

УДК 681.58

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).12-21](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).12-21)

В.В. Смірнов, доц., канд. техн. наук, **Н.В. Смірнова**, доц., канд. техн. наук
*Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,
Україна*
e-mail: swckntu@gmail.com

Архітектура контролера вузла адаптивної мобільної мережі з аморфною топологією

Наведений опис архітектури контролера вузла адаптивної мобільної мережі з аморфною топологією. Описана концепція роботи мобільної мережі. Мобільна мережа є адаптивною, що самоорганізується і здатна працювати автономно. Представлений стек протоколів мобільної мережі складається з протоколу управління, протоколу обміну даними і протоколу конфігурації. Взаємодія контролерів вузлів мережі здійснюється за допомогою декількох трансиверів, що дозволило розподілити службовий трафік, трафік даних і трафік управління по різних каналах. Мобільна мережа призначена для управління роєм об'єктів, якими можуть бути БПЛА, робототехнічні об'єкти і системи управління різними технологічними процесами.

мобільна мережа, архітектура, протокол, контролер, рій, бпла, кластер

В.В. Смирнов, доц., канд. техн. наук, **Н.В. Смирнова**, доц., канд. техн. наук
Центральнoукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Украина

Архитектура контроллера узла адаптивной мобильной сети с аморфной топологией

Приведено описание архитектуры контроллера узла адаптивной мобильной сети с аморфной топологией. Описана концепция работы мобильной сети. Мобильная сеть является адаптивной, самоорганизующейся и способна работать автономно. Представлен стек протоколов мобильной сети состоящий из протокола управления, протокола обмена данными и протокола конфигурации. Взаимодействие контроллеров узлов сети осуществляется с помощью нескольких трансиверов, что позволило распределить служебный трафик, трафик данных и трафик управления по разным каналам. Мобильная сеть предназначена для управления роём объектов, которыми могут быть БПЛА, робототехнические объекты и системы управления различными технологическими процессами.

мобильная сеть, архитектура, протокол, контроллер, рой, бпла, кластер

Постановка проблеми. В даний час існує безліч мобільних мереж різного призначення, які розрізняються архітектурою, областю використання, функціональними можливостями, вартістю реалізації та іншими характеристиками. Багато мобільних мереж об'єднують різні технічні об'єкти, які беруть участь в інформаційному обміні, але не пов'язані виконанням загального завдання. Об'єкти таких мереж не здатні впливати на прийняття рішень іншими об'єктами мережі.

Для вирішення кола специфічних завдань, наприклад, управлінням роєм БПЛА або робототехнічними об'єктами, що виконують частину роботи в рамках спільної справи, необхідна спеціальна мобільна мережа, що відповідає додатковим вимогам, не властивим мобільним мережам загального призначення.

Наприклад, робототехнічні об'єкти мобільної мережі (рою), що виконують завдання розмінування ділянки мінного поля, можуть з різних причин виходити з області покриття мережі або припиняти виконання локального завдання, що може вплинути на результат виконання місії.

У цьому випадку інші об'єкти рою повинні виконати завдання вибулого об'єкта, що передбачає динамічну зміну програми функціонування одного або декількох об'єктів мережі або зміна завдання рою (польотного завдання для рою БПЛА) в цілому.

Таким чином, специфіка управління роєм мобільних об'єктів передбачає застосування мобільної мережі з певними властивостями, спрямованими на забезпечення прозорості управління та функціонування мережі, забезпечення її «живучості» за рахунок самоорганізації об'єктів мережі шляхом зміни положення об'єктів мережі в просторі, тим самим ситуативно адаптуючи мережу до змінних умов існування рою.

Аналіз досліджень і публікацій. Існує ряд стандартів на мережеві протоколи для мобільних мереж відповідно до яких проводиться мережеве обладнання.

Мережеві стандарти IEEE 802.11 реалізується технологією Wi-Fi [1,2].

Мережа на основі Wi-Fi працює в діапазонах 2,4 і 5 ГГц. Забезпечуючи високу пропускну здатність, технологія має ряд недоліків, що перешкоджають побудові мобільної мережі для управління роєм об'єктів, а саме: обмежена кількість одночасних з'єднань (10-50 в залежності від застосовуваного контролера), великий час встановлення з'єднання (до 10 секунд) і відносно великий струм споживання.

Мережевий стандарт IEEE 802.15.4 реалізується технологією ZigBee для маршрутизованих радіомереж. Розроблено групою ZigBee Alliance [3-6].

Стандарт визначає два типи вузлів мережі: повнофункціональний пристрій Full-Function Device (FFD) і пристрої з полегшеними функціями Reduced-Function Device (RFD). Пристрій FFD є координатором мережі і може виконувати функції загального вузла. Пристрій RFD є простим пристроєм і не може виконувати функції координатора.

Мережа на основі ZigBee може бути одноранговою з топологією peer-to-peer (P2P), або мати топологію «зірка». Мережа повинна мінімум один FFD.

Мережі P2P можуть створювати довільні структури з'єднань і є основою для мереж, здатних до самоврядування і організації. Однак ZigBee не реалізує ці функції, що є перешкодою для застосування технології ZigBee в мобільній мережі для управління роєм об'єктів.

Мережа Z-Wave на основі ITU-T G.9959 [7-8] дозволяє створювати комірчасті мережі, що самоорганізуються і є гарним рішенням для управління роєм об'єктів. Однак, для створення контролерів мережі необхідно мати сертифікат союзу Z-Wave Alliance на правах члена Full Member за \$ 2500 на рік, що перешкоджає широкому використанню Z-Wave для реалізації мобільної мережі з аморфною топологією.

Мережевий стандарт IEEE 802.16 реалізується технологією WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) [9-10]. У цій технології реалізується концепція множинного доступу з поділом за часом (TDMA). Базова станція виділяє абонентським станціям тимчасові інтервали, для передачі даних в строгій черговості, що виключає колізії в середовищі передачі.

Однак, технологія вимагає використання базових станцій, абонентських станцій і обладнання для організації зв'язку між базовими станціями, що не відповідає концепції створення мобільних мереж.

Постановка задачі. Представляється доцільною розробка автономної адаптивної мобільної мережі з невисокою вартістю і обмеженою функціональністю для управління роєм об'єктів з метою виконання певного кола локальних задач. Слід взяти до уваги, що в даний час в багатьох країнах системи ройових БПЛА знаходяться в стадії розробки і лабораторних випробувань.

Архітектура контролера вузла мережі, його апаратна реалізація, стек протоколів і програмне забезпечення повинні мати низьке енергоспоживання і низьку ціну в розрахунку на ймовірність одноразового використання.

У зв'язку з цим необхідно прийняти ряд обмежень для реалізації мобільної мережі, таких, як кількість вузлів в мережі, потужність трансиверів, складність протоколів, можливості реалізації архітектури контролера вузла мережі для малих об'єктів мережі (наприклад, дронів класу Perdix) [11,12] і низькошвидкісних спеціалізованих робототехнічних систем, а також інші обмеження.

Основним завданням мобільної мережі з аморфною топологією є реалізація взаємодії об'єктів рою між собою з метою виконання поставленого завдання в умовах можливої втрати об'єктів рою. Мережа повинна забезпечити «живучість» рою при будь-якій зміні топології мережі, бути адаптованою і здатною до самоорганізації, перерозподілу та зміни завдань як окремого об'єкта, так і рою в цілому.

Таким чином, мережа повинна мати можливість працювати незалежно від операторів і самостійно приймати рішення з управління об'єктами мережі (рою).

Для вирішення цього завдання необхідна розробка архітектури мережі, стека протоколів, стратегії і правил функціонування мережі (інтелект), а також створення апаратного і програмного забезпечення контролера вузла мережі, як незалежного та самодостатнього модуля.

Виклад основного матеріалу. Для реалізації поставленого завдання була розроблена архітектура контролера вузла мобільної мережі, на основі якої були створені алгоритми функціонування, апаратне і програмне забезпечення контролера.

Більшою мірою базова архітектура контролера вузла мобільної мережі включає в себе перевірені рішення інших архітектур, які доповнені апаратними та програмними засобами, необхідними для виконання мережею заданих функцій. Архітектура контролера вузла мобільної мережі представлена на рис. 1.

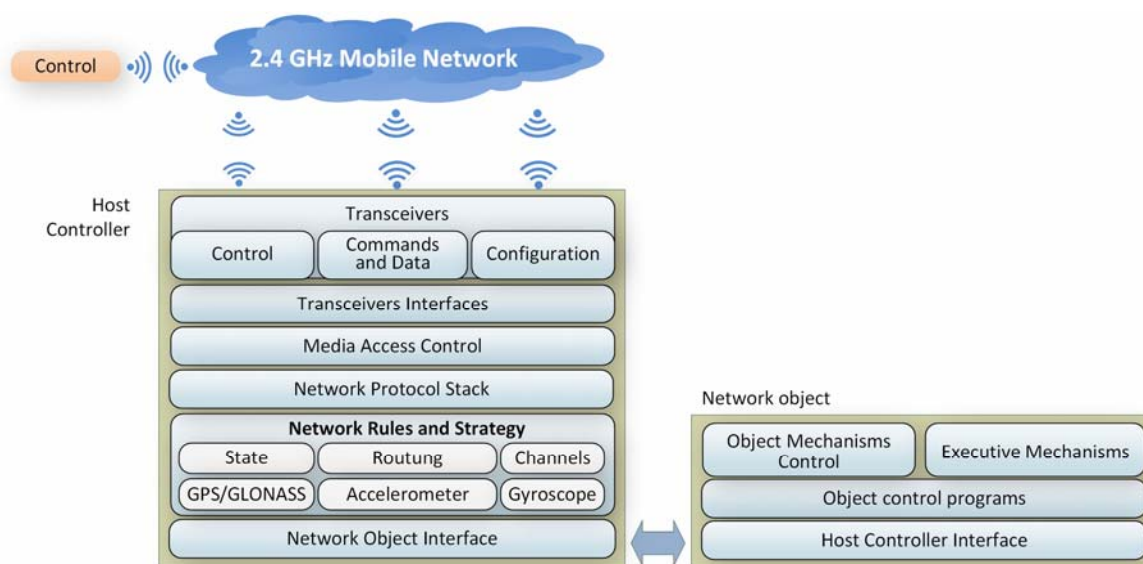


Рисунок 1 – Архітектура контролера вузла мобільної мережі

Джерело: розроблено автором

Контролер взаємодіє з мережею за допомогою трьох трансиверів: трансивера управління (Control), трансивера команд і даних (Commands and Data) і трансивера конфігурації (Configuration). Застосування декількох трансиверів дозволяє

розвантажити середу передачі від зайвого трафіку. Трансивери працюють на різних каналах і з різною інтенсивністю, тому не мають негативного взаємного впливу.

Через трансивер управління здійснюється зв'язок контролера вузла мережі з оператором з метою отримання додаткових команд об'єкту мережі (об'єкту рою) і відправки інформації про поточний стан рою. У разі відсутності зв'язку з оператором рій виконує поставлене завдання відповідно до поточної програми.

Через трансивер команд і даних здійснюється обмін даними між контролерами вузлів мережі про зміни в таблицях маршрутизації, в топології мережі, в статусі об'єктів, а також передача команд управління контролерам вузлів мережі для зміни місця розташування об'єктів мережі в просторі з метою побудови потрібної топології мережі (рою).

Через трансивер конфігурації здійснюється моніторинг вузлів мережі з метою підтримки контролером вузла мережі в актуальному стані інформації про топології мережі, таблиць маршрутизації і ієрархії кластерів. Після отримання об'єктом мережі завдання від контролера вузла мережі задача утримання об'єкта в заданих координатах лежить на самому об'єкті рою.

Інтерфейси з трансиверами (Transceivers Interfaces) забезпечують взаємодію трансиверів з блоком доступу до середовища передачі, який реалізує стек мережевих протоколів. При необхідності, якщо кількість об'єктів в мережі починає впливати на її продуктивність, до складу інтерфейсу можуть входити додаткові контролери, які реалізують відповідні функції з метою розвантаження основного контролера.

Стек мережевих протоколів (Network Protocol Stack) містить протоколи управління, обміну командами та даними і протоколи конфігурації.

Основним блоком, який визначає інтелект контролера вузла мережі є блок правил і стратегії поведінки мережі (Network Rules and Strategy). У блок входять програмні модулі управління маршрутизацією (Routing), перемиканням каналів трансиверів (Channels), модуль визначення координат (GPS/GLONASS) і статусу об'єкта (State).

GPS, акселерометр і гіроскоп з відповідним програмним забезпеченням є основними модулями, які беруть участь в конфігурації, побудові і підтримці просторової топології мережі як в статичному положенні рою, так під час його переміщення (рис. 2).

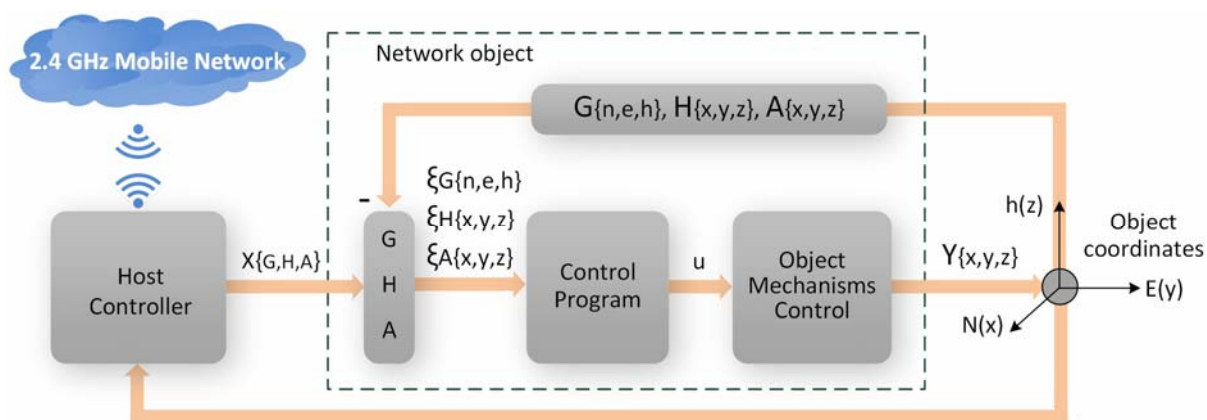


Рисунок 2 – Управління просторовим положенням об'єкта мобільної мережі

Джерело: розроблено автором

де G, H, A - вектор значень впливів, що задаються, GPS (G), гіроскопа (H) і акселерометра (A);

$\xi_G \{n, e, h\}$, $\xi_H \{x, y, z\}$, $\xi_A \{x, y, z\}$ - помилки відхилення G, H, A координат об'єкту від заданих значень;

G {n, e, h}, H {x, y, z}, A {x, y, z} - поточні значення G, H, A.

Координати об'єкта мобільної мережі в просторі можуть визначатися координатором мережі і програмою управління контролера вузла мережі відповідно до правил і стратегією мережі. Об'єкт мережі підтримує своє положення в просторі як в абсолютних, так і у відносних координатах, а також при переміщенні рою відповідно до вираження:

$$Y\{G(n,e,h); H(n,e,h); A(n,e,h)\} - X\{G(n,e,h); H(n,e,h); A(n,e,h)\} \rightarrow 0. \quad (1)$$

Інтерфейс з об'єктом мережі (Network Object Interface) забезпечує взаємодію між контролером вузла мережі і об'єктом мережі.

Оскільки контролер вузла мобільної мережі є незалежним пристроєм, функцією якого є підтримка працездатності мережі, він може бути використаний з будь-яким пристроєм, що має послідовний комунікаційний інтерфейс SPI або UART і відповідну програму управління.

Тому об'єктом мобільної мережі може бути будь-який пристрій, такий, як коптер, рухливий наземний робототехнічний об'єкт або статичний пристрій управління будь-яким технологічним процесом.

Взаємодія між контролерами вузлів мережі здійснюється за допомогою протоколу управління, інформаційного протоколу і протоколу конфігурації.

Протокол управління (рис. 3) призначений для зв'язку оператора з контролерами вузлів мобільної мережі. Просторові координати оператора передаються в широкомовному режимі.

Приймачем і ретранслятором пакетів стає найближчий до оператора контролер вузла мережі. Вибір об'єкта-ретранслятора здійснюється на підставі даних таблиць маршрутизації, які має кожен контролер вузла мережі.

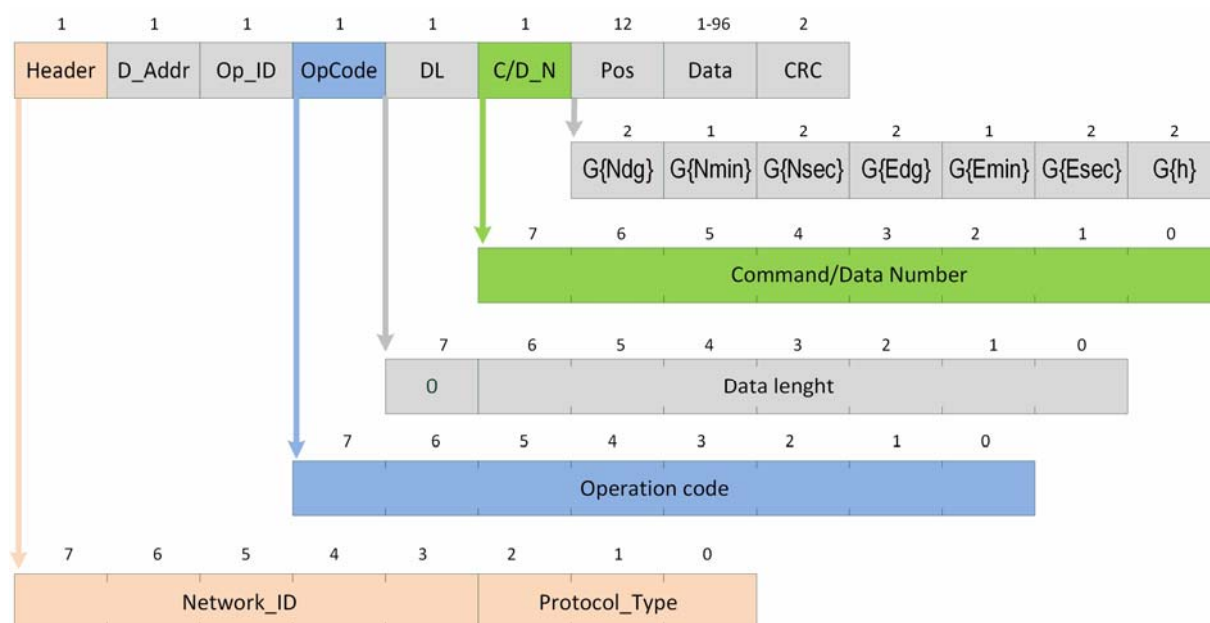


Рисунок 3 – Структура протоколу управління мобільною мережею
Джерело: розроблено автором

Призначення полів протоколу. Поле «Header» – заголовок протоколу. Поле ідентифікує мережу (32 мережі) і тип протоколу. Ідентифікація мережі необхідна, оскільки кілька мереж можуть перетинатися і знаходитися в загальній зоні покриття.

Поле «D_Addr» містить адресу об'єкта - одержувача пакета або значення «0xFF» в режимі широкомовної передачі. Поле «Op_ID» містить ідентифікатор оператора мережі. Поле «Op_Code» містить код операції для контролера вузла мережі. Поле «DL» визначає довжину поля даних в байтах.

Поле «C / D_N» містить номер даного пакета в загальній послідовності пакетів, що передаються. На кожен посланий відправником пакет від одержувача надходить квитанція про його прийом. В процесі ретрансляції пакетів виникає затримка, а в разі ретрансляції пакету по декількох каналах (при збої в системі маршрутизації) - одержувач може прийняти кілька копій пакета.

Якщо пакет прийнятий і на нього надіслано квитанцію, то всі інші копії пакета відкидаються одержувачем. Якщо у відповідь на відправлений пакет квитанція не надійшла протягом певного часового інтервалу, вважається, що об'єкт-ретранслятор вибув з мережі. У цьому випадку програма оператора запускає процедуру виявлення нового об'єкта-ретранслятора шляхом передачі широкомовного пакета з командою реконфігурації мережі. Після надходження квитанції значення поля «C / D_N» інкрементується по кільцю.

Поле «Pos» містить GPS / GLONASS / Galileo координати оператора в упакованому форматі в який перетворюються поля записів протоколу NMEA [13].

Положення оператора може змінюватися в просторі, тому передача координат оператора необхідна для прийняття рішень об'єктами мережі. Поле «Data» - поле даних 1-96 байт. Містить параметри команд і дані. Поле «СКС» - контрольна сума.

Протокол конфігурації (рис. 4) використовується об'єктами мережі для визначення поточної топології мережі, формування кластерів об'єктів, формування таблиць маршрутизації пакетів та інших службових функцій.

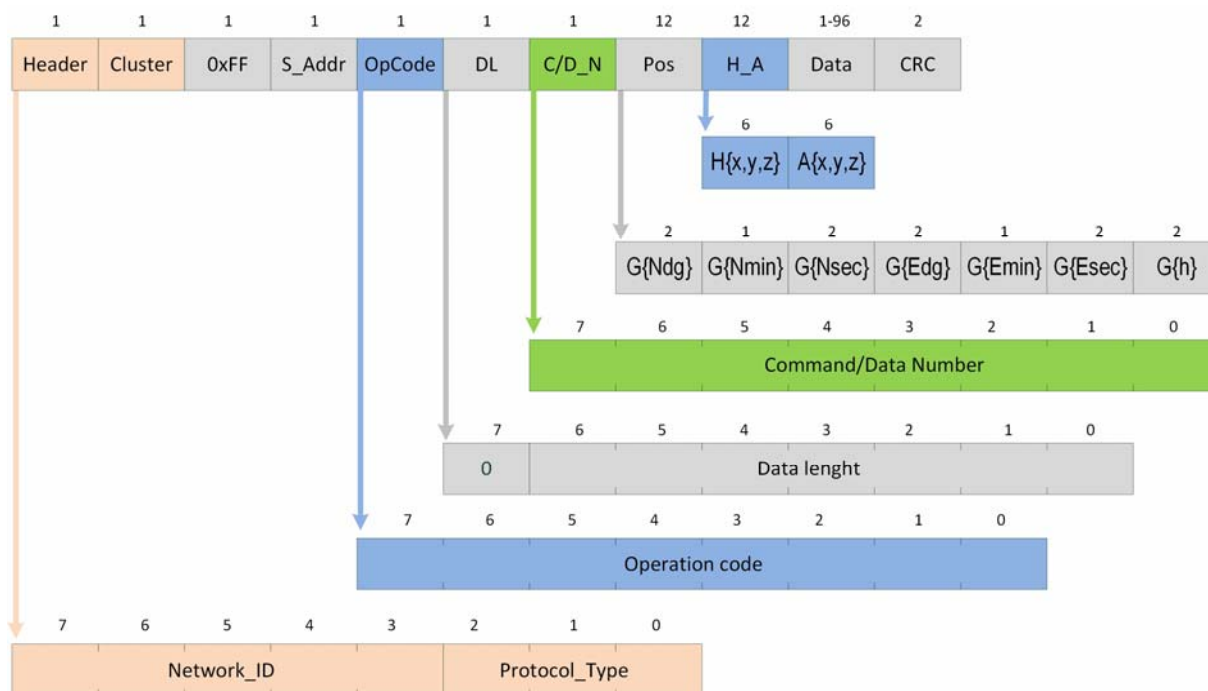


Рисунок 4 – Структура протоколу конфігурації мобільної мережі

Джерело: розроблено автором

Поле «Cluster» містить ідентифікатор кластера, до якого належить об'єкт мережі.

Поле «Pos» містить GPS / GLONASS / Galileo координати контролера вузла мережі в упакованому форматі.

Поле «H_A» містить інформацію про відмінності станів гіроскопа (H) і акселерометра (A) по осях x, y, z в момент часу H_A (t) і в момент часу H_A (t-1). Дана інформація необхідна для точного позиціонування об'єкта в просторі, дублювання поведінки ведучого об'єкта, формування певної топології мережі і виконання побудов об'єктів в порядку, наприклад, такі, як «Ланцюг», «Конвой» та інші, в залежності від поточної виконуваної роєм задачі.

Обмін даними конфігурації між контролерами вузлів мережі здійснюється безперервно по окремо виділеним каналам. Контролер вузла мобільної мережі передає дані про свій стан в ширококомовному режимі (поле адреси одержувача містить адресу 0xFF). Процедура конфігурації здійснюється без квітуння пакетів

Черговість передачі даних в мережу визначається номером (ідентифікатором) контролера вузла мережі. Контролер з молодшим номером передає свої дані першим. Якщо контролер вузла мережі не передає дані в перебігу встановленого проміжку часу, то після закінчення тайм-ауту чергу передачі передається об'єкту з великим номером. Інтервал тайм-ауту визначається ступенем мобільності мережі і може мати значення від 0.5 - 2 секунди.

В процесі виконання процедури конфігурації оновлюються таблиці зв'язків з доступними контролерами вузлів мережі. Найближчий контролер визначається за даними GPS і може виступати в ролі ретранслятора.

Той контролер, у якого більше сусідніх зв'язків, створює кластер і стає координатором кластеру. З безлічі контролерів вузлів мережі кластера зі зв'язками одного рангу координатором стає контролер з більшою адресою (ідентифікатором).

У контролері вузла мобільної мережі застосований гіроскоп L3G4200D [14] і акселерометр ADXL345 [15].

Протокол обміну даними (рис. 5) має невеликі відмінності від протоколу управління. Замість поля «Op_Code» використовується поле «S_Addr» - адреса відправника. Виключено поле «Pos».

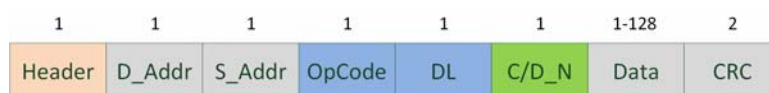


Рисунок 5 – Структура протоколу обміну даними в мобільній мережі

Джерело: розроблено автором

Інтелект мережі (рою) визначається програмним забезпеченням контролера вузла мобільної мережі. Всі контролери вузлів мережі рівнозначні, проте поведінка об'єкта рою в мережі визначається фізичною й логічною топологією мережі, яка може динамічно змінюватися. Завдання контролера вузла мобільної мережі і об'єкта рою розділені. Контролер вузла мобільної мережі виконує завдання підтримки працездатності мережі та забезпечення роботи об'єктів рою, в той час, як об'єкт рою виконує поставлене завдання в рамках загальної місії.

Висновки. Представлена архітектура контролера вузла мобільної мережі покладена в основу системи управління роєм об'єктів. Застосування декількох трансиверів дозволило розподілити трафік даних, трафік конфігурації і трафік управління по різних каналах, що дало можливість здійснювати інформаційний обмін одночасно.

Мінімізований стек протоколів. Повністю розділена функціональність вузла мережі і об'єкта мережі (рою). Топологія мобільної мережі не детермінована, аморфна і

змінюється при переміщенні об'єктів мережі в просторі. При цьому втрачаються одні зв'язки і виникають інші. Таблиці маршрутизації постійно оновлюються.

Мережа по команді або відповідно до закладеного алгоритму здатна вибудовувати потрібну топологію і організувати необхідні зв'язки з метою виконання завдання роєм об'єктів, а також для побудови ланцюжка ретрансляції пакетів для віддалених об'єктів мережі.

Таким чином, реалізація мобільної мережі при її невисокій вартості і невеликій складності дозволяє вирішити певне коло завдань. Виконавцем може бути як окремих об'єкт, пов'язаний з оператором роєм ретрансляторів, так і рій об'єктів.

З метою підвищення ефективності формування таблиць маршрутизації та мінімізації структур кластерів в мобільній мережі доцільне застосування алгоритмів оптимізації на основі теорії множин.

Список літератури

1. Brian Verenkoff Understanding and Optimizing 802.11n. Buffalo Technology. July 2011. 8 p. URL: https://www.lmi.net/wp-content/uploads/Optimizing_802.11n.pdf (дата обращения: 30.09.2020).
2. Wi-Fi Alliance® introduces Wi-Fi 6. URL: <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-6> (дата обращения: 30.09.2020).
3. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2020.05.06. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (дата обращения: 30.09.2020).
4. IEEE 802.15.2-2003 - IEEE Recommended Practice for Information technology - Local and metropolitan area networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2003.06.12. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_2-2003.html (дата обращения: 30.09.2020).
5. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2020.05.06. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (дата обращения: 30.09.2020).
6. P802.15.4z/D06, Jan. 2020 - IEEE Draft Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment: Enhanced High Rate Pulse (HRP) and Low Rate Pulse (LRP) Ultra Wide-Band (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. Jan. 2020. URL: <http://libris.kb.se/bib/fr02gv53cvb60ktf> (дата обращения: 30.09.2020).
7. Understanding Z-Wave Networks, Nodes & Devices. Vesternet Ltd. 28.01.2020. URL: <https://www.vesternet.com/pages/understanding-z-wave-networks-nodes-devices> (дата обращения: 30.09.2020).
8. Recommendation G.9959. URL: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9959-201202-I/en> (дата обращения: 30.09.2020).
9. WiMAX Forum. URL: <http://wimaxforum.org> (дата обращения: 30.09.2020).
10. IEEE Std 802.16™-2009. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. 29 May 2009. URL: <https://legal.vvv.enseirb-matmeca.fr/download/amichel/%5BStandard%20LDPC%5D%20802.16-2009.pdf> (дата обращения: 30.09.2020).
11. Perdix Immediate Release Department of Defense Announces Successful Micro-Drone Demonstration. Jan. 9, 2017. URL: <https://www.defense.gov/Newsroom/Releases/Release/Article/1044811/departement-of-defense-announces-successful-micro-drone-demonstration> (дата обращения: 30.09.2020).
12. Otto, Robert P. Small Unmanned Aircraft Systems (SUAS) Flight Plan: 2016-2036. Bridging the Gap Between Tactical and Strategic. Headquarters United States Air Force, AIR FORCE DEPUTY CHIEF OF STAFF WASHINGTON DC WASHINGTON DC United States, 2016.04.30. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD1013675> (дата обращения: 30.09.2020).
13. ISO 6709:2008(en). Standard representation of geographic point location by coordinates. 2008. URL: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:6709:ed-2:v1:en> (дата обращения: 30.09.2020).
14. L3G4200D MEMS motion sensor: ultra-stable three-axis digital output gyroscope. STMicroelectronics group of companies. December 2010. 42 p. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/a3g4250d.pdf> (дата обращения: 30.09.2020).
15. 3-Axis, ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g/ ± 16 g Digital Accelerometer ADXL345-EP. Analog Devices. URL: www.analog.com (дата обращения: 30.09.2020).

Referencis

1. Brian Verenkoff Understanding and Optimizing 802.11n. (July 2011) *Buffalo Technology* : website. *lmi.net*. Retrieved from https://www.lmi.net/wp-content/uploads/Optimizing_802.11n.pdf [in English].
2. Wi-Fi Alliance® introduces Wi-Fi 6 (n.d.) : website. *wi-fi.org*. Retrieved from <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-6> [in English].
3. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (2020.05.06). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. *standards.ieee.org*. Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html [in English].
4. IEEE 802.15.2-2003 - IEEE Recommended Practice for Information technology - Local and metropolitan area networks (2003.06.12). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. *standards.ieee.org*. Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_2-2003.html [in English].
5. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (2020.05.06). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. *standards.ieee.org*. Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html [in English].
6. P802.15.4z/D06, Jan. 2020 - IEEE Draft Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment: Enhanced High Rate Pulse (HRP) and Low Rate Pulse (LRP) Ultra Wide-Band (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques (Jan. 2020) : website. *libris.kb.se*. Retrieved from <http://libris.kb.se/bib/fr02gv53cvb60ktf> [in English].
7. Understanding Z-Wave Networks, Nodes & Devices (28.01.2020). *Vesternet Ltd.* : website. *vesternet.com*. Retrieved from <https://www.vesternet.com/pages/understanding-z-wave-networks-nodes-devices> [in English].
8. Recommendation G.9959 (n.d.) : website. *itu.int*. Retrieved from <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9959-201202-I/en> [in English].
9. WiMAX Forum (n.d.) : website. *wimaxforum.org*. Retrieved from <http://wimaxforum.org> [in English].
10. IEEE Std 802.16™-2009. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems (29 May 2009) : website. *legal.vvv.enseirb-matmeca.fr*. Retrieved from <https://legal.vvv.enseirb-matmeca.fr/download/amichel/%5BStandard%20LDPC%5D%20802.16-2009.pdf> [in English].
11. Perdix Immediate Release Department of Defense Announces Successful Micro-Drone Demonstration (Jan. 9, 2017) : website. *defense.gov*. Retrieved from <https://www.defense.gov/Newsroom/Releases/Release/Article/1044811/departement-of-defense-announces-successful-micro-drone-demonstration> [in English].
12. Otto, Robert P. Small Unmanned Aircraft Systems (SUAS) Flight Plan: 2016-2036 (2016.04.30). *Bridging the Gap Between Tactical and Strategic. Headquarters United States Air Force, AIR FORCE DEPUTY CHIEF OF STAFF WASHINGTON DC WASHINGTON DC United States* : website. *apps.dtic.mil*. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD1013675> [in English].
13. ISO 6709:2008(en). Standard representation of geographic point location by coordinates (2008) : website. *iso.org*. Retrieved from <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:6709:ed-2:v1:en> [in English].
14. L3G4200D MEMS motion sensor:ultra-stable three-axis digital output gyroscope (December 2010). *STMicroelectronics group of companies* : website. *st.com*. Retrieved from <https://www.st.com/resource/en/datasheet/a3g4250d.pdf> [in English].
15. 3-Axis, ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g/ ± 16 g Digital Accelerometer ADXL345-EP. (n.d.) *Analog Devices* : website. *analog.com*. Retrieved from www.analog.com [in English].

Volodymyr Smirnov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Natalia Smirnova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Adaptive Mobile Network With Amorphous Topology Node Controller Architecture

The purpose of the article is to develop an adaptive mobile network node architecture with an amorphous topology. The article describes the host controller architecture. The concept of a mobile network is described. The mobile network is adaptive, self-organizing, and able to operate autonomously. The presented mobile network node controller architecture is the object swarm control system basis. A stack of mobile network protocols is presented, consisting of a control protocol, a data exchange protocol and a configuration protocol. The nodes of the network controllers interaction is carried out using several transceivers.

The use of multiple transceivers made it possible to distribute data traffic, configuration traffic, and management traffic over different channels, which made it possible to carry out information exchange at the same time. The protocol stack is minimized. The functionality of the host and the network object (swarm) is completely separated. The topology of the mobile network is not deterministic, amorphous and changes when the

network objects move in space. In this case, some connections are lost and others arise. The routing tables are constantly updated.

The network in accordance with the laid down algorithm, is able to build the necessary topology and organize the necessary connections in order to complete the task with a swarm of objects. The network is capable of building packet retransmission chains for remote network objects. Thus, the implementation of a mobile network at its low cost allows solving a certain range of problems. The performer can be either a separate object associated with the operator through a swarm of repeaters, or a swarm of objects.

In order to increase the efficiency of the formation of routing tables and minimize the cluster structures in a mobile network, it is advisable to use optimization algorithms based on set theory. The mobile network is designed to control a swarm of objects, which can be UAVs, robotic objects and control systems for various technological processes.

mobile network, architecture, protocol, controller, swarm, UAV, cluster

Одержано (Received) 14.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 28.10.2020

Прийнято до друку (Approved) 19.10.2020