

Цзянь Юй¹, Цзян Хе², С. Г. Семенов³, С. І. Васюхно⁴

¹ Компанія «Zhongke Shuguang», Тяньцзінь, Китай

² Компанія «CNOOC Financial Shared Service Center PRD Branch», Шеньчжень, Китай

³ Університет Комісії національної освіти, Краків, Польща

⁴ Національний університет оборони України, Київ, Україна

ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПЕРЕДАЧІ ВІДЕОДАНИХ У МЕРЕЖАХ БПЛА

Анотація. Актуальність. Передавання відеоданих у комп'ютерних мережах БПЛА є складною міждисциплінарною задачею, в якій поєднуються особливості мобільних бездротових мереж, вимоги до обслуговування трафіку реального часу та прикладна значущість відеоінформації для виконання місії. **Об'єкт дослідження:** процес відеоданих у комп'ютерних мережах БПЛА. **Мета статті:** провести порівняльне дослідження сучасних методів передачі відеоданих у мережах БПЛА. **Результати дослідження.** Показано, що ефективність передавання відео в таких мережах визначається сукупною дією мобільності вузлів, динамічної топології, варіативності пропускної здатності, затримки, джитера, втрат пакетів, параметрів відеопотоку та ресурсних обмежень бортового і наземного сегментів. Установлено, що в мережах БПЛА якість передавання має оцінюватися не лише за середніми мережевими показниками, а й з урахуванням часової придатності та прикладної цінності відеоінформації. **Висновки.** Показано, що жоден із розглянутих підходів окремо не забезпечує повного врахування динаміки мережі, часової значущості відеоданих та ресурсних обмежень, характерних для мереж БПЛА.

Ключові слова: комп'ютерна система, БПЛА, відеопотік, штучний інтелект, динаміка мережі.

Вступ

Безпілотні літальні апарати впродовж останніх років перетворилися з вузькоспеціалізованих технічних засобів на універсальні мобільні платформи, що активно застосовуються у цивільній, промисловій, безпековій та дослідницькій сферах. Їх використання охоплює завдання аерофотозйомки, моніторингу інфраструктури, екологічного контролю, пошуково-рятувальних операцій, спостереження за динамічними об'єктами, а також забезпечення ситуаційної обізнаності в умовах обмеженого або небезпечного доступу людини до зони спостереження. На відміну від стаціонарних систем відеоспостереження, БПЛА поєднують мобільність, можливість швидкого розгортання та змінюваний ракурс спостереження, що істотно розширює функціональні можливості систем збору візуальної інформації.

У більшості практичних сценаріїв саме відеодані є основним типом інформації, що формується на борту безпілотного літального апарата та передається до наземного пункту керування або до іншого вузла мережі. Відеопотік забезпечує оператору або автоматизованій системі прийняття рішень безперервне уявлення про стан об'єкта спостереження, просторове оточення, характер змін у зоні місії та потенційні загрози. Тому ефективність функціонування БПЛА в багатьох випадках прямо залежить не лише від факту отримання відеоінформації, а й від її актуальності, повноти та придатності до подальшого аналізу в режимі, наближеному до реального часу.

Особливість відеоданих як інформаційного ресурсу полягає у поєднанні значного обсягу, часової впорядкованості та високої чутливості до затримок під час передавання. Якщо для окремих телеметричних повідомлень допустимими можуть бути порівняно невеликі затримки або епізодичні втрати, то для відеопотоку такі порушення безпосередньо впливають на

сприйняття сцени, точність виявлення подій та можливість оперативного реагування. У цьому контексті відеодані, що передаються в мережах БПЛА, слід розглядати не просто як сукупність пакетів, а як часово чутливий потік інформації, для якого визначальне значення мають узгодженість процесів формування, передавання, приймання та відтворення.

Специфіка функціонування БПЛА зумовлює й особливий характер комп'ютерної мережі, в межах якої здійснюється передавання відеоданих. Така мережа, як правило, не є статичною інфраструктурою з незмінними параметрами зв'язку, а формується як динамічне середовище взаємодії повітряних і наземних вузлів. Її стан змінюється під впливом траєкторії руху літальних апаратів, висоти польоту, радіоумов, перешкод, перевантаження каналів, зміни відстані між вузлами та особливостей використовуваних засобів передавання. Унаслідок цього параметри мережі можуть істотно варіюватися навіть у межах однієї місії, що створює додаткові труднощі для стабільної доставки відеоінформації.

Важливою рисою мереж БПЛА є поєднання обмежених ресурсів із підвищеними вимогами до оперативності. Бортові обчислювальні засоби, енергетичні можливості платформи, пропускна здатність каналу зв'язку та стійкість бездротового середовища утворюють сукупність факторів, які безпосередньо впливають на якість відеопередавання. При цьому завдання системи полягає не лише в транспортуванні максимальної кількості даних, а в забезпеченні такого режиму обміну, за якого відео зберігає прикладну цінність для спостереження, навігації або підтримки прийняття рішень. Саме тому для мереж БПЛА проблема передавання відеоданих набуває не суто телекомунікаційного, а комплексного системного характеру, що поєднує мережеві, обчислювальні та прикладні аспекти.

Окрему увагу слід приділити тому, що в мережах БПЛА відеопередавання часто виконує подвійну

функцію. З одного боку, воно забезпечує віддалене візуальне спостереження оператором, з іншого є джерелом даних для автоматизованої обробки, зокрема для задач виявлення об'єктів, класифікації ситуацій, супроводу цілей, навігаційної корекції або формування керуючих впливів. У таких умовах деградація параметрів передавання впливає не лише на суб'єктивну якість зображення, а й на достовірність машинного аналізу сцени. Це означає, що вимоги до передавання відеоданих визначаються не тільки класичними показниками якості обслуговування, а й функціональною роллю відео в загальному контурі роботи безпілотної системи.

Разом з тим мережі БПЛА не можна розглядати як однорідний клас середовищ передавання. Їх архітектура може охоплювати як прості схеми прямого зв'язку між одним безпілотником і наземною станцією, так і складні багатовузлові конфігурації з ретрансляцією, кооперацією кількох апаратів, розподілом функцій спостереження та використанням проміжних вузлів обробки. Ускладнення топології розширює можливості системи, проте одночасно підвищує варіативність часових характеристик передавання та ризик порушення цілісності відеопотоку.

На рис. 1 представлена схема передавання відеоданих у комп'ютерній мережі БПЛА як взаємодія бортового, мережевого та наземного сегментів.



Рис. 1. Передавання відеоданих у комп'ютерній мережі БПЛА як взаємодія бортового, мережевого та наземного сегментів

Різноманіття технічних сегментів обробки та передачі відеоданих з бортів БПЛА дає підставу зробити попередній висновок про те що, передавання відеоданих у комп'ютерних мережах БПЛА є складною міжdisciplinarily задачею, в якій поєднуються особливості мобільних бездротових мереж, вимоги до обслуговування трафіку реального часу та прикладна значущість відеоінформації для виконання місії. Саме ця сукупність характеристик визначає необхідність подальшого аналізу чинників, що впливають на якість передавання відеоданих, а також обґрунтовує потребу в пошуку спеціалізованих підходів, орієнтованих на умови функціонування мереж БПЛА.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх років в науковій літературі суттєво зріс інтерес до проблем передавання відеоданих у мережах БПЛА. При цьому дослідження розвиваються за кількома основними напрямками. Першим великим напрямком є оглядові роботи, присвячені систематизації проблем потокового відео БПЛА. Другий напрямок

це праці, орієнтовані на низьколатентну доставку відео через стільникові мережі. Третій напрямок охоплює дослідження з адаптивного відеострімінгу, периферійних обчислень та WebRTC-орієнтованих рішень. Крім того, є також праці, у яких відеопередавання аналізується в межах складніших архітектур 3D. У сукупності ці дослідження формують вагомий теоретичний і прикладний фундамент, однак не усувають потреби в окремому порівняльному дослідженні методів передавання відеоданих у мережах БПЛА за єдиною системою критеріїв.

У роботі [1] автори виконали цінну систематизацію досліджень, присвячених передаванню відео з БПЛА, і показали, що потокове відео БПЛА доцільно розглядати як окремий науковий напрям, у якому поєднуються питання кодування, доставки, якості сприйняття та функціонування бездротового середовища. Важливим є сам принцип комплексного розгляду задачі, а також акцент на тому, що проблема не зводиться ні лише до протокольного рівня, ні лише до відеокодеків. Водночас оглядовий характер цієї праці не передбачає жорсткого зіставлення методів передавання за спільними критеріями придатності саме до мереж БПЛА. Зокрема, у ній недостатньо виразно поставлено питання про системне порівняння методів за затримкою, джитером, стійкістю до зміни топології, втратами пакетів і часовою цінністю відеоінформації. Саме тому в нашій статті доцільно перейти від загального огляду до структурованого порівняльного аналізу методів.

У праці [2] позитивним є те, що автори значно поглиблюють оглядову рамку й переходять до benchmarking-підходу, аналізуючи іммерсивне стрімінгове відео, питання стандартизації, ефективності кодування, апаратних та програмних енкодерів, а також демонструючи тестовий стенд для 360°-стрімінгу через 5G. Це показує важливість урахування не лише транспортних характеристик, а й впливу формату відео, кодека, енергоспоживання та QoE. Разом з тим її фокус зміщений на 360°-стрімінг, тоді як у нашому дослідженні предметом є ширший клас методів передавання відеоданих у мережах БПЛА. Отже, хоча зазначена праця формує важливу методологічну основу, вона не замінює потреби в порівнянні традиційніших та практично поширених методів передавання відеоданих у БПЛА-мережах.

Значний інтерес становить стаття [3], у якій досліджено низьколатентну доставку відео для дистанційного пілотування літальних апаратів через стільникові мережі. Позитивним є те, що автори працюють не з абстрактною моделлю, а з реальним каналом доступу та показують, що затримка відтворення нижче 300 мс для Full HD-4K відео може підтримуватися приблизно у 95% часу, а переваги статичного бітрейту чи адаптивного потокового передавання залежать від типу середовища. Для нашої роботи ця стаття важлива тим, що вона наочно демонструє роль польових вимірювань і підтверджує критичність доставки з низькою затримкою для безпечних сценаріїв віддаленого пілотування. Однак вона концентрується переважно на сценарії передачі на основі стільникового зв'язку і не дає ширшого порівняння інших класів методів передавання

відеоданих у мережах БПЛА. Саме через це доцільним є наше дослідження, у якому підходи, орієнтовані на мобільний зв'язок, розглядаються як один із класів методів, а не як єдина рамка аналізу.

У роботі [4] вагомим позитивним результатом є реалізація реального тестового стенду для передачі мультимедіа повітря–земля з використанням кількох стільникових операторів. Автори показують приклад практичного використання мережевої різноманітності для підтримки відеопотоку якості, достатньої для BVLoS операцій. Це є підтвердженням того, що такі підходи можуть істотно підвищувати стійкість відеодоставки в умовах нестабільного радіоканалу. Водночас робота зосереджена саме на одній технологічній лінії і не зіставляє її в єдиній системі оцінювання з адаптивним бітрейтом, ARQ/FEC, маршруто-орієнтованими або прикладними підходами. Тому потрібно помістити multipath-рішення у ширший порівняльний контекст.

Окремий напрям представлено в дослідженні [5], де позитивним є саме міжрівневий підхід до організації потокового передавання медіа з використанням RTP over UDP та орієнтацією на підвищення надійності і ефективності передачі. Це ще раз говорить про доцільність виходу за межі ізольованого розгляду окремого рівня мережевої моделі та демонструє, що ефективне відеопередавання в БПЛА-мережах часто потребує координації транспортних, мережевих і прикладних механізмів. Проте подібні cross-layer-підходи зазвичай аналізуються в межах власної архітектури оптимізації та не розглядаються порівняльно відносно інших методів передачі.

У статті [6] розглянуто є поєднання адаптивної потокової передачі відео з задачами розміщення БПЛА, справедливого розподілу відеошвидкостей та плавної адаптації якості. Автори показують, що ефективність відеопередачі визначається не лише бітрейтом, а й енергоспоживанням, справедливим розподілом ресурсів та плавністю зміни якості потоку. Це дозволяє включити до порівняння клас методів, орієнтованих на оптимізацію параметрів відеопотоку та ресурсів бездротової системи. Проте фокус дослідження зміщений у бік розподілу ресурсів та розміщення БПЛА, а не у бік системного зіставлення методів передавання відеоданих як таких. Саме тому наше порівняльне дослідження покликане узагальнити цей клас рішень поряд з іншими методами, які використовуються в мережах БПЛА.

У праці [7] автори розглядають задачу максимізації якості обслуговування (QoE) для потокової передачі повітряного відео через 3D-стільникові мережі, спираючись на карту знань середовища та каналів, алгоритми графа для планування траєкторії та ітераційні процедури визначення швидкості відтворення й розподілу часу. Дана стаття переконливо показує перспективність екологічних комунікацій та використання сайт-специфічної інформації при організації відеострімінгу. Водночас цей підхід є достатньо спеціалізованим і орієнтованим на складну 3D-платформу оптимізації стільникового зв'язку. Він не замінює потреби в загальному порівняльному аналізі методів передавання відеоданих у мережах БПЛА, особливо коли йдеться не лише про cellular scenario,

а й про ширший спектр транспортних, маршрутизаційних та прикладних рішень.

У роботі [8] продемонстровано з'єднання з плануванням траєкторії, розподілом смуги пропускання, оптимізацією часу зв'язку та потоковою передачею на основі DASH для аварійних мереж зв'язку в приміщенні та на вулиці. Це демонструє потенціал комплексної оптимізації відеосервісу в середовищах, де UAV виступає аерорелеєм для системи, що втратила наземну інфраструктуру. Але дослідження залишається переважно оптимізаційним і орієнтованим на конкретний сценарій аварійного реле. У цьому не розглядається системне встановлення цього класу рішень з багатошляховим, на основі WebRTC, з підтримкою периферії, ретрансляцією чи міжрівневими підходами. Саме тому наша стаття потрібна для розміщення подібних спеціалізованих методів у єдиному полі порівняльного аналізу.

Суттєвий інтерес також стає стаття [9], в якій автори розглядають кілька БПЛА, кінцевих користувачів і периферійні сервери як єдину систему співпраці і пропонують адаптивну стратегію управління ресурсами, в тому числі з використанням глибокого підкріплення навчання, орієнтовану на зменшення затримки та підвищення ефективності реагування на надзвичайні ситуації. Стаття розширює межі традиційного мережевого розгляду та показує, що якість передавання відеоданих залежить також від розміщення обчислювальних ресурсів та оркестрації з підтримкою периферійних обчислень. Водночас такі роботи переважно фокусуються на архітектурі системи та політиці розподілу ресурсів, а не на порівнянні базових методів передавання відеоданих.

У роботі [10] позитивним є створення WebRTC-багатодронової системи моніторингу та керування із низькозатримною відеопередачею (low-latency video streaming), медіасервером Janus та наземною станцією керування на основі вебтехнологій. Ця праця підтверджує практичну придатність WebRTC як бази для низькозатримної передачі відео в багатодронових системах, причому не для одного БПЛА, а одразу для багатодронової системи. Однак системний прототипно-орієнтований характер дослідження означає, що автори демонструють працездатність певної архітектури, але не ставлять за мету широке порівняння WebRTC-підходу з альтернативними класами методів передавання відеоданих у мережах БПЛА.

У статті [11] автори провели польові експерименти для IoT на основі WebRTC з борту БПЛА і показали стабільні наскрізні затримки значно менші за 10 мс у надійних мережах, а також перевагу каналу даних WebRTC над WebSocket для чутливого до часу зв'язку. Для нашої роботи ця праця важлива тим, що вона надає експериментально підтверджений аргумент на користь транспортних та прикладних рішень, орієнтованих на високу чутливість до затримок. Разом з тим стаття має формат прикладного дослідження і не вирішує завдання системного зіставлення ширшого набору методів передавання відеоданих у мережах БПЛА. Саме тому вона є важливим джерелом фактів і висновків, але водночас підкреслює актуальність статті як узагальнювального порівняльного дослідження.

Додатково слід відзначити працю [12], у якій позитивним є систематизація саме AI-орієнтованих підходів до потокового відео з повітряних апаратів. Ця стаття показує окремий клас рішень, де штучний інтелект використовується для прогнозування, оптимізації та адаптації параметрів доставки відео. Водночас вона не формує порівняльної рамки для зіставлення AI-базованих підходів із традиційними поточковими, багатошляховими, периферійними, орієнтованими на повторну передачу чи WebRTC-базованими методами. Отже, навіть у межах інтелектуальних рішень залишається відкритою потреба в загальнішому порівняльному дослідженні.

Таким чином, в сучасній літературі вже накопичено значний масив результатів щодо потокового відео з БПЛА, низькозатримної доставки через стільникові мережі, багатошляхової мультимедійної доставки, міжрівневої координації, адаптивного керування бітрейтом, потокового 3D-відео з урахуванням оточення, архітектур з підтримкою периферійних обчислень, систем на основі WebRTC та оптимізації з використанням штучного інтелекту. Кожен із цих напрямів дав вагомі позитивні результати, які доцільно врахувати в нашій роботі. Проте наявні публікації здебільшого зосереджені або на окремому класі рішень, або на специфічному сценарії використання, або на демонстрації працездатності певної архітектури. Тому порівняльне дослідження, в якому різні методи передавання відеоданих у мережах БПЛА

були б послідовно зіставлені за спільною системою критеріїв, зокрема за затримкою, джитером, втратами пакетів, адаптивністю, стійкістю до зміни топології, ресурсною доцільністю та здатністю зберігати прикладну цінність відеоінформації, є **актуальним науковим завданням**.

1. Чинники впливу на якість передавання відеоданих у мережах БПЛА

Якість передавання відеоданих у мережах безпілотних літальних апаратів формується під впливом сукупності взаємопов'язаних чинників, що охоплюють характеристики самого відеопотоку, параметри бездротового каналу, особливості мережевої взаємодії та умови функціонування бортового й наземного обладнання.

На відміну від традиційних стаціонарних мереж, у яких значна частина параметрів є відносно стабільною в часі, мережі БПЛА характеризуються підвищеною мінливістю, унаслідок чого якість доставки відеоінформації визначається не одним домінуючим фактором, а їх динамічною комбінацією. Саме ця обставина ускладнює забезпечення сталої якості відеосервісу та зумовлює необхідність комплексного аналізу впливів, які діють одночасно на різних рівнях функціонування системи.

Узагальнена схема взаємозв'язку основних чинників, що впливають на якість передавання відеоданих у мережах БПЛА, наведено на рис. 2.

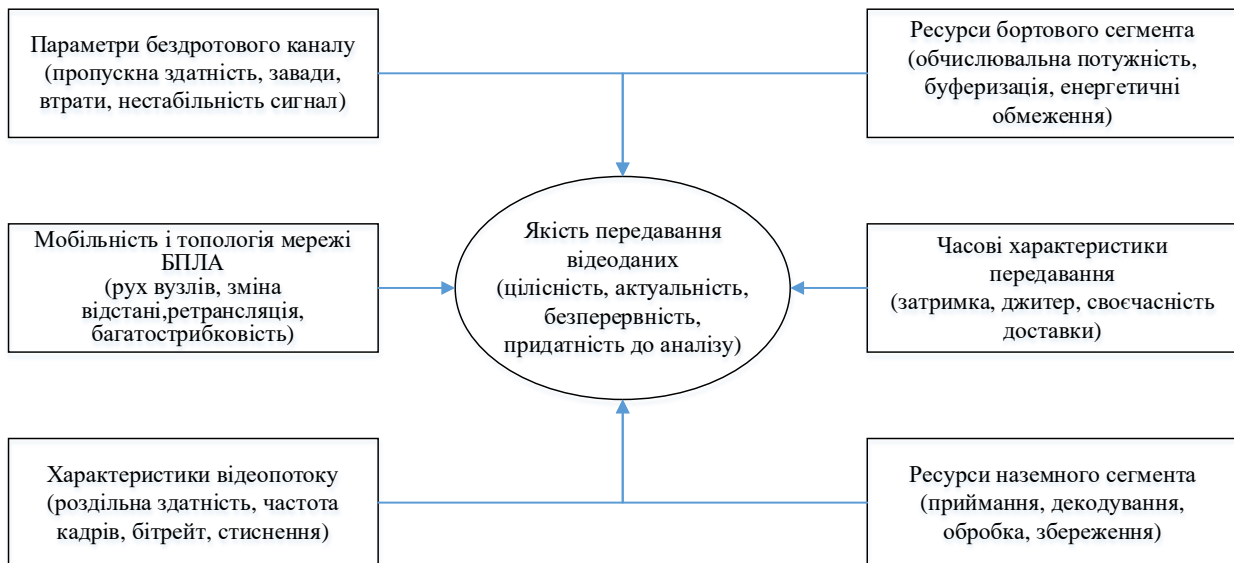


Рис. 2. Узагальнена схема взаємозв'язку основних чинників, що впливають на якість передавання відеоданих у мережах БПЛА

2. Аналіз існуючих підходів і засобів передавання відеоданих

Сучасні підходи до передавання відеоданих у комп'ютерних мережах формувалися під впливом зростання попиту на мультимедійні сервіси, системи віддаленого спостереження, відеоконференцзв'язок, потокове мовлення та інтерактивні інформаційні системи. У межах таких застосувань було розроблено значну кількість протоколів, методів і технологічних

рішень, орієнтованих на забезпечення прийнятної якості відтворення відео в умовах обмеженої пропускної здатності, затримок, втрат пакетів і неоднорідності мережевої інфраструктури. Водночас мережі БПЛА висувують до процесу передавання відеоданих специфічні вимоги, зумовлені мобільністю вузлів, мінливістю радіоканалу, обмеженістю бортових ресурсів і високою залежністю прикладної цінності відео від моменту його доставки. У зв'язку з цим аналіз існуючих підходів має ґрунтуватися не лише на їх

загальній функціональності, а й на ступені придатності до використання в динамічному мережевому середовищі безпілотних літальних апаратів.

Узагальнено існуючі засоби передавання відеоданих можна розглядати як поєднання кількох взаємопов'язаних рівнів. На нижчих рівнях вирішуються задачі транспортування пакетів через мережу, керування передаванням, маршрутизації та забезпечення базової доступності каналу зв'язку. На вищих рівнях здійснюється формування потоку, фрагментація відеоданих, синхронізація, контроль якості та взаємодія з прикладними сервісами. Саме на межі між транспортними механізмами та прикладною логікою реалізується більшість практичних рішень, що забезпечують роботу відеосистем у реальному середовищі. Однак ефективність такого підходу істотно залежить від того, наскільки мережеві умови узгоджуються з припущеннями, закладеними в архітектуру протоколів і механізмів адаптації.

Узагальнену структуру існуючих підходів і засобів передавання відеоданих за функціональними рівнями проілюстровано на рис. 3.



Рис. 3. Узагальнена класифікація підходів і засобів передавання відеоданих у мережевих системах

Серед найбільш поширених рішень, що використовуються для передавання відео в мережевому середовищі, центральне місце посідають поточкові протоколи реального часу. Їх призначення полягає у впорядкованій доставці мультимедійних даних, синхронізації потоків і підтримці механізмів контролю якості на стороні сеансу. У традиційних мережах такі

засоби продемонстрували високу ефективність у задачах потокового відтворення, дистанційного спостереження та інтерактивних сервісів. Разом з тим їх робота зазвичай орієнтується на відносно передбачуване середовище передавання, у якому часові параметри хоч і можуть змінюватися, проте не зазнають настільки різких коливань, як у мережах БПЛА. За таких умов загальні механізми керування сеансом і контролю потоку не завжди здатні забезпечити достатню чутливість до короточасних, але критичних змін мережевої ситуації.

Значний клас існуючих підходів пов'язаний із застосуванням буферизації, повторного передавання, випереджувального виправлення помилок і варіативного кодування. Такі механізми спрямовані на підвищення стійкості відеопередавання до втрат і нестабільності каналу. Буферизація дозволяє згладжувати нерівномірність надходження даних, повторне передавання дає змогу відновлювати окремі втрачені фрагменти, а надлишкове кодування підвищує ймовірність відновлення потоку без необхідності запиту повторної доставки. У стаціонарних або слабо мінливих мережах ці підходи часто забезпечують позитивний результат, проте в мережах БПЛА вони пов'язані з об'єктивними обмеженнями. Зокрема, збільшення буфера неминуче підвищує затримку, повторні передавання вимагають додаткового часу і пропускної здатності, а надлишковість знижує ефективність використання каналу. Тому механізми, що в традиційних системах розглядаються як універсальні засоби підвищення надійності, у безпілотних мережах можуть вступати в суперечність із вимогою своєчасності доставки відеоінформації.

Помітне місце в сучасних системах займають підходи, засновані на адаптації параметрів відеопотоку до поточного стану мережі. Йдеться про зміну бітрейту, частоти кадрів, роздільної здатності, структури стиснення або інших характеристик потоку з метою збереження прийнятної рівня обслуговування в умовах обмежених ресурсів. Подібні механізми є важливим напрямом розвитку систем передавання мультимедійних даних, оскільки дозволяють певною мірою узгодити навантаження на канал із його реальними можливостями. Проте більшість таких рішень орієнтована на середні або згладжені показники мережевого стану, що добре працює у відносно інерційних середовищах, але є недостатнім у випадку різких і короточасних коливань параметрів каналу.

Для мереж БПЛА це означає, що навіть адаптивні засоби загального призначення не завжди встигають відреагувати на зміну мережевої ситуації настільки швидко, щоб зберегти актуальність окремих відеокадрів.

Окремий напрям становлять рішення, у яких адаптація реалізується на рівні маршрутизації, вибору шляху проходження трафіку або координації взаємодії між кількома вузлами мережі. Для динамічних бездротових середовищ такий підхід є природним, оскільки значна частина проблеми передавання пов'язана саме зі змінами топології та неоднорідністю каналів. У мережах БПЛА маршрутні рішення

можуть підвищувати ймовірність збереження зв'язності, дозволяти використовувати ретрансляцію або перерозподіляти навантаження між каналами. Водночас подібні механізми в більшості випадків спрямовані на забезпечення загальної доступності мережі або зменшення середніх мережевих витрат, а не на збереження прикладної цінності конкретного відеокадру. Отже, хоча мережево-орієнтовані підходи є важливими для підтримки функціонування системи в цілому, вони не завжди забезпечують той рівень чутливості до часової значущості відеоданих, який є необхідним у задачах оперативного спостереження.

Суттєвого поширення набули й платформи та протокольні стеки, що забезпечують практичну інтеграцію передавання відео з прикладними сервісами реального часу. Вони поєднують функції транспортування, керування сеансом, контролю доступу до медіаданих, синхронізації та взаємодії з прикладним програмним забезпеченням. Перевага таких засобів полягає у технологічній зрілості та сумісності з існуючою інфраструктурою. Проте саме ця універсальність часто обмежує можливості їх глибокої адаптації до вузькоспеціалізованих умов мереж БПЛА. У типових реалізаціях вони створювалися для широкого класу мультимедійних застосувань, а тому орієнтуються переважно на підтримку працездатності сервісу в цілому, а не на цілеспрямоване керування передаванням відеоданих з урахуванням специфіки окремої місії, критичності кадрів чи мінливості стану мережі в кожен конкретний момент.

Варто зазначити, що в науковій та прикладній літературі значна увага приділяється оцінюванню якості відеопередавання на основі класичних показників якості обслуговування та якості сприйняття. Такий підхід є важливим для порівняння рішень і вибору допустимих режимів роботи системи. Проте для мереж БПЛА цього виявляється недостатньо, оскільки практична корисність відео визначається не лише формальною якістю відтворення або середнім рівнем затримки, а й відповідністю отриманої інформації поточному стану об'єкта спостереження. Іншими словами, у безпілотних системах питання передавання відеоданих виходить за межі забезпечення прийняттого мультимедійного сервісу і перетворюється на задачу підтримки актуальної інформаційної взаємодії між бортовим та наземним сегментами.

На цьому тлі стає очевидним, що існуючі підходи та засоби передавання відеоданих мають важливе методологічне і технологічне значення, однак кожен із них розв'язує переважно окрему частину загальної проблеми. Одні підходи краще забезпечують стійкість до втрат, інші гнучкість параметрів потоку, треті підтримку мережевої зв'язності або інтеграцію з прикладними сервісами. Проте для мереж БПЛА критично важливим є не локальне покращення одного показника, а узгоджене керування процесом передавання відеоданих у середовищі, де мережеві умови, ресурсні обмеження та прикладна цінність відео змінюються одночасно. Саме ця обставина вказує на недостатність використання лише традиційних або універсальних засобів без їх спеціальної адаптації до умов безпілотних мереж.

У підсумку можна стверджувати, що сучасний стан розвитку підходів і засобів передавання відеоданих створює необхідну основу для побудови спеціалізованих рішень, але сам по собі не усуває суперечності між потребою в надійності, вимогою низької затримки, мінливістю параметрів мережі та прикладною значущістю окремих фрагментів відеопотоку. У мережах БПЛА ця суперечність проявляється особливо гостро, оскільки інформація, отримана із запізнення, може виявитися непридатною для прийняття рішень навіть за умови формального збереження її цілісності.

Саме тому наступним кроком дослідження має стати постановка наукової проблеми, пов'язаної з необхідністю розроблення такого методу передавання відеоданих, який був би орієнтований не лише на загальні мережеві показники, а й на специфіку функціонування комп'ютерної мережі БПЛА та прикладну цінність своєчасно доставленого відео.

Висновки

У статті проведено порівняльне дослідження методів передавання відеоданих у комп'ютерних мережах БПЛА.

Показано, що ефективність передавання відео в таких мережах визначається сукупною дією мобільності вузлів, динамічної топології, варіативності пропускної здатності, затримки, джитера, втрат пакетів, параметрів відеопотоку та ресурсних обмежень бортового і наземного сегментів. Установлено, що в мережах БПЛА якість передавання має оцінюватися не лише за середніми мережевими показниками, а й з урахуванням часової придатності та прикладної цінності відеоінформації.

У результаті аналізу літератури та сучасних підходів встановлено, що потокові протоколи реального часу, механізми буферизації, повторної передачі та випереджувальної корекції помилок, адаптація параметрів відеопотоку, маршрутизаційні й платформно-орієнтовані рішення забезпечують розв'язання лише окремих аспектів загальної проблеми. Показано, що жоден із розглянутих підходів окремо не забезпечує повного врахування динаміки мережі, часової значущості відеоданих та ресурсних обмежень, характерних для мереж БПЛА.

Отже, перспективним напрямом подальших досліджень є розроблення спеціалізованих адаптивних методів передавання відеоданих, орієнтованих на узгодження надійності, затримки, адаптивності та збереження прикладної цінності відеоінформації в умовах стохастичної мінливості мережевого середовища БПЛА.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ammous, D.; Kammoun, F.; Masmoudi, N. Survey on Video Streaming for UAV. In *Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET)*, Hammamet, Tunisia, 16–19 May 2023; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2023. https://doi.org/10.1109/IC_ASET58101.2023.10150479
2. Sharma, M.K.; Liu, C.-F.; Farhat, I.; Sehad, N.; Hamidouche, W.; Debbah, M. UAV Immersive Video Streaming: A Comprehensive Survey, Benchmarking, and Open Challenges. *arXiv* **2023**, arXiv:2311.00082. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.00082>
3. Baltaci, A.; Cech, H.; Mohan, N.; Geyer, F.; Bajpai, V.; Ott, J.; Schupke, D. Analyzing Real-Time Video Delivery over Cellular Networks for Remote Piloting Aerial Vehicles. In *Proceedings of the 22nd ACM Internet Measurement Conference (IMC '22)*, Nice, France, 25–27 October 2022; ACM: New York, NY, USA, 2022. <https://doi.org/10.1145/3517745.3561465>
4. Bacco, M.; Cassarà, P.; Gotta, A. Air-to-Ground Real-Time Multimedia Delivery: A Multipath Testbed. *Veh. Commun.* **2022**, *33*, 100443. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2021.100443>
5. Liu, Z.; Jiang, Y. Cross-Layer Design for UAV-Based Streaming Media Transmission. *Acta Electron. Sin.* **2022**, *50*(3), 617–626. <https://doi.org/10.12263/DZXB.20210660>
6. Ahmed, Z.; Ahmad, A.; Altaf, M.; Khan, F.A. Power Efficient UAV Placement and Resource Allocation for Adaptive Video Streaming in Wireless Networks. *Ad Hoc Netw.* **2023**, *150*, 103260. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2023.103260>
7. Zhan, C.; Hu, H.; Liu, Z.; Wang, J.; Cheng, N.; Mao, S. Aerial Video Streaming Over 3D Cellular Networks: An Environment and Channel Knowledge Map Approach. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* **2024**, *23*(2), 1432–1447. <https://doi.org/10.1109/TWC.2023.3289501>
8. Guo, Z.; Hu, B.; Chen, S.; Zhang, B.; Wang, L. Joint Resource and Trajectory Optimization for Video Streaming in UAV-Based Emergency Indoor-Outdoor Communication. *Telecommun. Syst.* **2024**, *87*(1), 199–211. <https://doi.org/10.1007/s11235-024-01151-4>
9. Sarkar, M.; Sahoo, P.K. Leveraging Edge Computing for Video Data Streaming in UAV-Based Emergency Response Systems. *Sensors* **2024**, *24*(15), 5076. <https://doi.org/10.3390/s24155076>
10. Kilic, F.; Hassan, M.; Hardt, W. Prototype for Multi-UAV Monitoring–Control System Using WebRTC. *Drones* **2024**, *8*(10), 551. <https://doi.org/10.3390/drones8100551>
11. Chodorek, A.; Chodorek, R.R. Web Real-Time Communications-Based Unmanned-Aerial-Vehicle-Borne Internet of Things and Stringent Time Sensitivity: A Case Study. *Sensors* **2025**, *25*(2), 524. <https://doi.org/10.3390/s25020524>
12. Nguyen, T.-V.; Nguyen, N.P.; Kim, C.; Dao, N.-N. Intelligent Aerial Video Streaming: Achievements and Challenges. *J. Netw. Comput. Appl.* **2023**, *211*, 103564. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2022.103564>

Received (Надійшла) 19.01.2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.04.2026

Publication date (Дата публікації) 22.05.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Юй Цзянь – магістр, старший інженер з розробки тестів, Zhongke Shuguang, Тяньцзінь, Китай;

Jian Yu – Master, Senior Test Development Engineer, Zhongke Shuguang, Tianjin, China;

e-mail: iany220272@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0007-8990-8347>;Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59681719600&origin=recordpage>.

Хе Цзянь – магістр, фахівець з бухгалтерського обліку, Financial Shared Service Center PRD Branch, Шеньчжень, Китай;

Jiang He – Master, Accounting Staff, CNOOC Financial Shared Service Center PRD Branch, Shenzhen, China;

e-mail: hjamxm@163.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0004-4625-3721>.

Семенов Сергій Геннадійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та кібербезпеки, Університет Комісії національної освіти, Краків, Польща;

Serhii Semenov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Engineering and Cybersecurity, University of the National Education Commission, Krakow, Poland;

e-mail: serhii.semenov@uken.krakow.pl; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-4472-9234>;Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202908821>.

Васюхно Станіслав Іванович – начальник науково-дослідної лабораторії, Національний університет оборони України, Київ, Україна;

Stanislav Vasiukhno – Head of the Research Laboratory, National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine;

e-mail: stas816@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-0884-0405>.

Comparative study of video data transmission methods in uav networks

Jian Yu, Jiang He, Serhii Semenov, Stanislav Vasiukhno

Abstract. Relevance. Video data transmission in UAV computer networks is a complex interdisciplinary task that combines the features of mobile wireless networks, requirements for real-time traffic service, and the applied significance of video information for mission performance. **Object of study:** video data process in UAV computer networks. **Purpose of the article:** to conduct a comparative study of modern video data transmission methods in UAV networks. **Research results.** It is shown that the efficiency of video transmission in such networks is determined by the combined effect of node mobility, dynamic topology, bandwidth variability, delay, jitter, packet loss, video stream parameters, and resource constraints of the airborne and ground segments. It is established that in UAV networks, the transmission quality should be evaluated not only by average network indicators, but also taking into account the timeliness and applied value of video information. **Conclusions.** It is shown that none of the considered approaches individually provides full consideration of network dynamics, time significance of video data and resource constraints characteristic of UAV networks.

Keywords: computer system, UAV, video stream, artificial intelligence, network dynamics.