретранслювати чужі дані через себе. При цьому різні компоненти місії ставлять різні вимоги до каналу: команди управління потребують мінімальної затримки, відеопотік – високої пропускної здатності, телеметрія – енергоефективності. Знайти технологію, яка однаково добре задовольняла б усім цим вимогам одночасно,

© Середа С.С., Кравченко П.О., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

неможливо – а отже, постає завдання їх розумного комбінування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика комунікацій між дронами у складі рою активно досліджується з початку 2010-х років. Фундаментальна робота Бекмезчі та співавторів [1] заклала концептуальну основу, ввівши термін Flying Ad-Hoc Network і систематично описавши, чим FANET відрізняється від наземних MANET та транспортних VANET. Автори показали, що класичні протоколи, розроблені для відносно повільних наземних вузлів, виявляються малоефективними в умовах високої мобільності та низької щільності мережі. Ця робота досі залишається відправною точкою для переважної більшості досліджень у даній галузі.

Огляд Санчес-Гарсіа та ін. [2] охоплює широкий спектр технологій для багатошляхових повітряних і водних мереж. Автори розглядають не тільки теоретичні аспекти, а й практичні виклики реалізації, включаючи вибір модуляції, організацію mesh-топологій та інструменти тестування. Особливу цінність представляє порівняльний аналіз енергоефективності різних протоколів – аспект, критичний для малих платформ з обмеженою автономністю.

Хайят та ін. [3] детально дослідили можливості інтеграції стільникових мереж у контур управління БПЛА. Автори показали, що 4G LTE вже достатній для базової телеметрії, а 5G відкриває принципово нові можливості завдяки меншій затримці і підтримці massive machine-type communications. Разом із тим у роботі зазначено головне обмеження: наземні базові станції мають антени, орієнтовані донизу для обслуговування наземних користувачів, що суттєво погіршує покриття на висотах польоту БПЛА.

У дослідженні Талеб та співавторів [4] детально розглядається архітектура підтримки сервісів БПЛА у мобільних мережах 5G та майбутніх поколінь. Автори пропонують комплексну структуру, яка для ефективного управління вимагає координації між ключовими учасниками процесу: операторами БПЛА, операторами мобільного зв'язку, хмарними провайдерами та системами управління повітряним рухом дронів (наприклад, UTM). Головний акцент у роботі зроблено на використанні концепції мережевого нарізання (network slicing) та об'єднанні ресурсів через кілька адміністративних доменів різних мобільних операторів.

Питанням маршрутизації присвячено оглядову роботу Арафат та Мох [5], де автори послідовно порівнюють реактивні, проактивні та гібридні протоколи стосовно БПЛА-мереж. Особливу увагу приділено алгоритмам, які демонструють кращу адаптивність до непередбачуваних змін топології порівняно з класичними рішеннями.

Попри чималий обсяг публікацій, у літературі бракує узагальненого порівняльного аналізу, який би систематизував технології передачі даних у прив'язці до типових сценаріїв застосування роїв та обмежень реальних платформ – що й становить актуальність цього дослідження.

Постановка завдання. Мета статті - систематизація методів бездротової передачі даних для БПЛА-роїв, виявлення переваг і обмежень основних технологій та формулювання практичних орієнтирів для їх вибору залежно від специфіки виконуваної задачі.

Досягнення цієї мети передбачає вирішення кількох взаємопов'язаних завдань. По-перше, слід з'ясувати, чим FANET принципово відрізняються від класичних бездротових мереж і які виклики це створює для розробників. По-друге, необхідно розглянути технології фізичного рівня – від Wi-Fi і ZigBee до стільникових мереж – з точки зору їх придатності для різних типів даних. По-третє, важливо проаналізувати протоколи маршрутизації, адаптовані до високої мобільності вузлів. Нарешті, слід узагальнити практичний досвід побудови гібридних комунікаційних стеків, що поєднують кілька технологій у єдиній системі.

Виклад основного матеріалу. Щоб зрозуміти специфіку комунікацій у БПЛА-роях, варто почати з того, що робить їх принципово відмінними від звичних бездротових мереж. У класичній схемі дрон підключається до наземної станції – топологія проста, відстань передбачувана, зв'язок двосторонній. Рій – зовсім інша картина. Тут немає єдиного центру, натомість кожен апарат одночасно є джерелом даних і ретранслятором для сусідів. Така архітектура, відома як Flying Ad-Hoc Network, повинна самоорганізовуватись буквально на льоту [1, с. 1255]. Вузли постійно рухаються у трьох вимірах зі швидкостями до сотень кілометрів на годину, топологія змінюється кожні кілька секунд, а щільність мережі зазвичай нижча, ніж у наземних MANET [1, с. 1256-1258]. Це означає, що маршрут, знайдений секунду тому, може вже не існувати – і протокол повинен це враховувати.

Технології фізичного рівня можна класифікувати за дальністю покриття та складністю. Wi-Fi на базі стандарту IEEE 802.11 залишається найпоширенішим вибором там, де апарати діють

у межах пари сотень метрів один від одного і є потреба у відеопотоці. Стандарт 802.11s дозволяє організувати mesh-топологію, де вузли автоматично будують маршрути і перемикаються на резервні шляхи при розриві зв'язку [2, с. 48]. Головний недолік Wi-Fi у роєвому контексті – порівняно високе енергоспоживання. Для платформ вагою до кілограма кожен міліампер-год на рахунку, і витрачати енергію на підтримку Wi-Fi-модуля в активному режимі не завжди доречно.

ZigBee (IEEE 802.15.4) проектувався для сенсорних мереж, де дані невеликі, а батарея має служити місяцями. У контексті БПЛА-роїв ZigBee ідеально підходить для телеметрії: передача координат, висоти, залишку заряду, швидкості – все те, що не вимагає широкої смуги, але має надходити регулярно і надійно. Модулі типу XBee Pro на частоті 2,4 ГГц забезпечують дальність до 100 метрів на відкритому просторі при споживанні в десятки разів нижчому, ніж у Wi-Fi [2, с. 48-50]. Підтримка mesh-топології і кластерного дерева дозволяє будувати самоорганізовані мережі навіть без централізованого координатора – що критично важливо для децентралізованих роїв.

Стільникові мережі можна використовувати як альтернативу власній інфраструктури. Використання 4G LTE для зв'язку всередині рою – це підхід, який знімає проблему побудови власної мережі там, де є покриття оператора. Для базової телеметрії вимоги до пропускної здатності є мінімальними і становлять близько 24 кбіт/с, а розмір пакетів керування може складати лише близько 11 байтів [3, с. 2649]. Технології стільникового зв'язку, такі як LTE зі швидкістю передачі даних близько 300 Mbps, цілком здатні забезпечити такі показники з досить низькою затримкою у 5 ms [3, с. 2654]. Водночас 5G відкриває якісно нові можливості: максимальна швидкість до 10 Гбіт/с та затримка менше мілісекунди дозволяє будувати системи з реактивним зворотним зв'язком, а підтримка massive machine-type communications природно відповідає потребам роїв із десятками одночасно підключених апаратів [4]. Головне обмеження полягає в архітектурі самої інфраструктури: базові станції мають антени, які орієнтовані донизу для обслуговування наземних користувачів, тому на висотах 50–200 метрів сигнал часто нестабільний або взагалі відсутній [3, с. 2653–2655]. Це робить стільникові мережі прийнятним рішенням для міських операцій на невеликих висотах, але малопридатним для польотів за межами міст або на великих висотах.

Системи оптичного позиціонування (наприклад, інфрачервоні камери) демонструють сантиметрову точність у контрольованих умовах [2, с. 48], що задовольняє потребу у високоточному визначенні розташування для роботи у щільних формаціях. Для щільних формацій, де дрони летять на відстані метрів один від одного, така точність є вимогою безпеки – адже помилка навігації може призвести до зіткнення.

Підсумуємо всі вище описані технології фізичного рівня (табл. 1) [2, с. 48–50; 3, с. 2649, 2654; 4].

Дальність, пропускна здатність та затримка у технології Wi-Fi на базі стандарту IEEE 802.11s залежить від кількості вузлів та підключених пристроїв, тому наведення подібної інформації у таблиці не буде відображати реальну картину.

Важливим аспектом фізичного рівня є особливості радіопоширення у середовищі БПЛА. Дослідження показали, що для каналів UAV-to-UAV модель двопроменевого відбиття від поверхні землі є точнішою за модель вільного простору, а на малих висотах виникають так звані сірі зони з підвищеним рівнем замирань [1, с. 1260]. Вибір адекватної моделі завмирання залежить від умов місії: модель Релея краще описує канали на малих висотах у щільній забудові, тоді як моделі Накагамі-m та Вейбулла з підвищеними параметрами завмирання є більш відповідними для польотів на великих висотах у відкритому просторі [1, с. 1261].

Тип антени є ще одним критичним чинником ефективності комунікацій. Всеспрямовані антени не вимагають інформації про місцезнаходження сусідніх вузлів і прості у застосуванні, проте мають коротшу дальність і вищу схильність до радіозавад. Спрямовані антени забезпечують більшу дальність передачі, вищу просторову повторюваність каналу та кращий захист від навмисних перешкод, але потребують постійного відстеження координат сусідів [1, с. 1261–1262]. У середовищах FANET спрямовані антени мають

Таблиця 1

Нагляне порівняння технологій фізичного рівня

Технологія	Стандарт	Дальність	Пропускна здатність	Затримка	Енергоспоживання
Wi-Fi	802.11s	-	-	-	високе
ZigBee	802.15.4	до 100 м	250 кбіт/с	15 мс	дуже низьке
4G LTE	LTE	-	300 Мбіт/с	5 мс	високе
5G	NR	-	10 Гбіт/с	1 мс	дуже високе

явні переваги: збільшена дальність зменшує кількість ретрансляційних переходів і знижує наскрізну затримку, що є критично важливим для систем моніторингу у реальному часі.

Глибша інтеграція БПЛА із мережами 5G потребує не лише фізичного покриття, а й спеціалізованої архітектурної підтримки. Концепція мережевого нарізання (network slicing) дозволяє оператору виділити для рою БПЛА окремий мережевий зріз із гарантованими параметрами якості обслуговування: заданою максимальною затримкою для командного каналу і мінімальною пропускною здатністю для передачі відео [4, с. 221]. Зріз може охоплювати одночасно ядро мережі, транспортний сегмент, радіодоступ і хмарні ресурси, формуючи наскрізний логічний канал від оператора БПЛА до кожного апарату рою [4, с. 222].

Також велику роль грає архітектура мереж, організація зв'язку всередині рою може будуватись за кількома принципово різними схемами (табл. 2) [1, с. 1262–1264].

Централізована модель передбачає, що всі БПЛА підключені до наземної або повітряної базової станції через канали UAV-to-Infrastructure (U2I). Станція координує обмін даними, приймає рішення про маршрутизацію і видає команди управління. Така архітектура проста в реалізації і добре керується, але має очевидну вразливість: відмова станції паралізує весь рій [1, с. 1262-1264]. Децентралізована модель позбавлена цього недоліку – кожен апарат рівноправний і підтримує прямий зв'язок із сусідами через канали UAV-to-UAV (U2U). Рішення про маршрутизацію приймаються локально, що підвищує стійкість до відмов окремих вузлів. Ієрархічна кластерна архітектура намагається поєднати переваги обох підходів: рій ділиться на групи, всередині кожної є тимчасовий лідер, а обмін між групами йде через лідерів вищого рівня [1, с. 1263-1264]. Такий підхід добре масштабується і зберігає часткову децентралізацію.

Канальний рівень (MAC) також потребує спеціалізованих рішень для FANET. Протокол AMUAV (Adaptive MAC Protocol Scheme for UAVs) надсилає службові пакети через всеспрямовану антену, а пакети даних – через спрямовану, що одночасно зберігає широке охоплення для управління і ефективну передачу корисного навантаження, покращуючи пропускну здатність, наскрізну затримку та частоту бітових помилок [1, с. 1262]. Інший підхід використовує токен-доступ разом із повнодуплексними радіомодулями та схемою прийому кількох пакетів (multi-packet reception): токенова структура усуває колізії при оновленні інформації про стан каналу та знижує затримку [1, с. 1262]. Оскільки в FANET, на відміну від MANET, обмежень за енергоспоживанням для великих БПЛА практично немає, є можливість використовувати складніше апаратне забезпечення для реалізації таких розвинутих MAC-механізмів.

Протоколи маршрутизації, які адаптовані до польотної динаміки, виграють у класичних протоколів MANET – AODV, DSR, OLSR. Вони розроблялись для наземних вузлів з помірною мобільністю BICSF (табл. 3) [5, с. 99703–99712].

У FANET ці протоколи швидко деградують [5, с. 99701]: маршрут, знайдений AODV секунду тому, може вже не існувати, якщо вузли переміщаються зі швидкістю 50–100 км/год [5, с. 99696]. Реактивні протоколи (AODV, DSR) встановлюють маршрут лише за потреби – це знижує службовий трафік, але збільшує затримку першої передачі [5, с. 99704]. Проактивний OLSR постійно підтримує актуальні таблиці маршрутизації, використовуючи концепцію багатоточкових ретрансляторів (multipoint relays) для зменшення флудингу. Це знижує затримку встановлення з'єднання, але ціною постійного обміну службовими повідомленнями, що робить його неефективним у високодинамічних мережах [5, с. 99703].

Позиційні протоколи маршрутизації (position-based routing) мають суттєву перевагу перед топологічними у мережах БПЛА: замість таблиць маршрутизації вони використовують GPS-координати вузлів, що знижує накладні витрати і підвищує масштабованість [5, с. 99705]. Протокол GPMOR застосовує модель Гаусса–Маркова для прогнозування майбутнього положення сусідніх вузлів і передає пакет тому, хто буде ближчим

Таблиця 2

Архітектури організації зв'язку всередині рою

Архітектура	Канал	Переваги	Недоліки
Централізована	U2I	проста реалізація; добре керується	відмова станції паралізує весь рій
Децентралізована	U2U	висока стійкість до відмов; локальна маршрутизація	складніша координація; вищі вимоги до протоколів
Ієрархічна кластерна	U2I + U2U	добре масштабується; часткова децентралізація	Складніший протокол; накладні витрати на вибір лідера

Таблиця 3

Порівняння протоколів маршрутизації

Протокол	Тип	Ключова особливість	Переваги	Недоліки
AODV	Реактивний	Маршрути встановлюються лише на вимогу (on-demand)	Низький службовий трафік	Затримка першої передачі
DSR	Реактивний	On-demand, маршрут зберігається у заголовку пакету	Низький службовий трафік	Затримка першої передачі
OLSR	Проактивний	Постійні таблиці маршрутизації; концепція багатоточкових ретрансляторів (MPR)	Низька затримка з'єднання	Постійний службовий трафік; Не ефективний при високій мобільності
Reactive-Greedy-Reactive	Гібридний	Географічне пересилання при наявності зв'язку та AODV при розривах	Адаптивність; Баланс між затримкою і трафіком	Вимагає геоданих
BICSF	Біоінспірований	Оптимальна кластеризація	Найкраща адаптивність;	Складність реалізації

до цілі у прогнозованому часовому вікні, а не тому, хто є найближчим у поточний момент [5, с. 99708]. Для розріджених мереж, де прямий шлях відсутній, протокол LAROD поєднує жадібну пересилку з методом store-carry-and-forward: вузол утримує пакет у буфері і передає його, щойно з'являється відповідний ретранслятор [5, с. 99707]. Такий підхід забезпечує високий відсоток доставки навіть при нерівномірній щільності рою, проте є малоефективним для мікро-БПЛА через підвищені вимоги до енергоспоживання.

Гібридні протоколи, такі як Reactive-Greedy-Reactive, поєднують обидва підходи: використовують географічне пересилання там, де є зв'язність, і перемикаються на реактивний режим AODV при розривах маршруту [5, с. 99709]. Перспективним напрямком є біоінспіровані алгоритми – зокрема, на основі мурашиної колонії (Ant Colony Optimization), де «мурашки» (службові пакети) прокладають маршрути аналогічно до того, як комахи шукають їжу [5, с. 99712]. Водночас сучасні рішення, такі як гібридна схема BICSF (на основі поведінки світляків та криля), демонструють кращу адаптивність, дозволяючи ефективніше формувати кластери та знаходити оптимальні шляхи в умовах непередбачуваних змін топології [5, с. 99711]. Такі підходи демонструють кращу адаптивність до непередбачуваних змін топології порівняно з класичними статичними протоколами.

Кластерна маршрутизація (cluster-based routing) добре поєднується з ієрархічною архітектурою мережі і є доцільною для великих роїв. У протоколі CBRP зона операцій поділяється на квадратні осередки, лідер кожного осередку відповідає за маршрутизацію до базової станції і зменшує потребу у розгалуженому пошуку шляхів [5, с. 99710]. Схема BICSF розширює цей підхід гібридним алгоритмом оптимізації: алгоритм GSO формує кластери та обирає лідера з урахуванням залишкового заряду, а алгоритм KH забезпечує адаптивне управління складом кластера упродовж місії [5, с. 99711]. Важливим відкритим питанням залишається безпека маршрутизації: більшість існуючих протоколів не передбачають захисту від зовнішніх атак – зокрема, підробки маршрутних пакетів та відмови у обслуговуванні [5, с. 99715]. Виняток становить протокол PASER, який підтримує автентифікацію вузлів і здатний динамічного виявлення та ізоляції ненадійних вузлів в мережі рою [5, с. 99709].

Важливою складовою підтримки рою у мережах 5G є технологія периферійних обчислень (Multi-access Edge Computing, MEC). Розміщення програмного контролера польоту безпосередньо на межовому вузлі поблизу базової станції, а не у віддаленому хмарному центрі обробки даних, дозволяє суттєво знизити затримку між апаратом і контролером та підвищити надійність командного каналу – що є критично важливим для реактивних систем керування роєм [4, с. 223]. Застосування методів машинного навчання до зібраних даних телеметрії і завантаження мережі дає змогу прогнозувати потребу в ресурсах і автоматично масштабувати хмарну інфраструктуру ще до того, як виникне перевантаження [4, с. 224].

Транспортний рівень FANET становить окрему дослідницьку проблему. Традиційний протокол TCP є малопридатним у середовищах FANET через часті розриви з'єднань, значну затримку поширення і нестаціонарну якість каналу [1, с. 1264]. Стандарт JAUS (Joint Architecture for Unmanned Systems) пропонує спеціалізоване транспортне рішення – протоколи JTCP/JUDP, побудовані поверх TCP/UDP і адаптовані до особливостей безпілотних систем усіх типів: повітряних,

наземних та морських [1, с. 1264]. Паралельно стандарт НАТО STANAG 4586 визначає єдиний транспортний протокол для міжнародних мереж БПЛА, забезпечуючи взаємодію між наземними станціями управління, повітряними апаратами і системами командування C4I [1, с. 1265]. Разом ці стандарти формують нормативну основу, без якої неможлива сумісна робота роїв у міжнародних операціях.

Багатошляхова маршрутизація (multipath routing) є практичним інструментом підвищення стійкості рою до навмисних завад. Протокол JarmRout поєднує три метрики при виборі шляхів: якість радіоканалу за рівнем RSSI, завантаженість буфера MAC-рівня та просторову відстань між альтернативними маршрутами [5, с. 99710]. Просторова розв'язка шляхів гарантує, що одночасне придушення всіх маршрутів потребує від зловмисника значно ширшої зони подавлення, а частина пакетів доходить до адресата навіть в умовах активних перешкод. Разом з тим більшість поширених симуляторів – OPNET, NS-2 та NS-3 – не підтримують тривимірну комунікацію і не моделюють спеціалізовані канали між БПЛА [5, с. 99714]. Це свідчить про потребу у спеціалізованому симуляторі, здатному одночасно моделювати динаміку руху апаратів і мережевий стек FANET.

Крос-рівнева взаємодія є перспективним інструментом підвищення продуктивності FANET. Архітектура IMAC-UAV+DOLSR координує фізичний, канальний і мережевий рівні через спільний набір параметрів стану, що дозволяє динамічно коригувати налаштування передачі залежно від просторової орієнтації апарату (нахил, крен, рискання) і тим самим скорочує наскрізну затримку порівняно з незалежним налаштуванням рівнів [1, с. 1265]. Алгоритм meshed-tree поєднує функції MAC-рівня і мережевого рівня в єдиному протоколі: він одночасно формує кластери, маршрутизує дані до лідерів кластерів і розподіляє часові слоти у TDMA-структурі, що суттєво покращує частку успішно доставлених пакетів та наскрізну затримку [1, с. 1265]. Таким чином, крос-рівневий підхід дозволяє отримати синергетичний ефект, недосяжний при ізольованій оптимізації окремих рівнів.

Висновки. Проведений аналіз показує, що комунікація всередині БПЛА-рою – це завдання, яке не має єдиного універсального рішення. Кожна технологія займає свою нішу: Wi-Fi забезпечує високу пропускну здатність на коротких відстанях; ZigBee пропонує енергоефективну телеметрію; оптичні системи позиціонування дозволяють утримувати тісну формацію завдяки сантиметровій точності; стільникові мережі знімають проблему побудови власної інфраструктури там, де є покриття оператора.

Найбільш надійні практичні системи будуються не навколо однієї технології, а навколо їх продуманої комбінації. Гібридний комунікаційний стек – наприклад, ZigBee для обміну телеметрією плюс Wi-Fi для локального відеообміну та оптичні сенсори для точного утримання формації – покриває спектр потреб без компромісів у будь-якому окремому аспекті. Протоколи маршрутизації мережевого рівня також потребують адаптації до високої мобільності вузлів: класичні рішення типу AODV або OLSR дають прийнятні результати лише після модифікації, а найкращі показники демонструють гібридні підходи.

Перспективи подальших досліджень лежать у трьох площинах. По-перше, розробка протоколів, здатних масштабуватися до роїв із сотнями апаратів без суттєвої деградації якості зв'язку. По-друге, оптимізація енергоспоживання на рівні маршрутизації для підвищення загальної автономності вузлів під час тривалих місій. По-третє, побудова уніфікованих архітектур простір–повітря–земля, де супутниковий, стільниковий та внутрішньороєвий зв'язок органічно поєднуються в рамках єдиної керованої інфраструктури – що особливо актуально для операцій за межами зони покриття наземних мереж.

Список літератури:

1. Bekmezci İ., Sahingoz O. K., Temel Ş. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*. 2013. Vol. 11, No. 3. P. 1254-1270. DOI: https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.12.004

2. Sánchez-García J., García-Campos J. M., Arzamendia M. et al. A survey on unmanned aerial and aquatic vehicle multi-hop networks: Wireless communications, evaluation tools and applications. *Computer Communications*. 2018. Vol. 119. P. 43-65. DOI: https://doi.org/10.1016/j.comcom.2018.02.002

3. Hayat S., Yanmaz E., Muzaffar R. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18, No. 4. P. 2624-2661. DOI: https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2560343

4. Taleb T., Ksentini A., Hellaoui H., Bekkouche O. On supporting UAV based services in 5G and beyond mobile systems. *IEEE Network*. 2021. Vol. 35, No. 4. P. 220-227. DOI: https://doi.org/10.1109/MNET.021.2000358

5. Arafat M. Y., Moh S. Routing protocols for unmanned aerial vehicle networks: A survey. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 99694-99720. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2930813

Sereda S.S., Kravchenko P.O. METHODS OF WIRELESS DATA TRANSMISSION BETWEEN UNMANNED AERIAL VEHICLES IN A SWARM

This article explores modern methods and technologies of wireless data transmission between Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) within a swarm, which is a critical issue for ensuring effective drone coordination and interaction while performing various tasks. It examines the fundamental concepts of building Flying Ad-Hoc Networks (FANET), which are characterized by high spatial node mobility, low network density, and rapid topology changes, distinguishing them from traditional MANETs and vehicular VANETs.

Short-range technologies are analyzed in detail, such as Wi-Fi based on the IEEE 802.11 standard with a mesh topology for fast video transmission, and ZigBee (IEEE 802.15.4) for efficient power consumption during telemetry transmission with a range of up to 100 meters. The article considers the use of optical positioning systems to ensure safety in dense formations, as well as the potential integration of 4G LTE and 5G networks with bandwidths up to 10 Gbps and latency under 1 ms to support machine-to-machine (M2M) communications. Special attention is given to FANET routing protocols, including reactive protocols like AODV and DSR that establish routes strictly on-demand, the proactive OLSR protocol featuring the concept of multipoint relays, and a hybrid Reactive-Greedy-Reactive approach. UAV swarm network architectures are investigated, namely: centralized architectures using base stations, decentralized ones with direct UAV-to-UAV links, and hierarchical networks supporting node clustering. Energy efficiency issues aimed at extending flight time are also addressed.

The prospects of using satellite and cellular networks for operating UAVs over extremely long distances have been analyzed. The research results indicate that the choice of the optimal data transmission method depends on the various requirements of the specific task, which may include communication range, data transfer rate, energy efficiency, and so forth. Hybrid approaches and bio-inspired algorithms adapt better to topology changes in highly dynamic networks. They provide the highest reliability and flexibility for the complex tasks facing UAV swarms.

Keywords: *UAV swarm, wireless data transmission, FANET, Wi-Fi, ZigBee, routing protocols, mesh networks, optical positioning.*

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026