

Література

- [1] V. Avrutov, O. Hehelskyi, V. Tsisarzh, O. Pazdrii, and M. Khutko, “Modal Control of Unmanned Aerial Vehicle Roll Angle,” *Electronics and Control Systems*, no. 88, pp. 145–155, 2026.
- [2] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern Control Systems*. Pearson, 2017.
- [3] The MathWorks, “place — Pole placement design,” *MATLAB Documentation*.
- [4] The MathWorks, “kalman — Design Kalman filter for state estimation,” *MATLAB Documentation*.
- [5] M. Taimoor, L. Aijun, R. Amin, and H. Lu, “Autopilot design for an aircraft by using Luenberger observer design,” *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 90, no. 5, pp. 858–868, 2018.

УДК 621.396.74

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

Медведь Ю. Г., Сайко В. Г.

*Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут,
Київ, Україна*

E-mail: UR7HMC@ukr.net, vgsaiko@gmail.com

Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) 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]. 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 [2]. Зазначені особливості зумовлюють принципово нові вимоги до часових характеристик передавання даних і істотно ускладнюють забезпечення стабільних параметрів якості обслуговування в повітряних мережах [3]. Просторовий розподіл повітряних платформ і їхня інтенсивна мобільність призводять до постійної перебудови топології мережі, змін кількості хопів та суттєвої варіативності наскрізної (end-to-end) затримки, що є критичним для систем управління, координації та передавання даних у реальному часі.

Особливої уваги у мережах 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 нестабільність [4]. За таких умов часова затримка набуває характеру випадкової величини, що ускладнює забезпечення детермінованих параметрів якості обслуговування та потребує глибшого аналітичного осмислення механізмів її формування.

Ще однією визначальною рисою FANET є специфічна роль повітряних вузлів як активних мережевих елементів, які поєднують функції фізичного носія, радіотерміналу та маршрутизатора. 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 зв'язку з цим актуальним є аналітичне дослідження формування часових затримок у мережах 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 повітряних платформ.

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

У багатохопових мережах 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 архітектури [5].

Загальна end-to-end затримка передавання даних в FANET формується як сума затримок поширення сигналу на міжвузлових лінках та внутрішньовузлових затримок (рис. 1), пов'язаних із прийманням, обробкою, чергуванням і доступом до середовища передавання.

На рисунку 1 подано багатохопову архітектуру FANET, у межах якої повітряні вузли ($Node_i$) виконують функції мережевих ретрансляторів, забезпечуючи зв'язок між наземними інфраструктурними станціями (C2/B2). Схема відображає декомпозицію наскрізної затримки передавання даних на дві принципово відмінні групи складових: міжвузлові затримки поширення сигналу на кожному бездротовому лінку $D_{prop,i}$ та внутрішньовузлові затримки що виникають на борту повітряних ретрансляторів $D_{node,i}$.

Таким чином, на основі представленої багатохопової FANET-архітектури та її структурного опису доцільно сформулювати узагальнену математичну модель формування наскрізної затримки передавання пакета.

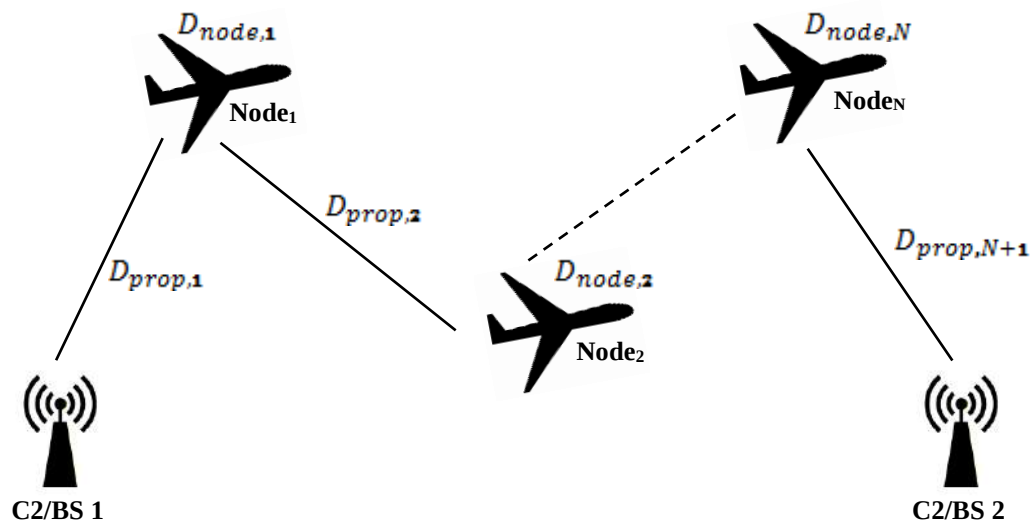


Рис.1. Багатохопова FANET-архітектура з внутрішньовузловими затримками на борту повітряних ретрансляторів $D_{node,i}$ та міжвузловими затримками поширення сигналу $D_{prop,i}$

З урахуванням того, що кожен повітряний вузол маршруту робить адитивний внесок у загальну затримку за рахунок внутрішньовузлових процесів, а кожен міжвузловий лінк характеризується затримкою поширення сигналу, end-to-end затримка може бути подана у вигляді суми відповідних складових на всіх хопх маршруту:

$$D_{e2e} = \sum_{i=1}^N D_{node,i} + \sum_{j=1}^{N+1} D_{prop,j} \quad (1)$$

де:

- D_{e2e} – загальна end-to-end затримка;
- $D_{node,i}$ – затримка на i -му повітряному вузлі;
- $D_{prop,j}$ – затримка поширення сигналу між повітряними вузлами;
- N – 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 поширення $D_{prop,i}$ визначається відстанню між повітряними вузлами та швидкістю поширення електромагнітної хвилі, має порядок мікросекунд і, як правило, не є домінуючою.

Для подальшої формалізації моделі доцільно деталізувати складову внутрішньовузлової затримки $D_{node,i}$, яка узагальнює всі часові процеси, що відбуваються безпосередньо на борту i -го повітряного вузла під час ретрансляції кадру (IP-пакета). Оскільки зазначена затримка формується послідовністю приймальних, обчислювальних та передавальних операцій, її

можна подати у вигляді суми окремих компонент, кожна з яких відповідає певному етапу обробки та доступу до середовища передавання.

$$D_{node,i} = D_{RXq,i} + D_{proc,i} + D_{TXq,i} + D_{mac,i} + D_{TX,i} \quad (2)$$

де:

- $D_{RXq,i}$ – затримка в приймальній черзі;
- $D_{proc,i}$ – затримка обробки;
- $D_{TXq,i}$ – затримка в передавальній черзі;
- $D_{MAC,i}$ – затримка доступу до середовища;
- $D_{TX,i}$ – затримка передавання кадру;

На рисунку 2 зображено спрощену структурну схему повітряного вузла FANET, у межах якої вузлова затримка $D_{node,i}$ подається як сукупність затримок, що формуються в приймальному, обробному та передавальному трактах ретранслятора.

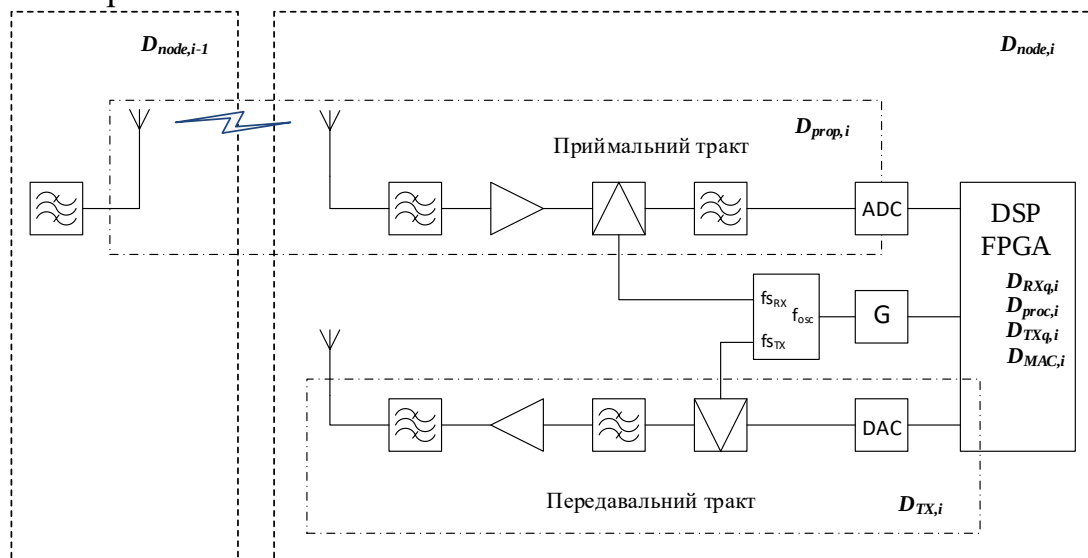


Рис. 2. Спрощена структурна схема повітряного вузла FANET

Модель абстрагується від внутрішньої схематехніки окремих блоків і зосереджується на часових аспектах проходження сигналу та даних.

У приймальному тракті після завершення затримки поширення сигналу формується затримка обробки фізичного рівня, пов'язана з аналоговою фільтрацією, підсиленням, частотним перетворенням та аналого-цифровим перетворенням. Подальша цифрова обробка в блоці DSP, що включає демодуляцію, декодування та каналну обробку, зумовлює затримку обробки пакета $D_{proc,i}$. На межі фізичного та каналного рівнів формується затримка перебування даних у приймальному буфері $D_{RXq,i}$, яка залежить від інтенсивності вхідного потоку та швидкодії обробних блоків.

У цифровому домені також реалізуються механізми доступу до середовища, синхронізації та керування передаванням, що формують затримку доступу до каналу $D_{MAC,i}$. Після цього дані надходять у передавальний тракт, де їх перебування в передавальній черзі визначає затримку $D_{TXq,i}$, а процеси

модуляції, цифро-аналогового перетворення, фільтрації та підсилення формують затримку передавання кадру $D_{Tx,i}$.

Таким чином, схема наочно і послідовно відображає, що вузлова затримка на борту БПЛА-ретранслятора виникає як результат сукупної дії приймальних, обробних, чергових і передавальних процесів, кожен з яких вносить власний вклад у часові характеристики багатохопового передавання в FANET.

На рисунку 3 наведено структурну схему внутрішньої логіки обробки даних на борту БПЛА-ретранслятора, реалізованої у цифровому домені на базі програмованих логічних інтегральних схем (FPGA) або процесорів цифрової обробки сигналу(DSP).

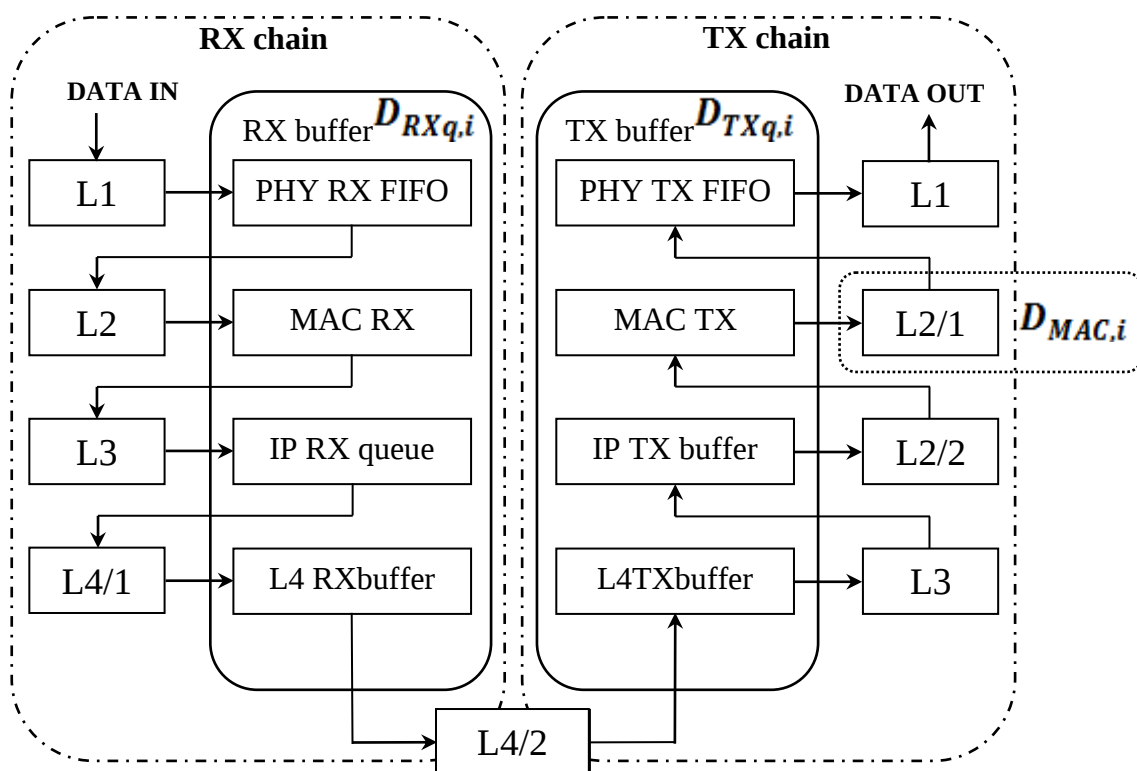


Рис. 3. Структурна схема внутрішньої логіки обробки даних на базі FPGA або DSP

Схема відображає послідовне проходження інформації через рівні стеку протоколів від фізичного до транспортного з явним виділенням приймального (RX chain) та передавального (TX chain) трактів, а також відповідних буферів, у яких формуються вузлові часові затримки.

У приймальному тракті після фізичної обробки сигналу на рівні L1 дані надходять до буфера “PHY RX FIFO”, що забезпечує узгодження швидкодії фізичного та канального рівнів. Подальша обробка здійснюється на рівні L2 із накопиченням кадрів у “MAC RX queue”, після чого IP-пакети буферизуються в “IP RX queue” на рівні L3. На транспортному рівні сформовано окремий L4 “RX buffer”, який акумулює прийняті UDP-датаграми або TCP-сегменти перед передачею в логіку L4-ретрансляції. Сукупність цих буферів формує затримку

очікування приймання D_{RXq} , величина якої залежить від інтенсивності вхідного трафіку та швидкодії FPGA або DSP.

Перехід від приймального до передавального тракту здійснюється виключно через буферизацію на транспортному рівні, що підкреслює відсутність прямого пересилання даних без проміжного їх зберігання. Після прийняття ретрансляційного рішення сформовані L4-дані поміщаються в “L4 TX buffer”, з якого вони інкапсулюються в IP-пакети та надходять до “IP TX buffer” на рівні L3. Далі MAC-кадри накопичуються в “MAC TX queue”, де реалізуються процедури планування та доступу до середовища. Перед безпосереднім передаванням у ефір кадри зберігаються в об’єднаному “PHY TX, ARQ/HARQ FIFO”, що забезпечує конвеєрну подачу даних у фізичний рівень та підтримку механізмів повторних передавань. Зазначені буфери формують затримку очікування передавання D_{TXq} , тісно пов’язану із затримкою доступу до середовища D_{MAC} .

Таким чином, представлена схема наочно демонструє, що часові затримки на борту БПЛА-ретранслятора виникають не лише внаслідок фізичних процесів передавання сигналу, але й як результат багаторівневої буферизації та цифрової обробки в FPGA/DSP. Чітке розмежування RX- та TX-трактів із явним виділенням транспортних буферів забезпечує коректну декомпозицію вузлової затримки та створює формальну основу для її подальшого математичного моделювання.

У роботі проведено системний аналіз формування часових затримок у багатохопових мережах з просторово-розподіленими повітряними вузлами та запропоновано узагальнену модель декомпозиції end-to-end затримки на міжвузлові та внутрішньовузлові складові. Показано, що в умовах динамічної топології FANET затримка набуває стохастичного характеру і визначається сукупною дією процесів доступу до середовища, обробки, буферизації та передавання даних на кожному хопі. Запропонована структурно-функціональна модель вузла та відповідна формалізація створюють основу для подальшого математичного опису часових характеристик мережі та оцінки їх середніх і варіативних параметрів з урахуванням просторової динаміки та багаторівневої архітектури FANET.

Ключові слова: FANET, топологія, телекомунікаційні мережі, безпілотні літальні апарати, бездротові системи зв’язку, мережі спеціального призначення.

References

- [1] L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, “Survey of important issues in UAV communication networks,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1123–1152, 2016.
- [2] I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, and Ş. Temel, “Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey,” *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 3, pp. 1254–1270, 2013.
- [3] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, “A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2334–2360, 2019.
- [4] E. Yanmaz, S. Yahyanejad, B. Rinner, H. Hellwagner, and C. Bettstetter, “Drone networks: Communications, coordination, and sensing,” *Ad Hoc Networks*, vol. 68, pp. 1–15, 2018.

- [5] E. M. Royer and C.-K. Toh, “A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks,” IEEE Personal Communications, vol. 6, no. 2, pp. 46–55, Apr. 1999.

UDC 004.62:004.94

MODELING OF A GEOMETRIC SEGMENTATION ALGORITHM BASED ON LASER SCANNING DATA

Shelemakha V., Tsybulnyk S.

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
Kyiv, Ukraine*

E-mail: s.tsybulnik@kpi.ua, vlad.shelemakha0302@gmail.com

Introduction

Current trends in the development of precision agriculture and autonomous robotic platforms necessitate the improvement of sensor vision systems to ensure high-precision perception of the environment [1]. Given the complexity of the operating conditions in agricultural ecosystems – specifically, the instability of natural lighting and the high density of vegetative objects [2] – laser scanning technologies (LiDAR) currently serve as the primary source of spatial information [3, 4]. While this approach allows for the generation of detailed 3D point clouds, the process of forming these datasets is accompanied by distortions caused by dynamic noise and random outliers resulting from signal reflection off fine-dispersed objects [5].

Traditional methods for processing such noisy arrays are characterized by low reliability, as the presence of even a small number of anomalous values leads to a significant reduction in accuracy and distortion of the ground plane orientation parameters [6–8]. This error is defined as critical, since precise classification of the ground surface is a fundamental stage that directly determines the correct functioning of all subsequent navigation algorithms. In view of this, the development of a robust method for separating ground points from the general 3D scene to increase the reliability of digital models of agrobiocenoses is an urgent scientific and technical task.

Problem Statement

Due to the imperative of increasing the levels of automation, robotics, and digitalization in the agricultural sector, the development of methods for identifying base surfaces in highly noisy and dynamic environments has become particularly relevant. Reliable extraction of the ground plane is defined as a fundamental prerequisite for creating accurate navigation maps that minimize spatial orientation errors for autonomous agro-platforms. To ensure the stable operation of robotic complexes in complex field conditions, it is necessary to implement anomaly-resistant mathematical models and rigorously validate their effectiveness on datasets with variable density and interference levels.

In view of the above, the objective of this work is the mathematical modeling of the RANSAC spatial filtering algorithm for the geometric segmentation of the ground surface based on laser scanning data. To verify the validity and reliability of the