

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ

DOI: 10.20535/1970.71(1).2026.361573

УДК 004.415.2

АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОГО КЕРУВАННЯ ТА АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЇ ГРУПИ НАЗЕМНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ОБ'ЄКТІВ*Соколов О. В., Павловський О. М.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: a_pav@ukr.net*

Статтю присвячено розробці та обґрунтуванню комплексу алгоритмічного забезпечення для відмовостійкого керування та автономної навігації групи (рою) мобільних наземних безпілотних об'єктів (МНБО) в умовах нестабільної радіообстановки, втрати сигналів глобальних систем позиціонування та розриву зв'язку з центральним координатором. Метою роботи є підвищення відмовостійкості та автономності групи МНБО шляхом синтезу ефективних алгоритмів навігації, повернення та децентралізованого керування з урахуванням обмежених апаратних ресурсів окремих учасників групи. Показано, що традиційні методи реєстрації навігаційних параметрів та стандартні протоколи мережевого обміну є неефективними для вузькосмугових децентралізованих mesh-мереж, оскільки призводять до перевантаження радіоканалу та швидкого вичерпання пам'яті автономних вузлів. Для вирішення задачі збереження просторової орієнтації запропоновано алгоритм подієвого стиснення вектора маршруту на основі модифікованого методу RLE, який дозволяє перейти від лінійної складності зберігання, забезпечуючи коефіцієнт стиснення до 360–900 разів для типових маршрутів. Керування екстремим поверненням реалізовано у вигляді асинхронного неблокуючого скінченного автомата, що забезпечує безперервний моніторинг каналу зв'язку та динамічний перерахунок координат при його відновленні. Розроблено легковаговий протокол децентралізованих виборів лідера, заснований на порівнянні конфігураційних пріоритетів та MAC-адрес, який виключає виникнення ширококомовних колізій за рахунок припинення трансляції вузлами з нижчим пріоритетом та зменшує службовий трафік у мережі. Комплексна реалізація запропонованих рішень підвищує відмовостійкість системи, оптимізує використання апаратних ресурсів, знижує навантаження на радіоканал та забезпечує автономне продовження місії без участі оператора в умовах динамічної зміни топології мережі.

Ключові слова: наземний безпілотний об'єкт, мобільний робот, наземний робот, рій роботів, автономна навігація, відмовостійке керування, стиснення даних, mesh-мережа.

Вступ

Керування групами малогабаритних наземних безпілотних об'єктів (МНБО) є актуальним напрямком розвитку сучасної робототехніки. Використання розподілених систем в МНБО (роїв) дозволяє підвищити ефективність виконання завдань, що вимагають покриття значних площ, узгоджених просторових дій та стійкості до зовнішніх впливів [1]. Сфери застосування таких систем охоплюють автоматизовану складську логістику, моніторинг промислових та сільськогосподарських територій, а також виконання пошуково-рятувальних операцій у неструктурованих середовищах.

Автономне функціонування кожної одиниці МНБО у складі групи забезпечується інтеграцією низки апаратно-програмних підсистем: інформаційно-виміральної (комплексу сенсорів для отримання даних про оточуюче середовище), системи зв'язку (для обміну даними та прийняття керуючих команд), виконавчої системи (для реалізації рухів) та системи керування [2]. Саме бортова

система керування відповідає за аналіз інформації, просторову навігацію та реалізацію алгоритмів групової взаємодії. Ключовою вимогою до таких систем є здатність адаптуватися до змінних умов навколишнього середовища та підтримувати керуваність навіть за умови часткової втрати працездатності окремих елементів.

У реальних експлуатаційних умовах надійність комунікаційної взаємодії між МНБО піддається серйозним викликам через складну радіообстановку, наявність перешкод для поширення сигналів (екранування) та постійну зміну просторового розташування об'єктів. Класичні архітектури керування, побудовані за топологією типу «зірка» із жорстко визначеним центральним координатором, виявляються вразливими [3]. Вихід з ладу або фізична недосяжність координатора створює єдину точку відмови, що призводить до дезорганізації групи. Вирішенням цієї проблеми на фізичному та транспортному рівнях є перехід до децентралізованих mesh-мереж (наприклад, на базі стандарту

ZigBee), які підтримують багатохопову передачу даних та автоматичну перебудову маршрутів [4].

Однак забезпечення зв'язності на апаратному рівні не вирішує логічної проблеми керування: група повинна мати алгоритмічний апарат для автономного реагування на втрату координатора. Більш того, для забезпечення автономної навігації (зокрема, за методом одометрії) бортова система керування повинна безперервно реєструвати вектор переміщення робота [5]. Навіть за умови використання сучасних високопродуктивних обчислювальних платформ, алгоритмічна оптимізація базових підсистем керування залишається важливою, оскільки дозволяє вивільнити апаратні ресурси для обробки даних від цільового корисного навантаження.

Використання в таких умовах блокуючих алгоритмів керування та лінійних методів покрокового запису маршруту призводить до переповнення буферів пам'яті, блокування виконання функцій керуючого алгоритму та втрати просторової орієнтації об'єкта [6].

Таким чином, для забезпечення відмовостійкості необхідно впроваджувати алгоритмічні рішення, які оптимізують використання апаратних ресурсів. Система керування повинна реалізовувати асинхронну (неблокуючу) архітектуру, застосовувати методи стиснення навігаційних даних для економії пам'яті, а також мати вбудовані протоколи для децентралізованого обрання нового лідера у випадку безповоротної втрати поточного координатора.

Метою роботи є розробка та структурно-функціональний синтез алгоритмічного забезпечення системи відмовостійкого керування групою МНБО, що включає механізми оптимізації збереження навігаційних даних, асинхронного екстреного повернення та децентралізованого консенсусу для перепризначення головного вузла мережі.

Огляд стану та перспективи розвитку систем керування наземними безпілотними об'єктами

Питанням просторової координації, автономної навігації та керування в розподілених робототехнічних системах присвячено значну кількість наукових праць. Сучасний розвиток алгоритмічного забезпечення здебільшого орієнтований на вирішення задач кооперативного картографування (Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)), багатокритеріального планування траєкторій та уникнення динамічних перешкод у режимі реального часу [7]. Такі підходи передбачають безперервний ширококутовий обмін значними масивами навігаційних та сенсорних даних між усіма агентами мережі. Проте застосування обчислювально-емнісних алгоритмів для груп малогабаритних мобільних платформ є ускладненим з точки зору енергоспоживання. В умовах реальної експлуатації (у закритих приміщеннях, індустріальних зонах або на пересіченій місцевості) спостерігається

динамічна зміна топології мережі, наявність фізичних перешкод для поширення радіохвиль та високий рівень електромагнітних завад. За таких умов алгоритми, що покладаються на постійну синхронізацію об'ємних пакетів даних, демонструють зниження ефективності через затримки в каналах зв'язку та втрату інформаційних пакетів, що призводить до розсинхронізації дій групи [8].

Крім того, функціонування МНБО часто відбувається в умовах відсутності або нестабільності сигналів глобальних супутникових систем позиціонування (GPS). У таких випадках базовим методом збереження просторової орієнтації залишається одометрія (Dead Reckoning) — обчислення поточних координат на основі даних про швидкості та напрямки руху. Класичні методи реєстрації навігаційних параметрів вимагають безперервного покрокового запису історії переміщень. Використання типових лінійних масивів для збереження цих даних призводить до зростання вимог до обсягів оперативної/Flash пам'яті бортового обчислювача. Під час виконання тривалих автономних місій, особливо у фазах втрати зв'язку, коли об'єкт змушений накопичувати дані до моменту відновлення комунікації, такий підхід швидко вичерпує доступні апаратні ресурси. Це робить актуальним пошук нових методів математичного стиснення просторових даних та оптимізації структур їх збереження на рівні вбудованих систем керування [9].

Окремим складним завданням є забезпечення відмовостійкості та збереження керованості автономної групи роботів при раптовій втраті зв'язку з центром керування. Вирішення цієї проблеми вимагає впровадження алгоритмів децентралізації для автоматичного перерозподілу ролей. Проблему динамічного обрання головного вузла (лідера) в статичних або високошвидкісних IT-інфраструктурах традиційно вирішують за допомогою стандартизованих мережевих протоколів (наприклад, Spanning Tree Protocol, VRRP) або класичних алгоритмів, таких як Raft чи Paxos [10]. Однак пряме перенесення цих рішень на децентралізовані мобільні радіомережі з низькою пропускну здатністю виявляється неефективним [11]. Це особливо стосується мереж, побудованих на базі енергоефективного стандарту IEEE 802.15.4 (ZigBee), які оптимізовані для передачі коротких телеметричних повідомлень, а не для інтенсивного службового трафіку.

Застосування розповсюджених протоколів виборів лідера у вузькосмугових мережах спричиняє «широкомовні шторми» (broadcast storms) - необхідність багаторазового обміну службовими пакетами між усіма вузлами перевантажує радіоканал та блокує передачу корисної телеметрії. Крім того, багато існуючих алгоритмів реагування на втрату зв'язку використовують синхронні блокуючі функції затримок часу. В однопотокових системах керування це призводить до зупинки основного циклу програми: під час виконання функції затримки мікроконтролер не опитує вхідні

буфери радіомодуля та не обробляє отримані пакети, що унеможливило відновлення мережі.

Таким чином, аналіз поточного стану проблеми свідчить про наявність вираженої суперечності. З одного боку, існує необхідність у забезпеченні високої надійності, відмовостійкості та автономності керування групами мобільних безпілотних об'єктів. З іншого боку, об'єктивна обмеженість пропускної здатності бездротових каналів зв'язку та апаратних ресурсів бортових систем унеможливило застосування існуючих ресурсоємних протоколів консенсусу та лінійних методів реєстрації маршруту. Вирішення цієї суперечності полягає у розробці спеціалізованих легковагових алгоритмів відмовостійкості. Такі алгоритми повинні мати асинхронну (неблокуючу) архітектуру для екстреного повернення вузлів на базу, забезпечувати ефективне стиснення навігаційних даних та реалізовувати протокол децентралізованого перерозподілу ролей із мінімальним використанням оперативної пам'яті керуючого обчислювача та ефірного часу мережі.

Синтез алгоритмічного забезпечення автономної навігації групи наземних безпілотних об'єктів

Для забезпечення здатності автономного агента повернутися в зону впевненого радіоприйому при втраті зв'язку, бортова система керування повинна безперервно фіксувати вектор його прос-

торового переміщення на основі одометричних даних. Традиційний підхід до реєстрації одометричних даних передбачає дискретне фіксування керуючих впливів виконавчої системи із жорстко заданим кроком квантування за часом. У такій моделі масив просторових даних формується як лінійна послідовність станів, де кожна комірка пам'яті відповідає фіксованому інтервалу часу. Цей метод призводить до лінійного зростання обсягу збережених даних пропорційно тривалості місії, що обмежує час автономної роботи та нерационально витрачає ресурси пам'яті бортового обчислювача.

З метою мінімізації обчислювального навантаження та оптимізації використання апаратних ресурсів було розроблено метод подієвого стиснення вектора маршруту, блок-схему якого наведено на рис. 1. В основу методу покладено адаптацію математичних принципів алгоритму кодування довжин серій (RLE) [12]. Сутність запропонованого алгоритму полягає у відмові від жорсткого часового квантування запису на користь динамічного подієвого відслідковування. Вектор пройденого шляху формується не як масив часових відліків, а як масив структур даних топологічних маневрів. Кожна структура (вузол масиву) містить два параметри: ідентифікатор поточної керуючої команди (вектор напрямку руху) та акумульований час її безперервного виконання (сумарна тривалість поточного кроку).

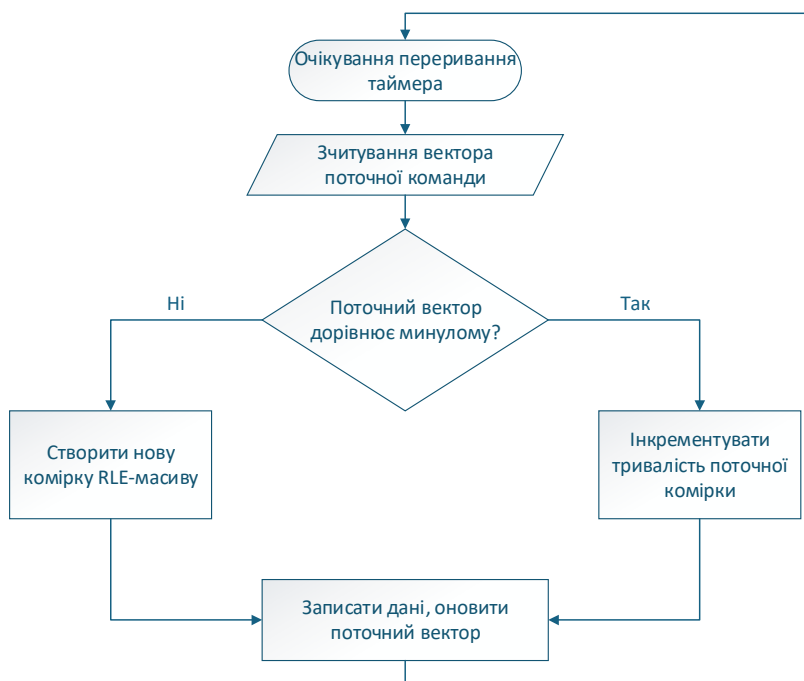


Рис. 1. Алгоритм подієвого стиснення маршруту

Під час руху об'єкта керуючий обчислювач циклічно аналізує стан виконавчої системи. У разі, якщо нова отримана керуюча команда є ідентичною до попередньої, виділення нового сегмента оперативної пам'яті не відбувається. Натомість

мікроконтролер лише інкрементує змінну тривалості для поточного активного кроку у вже існуючій комірці. Ініціалізація нової комірки пам'яті та створення наступної структури даних відбувається в момент зміни керуючого впливу – наприклад,

при здійсненні повороту, зміні швидкості або початковій зупинці.

Такий математичний підхід змінює характер використання системної пам'яті: обсяг витрачених апаратних ресурсів стає залежним не від фізичного часу перебування робота в дорозі, а від топологічної складності пройденого маршруту (кількості дискретних маневрів). Запропоноване рішення стискає вектор навігаційних даних пропорційно відношенню тривалості місії до кількості маневрів, забезпечуючи високу автономність об'єкта та гарантуючи стійкість програмного забезпечення до переповнення буферів пам'яті навіть за умов тривалої втрати комунікації. Для оцінки ефективності стиснення розглянемо типовий сценарій. Нехай частота дискретизації керуючих впливів становить 10 Гц, а тривалість автономної місії - 30 хв. За звичайним алгоритмом покрокового запису бортовий обчислювач має зберегти $T = 10 \times 1800 = 18000$ відліків. При використанні запропонованого подієвого методу обсяг масиву визначається лише кількістю маневрів K . Для маршрутів із переважно

прямолінійним рухом та епізодичними змінами напрямку (наприклад, $K = 20 \dots 50$ маневрів) коефіцієнт стиснення становить $T/K = 360 \dots 900$. Таким чином, складність зберігання змінюється з $O(T)$ до $O(K)$, де $K \ll T$, що дозволяє зберігати навігаційний вектор тривалих місій у межах обмеженої оперативної пам'яті мікроконтролера.

Наступною задачею, яку необхідно вирішити для забезпечення автономності групи, є реалізація механізму екстреного повернення при втраті зв'язку з координатором. Функціонування системи в умовах нестабільної радіообстановки вимагає постійного моніторингу наявності зв'язку з координатором мережі. У разі виявлення втрати службового сигналу синхронізації (heartbeat) [13] протягом заданого часового вікна, вузол ініціює протокол екстреного повернення на базу. Для усунення описаної проблеми блокування однопотокового обчислювача логіку автономного повернення було синтезовано у вигляді неблокуючого скінченного автомата (Finite State Machine), граф станів якого наведено на рис. 2.

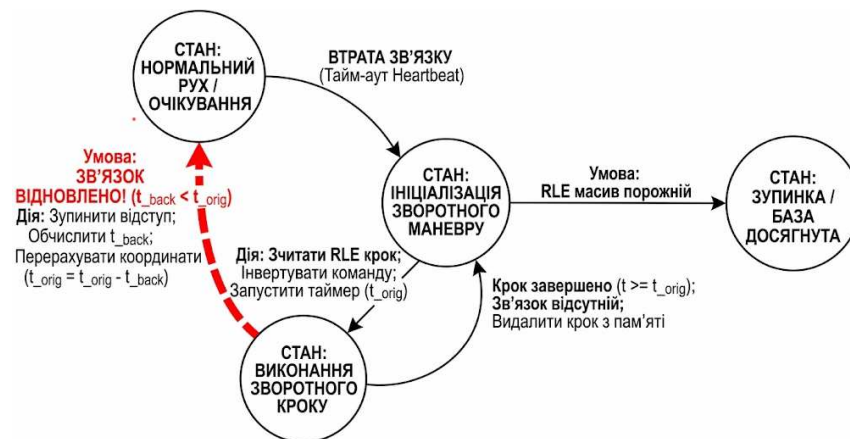


Рис. 2. Граф станів асинхронного неблокуючого автомата екстреного повернення

Відпрацювання зворотного вектора руху відбувається асинхронно. Керуючий обчислювач циклічно здійснює опитування системних таймерів для контролю тривалості поточного зворотного кроку, паралельно виконуючи безперервний моніторинг вхідних буферів радіомодуля. Процедура повернення полягає у послідовному зчитуванні стисненого RLE-масиву у зворотному порядку (від останнього збереженого маневру до першого) з логічною інверсією вектора напрямку. Особливістю запропонованого скінченного автомата є підсистема динамічного перерахунку одометрії. У випадку, коли зв'язок із мережею відновлюється безпосередньо в процесі екстреного повернення, автономний агент перериває зворотний рух і перераховує свої поточні просторові координати.

Алгоритм динамічної корекції обчислює фактичний час, витрачений на перерваний зворотний маневр, та віднімає це значення від збереженої тривалості оригінального кроку в RLE-масиві. Усі навігаційні сегменти, які мобільна платформа

встигла повністю пройти у зворотному напрямку, автоматично вивільняються з пам'яті. Така математична модель виключає просторову розсинхронізацію між фізичним положенням об'єкта та його внутрішньою матрицею стану, дозволяючи групі продовжити виконання місії з поточної точки без повернення до стартової позиції.

У випадку, коли екстрене повернення завершується прибуттям групи мобільних платформ на початкову базу, а зв'язок із центральним координатором не відновлюється протягом встановленого тайм-ауту, система діагностує критичну відмову центру прийняття рішень (координатора мережі). Для забезпечення самовідновлення керування ролю виникає необхідність автоматичної передачі функцій координатора одному з підпорядкованих вузлів. Алгоритми консенсусу Bully та Ring [14, 15] є неефективними для вузькосмугових mesh-мереж через виникнення ширококомовних штормів. Останні дослідження пропонують енергоефективні протоколи обрання лідера для статичних IoT-

мереж [16], проте ці рішення не враховують динамічну зміну топології, характерну для мобільних робототехнічних систем.

Зважаючи на ці апаратні обмеження, було розроблено комплексну архітектуру автономної навігації та самовідновлення рою, що включає легковаговий протокол децентралізованих виборів лідера [17]. Ключовою властивістю протоколу є те, що перехід до нового координатора відбувається автоматично, без участі оператора та без поперед-

нього налаштування ролей. Блок-схему протоколу наведено на рис. 3. Ініціалізація алгоритму відбувається синхронно: одразу після того, як автомати екстреного повернення всіх вузлів фіксують вичерпання своїх навігаційних масивів і зупиняють рух платформ. У цей момент обчислювачі перемикають радіомодулі у стан активного сканування («Вибори») та починають циклічно генерувати в ефір ширококомовні пакети-кандидатури.

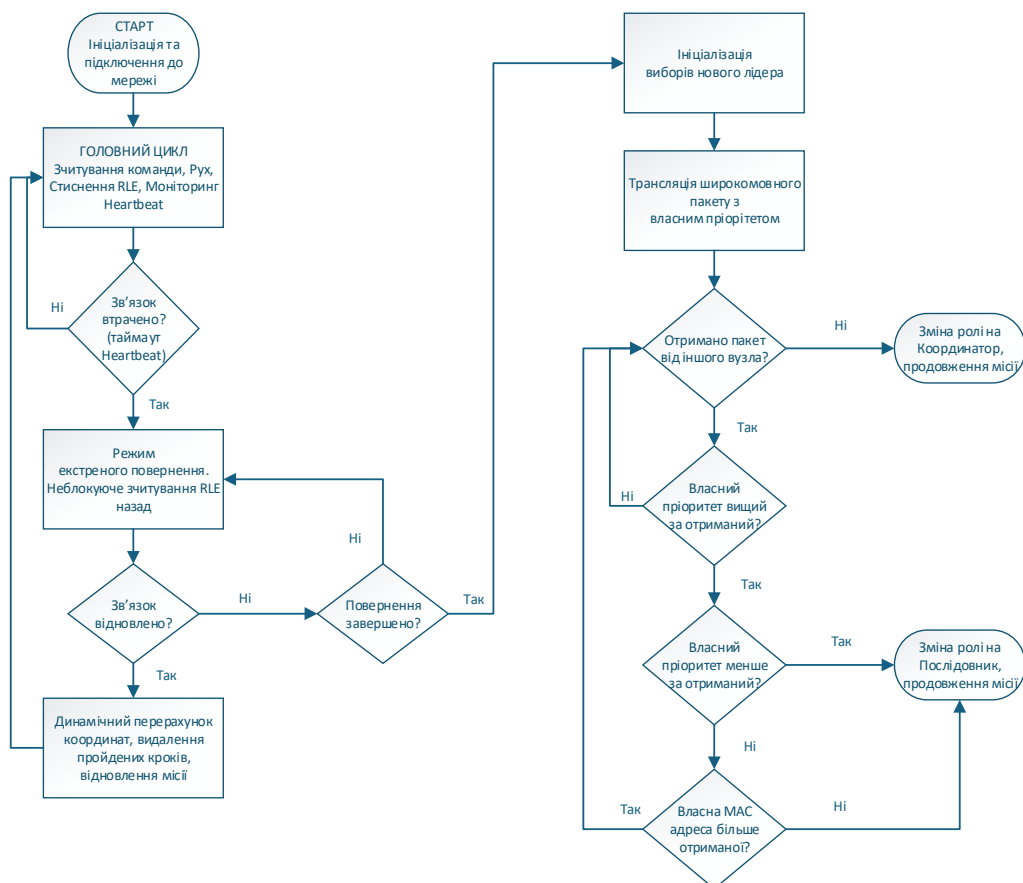


Рис. 3. Блок-схема комплексної системи автономної навігації (екстреного повернення) та децентралізованих виборів лідера рою МНБО

З метою мінімізації розміру пакета, кожне таке повідомлення містить лише два ідентифікатори: попередньо заданий конфігураційний пріоритет вузла та молодші байти його унікальної апаратної MAC-адреси. Ця адреса автоматично зчитується мікроконтролером з регістрів передавача під час завантаження системи.

Процес досягнення мережевого консенсусу реалізовано за допомогою жорсткої логіки порівняння "ваги" кандидатів. При отриманні пакета від конкурента, поточний вузол порівнює отримані значення пріоритету та адреси із власними. Базовим критерієм є конфігураційний пріоритет. Пріоритет задається на етапі конфігурації системи, проте сам по собі не визначає лідера, оскільки вузол з найвищим пріоритетом може бути недоступний внаслідок відмови або перебувати поза

зоною радіодосяжності. Тому процедура виборів забезпечує визначення лідера серед тих вузлів, які фактично залишились у мережі. Якщо пріоритет конкурента вищий, поточний вузол визнає поразку. Головною оптимізаційною особливістю розробленого протоколу є поведінка вузла після поразки: він негайно припиняє трансляцію власних пакетів і переходить у пасивний режим очікування («Веденого»). Цей принцип дозволяє швидко зменшити кількість активних передавачів в етері, усуваючи ризик колізій.

У випадку рівності конфігураційних пріоритетів, алгоритм використовує апаратну MAC-адресу як критерій розв'язання спорів. Оскільки MAC-адреси є унікальними, система гарантовано визначає переможця шляхом порівняння їх числових значень: перемагає пристрій із більшим іден-

тифікатором.

Фіналізація виборів відбувається на основі механізму часових затримок. Вузол-кандидат, який продовжує трансляцію і протягом встановленого часового вікна не фіксує в етері повідомлень від «сильніших» конкурентів, автоматично ідентифікує себе як переможця. Після цього він бере на себе роль координатора, починає генерувати власні службові сигнали синхронізації та транслювати керуючі команди підпорядкованим агентам. Завдяки такому підходу глобальна реконфігурація системи керування відбувається децентралізовано, без втручання оператора.

Висновки

Аналіз стану та перспектив розвитку систем керування роями мобільних наземних безпілотних об'єктів показав, що в умовах нестабільної радіообстановки та відсутності сигналів глобального позиціонування базова система керування потребує вдосконалення за трьома напрямками: оптимізація зберігання навігаційних даних, забезпечення асинхронного екстреного повернення та автоматичний перерозподіл ролей у разі втрати координатора. Існуючі рішення, зокрема лінійні методи реєстрації маршруту та класичні алгоритми консенсусу, є неефективними для вузькосмугових mesh-мереж з обмеженими апаратними ресурсами автономних вузлів.

Для вирішення задачі збереження просторової орієнтації запропоновано алгоритм подієвого стиснення вектора маршруту на основі модифікованого методу RLE. Показано, що складність зберігання навігаційних даних змінюється з $O(T)$ до $O(K)$, де K – кількість маневрів, а коефіцієнт стиснення для типових маршрутів становить 360..900. Це дозволяє зберігати навігаційний вектор тривалих місій у межах обмеженої оперативної пам'яті мікроконтролера та вивільнити апаратні ресурси для обробки даних від цільового корисного навантаження.

Логіку екстреного повернення синтезовано у вигляді асинхронного неблокуючого скінченного автомата, що забезпечує одночасне відпрацювання зворотного маршруту та моніторинг стану радіоканалу. На відміну від найбільш розповсюджених блокуючих алгоритмів, запропонований автомат зберігає здатність обробляти зовнішні переривання від комунікаційного модуля протягом усього процесу повернення. Запропоновано підсистему динамічного перерахунку одометрії, яка при відновленні зв'язку коригує поточні координати об'єкта на основі фактично пройденого зворотного шляху, що дозволяє продовжити місію з поточної точки без повернення до стартової позиції.

Розроблено легковаговий протокол децентралізованих виборів, в якому кожен вузол приймає рішення на основі порівняння конфігураційних пріоритетів та апаратних MAC-адрес. Вузли з нижчим пріоритетом припиняють трансляцію

після отримання повідомлення від вузла з вищим пріоритетом, що зменшує кількість активних передавачів в етері та усуває ризик широкомовних штормів. У випадку рівності пріоритетів унікальність MAC-адрес гарантує визначення переможця. Реконфігурація системи керування відбувається децентралізовано, без попереднього налаштування ролей та без участі оператора.

Слід зазначити, що ефективність подієвого стиснення залежить від характеру маршруту: для траєкторій з частими змінами напрямку кількість маневрів K зростає, і коефіцієнт стиснення знижується. Цей аспект потребує дослідження на реальних маршрутах різної складності для визначення меж застосовності методу. Метод одометрії, покладений в основу навігації, накопичує похибку з часом через похибки чутливих елементів, прослизання коліс та нерівності поверхні, що обмежує точність повернення на тривалих маршрутах. Зменшення цієї похибки можливе шляхом інтеграції додаткових джерел навігаційної інформації, зокрема інерціальних вимірювальних модулів або систем технічного зору. Протокол виборів лідера передбачає, що на момент ініціалізації усі вузли групи перебувають у зоні взаємної радіодосяжності, що може не виконуватись у складних умовах поширення сигналу. Подальша робота може бути спрямована на розширення протоколу для підтримки часткової зв'язності групи, а також на експериментальну верифікацію запропонованих алгоритмів на прототипах мобільних платформ.

Література

- [1] H. Duan, M. Huo, and Y. Fan, "From animal collective behaviors to swarm robotic cooperation", *National Science Review*, vol. 10, no. 5, 2023. DOI: 10.1093/nsr/nwad040
- [2] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, and D. Scaramuzza, "Introduction to Autonomous Mobile Robots", 2nd ed. *MIT Press*, 344 p., 2011.
- [3] I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, and Ş. Temel, "Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey", *Ad Hoc Networks*, vol. 11, Iss. 3, pp. 1254-1270, 2013. DOI: 10.1016/j.adhoc.2012.12.004
- [4] P. Baronti, P. Pillai, V. W. C. Chook, S. Chessa, A. Gotta, and Y. F. Hu, "Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards", *Computer Communications*, vol. 30, Iss. 7, pp. 1655-1695, 2007. DOI: 10.1016/j.comcom.2006.12.020
- [5] J. Borenstein, and L. Feng, "Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, Iss. 6, pp. 869-880, 1996. DOI: 10.1109/70.544770
- [6] E. A. Lee, "The problem with threads", *Computer*, vol. 39, Iss. 5, pp. 33-42, 2006. DOI: 10.1109/MC.2006.180
- [7] W. Chen et al., "A survey of autonomous robots and multi-robot navigation: Perception, planning and collaboration", *Biomimetic Intell. Robot*, 2024.

- DOI: 10.1016/j.birob.2024.100203
- [8] J. P. Hespanha, P. Naghshtabrizi, and Y. Xu, "A survey of recent results in networked control systems", *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, Iss. 1, pp. 138-162, 2007.
DOI: 10.1109/jproc.2006.887288
- [9] K. L. Ketshabetswe, A. M. Zungeru, B. Mtengi, C. K. Lebekwe, and S. R. S. Prabaharan, "Data Compression Algorithms for Wireless Sensor Networks: A Review and Comparison", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 136872-136891, 2021.
DOI: 10.1109/access.2021.3116311
- [10] D. Ongaro, and J. Ousterhout, "In search of an understandable consensus algorithm", *USENIX Annual Technical Conference*, pp. 305-320, 2014.
- [11] S.-Y. Ni, Y.-C. Tseng, Y.-S. Chen, and J.-P. Sheu, "The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network", *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking (MobiCom)*, pp. 151-162, 1999. DOI: 10.1145/313451.313525
- [12] S. W. Golomb, "Run-length encodings", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 12, Is. 3, pp. 399-401, 1966. DOI: 10.1109/tit.1966.1053907
- [13] О. В. Соколов, О. М. Павловський, "Обгрунтування вибору технології бездротового зв'язку для керування групою наземних мобільних безпілотних об'єктів" *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2026, Том 37 (76), №1, С. 338 – 344, 2026.
DOI: 10.32782/2663-5941/2026.1.2/43
- [14] H. Garcia-Molina, "Elections in a Distributed Computing System", *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-31, Is. 1, pp. 48-59, 1982.
DOI: 10.1109/TC.1982.1675885
- [15] A. S. Tanenbaum, and M. Van Steen, "Distributed Systems: Principles and Paradigms", 2nd ed. *Prentice Hall*, 2006.
- [16] M. A. Haddar, "SEALEA: Scalable and Energy Aware k-Leaders Election Algorithm in IoT Wireless Sensor Networks", *Wireless Personal Communications*, vol. 125, pp. 209-229, 2022.
DOI: 10.1007/s11277-022-09547-8
- [17] О. В. Соколов, О. М. Павловський, "Система бездротової передачі даних для керування групою наземних малогабаритних безпілотних об'єктів", *XXI Всеукр. наук.-практ. конф. "Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні"*, 10-11 груд. 2025 р., Київ. С. 34-37.

UDC 004.415.2

Oleksii Sokolov, Oleksii Pavlovskiy

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ALGORITHMS FOR FAULT-TOLERANT CONTROL AND AUTONOMOUS NAVIGATION OF A GROUP OF UNMANNED GROUND VEHICLES

The paper is devoted to the development and justification of a set of algorithmic solutions for fault-tolerant control and autonomous navigation of a group (swarm) of mobile ground unmanned vehicles (MGUVs) operating under conditions of unstable radio environment, loss of global positioning signals, and disruption of communication with a central coordinator. The aim of the study is to improve the fault tolerance and autonomy of the MGUV group through the synthesis of efficient navigation, return, and decentralized control algorithms, taking into account the limited hardware resources of individual nodes. It is shown that conventional methods for recording navigation parameters and standard network communication protocols are inefficient for narrowband decentralized mesh networks, as they lead to radio channel congestion and rapid exhaustion of memory resources in autonomous nodes. To address the problem of maintaining spatial awareness, an event-driven route vector compression algorithm based on a modified run-length encoding (RLE) method is proposed. The approach enables a transition from linear storage complexity while achieving a compression ratio of up to 360-900 times for typical trajectories. The emergency return control is implemented as an asynchronous non-blocking finite state machine, ensuring continuous monitoring of the communication channel and dynamic recalculation of coordinates upon its recovery. A lightweight decentralized leader election protocol is developed, based on the comparison of configuration priorities and MAC addresses. The proposed approach prevents broadcast collisions by forcing lower-priority nodes to cease transmission and reduces control traffic within the network. The integrated implementation of the proposed solutions improves system fault tolerance, optimizes the use of hardware resources, reduces radio channel load, and enables autonomous mission continuation without operator intervention under dynamically changing network topology conditions.

Keywords: ground unmanned vehicle, mobile robot, ground robot, swarm robotics, autonomous navigation, fault-tolerant control, data compression, mesh network.

*Надійшла до редакції
08 квітня 2026 року*

*Рецензовано
26 квітня 2026 року*



© 2026 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).