

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-63-36>

УДК 621.396.7:004.94

**Зінченко Наталія Романівна**, заступник начальника навчального відділу

<https://orcid.org/0009-0004-1837-2838>

**Чурилов Ігор Олександрович**, заступник начальника інституту з навчальної роботи

<https://orcid.org/0009-0003-9627-3221>

**Беляков Роберт Олегович**, д.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0001-9882-3088>

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, Україна

## УДОСКОНАЛЕНА МОДЕЛЬ ГРАФОВОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ЗАДАЧ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ ТОПОЛОГІЄЮ

**Зінченко Н.Р., Чурилов І.О., Беляков Р.О. Модель графового представлення інформаційно-комунікаційних мереж спеціального призначення для задач маршрутизації та управління топологією.** У сучасних наземно-повітряних інформаційно-комунікаційних мережах спеціального призначення класу MANET/FANET однією з ключових задач є формалізоване представлення їх структури, стану та динаміки функціонування в умовах високої мобільності вузлів, нестабільності радіоканалів, обмеженості енергетичних ресурсів, змінного інформаційного навантаження та зовнішніх деструктивних впливів. Класичне графове подання мережі у вигляді множини вузлів і ребер із скалярними вагами не повною мірою відображає взаємозалежність радіоресурсних, комунікаційних, енергетичних характеристик каналів зв'язку. У статті запропоновано кватерніонно-графову модель представлення наземно-повітряної інформаційно-комунікаційної мережі спеціального призначення, яка передбачає зонально-ієрархічну декомпозицію мережі на наземний, повітряний, сенсорний, базовий та міжсегментний графи. Для кожного ребра динамічного графа формується вектор характеристичних ознак, що включає показники *SINR*, *BER*, пропускну здатності, затримки, енергетичного ресурсу та ризику радіоелектронного впливу. Зазначені ознаки агрегуються у кватерніон стану ребра, компоненти якого характеризують радіоресурсну якість, комунікаційну спроможність, стійкість каналу. На відміну від адитивної згортки скалярних ваг, інтегральний стан маршруту визначається на основі добутку Гамільтона, що дозволяє враховувати порядок проходження ребер, спрямований характер маршруту та накопичувальний ефект зміни якості каналів уздовж шляху. Запропоновано алгоритм визначення активної топології та субоптимального маршруту, який забезпечує вибір множини доцільних для підтримання ребер і маршруту з максимальним значенням критерію субоптимальності. Отримана модель створює математичну основу для адаптивного управління маршрутизацією і топологією наземно-повітряних мереж в умовах динамічного середовища функціонування.

**Ключові слова:** прогнозування, наземно-повітряна комунікаційна мережа, система управління, MANET, FANET, інформаційно-комунікаційна мережа спеціального призначення, графова модель, кватерніонне представлення, добуток Гамільтона, активна топологія, субоптимальна маршрутизація, управління топологією, прийняття рішень.

**Zinchenko N., Churilov I., Bieliakov R. A model of graph-based representation of special-purpose information and communication networks for routing and topology control tasks.** In modern special-purpose ground-air information and communication networks of the MANET/FANET class, one of the key tasks is the formalized representation of their structure, state, and operational dynamics under conditions of high node mobility, unstable radio channels, limited energy resources, variable information load, and external destructive impacts. The classical graph-based representation of a network as a set of nodes and edges with scalar weights does not fully reflect the interdependence of radio-resource, communication, energy characteristics of communication channels. The article proposes a quaternion-graph model for representing a special-purpose ground-air information and communication network, which provides for the zonal-hierarchical decomposition of the network into ground, aerial, sensor, base, and intersegment graphs. For each edge of the dynamic graph, a vector of characteristic features is formed, including SINR, BER, throughput, delay, energy resource, and electronic warfare risk indicators. These features are aggregated into a quaternion of the edge state, the components of which characterize the radio-resource quality and communication capability, stability of the channel. Unlike the additive convolution of scalar weights, the integral state of the route is determined on the basis of the Hamilton product, which makes it possible to take into account the order of edge traversal, the directed nature of the route, and the cumulative effect of changes in channel quality along the path. An algorithm for determining the active topology and suboptimal route is proposed, which ensures the selection of a set of edges appropriate for maintaining and a route with the maximum value of the suboptimality criterion. The obtained model creates a mathematical basis for adaptive routing and topology control of ground-air networks under dynamic operating conditions.

**Keywords:** prediction, ground-air communication network, control system, MANET, FANET, special-purpose information and communication network, graph model, quaternion representation, Hamilton product, active topology, suboptimal routing, topology control, decision-making.

### Постановка наукового завдання.

Для управління процесами інформаційного обміну в перспективних наземно-повітряних комунікаційних мережах спеціального призначення класу MANET і FANET однією з ключових задач є формалізоване представлення їх структури, стану та динаміки функціонування. Такі мережі можуть включати наземні комунікаційні вузли, мобільні базові станції, безпроводові сенсорні

мережі, ретрансляційні вузли та підмережі повітряних комунікаційних аероплатформ. При цьому розмірність окремих підмереж може сягати сотень або тисяч абонентів, кожен з яких формує запити на реалізацію різних сервісів інформаційного обміну, що створює значне функціональне навантаження на систему управління.

**Метою статті** є обґрунтування кватерніонно-графової моделі представлення інформаційно-комунікаційних мереж спеціального призначення та формалізація процесів визначення субоптимального стану маршрутизації й топології наземно-повітряної мережі класу MANET/FANET.

**Об'єктом дослідження** є процеси функціонування наземно-повітряних інформаційно-комунікаційних мереж спеціального призначення в умовах динамічної зміни топології, параметрів каналів зв'язку, інформаційного навантаження та зовнішніх деструктивних впливів.

**Предметом дослідження** є математичні моделі графового та гіперкомплексного представлення станів вузлів, каналів зв'язку, маршрутів і топології наземно-повітряних інформаційно-комунікаційних мереж спеціального призначення.

**Основними завданнями статті є:**

1. Провести аналіз існуючих графових моделей, методів маршрутизації та підходів до управління топологією в наземно-повітряних комунікаційних мережах класу MANET і FANET.

2. Визначити особливості функціонування наземно-повітряних інформаційно-комунікаційних мереж спеціального призначення, які зумовлюють необхідність зонально-ієрархічного та багатокритеріального представлення їх структури.

3. Формалізувати модель наземно-повітряної мережі у вигляді сукупності взаємопов'язаних динамічних підграфів управління з урахуванням наземного, повітряного, сенсорного та базового сегментів.

4. Запропонувати кватерніонне представлення станів ребер графа на основі агрегованих характеристичних ознак каналів зв'язку, що відображають радіресурсну якість, комунікаційну спроможність і стійкість.

5. Формалізувати процедуру визначення субоптимального маршруту на основі композиції кватерніонних станів ребер із використанням добутку Гамільтона.

6. Обґрунтувати можливість використання запропонованої моделі для управління активною топологією мережі шляхом визначення множини ребер, доцільних для підтримання в поточних умовах функціонування.

**Аналіз останніх публікацій.**

У роботі [1] запропоновано підхід до управління топологією мережі БПЛА на основі навчання з підкріпленням. Автори розглядають задачу оптимізації зв'язності між вузлами рою БПЛА, аналізуючи їхнє взаємне просторове розташування та формуючи рішення щодо підтримання або зміни топологічних зв'язків. Перевагою такого підходу є можливість адаптивного управління структурою мережі в умовах мобільності вузлів. Водночас зазначений підхід здебільшого орієнтований на топологічну зв'язність і не забезпечує повного багатокритеріального опису стану ребра графа, зокрема з урахуванням комунікаційної спроможності, стійкості, енергетичного стану та ризику деструктивного впливу.

У дослідженні [2] розглянуто маршрутизацію в рої БПЛА із застосуванням багатоагентного навчання з підкріпленням. Автори запропонували підхід, у якому вузли мережі навчаються приймати кооперативні рішення щодо маршрутизації в умовах динамічної зміни топології. Особливу увагу приділено зменшенню службового навантаження, що виникає під час пошуку маршрутів у високодинамічних мережах. Цей підхід є близьким до задач наземно-повітряних мереж, однак його основний акцент зроблено на алгоритмічному аспекті маршрутизації, тоді як питання формалізованого багатовимірного представлення станів ребер і маршрутів у вигляді гіперкомплексної структури не розглядається.

У роботі [3] запропоновано протокол QLR-FANET, який поєднує Q-learning та механізми керування швидкістю передавання для мереж FANET. Такий підхід дозволяє адаптувати маршрути до змін параметрів повітряної мережі та підвищити ефективність передавання даних у динамічному середовищі. Важливо, що автори враховують специфіку FANET як мережі з високою мобільністю, нестабільними каналами та частими змінами топології. Разом із тим запропонований підхід залишається в межах класичної логіки вибору маршруту на основі навчання агента та не вводить

окремої математичної моделі багатокомпонентного стану каналу, яка б дозволяла описати ребро графа не скаляром, а структурованою гіперкомплексною величиною.

У роботі [4] запропоновано гібридний алгоритм багатошляхової маршрутизації, що поєднує Q-learning і AODV. Такий підхід є важливим для безпроводових мобільних мереж, оскільки дозволяє використовувати переваги класичних реактивних протоколів маршрутизації та адаптивність методів машинного навчання. Автори показують доцільність динамічного перемикавання між маршрутами, сформованими на основі Q-learning, та резервними шляхами, отриманими засобами AODV. Однак така модель здебільшого оптимізує поведінку протоколу маршрутизації, а не створює узагальненого математичного подання станів топології, придатного для комплексного аналізу наземного, повітряного, сенсорного та базового сегментів мережі.

У роботах [5, 6] значну увагу приділено огляду маршрутизації у FANET. Автори систематизують існуючі протоколи маршрутизації, зокрема проактивні, реактивні, географічні, кластерні, ієрархічні та інтелектуальні підходи. У цих роботах підкреслено, що для FANET характерними є висока швидкість зміни топології, обмежений час існування каналів, залежність якості маршруту від просторового положення вузлів, енергетичного ресурсу та умов радіосередовища. Водночас оглядові дослідження переважно класифікують відомі підходи, але не формують нової математичної моделі ребра графа, яка б дозволяла одночасно враховувати декілька взаємопов'язаних характеристик каналу в єдиній алгебраїчній структурі.

У роботі [7] досліджено питання безпеки UAV/FANET, зокрема, в сенсі вразливості, атаки на вузли діючих маршрутів, порушення доступності, втручання у передавання даних тощо. Автори наголошують, що безпекові характеристики повинні розглядатися не ізольовано, а як частина загального процесу забезпечення стійкого функціонування мережі. Це положення є важливим для наземно-повітряних мереж спеціального призначення, оскільки якість маршруту не може визначатися лише пропускнуою здатністю або затримкою.

У роботі [8] подано набір даних для дослідження FANET у контексті виявлення атак типу grey hole. Праця є корисною з погляду формування емпіричної бази для оцінювання стійкості маршрутів і виявлення аномальної поведінки вузлів. Водночас така постановка орієнтована насамперед на задачу кібербезпеки та виявлення атак, а не на побудову узагальненої моделі маршруту, у якій стан кожного ребра відображається через сукупність радіотехнічних, топологічних, енергетичних і безпекових характеристик.

Окремий науковий напрям становлять дослідження гіперкомплексних і кватерніонних моделей представлення графів. У роботі [9] запропоновано Quaternion Graph Neural Networks, де подання графових структур здійснюється у кватерніонному просторі, а операції над ознаками використовують добуток Гамільтона. Такий підхід демонструє, що кватерніонне представлення може бути ефективним для збереження внутрішніх взаємозв'язків між ознаками об'єктів графа.

У дослідженні [10] розвинуто ідею кватерніонного представлення графових даних для задач навчання репрезентацій у неоднорідних структурах. Автори показують, що перехід від евклідового простору до кватерніонного дозволяє зберігати складні взаємозв'язки між групами ознак.

Таким чином, на відміну від відомих робіт, у яких переважно оптимізуються окремі параметри маршрутизації або топології, запропонований у статті підхід дозволяє перейти до системного опису наземно-повітряної мережі у вигляді зонально-ієрархічного динамічного графа з кватерніонним представленням станів ребер. Це створює математичну основу для врахування взаємозалежності радіоресурсної якості, комунікаційної спроможності, стійкості та захищеності каналів зв'язку під час визначення субоптимального маршруту й активної топології мережі.

Для забезпечення ефективного функціонування наземно-повітряної мережі необхідно здійснювати декомпозицію задач управління та розділення мережі на підмережі, кластери або зони управління. Такий підхід дозволяє зменшити розмірність задач маршрутизації, обмежити обсяг службового трафіку, локалізувати процеси прийняття рішень і забезпечити узгодження двох основних класів цілей управління – користувальницьких та мережевих.

У загальному випадку наземно-повітряна комунікаційна мережа може бути подана у вигляді динамічного графа (1)

$$G(t) = (V(t), E(t), X(t), U(t)), \quad (1)$$

де  $V(t)$  – множина вузлів мережі;  $E(t)$  – множина каналів або потенційних зв'язків між вузлами;  $X(t)$  – вектор стану мережі;  $U(t)$  – множина керуючих впливів. Водночас для мереж спеціального призначення такого класичного подання недостатньо, оскільки воно не повною мірою враховує

багаторівневу структуру мережі, зональну декомпозицію, взаємозалежність характеристик каналів зв'язку та вплив деструктивних факторів на маршрутизацію і топологію.

Тому доцільно перейти від (1) до зонально-ієрархічного графового представлення (2)

$$G_{\Sigma}(t) = \{G_g(t), G_a(t), G_s(t), G_b(t), G_{ga}(t)\}, \quad (2)$$

де  $G_g(t)$  – граф наземної підмережі;  $G_a(t)$  – граф повітряної підмережі;  $G_s(t)$  – граф безпроводової сенсорної підмережі;  $G_b(t)$  – граф мобільних базових станцій;  $G_{ga}(t)$  – граф міжсегментної взаємодії наземних і повітряних вузлів.

З урахуванням зональної декомпозиції (2), мережу можна подати як об'єднання підграфів управління

$$G_{\Sigma}(t) = \bigcup_{q=1}^Q G_q(t), \quad (3)$$

$$G_q(t) = (V_q(t), E_q(t), Q_q(t), U_q(t)), \quad (4)$$

де  $G_q(t)$  – підграф  $q$ -ї зони управління;  $V_q(t)$  – множина вузлів зони;  $E_q(t)$  – множина внутрішньозональних зв'язків;  $Q_q(t)$  – множина гіперкомплексних оцінок станів каналів;  $U_q(t)$  – множина локальних керуючих впливів.

Взаємодія між зонами задається множиною міжзональних ребер

$$E_{inter}(t) = \{e_{ij}(t): v_i \in V_q(t), v_j \in V_r(t), q \neq r\}. \quad (5)$$

Тоді, повна множина ребер (5) мережі визначається як

$$E(t) = \left( \bigcup_{q=1}^Q E_q(t) \right) \cup E_{inter}(t). \quad (6)$$

У класичному графовому підході ребро мережі описується скалярною вагою  $w_{ij}(t)$ , яка використовується для пошуку найкоротшого або найменш витратного маршруту. Однак у наземно-повітряних мережах спеціального призначення стан каналу зв'язку визначається сукупністю взаємопов'язаних характеристик: якістю радіоканалу, пропускною здатністю, затримкою, імовірністю помилки, енергетичним станом вузлів, стійкістю зв'язку та ризиком деструктивного впливу, наприклад в наслідок дії РЕБ противника. Тому використання лише скалярної ваги ребра може призводити до втрати важливої інформації про реальний стан мережі.

Для підвищення адекватності моделі пропонується перейти від скалярного опису ребра до векторно-гіперкомплексного представлення, що визначено в наслідок аналізу [10], де обґрунтовано доцільність використання гіперкомплексного опису в задачах, де один об'єкт має декілька пов'язаних характеристик. Для кожного ребра  $e_{ij}(t)$  вводиться вектор характеристичних ознак

$$\mathbf{x}_{ij}(t) = [S\bar{I}\bar{N}R_{ij}(t), \bar{B}_{ij}(t), 1 - B\bar{E}R_{ij}(t), 1 - \bar{L}_{ij}(t), \bar{E}_i(t), 1 - \bar{R}_{ij}^{EW}(t)]^T, \quad (7)$$

де  $S\bar{I}\bar{N}R_{ij}(t)$  – нормоване відношення сигнал/(завада+шум);  $\bar{B}_{ij}(t)$  – нормована пропускна здатність;  $B\bar{E}R_{ij}(t)$  – нормована імовірність бітової помилки;  $\bar{L}_{ij}(t)$  – нормована затримка;  $\bar{E}_i(t)$  – нормований залишковий енергетичний ресурс вузла;  $\bar{R}_{ij}^{EW}(t)$  – нормований ризик радіоелектронного впливу засобами РЕБ.

Зазначені характеристики доцільно агрегувати у чотири групи ознак, що дозволяє подати стан ребра графа у вигляді кватерніона

$$q_{ij}(t) = Q_{ij}^R(t) + Q_{ij}^C(t)\mathbf{i} + Q_{ij}^S(t)\mathbf{j} + Q_{ij}^D(t)\mathbf{k}, \quad (8)$$

де  $Q_{ij}^R(t)$  – радіоресурсна якість каналу;  $Q_{ij}^C(t)$  – комунікаційна спроможність каналу;  $Q_{ij}^S(t)$  – стійкість каналу;  $Q_{ij}^D(t)$  – захищеність каналу від деструктивного впливу.

Агреговані компоненти в (8) можуть бути визначені у вигляді (9)-(12)

$$Q_{ij}^R(t) = \alpha_1 S\bar{I}\bar{N}R_{ij}(t) + \alpha_2 (1 - B\bar{E}R_{ij}(t)), \quad (9)$$

$$Q_{ij}^C(t) = \alpha_3 \bar{B}_{ij}(t) + \alpha_4 (1 - \bar{L}_{ij}(t)), \quad (10)$$

$$Q_{ij}^S(t) = \alpha_5 \bar{E}_i(t) + \alpha_6 \bar{T}_{ij}^{link}(t), \quad (11)$$

$$Q_{ij}^D(t) = \alpha_7 (1 - \bar{R}_{ij}^{EW}(t)) + \alpha_8 \bar{S}_{ij}(t), \quad (12)$$

де  $\bar{T}_{ij}^{link}(t)$  – нормований показник прогнозованої тривалості існування каналу;  $\bar{S}_{ij}(t)$  – нормований показник захищеності каналу;  $\alpha_1, \dots, \alpha_8$  – вагові коефіцієнти.

На відміну від адитивного зважування, кватерніонне представлення дозволяє використовувати добуток Гамільтона для композиції станів послідовних ребер маршруту.

Для маршруту  $P_{s,d}(t)$ , його гіперкомплексний стан  $Q_P(t)$  визначається за виразами (13) і (14)

$$P_{s,d}(t) = \{s, v_1, v_2, \dots, v_m, d\}, \quad (13)$$

$$Q_P(t) = \otimes_{(i,j) \in P_{s,d}(t)} q_{ij}(t). \quad (14)$$

Властивість некомутаційності добутку Гамільтона (14) дозволяє врахувати спрямований характер маршруту та накопичувальний ефект зміни якості каналів уздовж шляху [9]. Для задач наземно-повітряних мереж це є особливо важливим, оскільки стан радіолінії не є набором незалежних параметрів (15), а формується як взаємодія якості радіоканалу, пропускної здатності, затримки, енергетичного стану та стійкості до впливів.

$$q_1 \otimes q_2 \neq q_2 \otimes q_1. \quad (15)$$

Після обчислення  $Q_P(t)$  за формулою (14), (16) отримуємо субоптимальний маршрут за виразом (17),

$$Q_P(t) = A_P(t) + B_P(t)\mathbf{i} + C_P(t)\mathbf{j} + D_P(t)\mathbf{k}, \quad (16)$$

$$P_{s,d}^{sub}(t) = \arg \max_{P \in \mathcal{P}_{s,d}(t)} \Psi(Q_P(t)), \quad (17)$$

де  $\Psi(Q_P) = \mu_0 A_P(t) + \mu_1 B_P(t) + \mu_2 C_P(t) + \mu_3 D_P(t)$ , а  $\mu_0, \mu_1, \mu_2, \mu_3$  – коефіцієнти пріоритетності відповідних компонент гіперкомплексного стану маршруту.

У такій постановці задача управління топологією полягає не лише у виборі маршруту між заданими вузлами, а й у визначенні активної множини ребер, які доцільно підтримувати в поточних умовах функціонування

$$E^{active}(t) = \{e_{ij}(t): \Psi(q_{ij}(t)) \geq \theta_{ij}(t)\}, \quad (18)$$

де  $\theta_{ij}(t)$  – адаптивний поріг допустимості каналу.

Відповідно, активна топологія мережі має вигляд

$$G^{active}(t) = (V(t), E^{active}(t), Q(t)). \quad (19)$$

Основне протиріччя, що виникає при управлінні такою мережею, полягає у необхідності отримання достатньо повної інформації про стан вузлів, каналів зв'язку і середовища функціонування при одночасному обмеженні обсягів службового трафіку, часу прийняття рішень та обчислювальних ресурсів вузлів [11]. З одного боку, для формування раціональних маршрутів і підтримання необхідної якості інформаційного обміну необхідно враховувати значну кількість характеристик мережі. З іншого боку, надмірний збір, обробка та поширення службової інформації призводить до зростання навантаження на мережу і зменшення частки ресурсу, доступного для передачі корисного трафіку.

Це протиріччя може бути подане у вигляді системи цільових вимог (20)

$$\begin{cases} I_{state}(t) \rightarrow \max, \\ C_{ctrl}(t) \rightarrow \min, \\ T_{dec}(t) \rightarrow \min, \\ Q_{route}(t) \rightarrow \max, \\ R_{top}(t) \rightarrow \max, \end{cases} \quad (20)$$

де  $I_{state}(t)$  – інформативність даних про стан мережі;  $C_{ctrl}(t)$  – обсяг службового трафіку;  $T_{dec}(t)$  – час прийняття рішення;  $Q_{route}(t)$  – якість сформованого маршруту;  $R_{top}(t)$  – стійкість топології.

Таким чином, **актуальним** є наукове завдання розроблення та обґрунтування кватерніонно-графової моделі представлення інформаційно-комунікаційної мережі спеціального призначення, яка забезпечує формалізований опис зонально-ієрархічної структури наземно-повітряної мережі, дозволяє враховувати взаємозалежність характеристичних ознак каналів зв'язку та може бути використана для визначення субоптимального стану маршрутизації і топології в умовах динамічного середовища функціонування.

**Наукова новизна** полягає в удосконаленні моделі графового представлення інформаційно-комунікаційної мережі спеціального призначення шляхом введення кватерніонного опису станів ребер динамічного графа, компоненти якого відображають агреговані характеристичні ознаки каналів зв'язку, а саме радіоресурсну якість, комунікаційну спроможність і стійкість. На відміну від відомих підходів, у запропонованій моделі інтегральний стан маршруту формується не шляхом адитивної згортки скалярних ваг ребер, а на основі добутку Гамільтона, що дозволяє врахувати перехресний вплив характеристичних ознак каналів на субоптимальний стан маршрутизації та топології наземно-повітряної мережі.

**Алгоритм визначення субоптимального маршруту та активної топології наземно-повітряної комунікаційної мережі** (рис. 1) призначений для формалізованої обробки поточного стану вузлів, каналів зв'язку та сегментів мережі з метою вибору доцільної множини активних ребер і побудови маршруту, який забезпечує раціональний компроміс між якістю радіоканалу, пропускною здатністю, затримкою, енергетичним ресурсом та стійкістю від деструктивних впливів, включає наступні взаємопов'язані етапи 1-12.

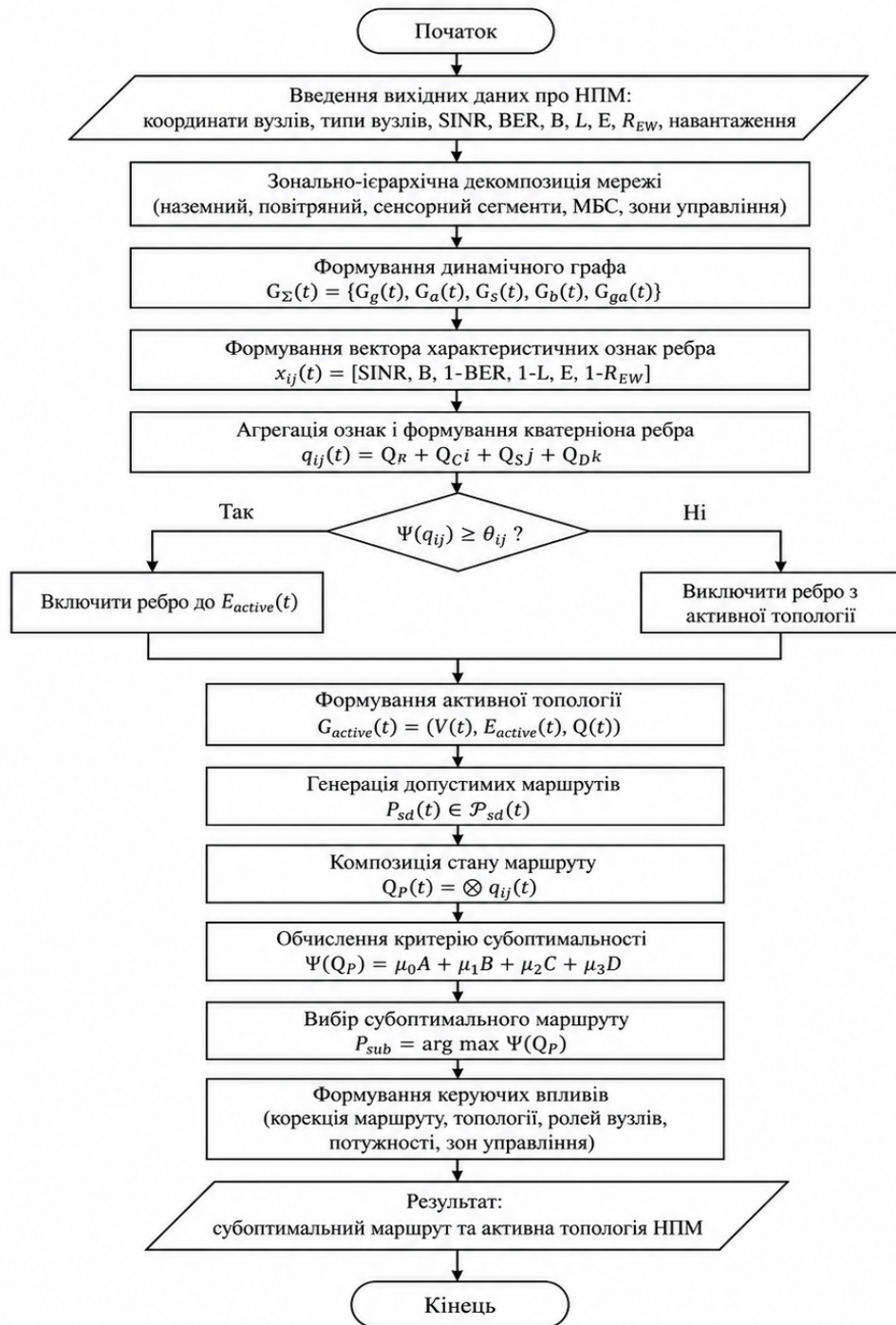


Рисунок 1. Алгоритм визначення субоптимального маршруту та активної топології наземно-повітряної комунікаційної мережі

1. На першому етапі здійснюється введення вихідних даних про стан наземно-повітряної мережі. До таких даних належать координати вузлів, типи вузлів, параметри радіоканалів, показники якості передавання, енергетичний стан вузлів, рівень навантаження та ризик радіоелектронного впливу.

2. На другому етапі виконується зонально-ієрархічна декомпозиція мережі. Наземно-повітряна мережа розділяється на функціональні сегменти: наземний, повітряний, сенсорний, сегмент мобільних базових станцій та зони управління. Такий підхід дозволяє зменшити розмірність задачі маршрутизації, локалізувати процеси прийняття рішень і обмежити надлишковий службовий трафік.

3. На третьому етапі формується динамічний граф мережі. У межах цього етапу визначаються

множина вузлів, множина потенційних ребер, параметри каналів і зв'язки між сегментами мережі.

4. На четвертому етапі для кожного потенційного ребра  $e_{ij}(t)$  формується вектор характеристичних ознак. Він описує не лише наявність зв'язку між вузлами, а й якісний стан цього зв'язку.

5. На п'ятому етапі здійснюється агрегація ознак і формується кватерніон ребра. Для кожного ребра графа вводиться гіперкомплексна оцінка  $q_{ij}(t)$ , тобто кожне ребро описується не одним числом, а структурованим станом, який одночасно враховує радіотехнічну, мережеву, енергетичну складові.

6. На шостому етапі виконується перевірка допустимості ребра за критерієм  $\Psi(q_{ij}) \geq \theta_{ij}$ , якщо умова не виконується, ребро виключається з активної топології, оскільки його використання може призвести до погіршення якості маршруту, зростання затримки, втрати пакетів, перевитрати енергії або підвищення вразливості до впливу РЕБ.

7. На сьомому етапі формується активна топологія мережі.

8. На восьмому етапі здійснюється генерація множини допустимих маршрутів між вузлом-джерелом та вузлом-призначенням  $d$ .

9. На дев'ятому етапі виконується композиція стану маршруту. Для цього використовується не проста сума ваг ребер, а добуток кватерніонів ребер уздовж маршруту (17). Оскільки добуток Гамільтона є некомутативним, то маршрут  $s \rightarrow v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow d$  і маршрут  $s \rightarrow v_2 \rightarrow v_1 \rightarrow d$  можуть мати різні інтегральні оцінки навіть за однакового набору ребер. Для наземно-повітряної мережі це є важливим, оскільки порядок проходження вузлів впливає на накопичення затримки, втрат, енергетичних витрат і ризиків деструктивного впливу.

10. На десятому етапі обчислюється критерій субоптимальності маршруту. Термін "субоптимальний" вжито тому, що в реальній наземно-повітряній мережі неможливо гарантувати глобально оптимальний маршрут через неповноту інформації, затримки оновлення стану, мобільність вузлів, нестабільність радіоканалів і динамічний вплив зовнішнього середовища. Тому алгоритм обирає не абсолютно оптимальний, а найкращий маршрут серед доступних і допустимих у поточний момент часу.

11. На одинадцятому етапі здійснюється вибір субоптимального маршруту.

12. На дванадцятому етапі формуються керуючі впливи на мережу в залежності від умов функціонування та мети управління мережею.

Результатом роботи алгоритму є сформована активна топологія наземно-повітряної мережі та визначений субоптимальний маршрут передавання даних. Запропонований алгоритм забезпечує послідовне перетворення вихідних даних про стан наземно-повітряної комунікаційної мережі у множину керуючих рішень щодо вибору активної топології та субоптимального маршруту передавання даних. На відміну від класичних підходів, у яких ребра графа описуються скалярними вагами, в алгоритмі використовується кватерніонне представлення стану ребра, що дозволяє одночасно враховувати радіоресурсну якість, комунікаційну спроможність і стійкість каналу зв'язку. Формування активної топології здійснюється шляхом порівняння інтегральної оцінки ребра з адаптивним порогом допустимості. Після цього в межах активного графа генерується множина допустимих маршрутів, для кожного з яких обчислюється інтегральний кватерніонний стан із використанням добутку Гамільтона. Вибір субоптимального маршруту здійснюється за максимальним значенням критерію  $\Psi(Q_p)$ , що дає змогу врахувати не лише локальні характеристики окремих каналів, а й накопичувальний ефект їх послідовного використання на маршруті.

Такий підхід створює математичну основу для адаптивного управління маршрутизацією і топологією наземно-повітряної мережі в умовах динамічної зміни радіоелектронної обстановки, мобільності вузлів і обмеженості мережевих ресурсів.

### Висновки та перспективи подальшого дослідження.

В результаті досліджень встановлено, що завдання маршрутизації та управління топологією наземно-повітряної інформаційно-комунікаційної мережі спеціального призначення потребує комплексного підходу. Такі мережі функціонують в умовах високої мобільності вузлів, динамічної зміни топології, нестабільності радіоканалів, обмеженості енергетичних ресурсів, змінного інформаційного навантаження та можливого деструктивного впливу на канали зв'язку. За таких умов класичне графове представлення мережі у вигляді множини вузлів і ребер із скалярними

вагами не забезпечує достатньої повноти опису стану каналів зв'язку, оскільки не враховує взаємозалежність радіоресурсних, комунікаційних, енергетичних і стійкісних характеристик.

Визначено, що для підвищення адекватності опису наземно-повітряної мережі доцільно застосовувати зонально-ієрархічну декомпозицію її структури на наземний, повітряний, сенсорний, базовий та міжсегментний сегменти. Такий підхід дозволяє зменшити розмірність задачі маршрутизації, локалізувати процеси прийняття рішень, обмежити обсяг службової інформації та створити умови для більш гнучкого управління активною топологією мережі.

Встановлено, що основною особливістю запропонованої моделі є перехід від скалярного опису ребра графа до кватерніонного представлення його стану. Для кожного каналу зв'язку формується сукупність характеристичних ознак, які відображають якість радіоканалу, пропускну здатність, затримку, імовірність помилки, залишковий енергетичний ресурс вузлів, стійкість каналу та ризик радіоелектронного впливу. Зазначені ознаки агрегуються у кватерніонний опис стану ребра, компоненти якого характеризують радіоресурсну якість, комунікаційну спроможність, стійкість каналу та вплив деструктивних факторів.

Показано, що використання кватерніонного представлення дозволяє описувати канал зв'язку не як одну числову вагу, а як структурований багатовимірний стан. Це краще відповідає природі наземно-повітряних мереж спеціального призначення, у яких якість маршруту визначається не одним параметром, а сукупністю взаємопов'язаних характеристик. Такий підхід дозволяє враховувати ситуації, коли канал із високою пропускну здатністю може мати низьку стійкість, підвищений ризик радіоелектронного впливу або значні енергетичні витрати.

Визначено, що для оцінювання стану маршруту доцільно використовувати композицію кватерніонних станів ребер із застосуванням добутку Гамільтона. На відміну від класичного адитивного підходу, така операція дозволяє враховувати порядок проходження сигналів від вузла до вузла на маршруті, спрямований характер передавання даних і накопичувальний ефект зміни якості каналів уздовж шляху. Це є важливим для наземно-повітряних мереж, у яких маршрут залежить не лише від локального стану окремих каналів, а й від їх послідовної взаємодії в межах усього шляху передавання.

Таким чином, запропонована кватерніонно-графова модель створює математичну основу для адаптивного управління маршрутизацією та топологією наземно-повітряних інформаційно-комунікаційних мереж спеціального призначення. На відміну від відомих підходів, вона дозволяє враховувати не лише окремі метрики каналів зв'язку, а й їх взаємозалежність, спрямованість маршруту та накопичувальний ефект проходження послідовності ребер. Це забезпечує більш повне представлення стану мережі та створює передумови для формування обґрунтованих управлінських рішень в умовах динамічного середовища функціонування.

Напрямок подальшого дослідження є розроблення імітаційної моделі наземно-повітряної інформаційно-комунікаційної мережі визначеного кількісного та якісного складу з урахуванням різних сценаріїв мобільності наземних і повітряних вузлів, зміни радіоелектронної обстановки, інформаційного навантаження та обмеженості мережевих ресурсів. Окремої уваги потребує порівняльна оцінка запропонованої кватерніонно-графової моделі з класичними та інтелектуальними протоколами маршрутизації в MANET/FANET, а також дослідження можливості її поєднання з алгоритмами машинного навчання з підкріпленням для адаптивного донавчання системи управління в реальному або квазі-реальному часі.

#### Список бібліографічного опису

1. Yoo T., Lee S., Yoo K., Kim H. Reinforcement Learning Based Topology Control for UAV Networks. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 2. Article 921. DOI: 10.3390/s23020921. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/2/921>.
2. Wang Z., Yao H., Mai T., Xiong Z., Wu X., Wu D., Guo S. Learning to Routing in UAV Swarm Network: A Multi-Agent Reinforcement Learning Approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2023. Vol. 72, No. 5. P. 6611–6624. DOI: 10.1109/TVT.2022.3232815. URL: <https://pure.qub.ac.uk/en/publications/learning-to-routing-in-uav-swarm-network-a-multi-agent-reinforcem/>.
3. Tho M. C., et al. QLR-FANET: A Q-learning and rate control-based routing protocol for flying ad hoc networks. *ETRI Journal*. 2025. DOI: 10.4218/etrij.2024-0298. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.4218/etrij.2024-0298>.
4. Ding R., Chen J., Wu W., Liu J., Gao F., Shen X. Packet Routing in Dynamic Multi-Hop UAV Relay Network: A Multi-Agent Learning Approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2022. Vol. 71, No. 9. P. 10059–10072. DOI: 10.1109/TVT.2022.3182335. URL: <https://uwaterloo.ca/scholar/sites/ca.scholar/files/sshen/files/ding2022packet.pdf>.

5. Almansor M. J., et al. Routing protocols strategies for flying Ad-Hoc network: A comprehensive survey. *Egyptian Informatics Journal*. 2024. DOI: 10.1016/j.eij.2024.100469. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016824010469>.
6. Hutchins C., et al. A flying ad-hoc network dataset for early time series classification of grey hole attacks. *Scientific Data*. 2025. Vol. 12. Article number 1304. DOI: 10.1038/s41597-025-05560-1. URL: <https://www.nature.com/articles/s41597-025-05560-1>.
7. Chandrasekar V., et al. Secure malicious node detection in flying ad-hoc networks using enhanced secure AODV routing protocol. *Scientific Reports*. 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-57480-6. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-57480-6>.
8. A Survey of Security in UAVs and FANETs: Issues, Threats, and Countermeasures. *arXiv*. 2024. URL: <https://arxiv.org/html/2306.14281v4>.
9. Nguyen D. Q., Nguyen T. D., Phung D. Quaternion Graph Neural Networks. *Proceedings of the Asian Conference on Machine Learning*. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2008.05089>.
10. Chen J., Ji Y., Zou R., Zhang Y., Cheung Y. QGRL: Quaternion Graph Representation Learning for Heterogeneous Feature Data Clustering. *Proceedings of the 30th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Barcelona, Spain, 2024. P. 297–306. DOI: 10.1145/3637528.3671839. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3637528.3671839>.
11. Bieliakov R. Problema intehratsii povitrianoi merezhi klasu FANET v mobilnu komunikatsiinu merezhu spetsialnoho pryznachennia. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*. 2023. № 53. С. 263–276. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-40>

#### References

1. Yoo T., Lee S., Yoo K., Kim H. Reinforcement Learning Based Topology Control for UAV Networks. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 2. Article 921. DOI: 10.3390/s23020921. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/2/921>.
2. Wang Z., Yao H., Mai T., Xiong Z., Wu X., Wu D., Guo S. Learning to Routing in UAV Swarm Network: A Multi-Agent Reinforcement Learning Approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2023. Vol. 72, No. 5. P. 6611–6624. DOI: 10.1109/TVT.2022.3232815. URL: <https://pure.qub.ac.uk/en/publications/learning-to-routing-in-uav-swarm-network-a-multi-agent-reinforcem/>.
3. Tho M. C., et al. QLR-FANET: A Q-learning and rate control-based routing protocol for flying ad hoc networks. *ETRI Journal*. 2025. DOI: 10.4218/etrij.2024-0298. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.4218/etrij.2024-0298>.
4. Ding R., Chen J., Wu W., Liu J., Gao F., Shen X. Packet Routing in Dynamic Multi-Hop UAV Relay Network: A Multi-Agent Learning Approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2022. Vol. 71, No. 9. P. 10059–10072. DOI: 10.1109/TVT.2022.3182335. URL: <https://uwaterloo.ca/scholar/sites/ca.scholar/files/sshshen/files/ding2022packet.pdf>.
5. Almansor M. J., et al. Routing protocols strategies for flying Ad-Hoc network: A comprehensive survey. *Egyptian Informatics Journal*. 2024. DOI: 10.1016/j.eij.2024.100469. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016824010469>.
6. Hutchins C., et al. A flying ad-hoc network dataset for early time series classification of grey hole attacks. *Scientific Data*. 2025. Vol. 12. Article number 1304. DOI: 10.1038/s41597-025-05560-1. URL: <https://www.nature.com/articles/s41597-025-05560-1>.
7. Chandrasekar V., et al. Secure malicious node detection in flying ad-hoc networks using enhanced secure AODV routing protocol. *Scientific Reports*. 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-57480-6. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-57480-6>.
8. A Survey of Security in UAVs and FANETs: Issues, Threats, and Countermeasures. *arXiv*. 2024. URL: <https://arxiv.org/html/2306.14281v4>.
9. Nguyen D. Q., Nguyen T. D., Phung D. Quaternion Graph Neural Networks. *Proceedings of the Asian Conference on Machine Learning*. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2008.05089>.
10. Chen J., Ji Y., Zou R., Zhang Y., Cheung Y. QGRL: Quaternion Graph Representation Learning for Heterogeneous Feature Data Clustering. *Proceedings of the 30th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Barcelona, Spain, 2024. P. 297–306. DOI: 10.1145/3637528.3671839. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3637528.3671839>.
11. Bieliakov R. Problema intehratsii povitrianoi merezhi klasu FANET v mobilnu komunikatsiinu merezhu spetsialnoho pryznachennia. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*. 2023. № 53. С. 263–276. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-40>

Історія статті:

Отримано: 24.03.2026 Доопрацьовано: 07.04.2026 Прийнято до друку: 23.05.2026 Опубліковано: 29.05.2026