

УДК 681.518

канд. техн. наук Беляков Р. О. ORCID: 0000-0001-9882-3088 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Фесенко О. Д. ORCID: 0000-0002-2114-5327 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Остапчук В. М. ORCID: 0000-0001-5686-0198 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
канд. техн. наук, професор Радзівілов Г. Д. ORCID: 0000-0002-6047-1897 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

МЕТОДИКА УПРАВЛІННЯ ПОЗИЦІЮВАННЯМ КОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ FANET В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ПРОТИДІЇ

У статті розглядається методика управління позиціонуванням комунікаційних аероплатформ (далі – КА) в мережі FANET в умовах радіоелектронної протидії для досягнення цільової функції: підвищення точності управління навігаційними параметрами (переміщенням) комунікаційних аероплатформ (зменшення відхилення від цільової траєкторії).

У роботі показано процес управління параметрами позиціонування КА FANET під час розгортання, функціонування та управління процесом ротації головного вузла повітряної комунікаційної підмережі.

Здійснено оцінку відхилення навігаційних параметрів КА з використанням імітаційного моделювання. Формалізовано процес визначення координат КА за прийнятими сигналами (зондами) по основному каналу передачі. В статті показано застосування резервного каналу на базі LoRa для збереження управління в умовах втрати GPS-сигналів, що може стати підтримкою для оцінки енерговитрат КА мережі в процесі інформаційного обміну. Процес адаптивного підлаштування навігаційних параметрів КА в роботі пропонується здійснювати з використанням фільтра Калмана.

Наукова новизна методики полягає у застосуванні науково-методичного апарату тригонометричних перетворень каналної матриці і розрахунку азимутального та елеваційного кута для додаткового корегування навігаційних параметрів позиціонування КА відносно мобільної базової станції.

Такий підхід дозволяє досягти оптимізації цільових функцій процесу управління позиціонуванням та забезпечення прийняття рішень в реальному часі. Результати імітаційного моделювання підтверджують можливість забезпечення меншого відхилення навігаційних параметрів до 30 м відносно відомого рішення із застосуванням алгоритму PSO 340–400 м по висоті.

Ключові слова: комунікаційні мережі, FANET, LoRa, комунікаційні аероплатформи, топологія, траєкторія польоту, прогнозування, фільтрація Калмана, енергоефективність, продуктивність мережі, радіоелектронна протидія

R. Bieliakov, O. Fesenko, V. Ostapchuk, H. Radzivilov Methodology positional controlling of communications aerial platform in FANET in the minds of inflection of radio electronic countermeasures.

The article considers the method of controlling the positioning of communication aerial platforms in the FANET network in the conditions of radio-electronic countermeasures to achieve the target function: increasing the accuracy of managing the navigation parameters (movement) of communication aerial platforms (reducing the deviation from the target trajectory). The work shows the process of controlling the parameters of FANET communication aerial platforms positioning in the process of deployment, operation, and control of the rotation process of the main node of the air communication subnet.

The deviation of the navigation parameters of the communication aerial platforms was estimated using simulation modeling. The process of determining the coordinates of the communication aerial platforms based on the received signals (probes) on the main transmission channel has been formalized. The article shows the use of a backup channel based on LoRa, to maintain control in conditions of loss of GPS signals, which can become the basis for estimating the energy consumption of the communication aerial platforms network in the process of information exchange. The process of adaptive adjustment of the navigation parameters of the communication aerial platforms is proposed to be carried out using the Kalman filter. The scientific novelty of the method consists in the application of a scientifically methodical apparatus of trigonometric transformations of the channel matrix and calculation of azimuthal and elevation angles for additional correction of navigation parameters by positioning the communication aerial platforms relative to the mobile base station.

This approach allows you to achieve optimization of the target functions of the positioning management process and ensure real-time decision-making. The results of simulation modeling confirm the possibility of providing a smaller deviation of navigation parameters up to 30 m compared to the known solution using the PSO algorithm 340–400 m in height.

Keywords: communication networks, FANET, LoRa, communication aerial platforms, topology, flight path, forecasting, Kalman filtering, energy efficiency, network performance, electronic countermeasures.

Постановка задачі. Забезпечення зв'язку в інтересах підрозділів Збройних Сил України (далі – ЗСУ) стикається зі зростаючою тенденцією радіоелектронної протидії з боку російського агресора. Внаслідок таких дій виникає низка задач щодо функціонування засобів зв'язку ЗСУ з урахуванням обмежень. Одним із можливих рішень є розгортання мереж FANET [1; 2].

Необхідно зазначити, що складність застосування мереж класу FANET у зонах активних бойових дій полягає у тимчасовій або повній відсутності сигналів супутникових систем, які використовуються для корекції навігаційних параметрів комунікаційних аероплатформ, що обумовлює впровадження нових підходів і методик для реалізації процесу управління траєкторією. Це обмеження спонукає застосовувати додатковий комплекс програмно-апаратних засобів, додаткових каналів управління для компенсації шумів та направлених завад, застосовувати складні математичні перетворення та алгоритми фільтрації тощо. Один зі шляхів удосконалення процесу корекції навігаційних параметрів комунікаційних аероплатформ в умовах радіоелектронної протидії є використання резервних низькошвидкісних каналів зв'язку типу Long Range (далі – LoRa). Необхідно зазначити, що низькошвидкісні канали зв'язку типу LoRa не є єдиним можливим підходом для забезпечення функціонування в умовах активної радіопротидії, і також можуть піддаватися впливам завад, суттєво погіршуючи свої характеристики [3].

Однак, особливістю LoRa є можливість адаптивної зміни структури повідомлення, тобто використання завадостійкого кодування, для зменшення імовірності втрати пакетів навіть при переважаючій за рівнем перешкод. Так, у статті [4] наведено математичну модель FANET із застосуванням в якості резервного додатковий низькошвидкісний канал типу LoRa в умовах складної заводої обстановки, що надихнуло авторів до написання статті в цій предметній області.

Отже, вирішення наукової задачі забезпечення мінімального відхилення траєкторії КА в процесі польоту під час тимчасового або повного зникнення опорного сигналу глобальної супутникової системи для компенсації похибки позиціонування КА, що наростає із часом, є актуальним.

2. Аналіз останніх публікацій. Процес управління положенням КА, що знайшли своє застосування як окремо, так і у складі FANET, супроводжується значною кількістю публікацій.

У [5] використовуються алгоритми машинного навчання з підкріпленням для прогнозування 3D-траєкторії польоту КА, однак оптимізація часу функціонування мережі не розглядалася, також не було враховано модель шуму.

У [6] авторами запропонована модель управління розгортанням та оперативного управління КА FANET мережі. В статті визначено, що прогнозування відхилення маршруту польоту здійснюється завдяки алгоритму Калмана. Однак детально процес прийняття рішення з управління КА не розкритий, також не наведено, які навігаційні параметри застосувались, що суттєво впливає на результат прогнозування.

Так, в статті [7] показано спосіб побудови топології FANET, а саме процес забезпечення зв'язності між наземною станцією управління та КА, завдяки управлінню параметрами позиціонування безпілотної літальної апаратури (далі – БпЛА). Авторами запропоновано алгоритм побудови топології FANET з урахуванням алгоритму оптимізації рою частинок (Particle Swarm Optimization, PSO). Численні результати показують, що запропонований алгоритм досягає значного приросту продуктивності порівняно зі схемою побудови топології, яка застосовує моделі алгоритмів на основі нормального розподілу. Однак автори застосовують лінійну імітаційну модель у двомірній площині, що ускладнює процес оцінки впливу високої динаміки переміщення на параметри позиціонування КА, також у статті не досліджено вплив шуму на процеси обміну даними.

У науковому дослідженні [8] представлено процеси управління комунікаційними вузлами (КА) мережі на основі повнозв'язної домінуючої множини параметрів, суть якої полягає у вирішенні задачі багатокритеріальної оптимізації, а саме управління параметрами потужності, передачі та положенні вузлів під час побудови первинної топології. Автори розробили групу алгоритмів для побудови та підтримки топології за допомогою дискретизованого за часом підходу. Результати симуляції показують, що запропонований спосіб має кращу продуктивність під час управління КА порівняно із загальним алгоритмом оптимізації рою частинок. Однак автори статті не розглядали випадки розгортання мережі FANET під час зникнення опорних сигналів глобальних супутникових систем, крім того, авторами було застосовано допущення щодо представлення моделі БпЛА як довільної точки в просторі, що не дозволяє застосувати запропонований алгоритм для забезпечення мінімально допустимого відхилення навігаційних параметрів в умовах радіоелектронної протидії (далі – РЕП). Можливість динамічного управління топологією, траєкторією переміщення КА, їхнім взаємним розміщенням, локацією точок зависання та інтервалами обміну даними з повітряними комунікаційними вузлами суттєво впливає на ефективність інформаційного обміну [9].

Таким чином, у статті запропоновано застосувати для управління позиціонуванням КА під час зникнення глобальних систем позиціонування найпоширеніший алгоритм – фільтр Калмана, та оцінити його ефективність щодо існуючого рішення на основі алгоритму PSO – фільтра частинок.

Метою статті є розробка методики управління параметрами позиціонування КА в умовах РЕП.

Виклад основного матеріалу. Розглядаються елементи повітряної мережі КА на етапі розгортання (польоту до визначених географічних координат) під час втрати опорного сигналу глобальної системи навігації внаслідок впливу РЕП.

КА підтримують однакові протоколи інформаційного обміну, мають обмежені дальність радіозв'язку і швидкість обміну. Кожен вузол мережі має власну систему управління, діє в кооперації з іншими вузлами мережі і КА.

БпЛА (КА) обладнані: прийомопередавачем із можливістю переналагодження на резервний низькошвидкісний канал LoRa; антенною системою МІМО 2*2; інерціальною навігаційною системою та приймачем GPS-сигналів глобальної навігаційної супутникової системи.

Роль центру управління повітряної мережі виконує мобільна базова станція (далі – МБС) (рис. 1), що обладнана комунікаційним обладнанням MU-MIMO, відносно якої відбувається коригування навігаційних параметрів позиціонування КА.

Процес управління кожною КА FANET здійснюється через МБС, яка має можливість адаптації променю діаграми направленості антени від широкого, на початковому етапі пошуку сусідніх вузлів КА – КА, до вузьконаправленого – при передачі даних вибраному головному вузлу КА відносно МБС.

Під час впливу РЕП можливі чотири типові сценарії:

- нормальне функціонування (номінальний режим);
- зникнення GPS, основний інформаційний канал функціонує – корекція цільових координат позиціонування КА здійснюється за сигналами від МБС по основному каналу;
- зникнення GPS, основний інформаційний канал не функціонує/якість каналу незадовільна – відбувається переналаштування на резервний канал, корекція цільових координат позиціонування КА здійснюється за сигналами від МБС по резервному каналу LoRa;
- втрати основного, резервного каналу управління та сигналу глобальних супутникових систем – виконується процедура аварійного повернення «додому» або посадка.

Вихідні дані:

кількість КА, якими здійснює управління одна МБС, $N_{КА}$;

початкова енергія батареї $E_{КА}$;

визначена висота зависання h КА;

відстань між КА $d \leq d_{max}$;

інтервали відправки службової інформації Δt ;

функція вихідних навігаційних параметрів локальної системи координат КА

$$p_{local}(t) = [lat(t), lon(t), alt(t), v(t), \theta(t), \psi(t), \phi(t)];$$

$lat(t), lon(t), alt(t)$ – широта, довгота та висота в час t ;

$v(t)$ – швидкість КА;

$\theta(t), \psi(t), \phi(t)$ – кути орієнтації (кут нахилу, курс, крен);

функція прогнозованих навігаційних параметрів КА на МБС;

$$p^*(t + \Delta t) = [lat(t + \Delta t), lon(t + \Delta t), alt(t + \Delta t), v(t + \Delta t), \theta(t + \Delta t), \psi(t + \Delta t), \phi(t + \Delta t)]. \quad (1)$$

Допущення: Обмін даними між КА здійснюється за нормальних погодних умов.

Кожна КА оновлює свої координати через GPS у випадку його наявності.

Під час впливу РЕП можливі чотири типові сценарії:

- нормальне функціонування (номінальний режим);
- зникнення GPS, основний інформаційний канал функціонує – корекція цільових координат позиціонування КА здійснюється за сигналами від МБС по основному каналу;
- зникнення GPS, основний інформаційний канал не функціонує/якість каналу незадовільна – відбувається переналаштування на резервний канал, корекція цільових координат позиціонування КА здійснюється за сигналами від МБС по резервному каналу LoRa;
- втрати основного, резервного каналу управління та сигналу глобальних супутникових систем – виконується процедура аварійного повернення «додому» або посадка.

Необхідно:

Забезпечити мінімальне відхилення позиціонування в просторі КА в умовах роботи засобів РЕП противника відносно заздалегідь визначених координат на етапі планування за критерієм мінімального відхилення положення в просторі, шляхом управління параметрами позиціонування.

$$\left| (p_{local}(t) - p^*(t)) \right| \xrightarrow{\Delta} min. \quad (2)$$

Для рішення поставленої задачі для виконання цільової функції пропонується:

- побудувати математичну модель корегування навігаційними параметрами КА в умовах РЕП противника;
- розробити алгоритм управління та взаємодії (обміну даними) між КА та МБС в умовах зникнення глобальних супутникових сигналів;
- застосувати алгоритм Калмана для мінімізації відхилення навігаційних параметрів КА, враховуючи фізико-математичну модель позиціонування КА;
- здійснити оцінку ефективності відхилення отриманих навігаційних параметрів польоту КА відносно еталонних параметрів (з GPS) в умовах впливу РЕП.

На рисунку 1 показано алгоритм процесу польоту КА від МБС: рисунок 1, a – у вертикальній площині, рисунок 1, b – у горизонтальній площині, політ до визначених географічних координат, розрахованих на етапі планування. Процес розльоту КА відбувається послідовно, від КА₁ до КА₄, далі відбувається набір встановленої висоти зависання h відносно визначених географічних координат МБС.

Процес розльоту після набору висоти кожним КА (рис. 1, a, b) позначено вертикальною пунктирною лінією червоного кольору. На рисунку 1, a показано Δh – похибку висоти відносно визначених координат, кут φ – елевацийний кут КА відносно МБС, що визначає особливість управління КА, тобто корекцію параметрів навігації на основі розрахунків коефіцієнтів каналної матриці.

На рисунку 1, b $\Delta y, \Delta x$ – відхилення у горизонтальній площині відносно встановлених географічних координат як результат обчислення похибки показників інерціальної навігаційної системи, тобто визначення власних координат КА відносно МБС.

Далі необхідно розглянути етапи побудови методики управління позиціонуванням КА FANET в умовах впливу РЕП противника.

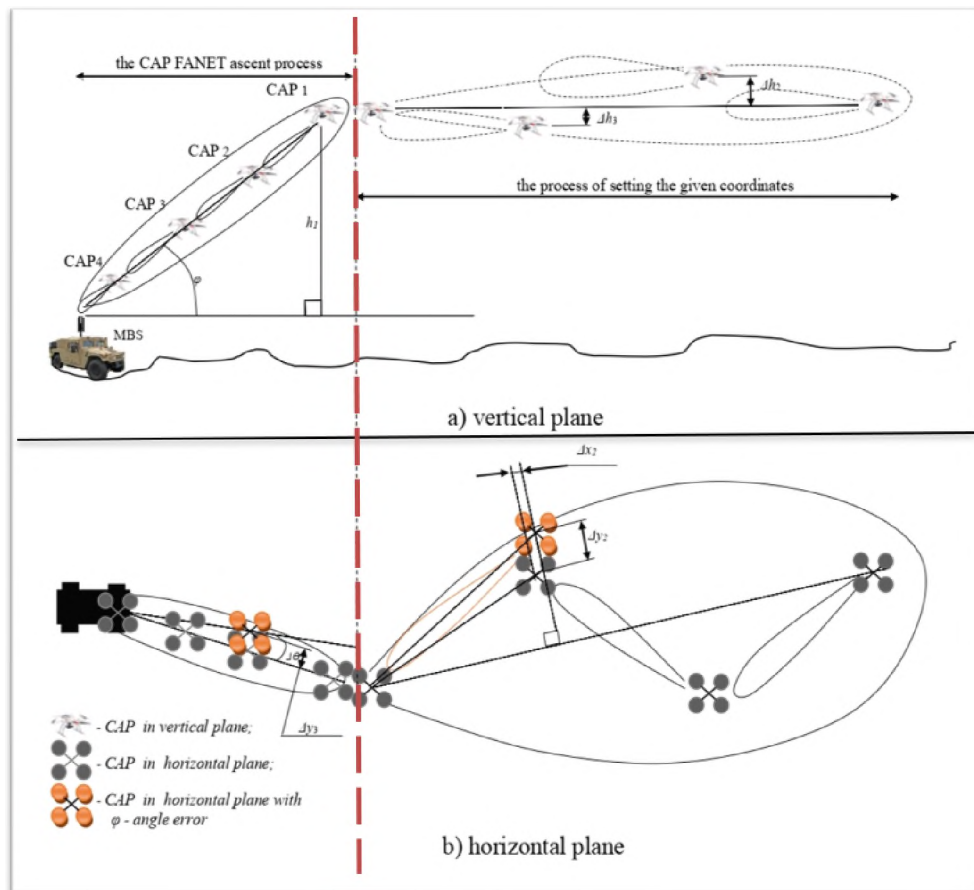


Рис. 1. Процес розгортання FANET підмережі [10]:
 а – процес розльоту КА(CAP) у вертикальній площині;
 б – процес розльоту КА(CAP) у горизонтальній площині

Однією із ключових особливостей методики є застосування резервного каналу зв'язку на базі алгоритму LoRa для забезпечення передачі пакетів даних, що включають в себе процес прогнозування і розрахунки параметрів позиціонування КА. Для забезпечення управління позиціонуванням (заданими координатами) застосовується алгоритм фільтрації Калмана.

Обробка навігаційних параметрів вектора стану КА здійснюється на МБС на основі запропонованої методики із канальних матриць для корекції позиціонування КА завдяки використанню властивостей рознесеного прийому сигналів.

Математична модель корегування навігаційними параметрами КА в умовах РЕП противника.

Для визначення позиції КА в просторі відносно МБС під час зникнення опорних сигналів глобальної супутникової системи застосовуються матричні операції: $x_{lMBS} = (x_l, y_l, z_l)$ – вектор положення КА в локальній системі координат, а $x_{gMBS} = (x_g, y_g, z_g)$ – вектор положення МБС в глобальній системі координат (на основі GPS) [9].

Зв'язок між векторами можна виразити через матрицю обертання, тобто процес повороту **Rot** та вектора зсуву **Div** (3):

$$x_{gMBC} = \mathbf{Rot}x_{IKA} + \mathbf{Div}. \quad (3)$$

Матриця обертання \mathbf{Rot} складається з трьох ортонормованих стовпців, які представляють напрямки осей локальної системи координат в глобальній системі координат, $\mathbf{Rot} = [u_x \ u_y \ u_z]$; вектор зсуву \mathbf{Div} дорівнює різниці між початком локальної системи координат і початком глобальної системи координат (4):

$$\mathbf{Div} = (o_{gMBC} - o_{IKA})^2. \quad (4)$$

Для зворотного перетворення з глобальних координат в локальні координати потрібно помножити обидві частини рівняння на \mathbf{Rot}^T (транспоновану матрицю обертання) і відняти \mathbf{Div} (5):

$$x_{IKA} = \mathbf{Rot}^T(x_{gMBC} - \mathbf{Div}). \quad (5)$$

Кожне повідомлення на прийомній стороні КА, які обладнані антеною МІМО 2*2 на БПЛА, приймається і формується канална матриця (6), на МБС із системою 4*4 – (7).

Під час прийому зондувального сигналу RTS канална матриця \mathbf{CH}_{RTS}^{KA1} для кожної КА може бути визначена як (6):

$$\mathbf{CH}_{RTS}^{KA1} = \begin{pmatrix} r_{11}^{KA1} & r_{12}^{KA1} \\ \vdots & \vdots \\ r_{41}^{KA1} & r_{42}^{KA1} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

де r_{ij}^{KA1} – каналний коефіцієнт від i -тої передавальної антени базової станції до j -тої приймальної антени на КА (КА₁).

Отримавши сигнал, КА надсилає CTS у відповідь (7):

$$\mathbf{CH}_{CTS}^{MBC} = \begin{pmatrix} r_{11}^{MBC} & \dots & r_{14}^{MBC} \\ r_{21}^{MBC} & \dots & r_{24}^{MBC} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Так, з кожним періодично відправленим зондом RTS буде здійснюватися підлаштування кутів орієнтації (рис. 1) шляхом обробки даних із каналної матриці та синхронізації із кутами Ейлера КА.

Математично елемент каналної матриці r_{ij}^a , ($a = \overline{MBC, KA}$) можна виразити (8):

$$r_{ij}^a = \alpha_{ij} e^{j(\omega t + \phi_{ij})}, \quad (8)$$

де α_{ij} – коефіцієнт затухання між i -тою передавальною антеною та j -тою приймальною антеною; ω – кутова частота сигналу; t – час; ϕ_{ij} – фазовий зсув між i -тою передавальною антеною та j -тою приймальною антеною.

Із рисунка 1 можливо визначити розрахункову координату z , що відповідатиме фактичній висоті h підйому КА (9):

$$h = d \cdot \sin(\varphi), \quad (9)$$

де $d = 10^{\left(\frac{L(d) - L_0 - 20 \log_{10}(f)}{20}\right)}$ – відстань між антеною базової станції та антеною КА в метрах; $L(d)$ – затухання сигналу в децибелах на відстані; L_0 – константа затухання, залежить від конфігурації антен; f – частота сигналу в герцах; φ – елеваційний кут на КА (10).

Азимутальний θ та елеваційний кут φ можливо визначити із коефіцієнтів каналної матриці (10), (11):

$$\varphi = \arccos\left(\frac{\sum |h_{ii}|}{2\sqrt{\sum |h_{ji}|^2}}\right); \quad (10)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sum \Im(h_{ij}h_{ji}^*)}{\sum \Re(h_{ii}h_{jj}^*) - \sum \Re(h_{ij}h_{ji}^*)}\right). \quad (11)$$

На основі (9)–(11) можливо розрахувати фактичні координати x та y , що відображено графічно на рисунку 1.

Отже, процес корекції навігаційних даних кожної КА на етапі набору висоти процесу зайняття визначених координат зависання (рис. 1, ліва частина) зі сторони мобільної базової станції відбуватиметься за алгоритмом, представленим нижче. Далі описано алгоритм управління КА з урахуванням впливу РЕП.

Алгоритм управління позиціонуванням КА FANET складається з наступних шести етапів:

1. Взліт КА з визначеним часовим інтервалом на визначені координати зависання.
2. Періодична оцінка власного місцезнаходження та корекція координат у випадку наявності сигналів GPS та задовільного рівня сигналу основного каналу КА-МБС.
3. Корекція траєкторії польоту під час набору висоти. МБС відправляє RTS-зонд КА для встановлення зв'язку та прогнозує параметри позиціонування КА з метою корекції навігаційних параметрів, адаптації діаграми направленості в горизонтальній і вертикальній площині, та з урахуванням похибки прогнозу по отриманому CTS-зонду формує коригуючий RTS-зонд на відправку. У випадку, коли МБС не отримує CTS-зонд у відповідь вперше – повторно відправляє зонд RTS, якщо знов збій, то система управління приймає рішення на зміну параметрів передачі та/або вузлової цільової функції, надсилає коригуючий RTS-зонд із урахуванням прийнятого рішення, та здійснюється оновлення даних про стан повітряної мережі для їхнього застосування під час зльоту наступних КА.
4. Призначення голови кластера КА_{ГК}. МБС визначає КА, яка досягла висоти H_0 першою; КА займає найближче географічне положення відносно МБС та відправляє АСК-зонд, що свідчить про готовність прийняття управління іншими КА за сигналами від МБС. МБС приймає рішення щодо призначення цієї КА головою кластера, визначає вихідну топологію та знову оновлює вихідні дані.
5. Політ КА на визначені координати та підтримка топології повітряної мережі. Інші КА, які досягли площини розльоту, коли голова кластера вже призначена, прямують на свої визначені координати, відправляючи RTS-зонду КА_{ГК} та здійснюючи корекцію вже через голову кластера. На наступних кроках алгоритму МБС і КА_{ГК} продовжують взаємодіяти для підтримки топології FANET та реалізують за необхідності зміну мережевих цільових функцій; МБС відправляє RTS-зонди КА_{ГК} для встановлення зв'язку і передачі даних. КА_{ГК} формує коригуючі RTS-зонди для корекції навігаційних даних КА-сусідів.
6. Ротація КА_{ГК}, зліт нових КА та прийняття рішень на згортання. За критерієм максимуму часу функціонування $T_f \geq T_{fmax}$, або за командою від МБС здійснюється виконання рішень управління процесами відповідно до сценарію функціонування.

Отже, алгоритм управління параметрами позиціонування КА в FANET забезпечує виконання польотного завдання, що складається з основних етапів: визначення голови кластера, точного розрахунку базового маршруту польоту КА, адаптації ДН, корегування навігаційних даних КА і згортання FANET за потреби.

Реалізація алгоритму управління параметрами позиціонування КА FANET зі сторони КА дзеркально відображає роботу алгоритму на стороні МБС.

Оцінка ефективності запропонованої методики.

З метою оцінки ефективності запропонованої методики було проведено експеримент із використанням програмного середовища Python 3.9.1. та пакету бібліотеки pyLora на ПЕОМ.

Вхідні дані моделювання:

середня швидкість руху повітряного комунікаційного вузла на КА – 75 км/год;

площина функціонування FANET – 3*5 км;

кількість КА, якими здійснює управління одна МБС, – $N_{КА} = 4$;

початкова енергія батареї комунікаційного вузла $E_{ка} = 12\ 800$ мА*год;

висота зависання h КА – 700 м;

взаємна відстань між КА d до 800 м, розподіл вихідних точок зависання визначаються за рівномірним розподілом;

інтервали відправки зондів – до 2 с;

параметри резервного каналу LoRa [1–3]: $n_{preamble}$ – кількість символів у преамбулі = 8;

PL – розмір корисного навантаження в бітах = (36 байт, тобто 288 біт); SF – коефіцієнт розширення спектру = 12; BW – смуга пропускання – 125 кГц; CR – швидкість кодування 4/8, де перші 4 біти – корисне навантаження, а інші 4 біти – надлишкові біти для ідентифікації повідомлення та синхронізації параметрів діаграми направленості антени; P_{noise} – вплив РЕП на резервний канал LoRa у діапазоні 433–800 МГц;

параметри фільтра Калмана визначені у [7];

час моделювання процесів управління маршрутом польоту до визначених координат зависання КА ≈ 20 хв.

Результат моделювання:

$lat(t)$, $lon(t)$, $alt(t)$ – широта, довгота та висота за час моделювання t .

Оцінку ефективності відхилення отриманих навігаційних параметрів (результат застосування фільтра Калмана) польоту КА відносно еталонних параметрів з GPS в умовах зникнення глобальних супутникових систем та впливу РЕП здійснено за допомогою статистичного критерію середньоквадратичного відхилення.

Завдяки застосуванню методики на основі фільтрації Калмана [7] та порівняно з існуючим рішенням [8] на основі фільтра частинок (PSO) були отримані статистична вибірка значень цільової функції (аргументами якої є навігаційні параметри за широтою, довготою та висотою) та розрахунок середньоквадратичного відхилення RMSE навігаційних параметрів (табл. 1, 2), а графічні результати наведено на рисунках 2, 3.

Із графіків (рис. 2) видно результат відхилення географічних параметрів (широти, довготи та висоти) КА відносно прогнозованих, отриманих за допомогою фільтра Калмана (фрагмент 500 с) відносно еталонних параметрів із GPS-сигналами. Результати, наведені в таблиці 1, показують, що в основному відхилення збільшуються за висотою (в середньому 30 метрів за 500 секунд) відносно заданих координат.

Таблиця 1

Середньоквадратичне відхилення навігаційних параметрів КА

КА	RMSE Latitude	RMSE Longitude	RMSE Altitude
1	0,37317	0,26015	16,67
2	0,301882	0,24906	23,89
3	0,311578	0,57083	24,45
4	0,299579	0,29085	30,56

Використовуючи імітаційне моделювання процесів управління позиціонуванням на основі **фільтра частинок (PSO)** були отримані графіки середнього значення втрати пакетів та дисперсії цього значення для кожної КА, внаслідок відхилення навігаційних параметрів за широтою, довготою та висотою (рис. 3).

На графіках (рис. 3) показано результат прогнозування географічних параметрів (широти, довготи та висоти) КА, отриманих завдяки існуючому рішення на основі фільтра частинок відносно еталонних параметрів із GPS-сигналами.

Результати, зведені до таблиці 2, показують, що максимум відхилення припадає по параметру висоти КА, і складає в середньому 340–400 метрів відносно координат точок зависання, заданих на етапі планування, що є більшим від запропонованої методики на 45 %. Результат моделювання дозволяє стверджувати, що велика розбіжність значень висоти КА корелює з постійним збільшенням частоти корекційних сигналів і, як наслідок, може прискорити розряд батареї.

Таблиця 2

Середньоквадратичне відхилення навігаційних параметрів КА

КА	RMSE Latitude	RMSE Longitude	RMSE Altitude
1	0,37317	1,26015	384,21
2	0,301882	1,24906	234,294
3	0,311578	0,57083	240,81
4	1,299579	2,29085	680,45

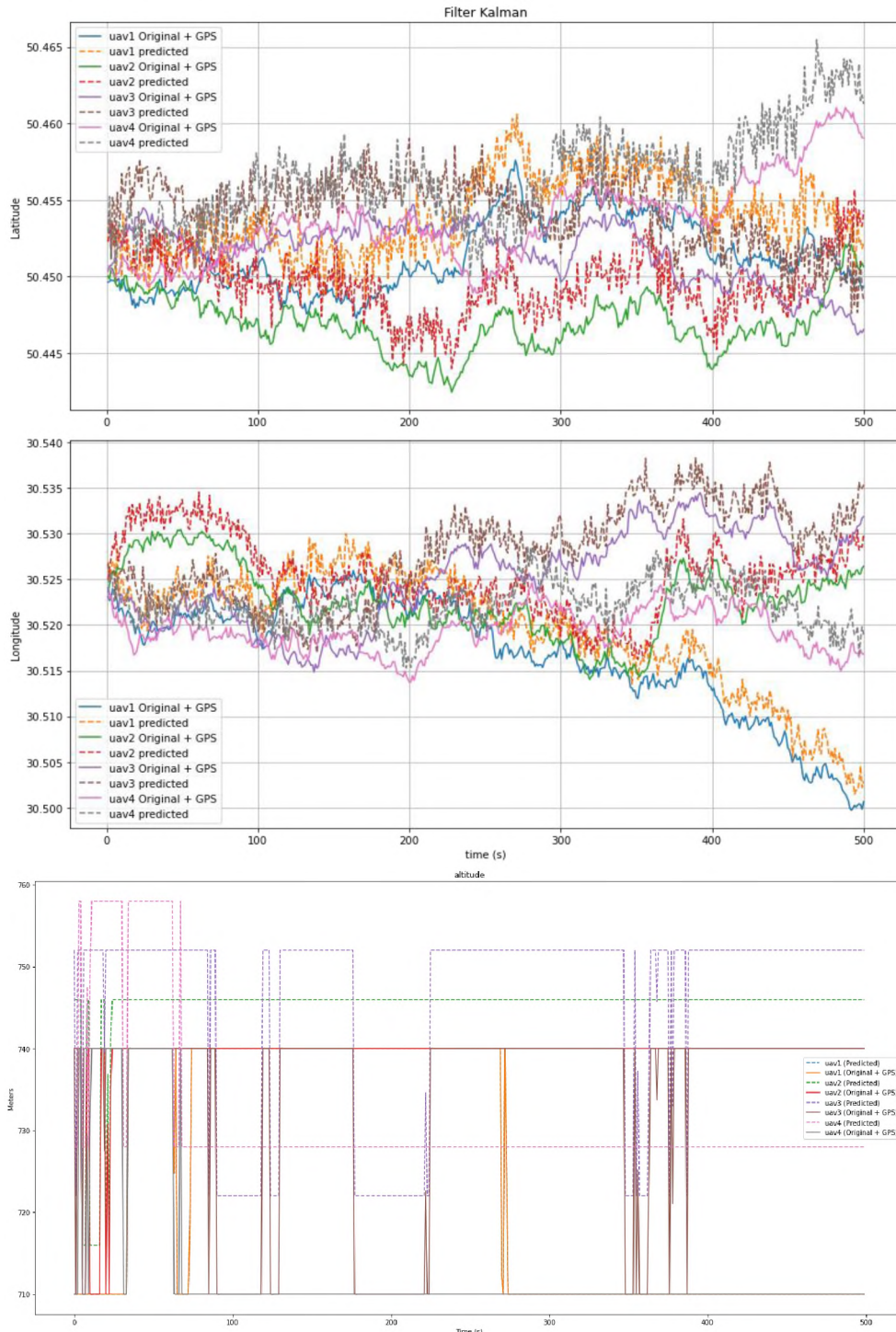


Рис. 4. Графіки результатів адаптивного прогнозування координат на основі фільтра Калмана (траєкторії польоту) відносно еталонної траєкторії з GPS

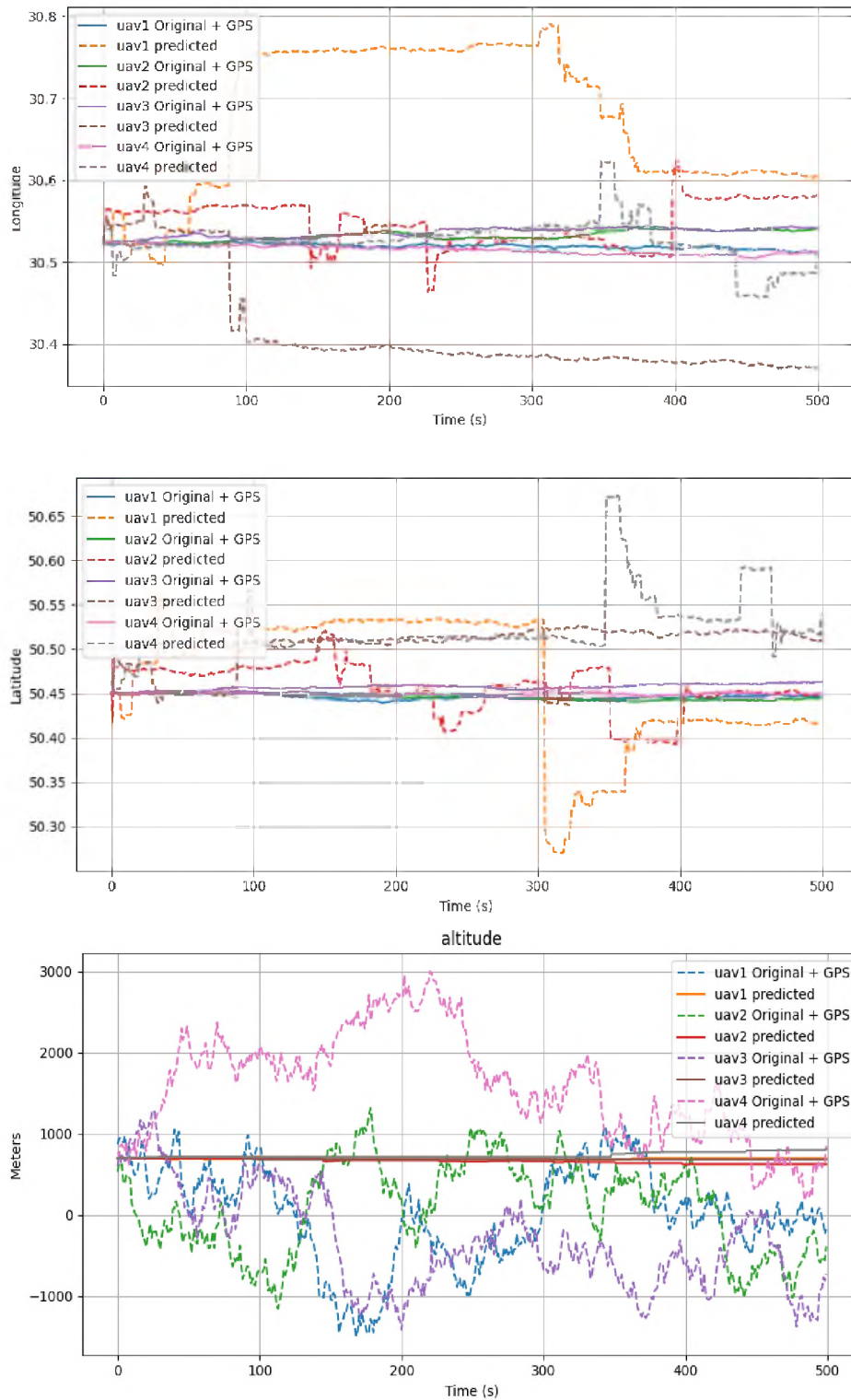


Рис. 5. Графіки результатів адаптивного прогнозування координат на основі фільтра частинок (траєкторії польоту) відносно еталонної траєкторії з GPS

Висновки. В роботі показано процес управління параметрами позиціонування КА у процесі розгортання, функціонування та управління процесом ротації головного вузла повітряної комунікаційної мережі. Описано математично та подано у вигляді структурних блок-схем алгоритми взаємодії між КА FANET та МБС в умовах РЕП або тимчасової відсутності сигналів глобальної супутникової системи. Здійснено оцінку кількості втрачених

пакетів у процесі управління та корекції навігаційних параметрів КА з наземного пункту управління – МБС та через голову кластера в процесі функціонування (оперативного управління).

У статті формалізовано процес визначення координат КА за прийнятими сигналами (зондами) по основному каналу передачі, причому враховано характеристики резервного каналу LoRa для збереження управління в умовах втрати GPS-сигналів. Процес адаптивного підлаштування навігаційних параметрів КА в роботі пропонується здійснювати з використанням фільтра Калмана.

Розроблена методика процесу управління позиціонуванням КА може забезпечити прийняття рішення в реальному часі, а результати імітаційного моделювання підтверджують можливість забезпечення меншого відхилення навігаційних параметрів до 30 м відносно відомого рішення із застосуванням алгоритму PSO 340–400 м по висоті.

Напрямом подальшого дослідження є застосування нейронних мереж для вироблення керуючих впливів для управління топологією FANET з урахуванням запропонованої в статті методики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Al-Hajri M. S., Al-Sheikh M. S., Al-Sulaiman S. Analysis of RF interference on LoRa modulation // IEEE Access. 2022.
2. Al-Omari A. A., Al-Abed M. A., Al-Azzawi A. A. Performance of LoRaWAN in the presence of RF interference // International Journal of Electronics and Communications. 2022.
3. Performance Analysis of Long Range Communication for FANETs in Urban Environments, by S. A. Al-Ghamdi, M. A. Al-Hourani, and A. H. Al-Bayatti, published in the IEEE Transactions on Vehicular Technology journal in 2022.
4. A Robust and Efficient Positioning Approach for FANETs in the Presence of Jamming by X. Zhang, Y. Wang, and X. Wang, published in IEEE Transactions on Vehicular Technology. July 2022. Vol. 66. No. 7. P. 6097–6109.
5. Nguyen K. K., Duong T. Q., Do-Duy T., Claussen H., Hanzo L. 3D UAV Trajectory and Data Collection Optimization via Deep Reinforcement Learning // IEEE Transactions on Communications. 2022. DOI: doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3148364.
6. Yan Yunfei, Peng Sun, Jieyong Zhang, Yutang Ma, Liang Zhao, Yueyi Qin. Dynamic QoS Prediction Algorithm Based on Kalman Filter Modification // Sensors. 2022. No. 22 (15). P. 5651. DOI: https://doi.org/10.3390/s22155651.
7. Polara Vishal, Jagdish Rathod. Cost Optimization Approach for MANET using Particle Swarm Optimization // International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. 2023. No. 11 (8). P. 90–98. DOI: https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i8.7927.
8. A Cooperative Positioning Scheme for FANETs in the Presence of Jamming and Uncertainties by Y. Wang, X. Zhang and X. Wang. Published in IEEE Transactions on Vehicular Technology. July 2023. Vol. 72. No. 7. P. 5826–5837.
9. Bieliakov R., Fesenko O. FANET management process simulation at the deployment and operation stage // Technology Audit and Production Reserves. 2023. No. 5 (2 (73)). P. 40–47. DOI: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290033.
10. Borkivska Olga, Zhurakovskiy Bohdan, Platonenko Artem. Smart City Information System Based On Lora Technology Annotation // Cybersecurity: Education, Science, Technique. 2022. No. 16 (4). P. 113–28. DOI: https://doi.org/10.28925/2663-4023.2022.16.113128.
11. A 3D MATLAB/Simulink Model of an Unmanned Aerial Vehicle for Control Design and Simulation by A. A. Al-Sheikhly, M. A. Al-Ghamdi and M. A. Al-Shehbaz // IEEE Transactions on Systems.
12. Bieliakov R., Fesenko O. Mobility model of a special purpose terrestrial communication network // Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production. 2023. No. 51. P. 130–138. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-17.