
АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ ЧАСОВИХ ЗАТРИМОК У FANET З ПРОСТОРОВО-РОЗПОДІЛЕНИМИ ПОВІТРЯНИМИ ВУЗЛАМИ

Сайко В. Г., Комаров В. О., Медведь Ю. Г.
DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-9>

ВСТУП

Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів та бездротових технологій зв'язку зумовив формування нового класу розподілених мереж – Flying Ad Hoc Networks (FANET), у яких повітряні вузли виконують функції джерел, приймачів і ретрансляторів інформації^{1,2}. На відміну від класичних мобільних ad hoc мереж, FANET характеризуються тривимірною просторовою організацією, високою мобільністю вузлів, динамічною топологією та повною або частковою відсутністю фіксованої інфраструктури зв'язку. Зазначені особливості зумовлюють принципово нові вимоги до часових характеристик передавання даних і істотно ускладнюють забезпечення стабільних параметрів якості обслуговування в повітряних мережах³.

Однією з ключових проблем функціонування FANET є формування часових затримок під час багатохолової передачі інформації між просторово-розподіленими повітряними вузлами⁴. У таких мережах затримка передавання IP-пакетів визначається не лише параметрами фізичного каналу, але й сукупною дією механізмів доступу до середовища, процедур маршрутизації, обробки пакетів на проміжних повітряних вузлах, а також процесів буферизації та чергування. Просторовий розподіл повітряних платформ і їхня інтенсивна мобільність призводять

¹ Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18, no. 2. P. 1123–1152.

² Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

³ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

⁴ Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // Ad Hoc Networks. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

до постійної перебудови топології мережі, змін кількості хопів та суттєвої варіативності end-to-end затримки, що є критичним для систем управління, координації та передавання даних у реальному часі⁵.

Аналіз сучасних наукових досліджень показує, що більшість існуючих підходів до оцінювання часових затримок у бездротових мережах орієнтовані на стаціонарні або слабкомобільні MANET та ґрунтуються на припущеннях відносної стабільності топології і часових характеристик каналів зв'язку⁶. У випадку FANET такі припущення є методологічно некоректними, оскільки не враховують тривимірної геометрії мережі, високих швидкостей руху повітряних вузлів, динамічних змін умов поширення радіосигналів та специфічної ролі БПЛА як активних багатофункціональних ретрансляторів^{7,8}. Унаслідок цього класичні моделі часової затримки не забезпечують адекватного опису часової поведінки багатохопових повітряних мереж і не дозволяють коректно ідентифікувати домінуючі чинники її формування.

Особливої уваги в FANET потребує аналіз впливу багатохопової архітектури на часові характеристики передавання даних. Кожен проміжний повітряний вузол додає до end-to-end затримки власні складові, пов'язані з доступом до середовища, обробкою пакетів і чергуванням, а динаміка маршрутів зумовлює їхню часову нестабільність⁹. За таких умов часова затримка набуває характеру випадкової величини, що ускладнює забезпечення детермінованих параметрів якості обслуговування та потребує глибшого аналітичного осмислення механізмів її формування.

У зв'язку з цим актуальним є аналітичне дослідження формування часових затримок у FANET з просторово-розподіленими повітряними вузлами, спрямоване не на розроблення конкретних методів оптимізації, а на системний розклад end-to-end затримки на складові та визначення їхньої ієрархії залежно від архітектури мережі, кількості хопів і динаміки

⁵ Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // *Ad Hoc Networks*. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

⁶ Corson S., Macker J. Mobile ad hoc networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations : RFC 2501. IETF, 1999.

⁷ Сайко В. Г., Радзівілов Г. Д., Комаров В. О. Спосіб та інтегрований комплекс визначення місцезнаходження наземних джерел радіовипромінювання на базі БПЛА спеціального призначення // *Збірник наукових праць ВІПІ: системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки*. 2025. Вип. 7. С. 165–176.

⁸ Патент України на корисну модель № 160108. Безпілотний літальний апарат мультикоптерного типу / Колонійцев О. В., Радзівілов Г. Д., Сайко В. Г., Комаров В. О. Опубл. 06.08.2025, Бюл. № 32.

⁹ Royer E. M., Toh C. K. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks // *IEEE Personal Communications*. 1999. Vol. 6, no. 2. P. 46–55.

повітряних платформ¹⁰. Такий підхід створює методологічне підґрунтя для подальшого обґрунтованого вибору технічних і протокольних рішень у повітряних ad hoc мережах.

Метою розділу є аналіз формування часових затримок у FANET з просторово-розподіленими повітряними вузлами шляхом декомпозиції end-to-end затримки та виявлення ключових мережевих і архітектурних чинників, що визначають її величину та варіативність. Для досягнення поставленої мети в роботі розглянуто особливості FANET як класу ad hoc мереж, проаналізовано складові часової затримки на різних рівнях протоколів, а також досліджено вплив багатохлопової архітектури та мобільності повітряних вузлів на часові характеристики передавання даних¹¹.

1. FANET як клас просторово-розподілених ad hoc мереж

Flying Ad Hoc Networks (FANET) розглядаються як спеціалізований підклас мобільних ad hoc мереж, у якому вузлами мережі є безпілотні літальні апарати, здатні динамічно змінювати своє просторове положення та виконувати функції передачі, ретрансляції й обробки інформації¹². На відміну від традиційних MANET, де мобільність вузлів зазвичай обмежена двовимірною площиною та порівняно невеликими швидкостями, FANET функціонують у тривимірному просторі та характеризуються значно вищою динамікою топології, що принципово змінює часову поведінку мережі.

Просторовий розподіл повітряних вузлів у FANET формується не лише випадковими переміщеннями, а й цілеспрямованим рухом БПЛА відповідно до виконуваних завдань, що призводить до нерівномірної щільності мережі та постійної зміни відстаней між сусідніми вузлами¹³. У таких умовах кожен повітряний вузол водночас є фізично мобільним об'єктом і логічним елементом мережевої інфраструктури, що ускладнює застосування класичних моделей аналізу мережевих затримок.

Важливою особливістю FANET є багатохлопова архітектура передачі даних, яка виникає внаслідок обмеженої дальності радіоканалу,

¹⁰ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

¹¹ Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.

¹² Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

¹³ Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // Ad Hoc Networks. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

необхідності обходу зон радіотіней або розширення зони покриття за рахунок повітряних ретрансляторів¹⁴. У багатохопових FANET кожен БПЛА може виступати як проміжний вузол маршруту, додаючи до загальної часової затримки власні складові, пов'язані з доступом до середовища, обробкою пакетів і буферизацією.

На відміну від стаціонарних або слабкомобільних мереж, багатохоповість у FANET має динамічний характер: кількість хопів між джерелом і приймачем змінюється в часі залежно від просторової конфігурації повітряних вузлів і їхньої мобільності. Це призводить до того, що end-to-end затримка в FANET не може розглядатися як стаціонарна величина, а набуває властивостей випадкового процесу з істотною варіативністю.

Ще однією визначальною рисою FANET є специфічна роль повітряних вузлів як активних мережевих елементів, які поєднують функції фізичного носія, радіотерміналу та маршрутизатора¹⁵. Обмежені енергетичні ресурси, масогабаритні характеристики та обчислювальні можливості БПЛА накладають додаткові обмеження на реалізацію протокольних стеків і безпосередньо впливають на затримки обробки пакетів на кожному хопі.

У порівнянні з MANET, FANET характеризуються також іншими умовами поширення радіосигналів. Переважна наявність прямої видимості між повітряними вузлами зменшує вплив багатопробності, однак висока швидкість руху БПЛА спричиняє доплерівські зсуви та швидкі зміни параметрів каналу, що відбивається на стабільності передавання даних і частоті повторних передач¹⁶. У контексті формування часових затримок це означає, що фізичний рівень впливає на часові характеристики опосередковано через механізми доступу до середовища та керування передаванням.

Таким чином, FANET доцільно розглядати не просто як бездротову мережу з рухомими вузлами, а як просторово-розподілену динамічну систему, у якій часові затримки формуються внаслідок взаємодії топологічних, протокольних і фізичних чинників¹⁷. Такий підхід створює основу для подальшої декомпозиції end-to-end затримки та аналізу її складових з урахуванням специфіки багатохопових повітряних мереж.

¹⁴ Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18, no. 2. P. 1123–1152.

¹⁵ Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

¹⁶ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

¹⁷ Corson S., Macker J. Mobile ad hoc networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations : RFC 2501. IETF, 1999.

2. Декомпозиція часової затримки в FANET

У багатохопових FANET з просторово-розподіленими повітряними вузлами часова затримка передавання даних між джерелом і приймачем формується як результат послідовного накопичення затримок на кожному проміжному хопі маршруту. На відміну від інфраструктурних мереж зі стаціонарними вузлами, у FANET кількість хопів, їхній склад та параметри каналів змінюються в часі, що зумовлює необхідність формального розкладу end-to-end затримки на складові з урахуванням багаторівневої протокольної архітектури¹⁸.

Загальну end-to-end затримку передавання пакета в FANET доцільно подати у вигляді суми затримок на всіх хопах маршруту:

$$T = \sum_{h=1}^H T_h \quad (1)$$

де:

T – кількість хопів між джерелом і приймачем;

T_h – сукупна затримка на h -му повітряному вузлі;

H – загальна кількість хопів.

Такий підхід є принциповим для FANET, оскільки кожен БПЛА виконує роль активного мережевого елемента і додає власний вклад у часову поведінку маршруту.

Затримка на окремому хопі може бути декомпозована на складові, пов'язані з різними рівнями протокового стеку:

$$T_h = T_{prop}(h) + T_{tx}(h) + T_{MAC}(h) + T_{proc}(h) + T_{queue}(h) \quad (2)$$

де:

T_{prop} – затримка поширення сигналу;

T_{tx} – затримка передавання кадру;

T_{MAC} – затримка доступу до середовища;

T_{proc} – затримка обробки кадру (пакету);

T_{queue} – перебування кадру в буфері;

Затримка поширення T_{prop} визначається відстанню між повітряними вузлами та швидкістю поширення електромагнітної хвилі:

$$T_{prop}(h) = \frac{d}{c} \quad (3)$$

¹⁸ Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.

де:

d – відстань між передавачем і приймачем;

c – швидкість світла у вільному просторі.

Для тактичних FANET, де відстані між БПЛА зазвичай становлять одиниці або десятки кілометрів, ця складова має порядок мікросекунд і, як правило, не є домінуючою. Проте зі збільшенням просторового рознесення або висоти платформи її внесок може зростати та накопичуватися при багатохоповій ретрансляції.

Затримка передавання T_{tx} визначається розміром кадру та швидкістю фізичного каналу:

$$T_{prop}(h) = \frac{L}{R} \quad (4)$$

де:

L – довжина кадру;

R – швидкість передавання даних.

У FANET ця складова істотно залежить від умов каналу, адаптивних схем модуляції та кодування, а також від обмежень пропускної здатності радіоінтерфейсу БПЛА.

Однією з ключових складових часової затримки в FANET є затримка доступу до середовища T_{MAC} , яка формується на каналному рівні. У мережах з випадковим доступом вона включає час очікування звільнення каналу, випадкові затримки відкладеного передавання та повторні передачі у разі колізій¹⁹. В умовах високої мобільності FANET ця складова може перевищувати всі інші та бути основним джерелом як середньої затримки, так і її варіативності.

Затримка обробки T_{proc} пов'язана з виконанням мережеских функцій на борту повітряного вузла, зокрема аналізом заголовків, прийняттям маршрутизаційних рішень, шифруванням і формуванням нових кадрів²⁰. Обмежені обчислювальні ресурси БПЛА зумовлюють те, що навіть порівняно прості операції можуть вносити відчутний вклад у загальну затримку, особливо при високій інтенсивності трафіку.

Окремо слід виділити затримку передування кадру в буфері T_{queue} , яка виникає внаслідок тимчасового накопичення пакетів у буферах повітряного вузла. У FANET ця складова є найбільш нестабільною, оскільки залежить

¹⁹ Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18, no. 3. P. 535–547.

²⁰ Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

від миттєвого навантаження, зміни маршрутів та параметрів доступу до середовища. Саме затримка *T_{queue}* часто визначає величину jitter та укладне підтримання детермінованих часових характеристик.

Таким чином, end-to-end затримка в FANET формується як багаторівнева сукупність детермінованих і випадкових складових, причому їхній відносний внесок істотно залежить від кількості хопів, архітектури доступу до середовища та динаміки просторового розподілу повітряних вузлів. Така декомпозиція створює формальну основу для подальшого аналізу впливу мобільності та топологічних змін на часові характеристики багатохопових FANET.

3. Вплив просторового розподілу та мобільності повітряних вузлів на часові затримки

Просторовий розподіл повітряних вузлів у FANET є одним з визначальних чинників формування часових затримок, оскільки безпосередньо впливає на топологію мережі, кількість хопів між джерелом і приймачем та стабільність маршрутів передавання даних. На відміну від наземних MANET, у яких вузли зазвичай обмежені двовимірним простором і відносно невеликими швидкостями переміщення, FANET функціонують у тривимірному середовищі з високою динамікою змін просторової конфігурації²¹.

Геометрія просторового розподілу повітряних вузлів визначає середню довжину маршрутів у мережі та кількість проміжних ретрансляцій, необхідних для передавання інформації. Зі збільшенням відстані між вузлами або зменшенням щільності FANET зростає імовірність багатохопової передачі, що призводить до лінійного зростання end-to-end затримки відповідно до кількості хопів²². У цьому контексті просторовий розподіл виступає не лише геометричним параметром, а й ключовою мережевою характеристикою, яка визначає часову поведінку FANET.

Висока мобільність повітряних вузлів зумовлює постійні зміни топології мережі, що призводить до частих перебудов маршрутів передавання даних. У таких умовах затримка формується не лише як сума затримок на окремих хопах, але й як результат процесів виявлення, підтримання та відновлення маршрутів²³. Часті розриви маршрутів у FANET спричиняють

²¹ Bekmezi I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

²² Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18, no. 2. P. 1123–1152.

²³ 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. P. 90–100.

додаткові затримки, пов'язані з повторною маршрутизацією, буферизацією пакетів та можливими втратами даних.

Особливістю FANET є те, що мобільність вузлів часто має цілеспрямований характер, зумовлений виконанням місій або тактичних завдань. Це призводить до нерівномірних змін щільності мережі в різних просторових зонах та появи тимчасових вузьких місць, у яких затримки різко зростають через перевантаження проміжних повітряних ретрансляторів²⁴. У таких сценаріях затримка чергування на окремих вузлах може стати домінуючою складовою end-to-end затримки.

Мобільність повітряних вузлів також впливає на стабільність радіоканалів між ними. Зміни відстані, кута взаємної орієнтації антен і швидкості руху призводять до флуктуацій рівня сигналу, доплерівських зсувів і змін ефективної швидкості передавання даних. У результаті це спричиняє збільшення кількості повторних передач на каналному рівні, що опосередковано підвищує часові затримки та їхню варіативність.

Суттєвим фактором є також просторово-часова кореляція руху повітряних вузлів. У випадку групового або ройового руху БПЛА зміни топології можуть мати квазідетермінований характер, що знижує варіативність затримки порівняно з випадковими моделями мобільності²⁵. Водночас при хаотичному русі або частих маневрах стабільність маршрутів різко зменшується, що негативно впливає на часові характеристики мережі.

У багатохопових FANET із просторово-розподіленими повітряними вузлами особливої уваги потребує взаємозв'язок між мобільністю та механізмами керування доступом до середовища. Зміна просторової конфігурації мережі впливає на кількість активних вузлів у зоні взаємного радіопокриття, що безпосередньо позначається на рівні конкуренції за доступ до каналу та величині затримки доступу²⁶. Унаслідок цього просторовий розподіл і мобільність повітряних вузлів формують кросрівневий вплив на часові затримки, поєднуючи фізичні, каналні та мережеві аспекти.

Таким чином, просторовий розподіл і мобільність повітряних вузлів є фундаментальними чинниками формування часових затримок у FANET. Вони визначають кількість хопів, стабільність маршрутів, умови доступу до середовища та характер чергування пакетів, що в сукупності формує

²⁴ Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // *Ad Hoc Networks*. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

²⁵ Camp T., Boleng J., Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research // *Wireless Communications & Mobile Computing*. 2002. Vol. 2, no. 5. P. 483–502.

²⁶ Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2000. Vol. 18, no. 3. P. 535–547.

складну, нестационарну часову поведінку мережі. Усвідомлення цієї взаємодії є необхідною передумовою для подальшого аналізу механізмів детермінізації затримок у багатохопових FANET.

4. Роль механізмів доступу до середовища та часової синхронізації у формуванні затримок

Механізми доступу до спільного середовища передачі є одним з ключових чинників формування часових затримок у FANET, оскільки саме на канальному рівні виникають як детерміновані, так і випадкові складові затримки, пов'язані з конкуренцією вузлів за радіоресурс. У багатохопових повітряних мережах вплив механізмів доступу до середовища посилюється через високу мобільність вузлів, змінну щільність мережі та динамічний склад активних передавачів²⁷.

У FANET широкого поширення набули механізми доступу з випадковим принципом, зокрема протоколи на основі CSMA, які забезпечують простоту реалізації та гнучкість в умовах динамічної топології²⁸. Проте в багатохопових сценаріях такі механізми призводять до значної варіативності затримок, оскільки час доступу до каналу залежить від випадкових інтервалів відкладеного передавання, кількості колізій та повторних передач. За високої мобільності повітряних вузлів ці чинники формують істотний jitter, який накопичується при проходженні пакета через декілька хопів.

Альтернативою випадковому доступу є детерміновані механізми, засновані на часовому розподілі ресурсу, зокрема TDMA-подібні схеми. У таких системах кожному вузлу або групі вузлів заздалегідь призначається часовий інтервал для передачі, що дозволяє усунути колізії та обмежити максимальний час очікування доступу до середовища. Для FANET застосування часово-розділеного доступу є особливо актуальним з огляду на необхідність прогнозованих часових характеристик передавання даних.

Ключовою передумовою реалізації детермінованих механізмів доступу в FANET є наявність узгодженої часової шкали між просторово-розподіленими повітряними вузлами. За відсутності фіксованої інфраструктури синхронізація внутрішніх годинників вузлів стає складним завданням, оскільки класичні протоколи мережевої синхронізації в умовах високої мобільності та змінної затримки каналів не забезпечують достатньої точності.

²⁷ Tanenbaum A. S., Wetherall D. J. Computer Networks. 5th ed. Pearson Education, 2011. 960 p.

²⁸ Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18, no. 3. P. 535–547.

У цьому контексті особливу роль відіграє використання глобальних навігаційних супутникових систем як джерела опорного часу. GNSS-синхронізація забезпечує єдину часову шкалу для всіх повітряних вузлів з точністю, достатньою для реалізації часово-детермінованого доступу до середовища. Завдяки цьому механізми доступу можуть бути організовані таким чином, що момент передачі пакета визначається не станом каналу, а глобально узгодженим часовим слотом.

Використання часово-синхронізованого доступу принципово змінює характер формування затримок у FANET. Час очікування доступу до середовища стає обмеженим зверху тривалістю кадру або фрейму, а колізії практично усуваються. У результаті затримка доступу до середовища набуває квазідетермінованого характеру, а її варіативність істотно зменшується. У багатохопових сценаріях це призводить до лінійного, передбачуваного накопичення затримок замість випадкового, характерного для CSMA-подібних протоколів.

Водночас застосування детермінованих механізмів доступу та часової синхронізації в FANET пов'язане з певними обмеженнями. Динамічна топологія мережі потребує адаптації розкладів доступу, а помилки синхронізації або втрата GNSS-сигналу можуть призводити до порушення часової узгодженості між вузлами. Тому в реальних FANET часто застосовуються гібридні підходи, які поєднують елементи детермінованого та випадкового доступу до середовища.

Таким чином, механізми доступу до середовища та часової синхронізації відіграють визначальну роль у формуванні часових затримок у FANET. Випадкові схеми доступу зумовлюють високу варіативність затримок, тоді як часово-синхронізовані механізми створюють передумови для їх детермінізації. Усвідомлення цього взаємозв'язку є важливим етапом аналітичного дослідження часової поведінки багатохопових FANET з просторово-розподіленими повітряними вузлами та формує основу для подальшого узагальнення отриманих результатів.

На відміну від інфраструктурних або слабкомобільних бездротових мереж, FANET характеризуються тривимірною динамічною топологією, високою мобільністю вузлів і відсутністю централізованого керування, що принципово впливає на механізми формування end-to-end затримок²⁹.

Часова затримка в FANET формується як сукупність складових різної природи, які накопичуються на кожному хопі маршруту. Запропонована декомпозиція end-to-end затримки дозволяє виокремити внесок затримок

²⁹ Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

поширення, передавання, доступу до середовища, обробки та чергування пакетів, а також проаналізувати їхню відносну значущість залежно від архітектури мережі та умов функціонування³⁰.

Для тактичних і оперативних сценаріїв FANET затримка поширення сигналу, як правило, не є домінуючою складовою, тоді як вирішальний вплив на часові характеристики мають затримки каналного та мережевого рівнів, зокрема затримка доступу до середовища та затримка чергування. Їхня варіативність значною мірою визначається просторовим розподілом повітряних вузлів, кількістю хопів і динамікою топологічних змін³¹.

Аналіз впливу просторового розподілу та мобільності показав, що ці фактори безпосередньо формують нестационарний характер часових затримок у FANET. Зміни щільності мережі, перебудова маршрутів і нестабільність радіоканалів призводять до накопичення затримок та зростання jitter, що ускладнює забезпечення детермінованих часових характеристик при багатохоповій передачі даних³². Випадкові схеми доступу, характерні для класичних MANET, у FANET призводять до значної варіативності затримок, яка накопичується з кожним додатковим хопом. Натомість застосування часо-синхронізованих механізмів доступу створює передумови для обмеження та часткової детермінізації затримок, хоча їх реалізація в умовах динамічної топології пов'язана з низкою практичних обмежень.

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що FANET доцільно розглядати як динамічну просторово-розподілену систему, у якій часова затримка є не статичним параметром, а результатом взаємодії топологічних, протокольних і фізичних чинників. Такий підхід дозволяє коректно інтерпретувати часову поведінку багатохопових повітряних мереж і формує методологічну основу для подальших досліджень, спрямованих на підвищення передбачуваності та керованості часових характеристик FANET.

5. Методичний аналіз антенних і фізичних методів зменшення затримок у FANET

Розвиток FANET як основи для побудови розподілених повітряних систем зв'язку зумовив зростання вимог до часових характеристик передавання даних, особливо в багатохопових сценаріях. У таких мережах

³⁰ Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.

³¹ Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18, no. 2. P. 1123–1152.

³² Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // Ad Hoc Networks. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

безпілотні літальні апарати одночасно виконують функції джерел, приймачів і ретрансляторів інформації, що призводить до накопичення часових затримок та зростання їх варіативності при проходженні пакетів через декілька повітряних вузлів³³.

У сучасних дослідженнях FANET основна увага традиційно приділяється мережевим і каналним механізмам керування затримками, зокрема маршрутизації та доступу до середовища. Водночас фізичний рівень і антенні системи часто розглядаються переважно з позицій підвищення пропускної здатності або енергетичної ефективності, тоді як їхній вплив на часові характеристики мережі залишається недостатньо систематизованим³⁴.

Разом з тим у FANET фізичний рівень має істотний непрямий вплив на формування часових затримок. Нестабільність радіоканалу, зміни умов поширення сигналу, доплерівські зсуви та флуктуації рівня сигналу призводять до зростання імовірності повторних передач, що, у свою чергу, безпосередньо відбивається на затримках доступу до середовища та процесах чергування на каналному рівні. У багатохопових FANET такі ефекти накопичуються, формуючи значну варіативність end-to-end затримок навіть за відносно стабільної топології.

Антенні системи відіграють у цьому контексті особливу роль, оскільки саме вони визначають просторові властивості радіолінків між повітряними вузлами. Використання спрямованих антен, просторової диверсифікації, MIMO та технологій формування променя впливає не лише на рівень сигналу, але й на стабільність каналу, імовірність розривів з'єднань та частоту повторних передач. Проте в більшості робіт ці механізми аналізуються ізольовано від часової поведінки мережі, без явного зв'язку з формуванням затримок і їх варіативності.

Особливості FANET, зокрема тривимірна мобільність, змінна геометрія мережі та обмежені ресурси повітряних платформ, ускладнюють пряме перенесення результатів, отриманих для наземних бездротових мереж, на повітряні сценарії³⁵. Це зумовлює необхідність окремого методичного осмислення антенних і фізичних методів саме в контексті зменшення часових затримок у FANET, а не лише покращення енергетичних або спектральних показників.

³³ Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // *Ad Hoc Networks*. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

³⁴ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

³⁵ Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // *Ad Hoc Networks*. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

У попередніх роботах показано, що для багатохопових FANET домінуючими з точки зору часової нестабільності є затримки, пов'язані з каналним рівнем і доступом до середовища. Водночас фізичний рівень формує вихідні умови для їх виникнення, визначаючи стабільність радіолінків і характер повторних передач. Це свідчить про доцільність розгляду антенних і РНУ-методів як базового рівня стабілізації часових характеристик, який доповнює мережеві та каналні механізми керування затримками.

У зв'язку з цим актуальним є методичний аналіз антенних і фізичних методів зменшення затримок у FANET, спрямований на систематизацію їхнього впливу на часові характеристики мережі без переходу до конкретних алгоритмічних реалізацій. Такий підхід дозволяє визначити роль фізичного рівня в загальній архітектурі керування затримками та створює підґрунтя для подальших інтеграційних досліджень, що поєднують РНУ-, MAC- та мережеві механізми.

Метою розділу є методичний аналіз антенних і фізичних методів зменшення часових затримок у FANET з урахуванням специфіки багатохопових повітряних мереж. Для досягнення поставленої мети в роботі розглянуто роль фізичного рівня у формуванні часових характеристик, проаналізовано вплив антенних систем, просторової диверсифікації, МІМО та технологій формування променя на стабільність радіолінків, а також визначено обмеження застосування антенних і РНУ-підходів у FANET.

5.1. Роль фізичного рівня у формуванні часових затримок у FANET

Фізичний рівень у Flying Ad Hoc Networks (FANET) традиційно розглядається як підсистема, що визначає пропускну здатність, дальність зв'язку та енергетичну ефективність передавання даних. Водночас у багатохопових повітряних мережах фізичний рівень має істотний опосередкований вплив на часові характеристики передавання, формуючи вихідні умови для роботи каналного та мережевого рівнів³⁶.

У FANET затримка поширення сигналу зазвичай не є домінуючою складовою end-to-end затримки, однак фізичні властивості радіоканалу безпосередньо впливають на імовірність помилок, повторних передач і розривів з'єднань. Погіршення якості каналу призводить до зростання кількості повторних передач на каналному рівні, що викликає збільшення затримки доступу до середовища та накопичення jitter у багатохопових маршрутах³⁷.

³⁶ Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 664 p.

³⁷ Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 736 p.

Особливістю FANET є динамічний характер радіоканалу, зумовлений тривимірною мобільністю повітряних вузлів, зміною їх взаємного просторового положення та швидкостей руху. Доплерівські зсуви, флуктуації рівня сигналу та швидка зміна умов прямої видимості призводять до нестаціонарності каналу навіть у межах одного сеансу передавання³⁸. У таких умовах фізичний рівень стає джерелом часової нестабільності, яка далі транслюється у вигляді варіативності затримок на вищих рівнях протокольного стеку.

У багатохопових FANET фізичний рівень впливає на часові характеристики не ізольовано, а через ланцюг причинно-наслідкових зв'язків: нестабільність каналу → зростання BER → повторні передачі → збільшення MAC-затримки → накопичення jitter. Такий механізм зумовлює те, що навіть незначні покращення стабільності фізичного каналу можуть мати непропорційно великий ефект щодо зменшення варіативності end-to-end затримки³⁹.

Для FANET характерна також залежність часових характеристик від умов прямої та непрямой видимості між повітряними вузлами. Хоча повітряні платформи часто забезпечують сприятливі умови LoS-зв'язку, маневри БПЛА, зміна висоти та орієнтації антен можуть призводити до короткочасних погіршень каналу або переходів у NLoS-режими. Такі події супроводжуються різкими змінами ефективної швидкості передавання та затримок, що особливо критично для багатохопових маршрутів⁴⁰.

Антенні системи та РНУ-рішення визначають просторові та спектральні властивості радіолінків у FANET, а отже – і ступінь стабільності фізичного каналу. На відміну від мережевих і каналних механізмів, які реагують на вже наявні порушення зв'язку, фізичний рівень формує первинні умови для їх виникнення або запобігання. У цьому сенсі РНУ може розглядатися як базовий рівень стабілізації часових характеристик, що зменшує навантаження на MAC і мережеві механізми керування затримками⁴¹.

Таким чином, фізичний рівень у FANET слід розглядати не лише як засіб забезпечення зв'язку, але і як непрямий інструмент керування часовими затримками. Методичний аналіз РНУ-рішень у контексті часових

³⁸ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

³⁹ Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.

⁴⁰ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

⁴¹ Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

характеристик дозволяє переосмислити роль антенних систем і фізичних методів як складової комплексного підходу до зменшення затримок у багатохопових повітряних мережах. Це створює основу для подальшого розгляду антенних механізмів стабілізації часових характеристик у FANET.

5.2. Антенні системи як засіб стабілізації часових характеристик у FANET

Антенні системи є одним із ключових елементів фізичного рівня FANET, які визначають просторові властивості радіолінків між повітряними вузлами та безпосередньо впливають на стабільність передавання даних. У контексті часових характеристик антенні рішення мають розглядатися не лише як засіб підвищення рівня сигналу або пропускної здатності, а як інструмент зменшення варіативності затримок шляхом стабілізації фізичного каналу⁴².

У FANET традиційно застосовуються всеспрямовані антени, що забезпечують простоту реалізації та нечутливість до орієнтації повітряної платформи. Проте такі антени формують радіолінки з високою чутливістю до завад, багатопроменевого поширення та взаємних перешкод між сусідніми вузлами. У багатохопових сценаріях це призводить до зростання імовірності помилок і повторних передач, що транслюється у вигляді збільшення затримки доступу до середовища та накопичення jitter⁴³.

Застосування спрямованих антен у FANET дозволяє зосередити енергію випромінювання в напрямку цільового вузла, зменшуючи рівень завад і підвищуючи стабільність радіолінку. У часовому аспекті це означає зменшення кількості повторних передач і більш передбачувану поведінку каналного рівня, що безпосередньо впливає на варіативність затримок⁴⁴. Таким чином, спрямовані антени можуть розглядатися як механізм непрямого керування часовими характеристиками мережі.

Особливе значення антенні системи набувають у FANET з високою щільністю вузлів або в сценаріях інтенсивного багатохопового ретранслявання. Обмеження просторового випромінювання дозволяє зменшити кількість конкурентних передавачів у зоні взаємного впливу, що знижує рівень колізій і флуктуацій затримки доступу до середовища. У результаті end-to-end затримка стає менш варіативною навіть за збереження випадкових механізмів доступу на каналному рівні⁴⁵.

⁴² Rappaport T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 736 p.

⁴³ Goldsmith A. *Wireless Communications*. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 664 p.

⁴⁴ Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // *Ad Hoc Networks*. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

⁴⁵ Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2000. Vol. 18, no. 3. P. 535–547.

Умови експлуатації FANET накладають специфічні вимоги на антенні системи. Тривимірна мобільність повітряних вузлів і постійна зміна їх взаємної орієнтації ускладнюють використання жорстко фіксованих спрямованих антен. Проте навіть помірною спрямованістю або адаптивною перебудовою діаграми випромінювання може істотно зменшити флуктуації якості каналу та пов'язані з ними часові нестабільності⁴⁶.

Антенні системи також впливають на часові характеристики FANET через зміну просторової структури мережі. Формування більш стабільних і довготривалих лінків між окремими парами вузлів сприяє зменшенню частоти перебудови маршрутів і, відповідно, зниженню варіативності затримок, пов'язаних з маршрутизаційними подіями. У цьому сенсі антенні рішення мають міжрівневий вплив, поєднуючи фізичні та мережеві аспекти формування часових характеристик.

Таким чином, антенні системи у FANET доцільно розглядати як базовий засіб стабілізації часових характеристик, який діє на фізичному рівні та зменшує джерела варіативності затримок ще до їх прояву на каналному та мережевому рівнях. Методичний аналіз антенних рішень створює основу для подальшого розгляду просторової диверсифікації, MIMO та технологій формування променя як інструментів зменшення затримок у багатохопових повітряних мережах.

5.3. Просторова диверсифікація та MIMO у контексті часових затримок у FANET

Просторова диверсифікація та багатоканальні технології MIMO традиційно розглядаються як засоби підвищення пропускної здатності та надійності бездротових систем зв'язку. Однак у контексті Flying Ad Hoc Networks (FANET) їх доцільно аналізувати також з позицій впливу на часові характеристики передавання, зокрема на стабільність затримок у багатохопових сценаріях⁴⁷. Просторова диверсифікація ґрунтується на використанні декількох антенних елементів для формування незалежних або частково корельованих каналів передавання. У FANET, де радіоканал зазнає швидких флуктуацій унаслідок мобільності повітряних вузлів і змін геометрії мережі, диверсифікація дозволяє зменшити імовірність глибоких завмирань та короточасних розривів зв'язку. У часовому вимірі це означає зниження кількості повторних передач і більш стабільну поведінку каналного рівня⁴⁸.

⁴⁶ Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // Ad Hoc Networks. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

⁴⁷ Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 736 p.

⁴⁸ Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 664 p.

У багатохопових FANET ефект просторової диверсифікації має властивість накопичуватися. Стабілізація кожного окремого радіолінку зменшує варіативність затримок на відповідному хопі, що у сукупності призводить до зниження jitter на end-to-end рівні. Таким чином, навіть помірне підвищення надійності фізичного каналу може мати непропорційно великий вплив на часові характеристики багатохопового маршруту⁴⁹.

Технології MIMO у FANET можуть реалізовуватися як у режимі просторової диверсифікації, так і у вигляді просторового мультиплексування. У контексті зменшення затримок і їх варіативності пріоритетним є саме диверсифікаційний режим, оскільки він спрямований на підвищення стабільності каналу, а не на збільшення пікової швидкості передавання. Використання MIMO як інструмента стабілізації знижує ймовірність повторних передач і, відповідно, зменшує затримки доступу до середовища та чергування пакетів⁵⁰.

Особливістю FANET є те, що ефективність просторової диверсифікації та MIMO суттєво залежить від геометрії розміщення антен на повітряній платформі, її орієнтації в просторі та взаємного розташування вузлів. Тривимірна мобільність може як підвищувати ефективність диверсифікації за рахунок зміни просторових кореляцій, так і знижувати її через обмеження масо-габаритних характеристик БПЛА та нестабільність орієнтації антен⁵¹.

З методичної точки зору важливо підкреслити, що застосування MIMO у FANET не повинно розглядатися ізольовано від механізмів доступу до середовища. Стабілізація фізичного каналу зменшує варіативність часу передавання кадрів і повторних передач, що створює більш сприятливі умови для прогнозованої роботи MAC-рівня навіть у випадку використання гібридних або частково випадкових схем доступу⁵².

Водночас використання просторової диверсифікації та MIMO у FANET супроводжується низкою обмежень, пов'язаних з енергоспоживанням, обчислювальною складністю та вимогами до апаратної реалізації. Ці фактори можуть опосередковано впливати на затримки обробки пакетів

⁴⁹ Kurose J. F., Ross K. W. *Computer Networking: A Top-Down Approach*. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.

⁵⁰ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

⁵¹ Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // *Ad Hoc Networks*. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

⁵² Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2000. Vol. 18, no. 3. P. 535–547.

і повинні враховуватися при методичному аналізі їх доцільності для конкретних сценаріїв застосування⁵³.

Таким чином, просторова диверсифікація та MIMO у FANET доцільно розглядати як фізичні механізми стабілізації часових характеристик, які зменшують джерела варіативності затримок на рівні радіоканалу та опосередковано впливають на роботу каналного і мережевого рівнів. Це створює методичне підґрунтя для подальшого аналізу технологій формування променя та multi-beam підходів як засобів зменшення затримок у багатохопових повітряних мережах.

5.4. Технології формування променя та multi-beam підходи як чинники зменшення затримок у FANET

Технології формування променя (beamforming) та multi-beam підходи є логічним розвитком антенних і MIMO-рішень та набувають особливого значення в Flying Ad Hoc Networks (FANET) з огляду на тривимірну мобільність вузлів і динамічну зміну просторової конфігурації мережі. У часовому контексті ці технології доцільно розглядати не лише як засіб просторового фокусування енергії, а як механізм стабілізації радіолінків, що опосередковано зменшує варіативність затримок у багатохопових сценаріях.

Beamforming дозволяє адаптивно змінювати діаграму випромінювання антенної системи відповідно до просторового положення цільового вузла. У FANET це сприяє зменшенню флуктуацій рівня сигналу, викликаних маневрами повітряних платформ, та зниженню впливу сторонніх завад. У часовому вимірі стабілізація радіолінку призводить до зменшення імовірності повторних передач і більш передбачуваної роботи каналного рівня, що знижує варіативність затримок доступу до середовища⁵⁴.

У багатохопових FANET переваги beamforming проявляються кумулятивно. Кожен стабілізований лінк зменшує локальну варіативність затримок, яка в іншому випадку накопичувалася б уздовж маршруту. Таким чином, навіть часткове застосування формування променя на окремих хопах може позитивно впливати на end-to-end часові характеристики мережі⁵⁵.

Multi-beam підходи, що передбачають одночасне формування декількох просторово розділених променів, відкривають додаткові можливості зменшення затримок у FANET. З методичної точки зору їх значення полягає

⁵³ Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

⁵⁴ Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 664 p.

⁵⁵ Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.

у паралелізації радіолінків, яка дозволяє зменшити ефект послідовного store-and-forward передавання на проміжних вузлах. За наявності декількох стабільних променів повітряний вузол може підтримувати одночасні з'єднання з кількома сусідами, що знижує черги на каналному рівні та обмежує накопичення jitter ⁵⁶.

У FANET застосування beamforming і multi-beam технологій ускладнюється динамічною зміною взаємної орієнтації повітряних платформ і швидкою перебудовою топології. Помилки наведення променя або затримки його адаптації можуть тимчасово погіршувати якість каналу, що в часовому вимірі проявляється як короткочасні сплески затримок. Тому з методичної точки зору важливо розглядати формування променя не як ідеалізований механізм, а як інструмент із певними обмеженнями та компромісами між стабільністю каналу й складністю реалізації⁵⁷.

Важливим аспектом є також взаємодія beamforming-рішень із механізмами доступу до середовища. Стабілізація фізичного каналу та зменшення рівня міжвузлових завад створюють передумови для більш прогнозованої роботи MAC-рівня, навіть у випадку використання гібридних або частково випадкових схем доступу. Таким чином, технології формування променя виступають підсилювачем ефективності каналних механізмів керування затримками, а не їх заміною⁵⁸.

З методичної точки зору beamforming і multi-beam підходи в FANET доцільно розглядати як фізичні механізми обмеження джерел варіативності затримок, що виникають через нестабільність радіолінків і конкуренцію за доступ до середовища. Їх застосування створює більш стабільне фізичне підґрунтя для роботи каналного та мережевого рівнів і знижує ймовірність різких флуктуацій часових характеристик у багатохповних повітряних мережах.

Розглянуті антенні та фізичні методи зменшення часових затримок у FANET мають спільну методичну основу, яка полягає у стабілізації радіолінків як первинного джерела часової нестабільності. Незважаючи на відмінності у принципах реалізації, спрямовані антени, просторова диверсифікація, MIMO та технології формування променя впливають на часові характеристики мережі через подібні причинно-наслідкові механізми.

⁵⁶ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

⁵⁷ Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // Ad Hoc Networks. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

⁵⁸ Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18, no. 3. P. 535–547.

Антенні системи забезпечують просторову селекцію передавання, зменшуючи рівень завад і флуктуації якості каналу. Просторова диверсифікація та МІМО підвищують надійність фізичного каналу за рахунок використання декількох просторових ступенів свободи, зменшуючи імовірність глибоких завмирань і короткочасних розривів з'єднання. Технології формування променя та multi-beam підходи, у свою чергу, дозволяють адаптивно підтримувати стабільні лінки та обмежувати взаємний вплив сусідніх вузлів у щільних або багатохопових конфігураціях.

У часовому вимірі всі ці механізми зменшують кількість повторних передач, флуктуації часу доступу до середовища та нестабільність чергування пакетів, які є основними джерелами варіативності затримок у FANET. Таким чином, антенні та РНУ-підходи виконують роль базового рівня стабілізації часових характеристик, формуючи сприятливі умови для роботи каналного та мережевого рівнів без необхідності їх жорсткої детермінізації.

Водночас спільною рисою розглянутих методів є їх непрямий характер впливу на часові затримки. Антенні та фізичні рішення не керують затримками безпосередньо, а зменшують варіативність радіоканалу, яка транслюється у часову нестабільність на вищих рівнях протокольного стеку. Це зумовлює необхідність розглядати антенні, МІМО та beamforming-підходи не ізольовано, а у взаємодії з механізмами доступу до середовища, маршрутизації та часової синхронізації.

Таким чином, антенні та РНУ-методи у FANET доцільно інтерпретувати як фундаментальний компонент комплексного підходу до зменшення часових затримок, який доповнює мережеві та каналні механізми та створює методичне підґрунтя для подальшого аналізу їх обмежень і практичної застосовності в умовах реальних повітряних мереж.

5.5. РНУ-методи адаптації та їх вплив на часові затримки у FANET

Методи адаптації на фізичному рівні є невід'ємною складовою сучасних бездротових систем зв'язку та широко застосовуються для підтримання стійкості каналу в умовах змінного радіосередовища. У Flying Ad Hoc Networks (FANET) РНУ-адаптація набуває особливого значення з огляду на тривимірну мобільність повітряних вузлів, швидкі флуктуації якості каналу та обмежені ресурси повітряних платформ. У часовому контексті такі методи доцільно розглядати як механізми опосередкованого впливу на затримки, які формують передумови для стабільної роботи каналного рівня.

Одним із базових інструментів РНУ-адаптації є адаптивна модуляція та кодування (АМС), що дозволяє змінювати параметри передавання залежно від поточного стану каналу. У FANET застосування АМС спрямоване не

лише на підвищення середньої швидкості передавання, але й на зменшення імовірності помилок у несприятливих умовах. У часовому вимірі це означає скорочення кількості повторних передач і, відповідно, зменшення варіативності затримок доступу до середовища та чергування пакетів.

Разом з тим, часті зміни режимів модуляції та кодування можуть самі по собі стати джерелом часової нестабільності, особливо в умовах швидких флуктуацій каналу. Запізніла або неточна оцінка стану каналу призводить до неузгодженості параметрів передавання та короткочасного погіршення якості зв'язку, що у багатохопових FANET проявляється у вигляді сплесків затримок. Це вимагає методичного балансу між швидкістю адаптації та стабільністю часових характеристик⁵⁹.

Іншим важливим аспектом РНУ-адаптації є вибір структури кадру та тривалості фізичних інтервалів передавання. Зменшення довжини кадрів і використання режимів із низькою затримкою дозволяє обмежити час, необхідний для повторної передачі у разі помилки, що знижує пікові значення затримок. Водночас короткі кадри збільшують накладні витрати та можуть призводити до зростання навантаження на каналний рівень, що повинно враховуватися при методичному аналізі їх доцільності⁶⁰.

РНУ-методи адаптації також пов'язані з керуванням потужністю передавання, яке впливає на стабільність радіолінку та рівень міжвузлових завад. У FANET надмірні флуктуації потужності можуть призводити до нестабільної якості каналу та зростання варіативності затримок, тоді як помірні та прогнозовані адаптації сприяє стабілізації часових характеристик. У цьому сенсі керування потужністю слід розглядати не лише як енергетичний, а і як часовий механізм⁶¹.

У багатохопових FANET важливо враховувати кумулятивний ефект РНУ-адаптації. Навіть незначна нестабільність параметрів фізичного рівня на окремому хопі може накопичуватися вздовж маршруту, формуючи істотну варіативність end-to-end затримок. Тому РНУ-адаптація має розглядатися з позицій узгодженості її часової поведінки з механізмами доступу до середовища та маршрутизації, а не як автономний процес⁶².

Таким чином, РНУ-методи адаптації у FANET виконують подвійну роль щодо часових характеристик: з одного боку, вони зменшують

⁵⁹ Kurose J. F., Ross K. W. *Computer Networking: A Top-Down Approach*. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.

⁶⁰ Tanenbaum A. S., Wetherall D. J. *Computer Networks*. 5th ed. Pearson Education, 2011. 960 p.

⁶¹ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

⁶² Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // *Ad Hoc Networks*. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

джерела варіативності затримок шляхом стабілізації каналу, а з іншого – за невдалого або надмірно агресивного застосування можуть самі стати джерелом часової нестабільності. Методичний аналіз цих компромісів дозволяє коректно визначити місце РНУ-адаптації у загальній архітектурі зменшення затримок у багатохопових повітряних мережах.

5.6. Обмеження антенних і РНУ-підходів у FANET

Незважаючи на потенціал антенних і фізичних методів щодо зменшення часових затримок у Flying Ad Hoc Networks (FANET), їх практичне застосування супроводжується низкою обмежень, зумовлених специфікою повітряних платформ, динамікою мережі та взаємодією між рівнями протокольного стеку. Методичний аналіз цих обмежень є необхідним для коректної інтерпретації можливостей РНУ-рівня у контексті керування часовими характеристиками.

Одним із базових обмежень є масо-габаритні та енергетичні характеристики безпілотних літальних апаратів. Реалізація складних антенних систем, багатоканальних МІМО-рішень або адаптивного формування променя потребує додаткових антенних елементів, радіочастотних трактів і обчислювальних ресурсів, що може бути критичним для малорозмірних БПЛА з обмеженим енергобюджетом. У часовому аспекті це може призводити до зростання затримок обробки та непрямих джерел варіативності.

Іншим важливим фактором є тривимірна мобільність і нестабільна орієнтація повітряних платформ. Для антенних систем із вираженою спрямованістю або beamforming-рішень точність наведення променя та швидкість його адаптації мають критичне значення. Помилки орієнтації, затримки в оновленні діаграми випромінювання або інерційність механізмів керування можуть призводити до короткочасного погіршення якості каналу, що у багатохопових FANET проявляється у вигляді сплесків затримок⁶³.

Обмеженням методичного характеру є також неможливість ізолюваного застосування РНУ-підходів для повноцінного керування часовими затримками. Антенні та фізичні методи впливають на часові характеристики опосередковано, через стабілізацію радіоканалу, і не можуть самостійно забезпечити обмеження часу доступу до середовища або контроль чергування пакетів. За відсутності узгоджених механізмів на каналному та мережевому рівнях ефект від РНУ-стабілізації може бути частково або повністю нівельований⁶⁴.

⁶³ Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // Ad Hoc Networks. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

⁶⁴ Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.

Додаткові обмеження пов'язані з адаптивними механізмами фізичного рівня. Часті зміни режимів модуляції, кодування або потужності передавання, хоча й спрямовані на підтримання якості каналу, можуть самі по собі створювати часову нестабільність за рахунок затримок оцінювання стану каналу та перебудови параметрів передавання. У FANET із високою швидкістю мобільності ці ефекти посилюються, що вимагає обережного методичного підходу до застосування РНУ-адаптації.

Суттєвим чинником є також взаємодія між антенними рішеннями та механізмами доступу до середовища. Наприклад, використання спрямованих антен або multi-beam підходів змінює просторову структуру завад, що може призводити до неочікуваної поведінки випадкових схем доступу та впливати на їх часові характеристики. Без відповідної адаптації MAC-рівня такі ефекти можуть зменшувати очікуваний позитивний вплив РНУ-методів на затримки⁶⁵.

Таким чином, антенні та РНУ-підходи у FANET мають розглядатися як обмежений, але важливий компонент комплексної архітектури керування часовими затримками. Їх ефективність істотно залежить від апаратних можливостей повітряних платформ, характеру мобільності, узгодженості з канальними та мережевими механізмами, а також від умов експлуатації. Усвідомлення цих обмежень є необхідною передумовою для коректного застосування антенних і фізичних методів та формує основу для подальших інтеграційних досліджень у галузі FANET.

У розділі здійснено методичний аналіз антенних і фізичних методів зменшення часових затримок у FANET з урахуванням специфіки багатохопових повітряних мереж. Показано, що фізичний рівень і антенні системи відіграють важливу, хоча й опосередковану роль у формуванні часових характеристик передавання даних, визначаючи стабільність радіолінків та початкові умови для роботи канального і мережевого рівнів.

У результаті аналізу встановлено, що антенні рішення, такі як спрямовані антени, просторова диверсифікація, МІМО та технології формування променя, сприяють зменшенню варіативності часових затримок шляхом стабілізації фізичного каналу та зниження імовірності повторних передач. У багатохопових FANET ефект таких методів має кумулятивний характер, оскільки зменшення часової нестабільності на окремих хопах призводить до зниження jitter на рівні end-to-end з'єднання.

Доведено, що РНУ-методи адаптації, зокрема адаптивна модуляція і кодування, вибір структури кадрів та керування потужністю передавання,

⁶⁵ Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18, no. 3. P. 535–547.

можуть як зменшувати, так і збільшувати варіативність затримок залежно від способу їх застосування. Це зумовлює необхідність методичного балансу між стабілізацією каналу та часовою узгодженістю параметрів фізичного рівня, особливо в умовах високої мобільності повітряних вузлів. Таким чином антенні та РНУ-підходи не можуть розглядатися як самодостатні засоби керування часовими затримками у FANET. Їх вплив на часові характеристики має непрямий характер і істотно залежить від узгодженості з механізмами доступу до середовища, маршрутизації та часової синхронізації. За відсутності такої узгодженості позитивний ефект від стабілізації фізичного каналу може бути частково або повністю нівельований на вищих рівнях протокольного стеку.

Отримані результати дозволяють інтерпретувати антенні та фізичні методи як базовий рівень стабілізації часових характеристик у FANET, який зменшує джерела варіативності затримок ще до їх прояву на каналному та мережевому рівнях. Такий підхід доповнює мережеві й каналні механізми керування затримками та формує методичне підґрунтя для комплексних архітектурних рішень⁶⁶.

ВИСНОВКИ

1. FANET доцільно розглядати як просторово-розподілені динамічні системи, у яких end-to-end затримка є нестационарною величиною та формується внаслідок взаємодії топологічних, протокольних і фізичних чинників.

2. Запропонована декомпозиція часової затримки дозволяє формально виокремити внесок затримок поширення, передавання, доступу до середовища, обробки та чергування пакетів на кожному хопі багатохопового маршруту.

3. Для більшості практичних сценаріїв FANET домінуючими є затримки каналного та мережевого рівнів, зокрема затримка доступу до середовища і затримка чергування, тоді як затримка поширення сигналу має обмежений вплив.

4. Просторовий розподіл і висока мобільність повітряних вузлів безпосередньо визначають кількість хопів, стабільність маршрутів і рівень конкуренції за доступ до радіоканалу, що зумовлює значну варіативність часових характеристик.

⁶⁶ Сайко В. Г., Зінченко М. О., Комаров В. О., Солодовник В. І., Криволапов Я. В., Криволапов Г. Я. Модель інтегрованого мережевого комплексу зв'язку з використанням БПЛА для підвищення ефективності вирішення цільових завдань спеціального призначення // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2025. Т. 35 (75), № 2, ч. 1. С. 130–138.

5. Випадкові механізми доступу до середовища призводять до накопичення jitter у багатохопових FANET, тоді як часово-синхронізовані та детерміновані підходи створюють передумови для обмеження затримок і підвищення їх передбачуваності.

6. Фізичний рівень і антенні системи мають істотний непрямий вплив на часові характеристики FANET через стабільність радіолінків і частоту повторних передач.

7. Антенні рішення, просторова диверсифікація, MIMO та технології формування променя доцільно розглядати як базові механізми стабілізації часових затримок, що доповнюють каналні й мережеві методи.

8. Отримані результати створюють методичну основу для подальших досліджень, спрямованих на детермінізацію та керування часовими характеристиками багатохопових FANET у тактичних і критичних застосуваннях.

АНОТАЦІЯ

У статті проаналізовано особливості формування часових затримок у Flying Ad Hoc Networks (FANET) з просторово-розподіленими повітряними вузлами. FANET розглядаються як динамічні багатохопові мережі з тривимірною топологією та високою мобільністю вузлів, що зумовлює нестационарний характер end-to-end затримки. Запропоновано декомпозицію часової затримки з урахуванням внеску фізичного, каналного та мережевого рівнів, а також процесів обробки й чергування пакетів на проміжних вузлах. Показано, що у багатохопових FANET домінуючий вплив на часові характеристики мають затримки доступу до середовища та буферизації, тоді як затримка поширення сигналу зазвичай є другорядною. Досліджено вплив просторового розподілу та мобільності повітряних вузлів на варіативність затримок і jitter. Окрему увагу приділено ролі механізмів доступу до середовища та часової синхронізації у формуванні детермінованих і випадкових складових затримки. Виконано методичний аналіз антенних і фізичних методів як базового рівня стабілізації часових характеристик у FANET. Отримані результати формують методологічне підґрунтя для подальших досліджень і проектування повітряних мереж із прогнозованими часовими характеристиками.

Література

1. Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18, no. 2. P. 1123–1152.

2. Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // *Ad Hoc Networks*. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.
3. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.
4. Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // *Ad Hoc Networks*. 2018. Vol. 68. P. 1–15.
5. Corson S., Macker J. Mobile ad hoc networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations : RFC 2501. IETF, 1999.
6. Royer E. M., Toh C. K. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks // *IEEE Personal Communications*. 1999. Vol. 6, no. 2. P. 46–55.
7. Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.
8. Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2000. Vol. 18, no. 3. P. 535–547.
9. 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. P. 90–100.
10. Camp T., Boleng J., Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research // *Wireless Communications & Mobile Computing*. 2002. Vol. 2, no. 5. P. 483–502.
11. Tanenbaum A. S., Wetherall D. J. Computer Networks. 5th ed. Pearson Education, 2011. 960 p.
12. Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 664 p.
13. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 736 p.
14. Сайко В. Г., Радзівілов Г. Д., Комаров В. О. Спосіб та інтегрований комплекс визначення місцезнаходження наземних джерел радіовипромінювання на базі БПЛА спеціального призначення // *Збірник наукових праць ВІПІ: системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки*. 2025. Вип. 7. С. 165–176.
15. Сайко В. Г., Зінченко М. О., Комаров В. О., Солодовник В. І., Криволапов Я. В., Криволапов Г. Я. Модель інтегрованого мережевого комплексу зв'язку з використанням БПЛА для підвищення ефективності вирішення цільових завдань спеціального призначення // *Вчені записки*

Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2025. Т. 35 (75), № 2, ч. 1. С. 130–138.

16. Патент України на корисну модель № 160108. Безпілотний літальний апарат мультикоптерного типу / Коломійцев О. В., Радзівілов Г. Д., Сайко В. Г., Комаров В. О. Опубл. 06.08.2025, Бюл. № 32.

Information about the authors:

Saiko Volodymyr Hryhorovych,

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Communication Systems and Networks,
Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications
and Information Technology,
45/1, Kniaziv Ostrozkykh str., Kyiv, 01011, Ukraine

Komarov Volodymyr Oleksandrovych,

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher,
Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications
and Information Technology,
45/1, Kniaziv Ostrozkykh str., Kyiv, 01011, Ukraine

Medved Yurii Hryhorovych,

Head of the Research Laboratory,
Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications
and Information Technology,
45/1, Kniaziv Ostrozkykh str., Kyiv, 01011, Ukraine