



УДК 004.94

І. Г. Цмоць, Ю. В. Опотяк, К. М. Обельовська, С. В. Теслюк

Національний університет "Львівська політехніка"

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ БЕЗКОНФЛІКТНОГО ОБМІНУ ДАНИМИ
У ГРУПІ МОБІЛЬНИХ РОБОТОТЕХНІЧНИХ ПЛАТФОРМ

Під час використання груп мобільних робототехнічних платформ (МРП) виникають проблеми, пов'язані із керуванням окремими платформами, організацією співпраці в групі та забезпеченням управління групою загалом. Управління групою МРП передбачає керування діями окремих платформ для досягнення загальної мети групи. Для забезпечення управління групою МРП у такому випадку доцільно вибрати гібридний метод, що вимагає вирішення проблеми безконфліктного обміну даними та командами керування між МРП у групі. Для вирішення вказаної проблеми запропоновано удосконалити відповідні методи та засоби. Гібридний метод управління враховує переваги централізованого і розподіленого залежно від конкретних завдань та умов використання. Запропоновано для обміну даними за гібридного управління використовувати багатоканальний пристрій безконфліктного обміну із використанням методу часового розподілу ресурсів ОЗП. Показано, що глобальні мережі із низьким енергоспоживанням LPWANs (Low-Power Wide Area Networks) можна використовувати для передавання невеликих блоків даних із низькою швидкістю, організовуючи обмін із МРП. Запропоновано для передавання трафіку, не критичного до часу, застосовувати слотовий механізм CSMA/CA, а для критичного до часу – керований координатором доступ із використанням гарантованих часових слотів. Показано, що ефективність роботи мережі упродовж безконфліктного періоду доступу залежить від результатів розподілу гарантованих часових слотів між активними користувачами. Вибрано технологію LoRa для обміну даними на великих відстанях між МРП, яка на рівні управління доступом до фізичного середовища MAC дає змогу планувати передавання та управляти зв'язком між кінцевими пристроями та шлюзами, уникаючи зіткнень та оптимізуючи продуктивність мережі.

Ключові слова: управління мобільними робототехнічними платформами, передавання даних, управління доступом до середовища передачі, безконфліктний доступ.

Вступ / Introduction

Актуальність проблеми. Під час використання мобільних робототехнічних платформ (МРП) та взаємодії їх у групі виникають додаткові проблеми, пов'язані із керуванням окремими платформами, організацією співпраці в групі та забезпеченням управління для досягнення поставлених цілей і виконання завдання групою загалом. Управління групою МРП передбачає виконання дій окремими платформами, що спрямовані на досягнення загальної мети групи в умовах змінного навколишнього середовища та різноманітних впливів.

Оскільки окрема МРП має обмеження щодо габаритів, маси, енергоспоживання та інших параметрів, доцільно орієнтувати кожну на виконання нескладних операцій і дій у межах глобального завдання групи. Для управління групою МРП у такому випадку доцільно вибрати гібридний метод, який є комбінацією централізованого та розподіленого. За такого методу використовується централізоване планування, яке

передбачає аналіз поточної ситуації, оптимізацію планування маршрутів, розподілу завдань і ресурсів для всієї групи МРП.

Однак у цьому випадку надзвичайно важливим завданням є забезпечення узгодженого управління окремою МРП та групою, а для цього потрібно вирішити проблему безконфліктного обміну даними та командами керування між МРП у групі.

Отже, для вирішення вказаного завдання необхідно знайти методи та удосконалити відповідні засоби для забезпечення безконфліктного обміну даними у групі МРП.

Об'єкт дослідження – процеси передавання даних у групі МРП з урахуванням відповідних обмежень.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та засоби безконфліктного обміну даними у групі МРП.

Мета роботи – вибір технології безпроводного передавання даних між МРП, розроблення методу та засобів багатоканального безконфліктного доступу.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- аналіз останніх досліджень та публікацій;
- вибір технології безпроводного передавання даних для МРП;
- вибір методу доступу до фізичного середовища засобів передавання даних для групи МРП;
- розроблення методу та засобів багатоканального безконфліктного обміну на рівні окремої МРП.

Матеріали та методи дослідження. У роботі використано: сучасні методи та алгоритми інтелектуального управління, методи передавання даних та керування, методи та засоби проектування апаратних і програмних засобів для МРП.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання управління окремими МРП та їх групами залишається надзвичайно актуальним. У низці публікацій [1], [2], [3] висвітлено питання групового управління роботами та його забезпечення в умовах обмежень щодо засобів зв'язку. Зокрема, у [2] зазначено, що з розвитком науки й техніки багато складних завдань не може ефективно вирішити один робот, тому для спільної роботи їх потрібно кілька. Для сценаріїв складних завдань із кількома роботами проблема розподілу завдань між кількома роботами є ключем до координації роботів для ефективної праці. Для цього застосовано моделювання на основі алгоритму пошуку балансу ресурсів і генетичного алгоритму, що дає змогу підвищити раціональність розподілу завдань для кількох роботів та ефективність виконання завдання. У [4] досліджено проблему розподілу завдань між кількома роботами та викладено два різні стохастичні підходи до вирішення такої проблеми. У [5] підкреслено, що роботи повинні бути здатними ефективно вирішувати завдання на командному рівні, досягаючи завдяки цьому високої продуктивності. Для цього у дослідженні подано нове визначення ефективності розгортання сервісних роботів з погляду управління декількома роботами, а також запропоновано набір методів призначення завдань багатьом роботам для підвищення ефективності, особливо для прикладних сценаріїв, у яких розташування роботів є географічно неоднаковим або змінюється з часом.

Аналіз робіт [6], [7], [8], [9] вказує на важливість збирання і обміну даними між роботами під час їх функціонування. Так, у [6] вказано, що велика кількість даних датчиків високої роздільної здатності, як часових, так і просторових, які автономні мобільні роботи збирають у сучасних системах, потребує структурованого та ефективного керування та зберігання протягом місії робота. Просторово-часово-семантичне представлення середовища для автономних мобільних роботів, наведене у дослідженні, дає змогу одночасно обробляти різні типи даних і забезпечувати ефективний інтерфейс запитів для реалізації аналізу високого рівня і набагато краще підходить для цих завдань, ніж традиційна ГІС.

Великого значення дослідники надають вирішенню питань ефективної комунікації у групі роботів та забезпеченню передавання даних [10], [11] [12]. Зокрема, у [10] досліджено енергоефективний зв'язок, який є ключовим аспектом систем ройових роботів, які спільно працюють над виконанням складних завдань. Запропоновано схему кодування, натхненну кодуванням

Хаффмана для стиснення даних без втрат, яку оптимізовано для зв'язку ройових роботів, а технологія зв'язку на основі UWB (Ultra-Wide Band) інтегрована в платформу для забезпечення зв'язку між роботами. У вирішенні цього питання важливе місце займає розроблення ефективних протоколів комунікації між роботами [13], [14], [15], [16]. У [13] вказано потенційні обмеження, такі як обмежена пропускна здатність і суперечливі сценарії, унаслідок чого взаємодія роботів, ймовірно, буде неможлива в ситуаціях, коли роботи часто обмінюються великими обсягами даних. Автори у роботі пропонують легкі протоколи зв'язку "робот – робот" з ефективним використанням пропускної здатності каналу, обміном значно меншими обсягами інформації. Автори [14] наголошують, що сьогодні доступно декілька протоколів зв'язку для реалізації збирання даних. Як наслідок, розуміння практичних можливостей кожного протоколу зв'язку стає істотною проблемою в оптимізації збирання та зберігання даних. Застосовано протоколи уніфікованої архітектури комунікації відкритої платформи (OPC UA) і телеметричний транспорт черги повідомлень (MQTT). Розроблене тестове середовище допомагає оцінити кілька показників продуктивності: накладні витрати пакетів, затримку, коефіцієнт втрат пакетів і використання ЦП різних сценаріїв додатків, де враховано неоднакову кількість роботів.

У [17] автори наголошують, що розробки в галузі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) засвідчили очевидну потребу в стандартизації комунікаційних технологій, які підтримують прямий обмін даними. Це уможливує створення мережі між БПЛА, необхідної для виконання спільних завдань, які потребують синхронізації в реальному (або майже реальному) часі, зокрема формування рою та уникнення зіткнень. Запропоновано впровадження нового стандарту, який би стосувався цієї специфічної сфери, висвітлено недоліки поточних технологій, кроки до швидкої стандартизації та досягнення суміжних галузей за останні кілька років.

Крім того, під час організації передавання даних у безпроводних мережах вузьким місцем і надалі залишається організація доступу до фізичного середовища (Media Access Control, MAC). Одним із найпоширеніших методів MAC є множинний метод доступу із прослуховуванням несучої та запобіганням колізіям (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA). Стосовно аналізу схеми CSMA/CA є велика кількість праць, проте роботи із його вдосконалення, зокрема для конкретних застосувань, постійно ведуться. Серед них щодо безпроводних локальних мереж WLAN (Wireless Local Area Network) можна виділити праці [18–20], безпроводних сенсорних мереж [21], безпроводних мереж на тілі WBANs (Wireless Body Area Networks), наприклад, [22]. В роботах [18, 19] для вдосконалення схеми CSMA/CA бездротових локальних мереж застосовано машинне навчання із посиленням, за допомогою якого реалізовано оптимізацію значення вікна конкуренції за рахунок адаптації його до трафіку мережі. В роботах [21], [23] подано модифіковані схеми доступу CSMA/CA. У [22], щоб підвищити продуктивність CSMA/CA, автори пропонують зміни до формування затримки відтермінування. Для тестування модифікованого методу застосовано пакет моделювання OPNET. Результати досліджень показали, що модифікований метод підвищує надійність, одно-

часно зменшуючи середню затримку. Модифікована схема CSMA/CA авторів [23] забезпечує координацію каналів між бездротовими локальними та персональними мережами. Сучасний підхід до підвищення ефективності функціонування телекомунікаційних мереж передбачає забезпечення обслуговування кожного типу трафіку із потрібною йому якістю сервісу [24], [25], [26]. У [26] запропонована вдосконалена схема CSMA/CA на основі пріоритетів класу трафіку. Пріоритетний доступ до каналу досягається призначенням під час змагання діапазону періоду відтермінування для кожного класу трафіку під час кожного відтермінування. Основною перевагою запропонованої схеми є зменшення затримки доставки пакетів, втрати пакетів і споживання енергії, а також підвищення пропускну здатності та коефіцієнта доставки пакетів.

Отже, як показує аналіз, питання забезпечення ефективного обміну даними між МРП у групі залишається актуальним і потребує подальших досліджень. Розроблення методів та засобів для забезпечення безконфліктного обміну даними у групі мобільних робототехнічних платформ допомагає вирішити проблему та визначає успішність експлуатації МРП.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Рівні обміну даними у групі мобільних робототехнічних платформ. Управління групою мобільних робототехнічних платформ (МРП) передбачає обмін даними між МРП про їх координати та стан навколишнього середовища. На основі опрацювання таких даних здійснюється управління групою МРП, що

зводиться до визначення та реалізації таких дій кожної окремої МРП, які забезпечували б досягнення загальної групової мети. Для управління групою МРП найчастіше використовують централізований, розподілений та гібридний методи управління.

Централізований метод управління групою МРП є вразливим до відмови централізованої системи управління, збільшує затримки під час передавання команд, зменшує ефективність реагування на зміни у навколишньому середовищі, а зі збільшенням кількості МРП зростатиме складність централізованого управління. У разі використання розподіленого методу управління групою МРП виникають проблеми із ускладненням алгоритмів і програмних засобів, із забезпеченням ефективної співпраці, розподілу ресурсів і координації в групі між МРП.

Для управління групою МРП вибрано гібридний метод, який є комбінацією централізованого та розподіленого методів [27]. Гібридний метод балансує між централізованим і розподіленим управлінням, використовуючи переваги обох підходів залежно від конкретних завдань та умов. За такого методу використовують централізоване планування, яке передбачає аналіз поточної ситуації, оптимізацію планування маршрутів, розподілу завдань і ресурсів для всієї групи МРП. Цей метод за рахунок розподіленого виконання команд забезпечує гнучкість та адаптивність до змін в оточенні без необхідності постійної централізованої координації.

Структуру засобів збирання та обміну даними для гібридного методу управління групою МРП наведено на рис. 1, де КСУ – комп’ютерна система управління, ДП – двопортова пам’ять.

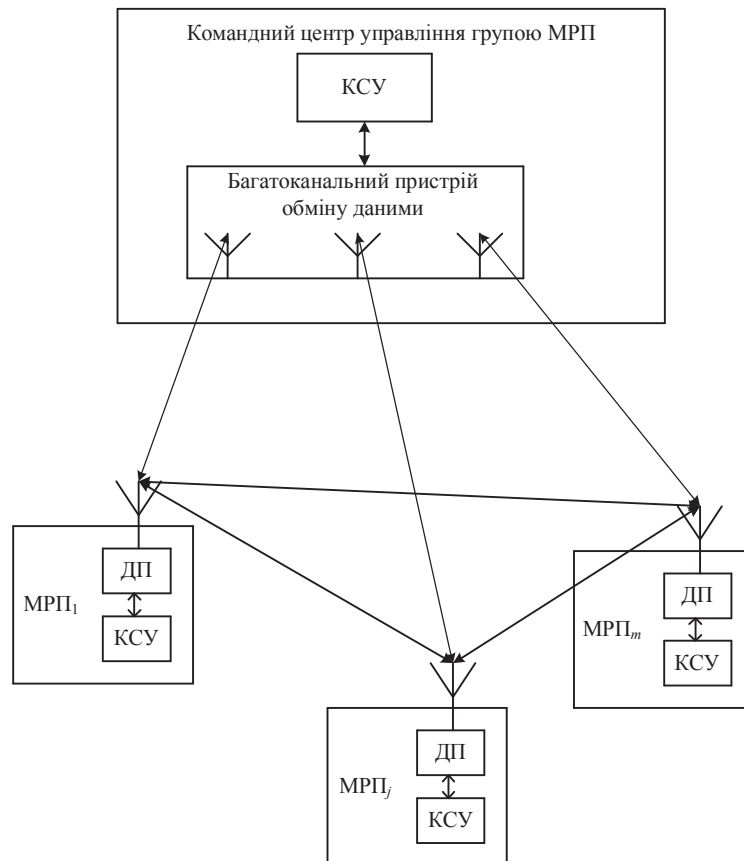


Рис. 1. Структура засобів збирання та обміну даними для гібридного методу управління групою МРП /
The structure of data collection and exchange means for the hybrid method of MRP group control

Гібридний метод управління групою МРП є поєднанням централізованого та розподіленого методів управління, коли кожна МРП має свою систему управління та існує командний центр для централізованого управління групою МРП. Для реалізації такого методу управління необхідно створити методи та засоби безконфліктного обміну даними у групі мобільних робототехнічних платформ. Вирішити вказане завдання можливо, реалізувавши відповідні методи і засоби на таких рівнях:

- вибір технології безпроводного передавання даних для МРП;
- вибір методу доступу до фізичного середовища засобів передавання даних для групи МРП;
- розроблення засобів багатоканального безконфліктного обміну на рівні окремої МРП.

Вибір безпроводної технології передавання даних для МРП. Сьогодні існують різні безпроводні технології

передавання, кожна з них має певні особливості й може забезпечити певні вимоги щодо передавання даних. Деякі з них постійно розвиваються та вдосконалюються. Однак треба зазначити, що системи з МРП мають власний унікальний набір вимог до мереж і під час вибору бездротової технології для конкретного випадку важливо зважати на ці вимоги. Найістотнішими серед них у багатьох випадках є дальність передавання, енергоспоживання, безпека та вимоги до управління мережею.

Для аналізу різних безпроводних технологій передавання даних використано розміщену на медіаплатформі industrytoday.com [28] схему (рис. 2), що дає змогу порівняти безпроводні технології за параметрами, важливими під час обміну даними між МРП: дальність, швидкість передавання й енергоспоживання.

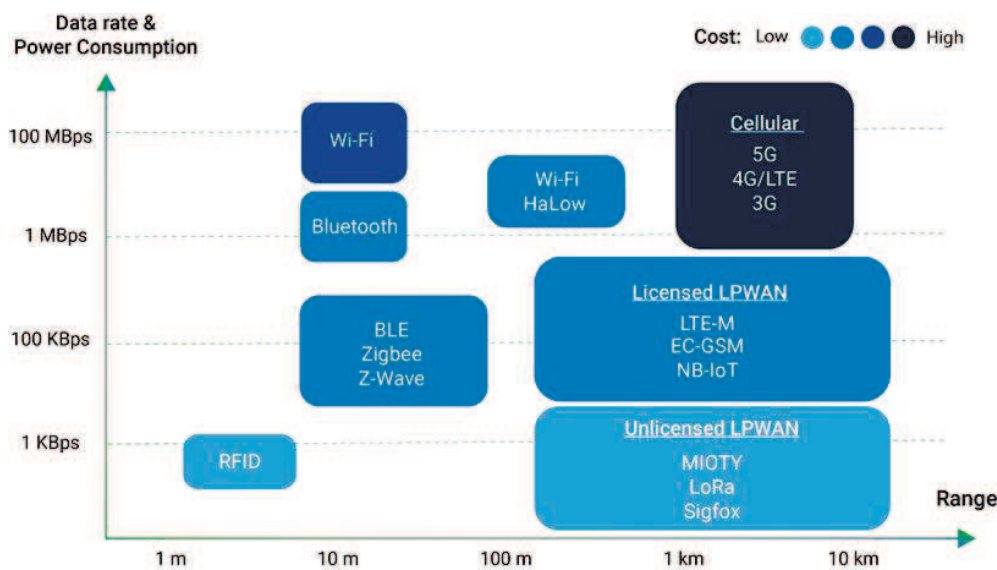


Рис. 2. Порівняння технологій безпроводного зв'язку [28] / Comparison of wireless communication technologies [28]

Радіочастотна ідентифікація RFID (Radio Frequency Identification) – це технологія малого радіуса дії, що застосовується для ідентифікації предметів за допомогою використання радіохвиль. На об'єктах закріплюють спеціальні RFID мітки, що містять ідентифікаційну та іншу інформацію, яку зчитують за допомогою радіочастотного розпізнавання. Технологія RFID характеризується невеликою дальністю передавання, низькими швидкістю та енергією споживання. Сьогодні RFID починають все ширше застосовувати в логістиці.

Технологія Wi-Fi – безпроводна технологія, що дає змогу здійснювати обмін даними між МРП. Wi-Fi підтримують багато пристроїв та систем, що забезпечує можливість інтеграції МРП у різноманітні середовища, які підтримують цей стандарт. Wi-Fi може забезпечити зручний обмін даними на порівняно великій площі за помірного енергоспоживання. Перед вибором технології Wi-Fi для обміну даними між МРП важливо враховувати конкретні вимоги завдання і такі фактори, як відстань передавання даних, швидкість, безпека й ефективність споживаної потужності. Максимальну швидкість з'єднання (9,6 Гбіт/с) забезпечує Wi-Fi 6, Wi-Fi 6E (IEEE 802.11ax), Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11ah)

надає істотні покращення в радіусі дії та енергоефективності, краще задовольняє вимоги IIoT (Industrial Internet of Thing).

Поширеною є технологія Bluetooth, яка надає зв'язок у малому радіусі дії. Версія Bluetooth, що характеризується низьким енергоспоживанням, відома під назвою BLE (англ. Bluetooth Low-Energy), або Bluetooth Smart.

Безпроводна технологія малого радіуса дії Zigbee є надбудовою над фізичним рівнем та MAC-підрівнем, реалізованими відповідно до вимог стандарту IEEE 802.15.4. Технологія Zigbee зазвичай працює у сітчастій (англ. mesh) топології, що дає можливість збільшити радіус покриття. Проте такий підхід негативно впливає на енергоефективність і не є ідеальним для територіально рознесених об'єктів. З появою LPWAN (Low-Power Wide Area Networks) з'явилась можливість відмови від сітчастих мереж і переходу на LPWAN. Zigbee, порівняно з LPWAN, забезпечує дещо більшу швидкість передавання даних, проте через сітчасту топологію її енергоефективність набагато менша.

Стільникові мережі надають надійний ширококомунікаційний зв'язок для обміну даними між МРП. Проте для них характерні дуже високі експлуатаційні витрати та споживання електроенергії. Однак очікується, що

стільникові мережі 5G стануть лідером в підтримці чутливих до часу додатків, зокрема у сфері управління транспортними засобами та промислової автоматизації.

Глобальні мережі з низьким енергоспоживанням LPWANs орієнтовані на передавання невеликих блоків даних із низькою швидкістю, тому підходять для застосувань, що не потребують високої пропускної здатності та не є критичними до часу. *Технологія LoRa (Long Range)* орієнтована на передавання даних на великі відстані із низьким споживанням енергії. Мережі LoRa гнучкі, працюють на різних частотних діапазонах, що дає їм змогу адаптуватися до різних стандартів та умов. Вартість обладнання для мереж LoRa зазвичай низька порівняно з іншими технологіями, вони просто масштабуються для обслуговування великої кількості пристроїв, розташованих на значних відстанях. Для обміну даними між МРП використовують трансивери LoRa, які працюють із низьким рівнем споживання енергії, що є критичним для мобільних платформ, які працюють у режимі батарейного живлення. Ця технологія дає змогу створювати мережеві топології для підключення багатьох пристроїв до одного центрального вузла. В разі використання трансивера LoRa в МРП важливо враховувати особливості конкретного застосування і налаштувати параметри мережі відповідно до вимог завдання.

Вибір методу доступу до фізичного середовища засобів передавання даних для групи МРП. Одним із важливих завдань удосконалення безпроводного зв'язку є підвищення його ефективності та забезпечення можливостей необхідної якості обслуговування різних типів трафіку. Безпроводний зв'язок розвивається надзвичайно швидко, проте успіхи в розвитку різних технологій та їх компонент різні. Так, на цьому етапі можна констатувати істотні досягнення у збільшенні швидкості передавання сигналів по фізичних лініях зв'язку. Проте фізичне середовище безпроводної мережі спільно використовують усі активні вузли МРП. Потрібні спеціальні методи організації доступу таких вузлів до спільного середовища, які розподілятимуть його ресурси між активними МРП. Щоб більше претендентів на використання спільного ресурсу, то складніше забезпечити потреби кожного з них.

У загальному випадку реалізація функції управління доступом до фізичного середовища MAC потребує використання певних значних ресурсів, зокрема часових. Внаслідок цього, навіть за умови використання найефективніших технологій передавання на фізичному рівні, ефективність використання ресурсів безпроводних каналів сьогодні потребує істотного підвищення. Одним зі способів вирішення цієї проблеми є розроблення моделей, які дадуть змогу визначати, досліджувати та аналізувати характеристики наявних мереж і розробляти методи та засоби для їх вдосконалення.

Існує кілька категорій методів доступу до спільного фізичного середовища, найпоширенішим з яких є конкурентний (випадковий) метод, що передбачає конкурентну боротьбу активних пристроїв за право на передавання. Основним конкурентним методом для безпроводних мереж є конкурентний метод множинного доступу до фізичного середовища з прослуховуванням несучої та запобіганням колізіям CSMA/CA.

Стандарти управління доступом до безпроводного фізичного середовища та відповідні протоколи визначено в стандартах сім'ї IEEE 802.X відповідають двом нижнім рівням (рис. 3) еталонної моделі мережевої архітектури OSI (Open System Interconnection) – фізичному та канальному. Проте канальний рівень OSI поділено на два підрівні:

- Logical Link Control (LLC);
- Media Access Control (MAC).

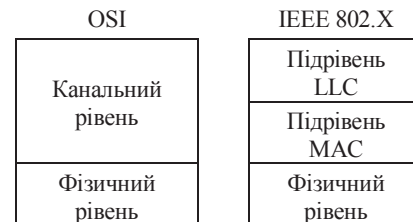


Рис. 3. Відповідність архітектури IEEE 802.X моделі OSI / Compliance of the IEEE 802.X architecture with the OSI model

Підрівень MAC відповідає за управління доступом до фізичного середовища з'єднання. Найчастіше використовуваними стандартами, що використовують метод доступу CSMA/CA, є стандарт IEEE 802.11 для локальних безпроводних мереж Wi-Fi та стандарт IEEE 802.15.4. Останній описує фізичний рівень і рівень управління доступом до фізичного середовища для низькошвидкісних сенсорних мереж. Стандарт IEEE 802.15.4 широко застосовують у мережах, наприклад, сумісно з протоколами альянсу Zigbee, які реалізують верхні рівні архітектури (прикладний та мережевий). Основним методом доступу до фізичного середовища стандарту IEEE 802.15.4 є конкурентний доступ із запобіганням колізіям CSMA/CA, проте опційно стандарт дає змогу організувати і безконфліктний керований доступ до фізичного середовища. Треба зазначити, що сьогодні зростає увага саме до безконфліктного доступу та способів його вдосконалення.

На підрівні MAC стандарту IEEE 802.15.4 передбачено два режими роботи: без маячка та з маячком. У режимі роботи без маячка доступ до спільного середовища надається за допомогою звичайної схеми CSMA/CA. Оскільки це конкурентний метод доступу, то не може бути мови про забезпечення гарантованого керованого доступу, наприклад, через опитування. У режимі роботи із маячком передбачено використання спеціального кадру, який називають маячком (Beacon). Маячок посилає координатор, пристрій, що управляє процесом передавання у мережі. Маячки використовують, передусім, для синхронізації та управління роботою всіх активних пристроїв мережі. Координатор може вимкнути режим передавання повідомлень із маячками.

Однією із особливостей стандарту IEEE 802.15.4 є підтримка в режимі роботи з маячком суперфреймової структури, яка показана на рис. 4.

Починається суперфрейм зі спеціального кадру маячка, який посилає координатор мережі. Надіславши маячок, координатор самоусувається від управління мережею, надаючи пристроям можливість самостійно визначати, який з них і в якій послідовності пере-

даватиме дані. Для цього режиму роботи у суперфреймі виділено спеціальний відрізок часу, названий періодом конкурентного доступу CAP (Contention Access Period). Цей період розділений на фіксовані часові слоти (time slots). Пристрої, що мають дані для передавання, відповідно до механізму слотового SCSMA/CA (Slot CSMA/CA) ведуть між собою конкурентну боротьбу за

отримання слоту для передавання даних. Будь-які пристрої, які з власної ініціативи хочуть розпочати передавання в проміжку часу між маячками, реалізуюватимуть конкурентний слотовий механізм доступу із запобіганням колізіям. Якщо внаслідок змагання пристрій отримає право на передавання, йому для передавання буде виділено певний слот часу.

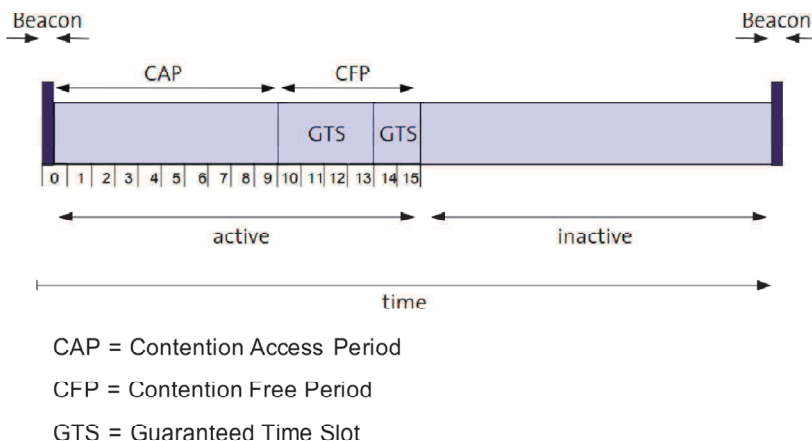


Рис. 4. Режим роботи з маячком суперфреймової структури / Mode of operation with a beacon of a superframe structure

Безконфліктний доступ і гарантовані часові слоти. Слоти періоду CAP, що йдуть безпосередньо за маячком, використовують для конкурентного слотового доступу SCSMA/CA. Після періоду конкурентного доступу CAP у суперфреймі може міститись опційна ділянка для періоду безконфліктного передавання даних CFP (Contention Free Period). Період, вільний від конфліктів, також поділено на слоти, в межах яких пристрої зможуть гарантовано відправити або отримати, наприклад, термінову інформацію. Формат суперфрейму визначає координатор мережі. Для пристроїв, збирання даних від яких треба забезпечити в певні визначені часові проміжки, координатор може зарезервувати частину суперфрейму. В цій частині суперфрейму немає змагання за доступ до каналу, оскільки в ній заборонено будь-яке передавання усім іншим пристроям. Період безконфліктного передавання даних CFP також поділено на слоти, що називають гарантованими часовими слотами GTS (Guaranteed Time Slots). Передавання суперфреймів може бути безперервним. Можливий і економічніший режим роботи, за якого після періоду безконфліктного доступу починається період неактивності, протягом якого ніякі дані в мережі не передаються аж до появи наступного маячка.

Якщо необхідно забезпечити МРП безпроводним зв'язком на великі відстані, можна рекомендувати технологію LoRa, яку все ширше застосовують у різних варіантах IoT.

На фізичному рівні LoRa використовує модуляцію із розширеним спектром, що забезпечує передавання на великі відстані із низьким енергоспоживанням. Рівень управління доступом до середовища MAC дає змогу планувати передавання і управляти зв'язком між кінцевими пристроями та шлюзами, уникаючи зіткнень та оптимізуючи продуктивність мережі.

Вибір формату для обміну даними в мережі LoRa. Для обміну між МРП запропоновано використовувати 16-розрядні формати даних і команд управління.

Розроблено алгоритм обміну повідомленнями між МРП, який наведено на рис. 5.

Структура вхідних даних повідомлення така: ідентифікатор відправника; ідентифікатор одержувача; тип повідомлення; дані повідомлення.

Процес обміну починається з вибору адресата, далі формується повідомлення в Json форматі та передається трансиверу LoRa який відправляє повідомлення. Пакет має містити адресу відправника й ідентифікатор повідомлення. Пристрій очікує підтвердження про цілісність повідомлення повідомлення. Якщо пристрій не отримує повідомлення, він вибирає нового адресата, а в разі пошкодження повідомлення пристрій надсилає його повторно.

Розроблено алгоритм ініціалізації пристрою, блок-схему якого наведено на рис. 6.

Алгоритм ініціалізації пристрою простий і ефективний. Він виконується за кілька кроків і не потребує значних ресурсів. Пристрій перевіряє працездатність системи і далі ініціалізується або як командний центр, або як підконтрольна МРП.

Розроблення методу та засобів багатоканального безконфліктного обміну на рівні окремої МРП. Засоби збирання та обміну даними для гібридного методу управління групою МРП використовують багатоканальний пристрій обміну даними та пристрій обміну на базі двопортової пам'яті. Особливістю таких пристроїв обміну є безконфліктний обмін даними із використанням методу часового розподілу ресурсів пам'яті. Реалізація цього методу потребує виконання такої умови:

$$T_{\min \text{МРП}} \geq (m + 1)t_{\text{цПам}} \quad (1)$$

де $T_{\min \text{МРП}}$ – найменший із періодів звертання МРП до пам'яті; $t_{\text{цПам}}$ – цикл доступу до пам'яті; m – кількість пристроїв, що мають доступ до пам'яті. Виконання умови (1) дає змогу синтезувати пристрій безконфліктного обміну даними у реальному часі.

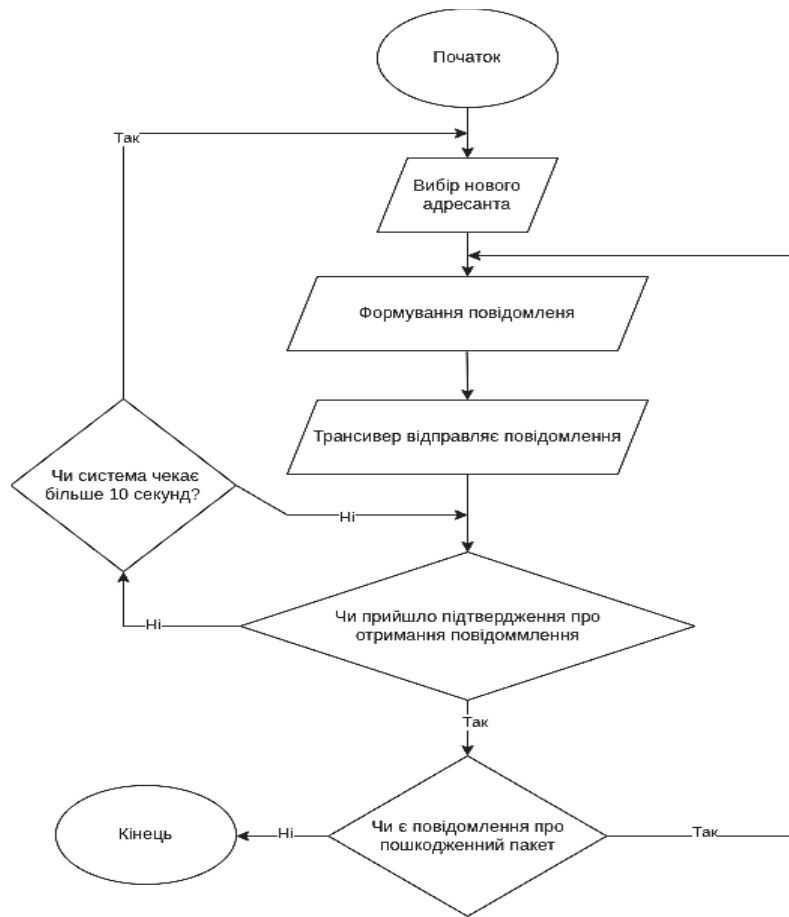


Рис. 5. Блок-схема алгоритму обміну повідомленнями / Block diagram of the messaging algorithm

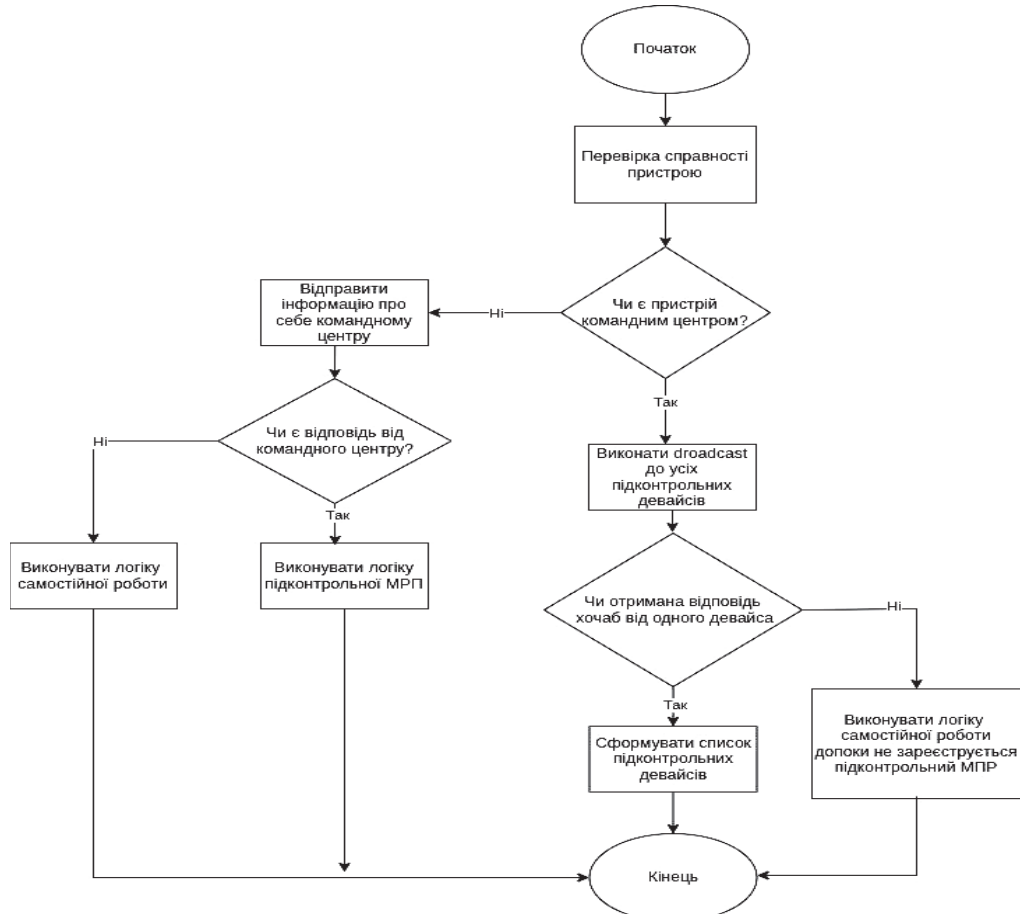


Рис. 6. Блок-схема алгоритму ініціалізації пристрою / Block diagram of the device initialization algorithm

Ємність пам'яті залежить як від кількості входів m , так і від розмірів N_i та розрядності n_i масивів даних, якими обмінюються МРП. Крім того, в багатоканальному пристрої обміну необхідно передбачити певний обсяг пам'яті V для зберігання даних, які використовують для організації обміну. Із урахуванням наведених міркувань мінімальну ємність пам'яті визначають так:

$$Q = V + \sum_i^m N_i n_i . \quad (2)$$

Сьогодні найперспективнішою елементною базою для реалізації пам'яті пристроїв обміну є мікросхеми пам'яті з малим часом циклу доступу та великою ємністю.

Розроблення структури багатоканального безконфліктного пристрою обміну даними між МРП із використанням трансиверів. Обмін даними між МРП здійснюватимемо бездротовою мережею з використанням трансиверів, що поєднують функції передавача (transmitter) і приймача (receiver) в одному пристрої. Основні компоненти трансивера такі:

- приймальний тракт (Receiver Path), який містить антену, фільтри, підсилювачі та конвертери частоти;
- передавальний тракт (Transmitter Path), до якого входять зворотний підсилювач, модулятор, фільтри та інші компоненти, які готують сигнал для передавання через антену;
- антена, яка функціонує як інтерфейс між пристроєм і бездротовим середовищем, передаючи і приймаючи радіосигнали;

- підсилювачі та фільтри, які використовують для підсилення сигналів та фільтрації шумів, щоб забезпечити кращу якість сигналу під час передавання та приймання;
- мікроконтролер, який управляє роботою трансивера, зокрема обробленням даних, управлінням передаванням та прийманням сигналів;
- модулятор та демодулятор, які забезпечують перетворення сигналу в формат як для передавання через канал зв'язку, а також зворотне перетворення сигналу, отриманого з каналу зв'язку, в початковий формат;
- конвертери частоти, застосовувані для зміни частоти сигналу під час його передавання або приймання;
- інтерфейси зовнішнього зв'язку, які забезпечують взаємодію з іншими пристроями або системами.

Збільшити інтенсивність обміну даними між МРП та пристроєм обміну можна, забезпечивши паралельну роботу трансиверів. Цей підхід може пришвидшити передавання даних, забезпечуючи можливість передавання великого обсягу інформації.

Структуру багатоканального пристрою обміну даними з підключенням МРП через трансивери наведено на рис. 7, де КСУ – комп'ютерна система управління групою МРП, БГТІ – блок генерації тактових імпульсів, КПП – контролер паралельної пам'яті, ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій, ШД – шина даних, ША – шина адреси, $Ч_m / \overline{3n}$ – сигнал читання/запису, $\overline{Вк}$ – сигнал вибірки пам'яті.

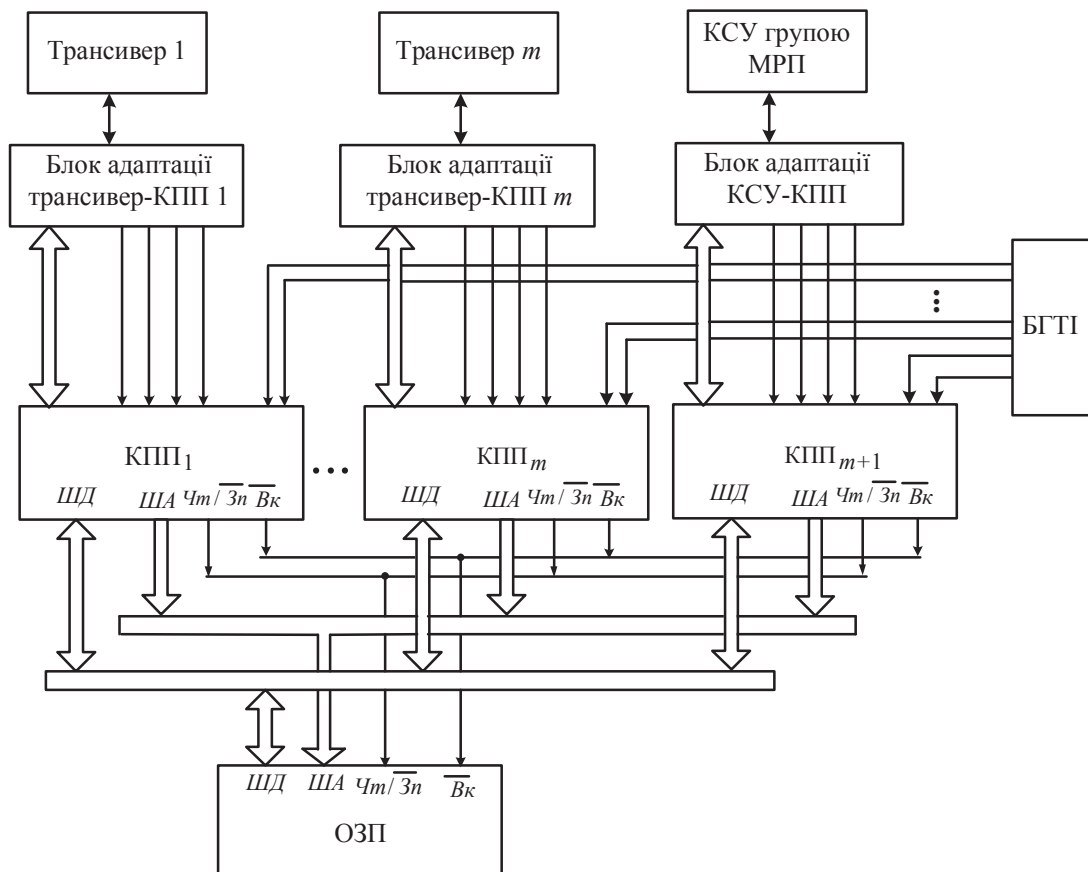


Рис. 7. Структура багатоканального пристрою обміну даними з підключенням МРП через трансивери / The structure of a multi-channel data exchange device with the connection of MRP through transceivers

У багатоканальному безконфліктному пристрої обміну даними інтенсивність доступу до ОЗП визначається так:

$$P_{\text{ОЗП}} = (m+1)n_d F_d, \quad (3)$$

де m – кількість МРП, n_d – розрядність даних, F_d – частота надходження даних. З формули (3) видно, що інтенсивність доступу до ОЗП залежить як від кількості МРП і частоти надходження даних, так і від їх розрядності.

Обговорення отриманих результатів. Під час керування групою МРП для виконання поставленого завдання необхідно забезпечити ефективне передавання даних між окремими МРП, команд управління у межах групи МРП з одночасним урахуванням цілої низки обмежень щодо габаритів, маси, енергоспоживання та інших параметрів. Для цього доцільно орієнтувати кожну МРП на виконання певних нескладних дій у межах глобального завдання для групи МРП. Управління групою МРП у такому випадку варто здійснювати з використанням гібридного методу, а для цього потрібно вирішити проблему безконфліктного обміну даними та командами керування між МРП у групі. Для вирішення вказаного завдання запропоновано метод та засоби, які забезпечать безконфліктний обмін даними у групі МРП, що ґрунтуються на вибраній технології безпроводного передавання даних та адаптованому методі доступу до фізичного середовища засобів передавання даних групи МРП із використанням засобів багатоканального безконфліктного обміну на рівні окремої МРП.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – розроблено метод багатоканального безконфліктного обміну даними, який за рахунок узгодження інтенсивності надходження даних з адаптивним управлінням доступом до фізичного середовища забезпечує режим реального часу. Розроблено метод багатоканального безконфліктного обміну даними на рівні окремої МРП, який за рахунок узгодження інтенсивності надходження даних з інтенсивністю доступу до пам'яті забезпечує режим реального часу. Удосконалено метод управління рухом групи мобільних робототехнічних платформ, який завдяки урахуванню змінних параметрів платформ та змінного стану навколишнього середовища забезпечує ефективне управління групою МРП у режимі реального часу.

Практична значущість результатів дослідження – запропоновано із метою підвищення продуктивності для трафіку, некритичного до часу, застосовувати слотований механізм SCSMA/CA, а для критичного до часу – керований координатором доступ із використанням гарантованих часових слотів.

Висновки / Conclusions

Визначено, що під час управління групою МРП необхідно враховувати зміну параметрів кожної окремої платформи, аналізувати навігаційний стан навколишнього середовища та використовувати доступні ресурси для досягнення загальної групової мети.

Для управління групою МРП вибрано гібридний метод, який балансує між централізованим і розподіленим управлінням, використовуючи переваги обох

підходів залежно від конкретних завдань та умов використання.

Запропоновано для обміну даними у разі гібридного управління застосовувати багатоканальний пристрій безконфліктного обміну з використанням методу часового розподілу ресурсів ОЗП.

Показано, що глобальні мережі із низьким енергоспоживанням LPWANs можуть використовуватись для передавання невеликих блоків даних із низькою швидкістю під час організації обміну з МРП.

Визначено, що одним із важливих завдань удосконалення безпроводного зв'язку є підвищення його ефективності та забезпечення можливостей необхідної якості обслуговування різних типів трафіку.

Запропоновано для підвищення продуктивності трафіку, некритичного до часу, застосовувати слотований механізм SCSMA/CA, а критичного до часу – керований координатором доступ із використанням гарантованих часових слотів.

Показано, що ефективність роботи мережі упродовж безконфліктного періоду доступу CFP залежить від результатів розподілу гарантованих часових слотів GTS між активними користувачами.

Вибрано технологію LoRa для обміну даними на великих відстанях між МРП, яка на рівні управління доступом до середовища MAC дає змогу планувати передавання й управляти зв'язком між кінцевими пристроями та шлюзами, уникаючи зіткнень та оптимізуючи продуктивність мережі.

References

1. L. Heitlinger, R. Stock-Homburg and F.D. Wolf, "You Got the Job! Understanding Hiring Decisions for Robots as Organizational Members", *2022 17th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, Sapporo, Japan, 2022, pp. 530–540. DOI: 10.1109/HRI53351.2022.9889444.
2. C. Li, J. Guo, S. Guo and Q. Fu, "Study on Collaborative Task Assignment of Sphere Multi-Robot based on Group Intelligence Algorithm", *2022 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Guilin, Guangxi, China, 2022, pp. 1159–1164. DOI: 10.1109/ICMA54519.2022.9856105.
3. R. Cao, X. Ma, C. Yu and P. Xu, "Framework of Industrial Robot System Programming and Management Software", *2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Xi'an, China, 2019, pp. 1256–1261. DOI: 10.1109/ICIEA.2019.8833854.
4. M. Shelkamy, C. M. Elias, D. M. Mahfouz and O. M. Shehata, "Comparative Analysis of Various Optimization Techniques for Solving Multi-Robot Task Allocation Problem", *2020 2nd Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference (NILES)*, Giza, Egypt, 2020, pp. 538–543. DOI: 10.1109/NILES50944.2020.9257967.
5. J. Dai, H. Yoshiuchi and T. Matsuda, "Multi-Robot Work Assignment Methods for Effectiveness Improvement of Deploying Service Robots", *2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Vancouver, BC, Canada, 2019, pp. 1224–1229. DOI: 10.1109/COASE.2019.8843125.
6. M. Niemeyer, S. Pütz and J. Hertzberg, "A Spatio-Temporal-Semantic Environment Representation for Autonomous Mobile Robots equipped with various Sensor Systems", *2022 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, Bedford, United Kingdom, 2022, pp. 1–6. DOI: 10.1109/MFI55806.2022.9913873.
7. A. Jalil and J. Kobayashi, "Experimental Analyses of an Efficient Aggregated Robot Processing with Cache-Control for Multi-Robot System", *2020 20th International Conference on Control,*

- Automation and Systems (ICCAS)*, Busan, Korea (South), 2020, pp. 1105–1109. DOI: 10.23919/ICCAS50221.2020.9268225.
8. K. Stark, T. Goldschmidt, J. Doppelhamer, P. Bihani and D. Goltz, “Cloud-based integration of robot engineering data using AutomationML”, *2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Munich, Germany, 2018, pp. 645–648. DOI: 10.1109/COASE.2018.8560525.
 9. M. Babcsinski, B. Freire, P. Neto, L. A. Ferreira, B. L. Señaris and F. Vidal, “AutomationML for Data Exchange in the Robotic Process of Metal Additive Manufacturing”, *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Zaragoza, Spain, 2019, pp. 65–70. DOI: 10.1109/ETFA.2019.8869079.
 10. K. Narayanan, V. Honkote, D. Ghosh and S. Baldev, “Energy Efficient Communication with Lossless Data Encoding for Swarm Robot Coordination”, *2019 32nd International Conference on VLSI Design and 2019 18th International Conference on Embedded Systems (VLSID)*, Delhi, India, 2019, pp. 525–526. DOI: 10.1109/VLSID.2019.00118.
 11. A. Zakhama, L. Charaabi, K. Jelassi and W. Mansour, “Software Design for Data Transfer Between an Industrial Robot and Vision System”, *2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, Yasmine Hammamet, Tunisia, 2018, pp. 385–389. DOI: 10.1109/SSD.2018.8570661.
 12. M. Vorderer, A. Verl, F. Kretschmer and T. Ringhoffer, “Platform for Information Exchange in Versatile Production Systems”, *2018 25th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, Stuttgart, Germany, 2018, pp. 1–5. DOI: 10.1109/M2VIP.2018.8600888.
 13. M. Alsayegh, A. Dutta, P. Vanegas and L. Bobadilla, “Lightweight Multi-robot Communication Protocols for Information Synchronization”, *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Las Vegas, NV, USA, 2020, pp. 11831–11837. DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9341480.
 14. X. Wang, İ. Mutlu, F. Rani, L. Drowatzky and L. Urbas, “A Comparative Study to Evaluate the Performance of Communication Protocols for Process Industry”, *2022 32nd International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)*, Wellington, New Zealand, 2022, pp. 170–177. DOI: 10.1109/ITNAC55475.2022.9998327.
 15. N. Koul, N. Kumar, A. Sayeed, C. Verma and M. S. Raboaca, “Data Exchange Techniques for Internet of Robotic Things: Recent Developments”, in *IEEE Access*, vol. 10, 2022, pp. 102087–102106. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3209376.
 16. D. Aloisi and A. Cristofaro, “Consensus and formation control of unicycle-like robots with discontinuous communication protocols”, *2022 European Control Conference (ECC)*, London, United Kingdom, 2022, pp. 1055–1060. DOI: 10.23919/ECC55457.2022.9838045.
 17. A. M. Vegni, V. Loscrí, C. T. Calafate and P. Manzoni, “Communication Technologies Enabling Effective UAV Networks: A Standards Perspective”, in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 33–40, December 2021. DOI: 10.1109/MCOMSTD.0001.2000074.
 18. Cruz, S. C. D. S.; Ahmed Ouameur, M.; Figueiredo, F. A. P. D. Reinforcement Learning-based Wi-Fi Contention Window Optimization. Preprints 2022, 2022110011. DOI: 10.20944/preprints202211.0011.v1.
 19. Kim, T.-W., & Hwang, G.-H. (2021). Performance Enhancement of CSMA/CA MAC Protocol Based on Reinforcement Learning. *Journal of Information and Communication Convergence Engineering*, 19(1), 1–7. DOI:10.6109/JICCE.2021.19.1.1
 20. Khattab, T. M. S., El-Hadidi, M. T., Mourad, H.-A. M.: Analysis of Wireless CSMA/CA Network Using Single Station Superposition (SSS). *AEU – International Journal of Electronics and Communications*, 56/2, pp. 73–83, 2002. <https://doi.org/10.1078/1434-8411-54100076>
 21. Mahmoud Gamal, Nayera Sadek, Mohamed R. M. Rizk, Magdy Abd ElAzim Ahmed, Optimization and modeling of modified unslotted CSMA/CA for wireless sensor networks, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, iss. 2, 2020, pp. 681–691, ISSN 1110-0168, doi:10.1016/j.aej.2020.01.035
 22. F. Masud, A. Abdullah, A. Altameem, G. Abdul-Salaam, and F. Muchtar, “Traffic Class Prioritization-Based Slotted-CSMA/CA for IEEE 802.15.4 MAC in Intra-WBANS”, *Sensors*, vol. 19, no. 3, p. 466, Jan. 2019. DOI: 10.3390/s19030466.
 23. Kim, S. Enabling WLAN and WPAN Coexistence via Cross-Technology Communication. *Sensors* 2022, 22, 707. DOI: 10.3390/s22030707
 24. Kovtun V., Izonin I., Gregus M. (2022). Modeling a session of subject-system interaction in a wireless communication infrastructure with a mixed resource. *PLoS ONE* 17(7). DOI: 10.1371/journal.pone.0271536
 25. Liskevych, R. I., Liskevych, O. I., Obelovska, K. M., & Panchyshyn, R. P. (2021). Improved algorithm for the packet routing in telecommunication networks. *Ukrainian Journal of Information Technology*, 3(1), 114–119. DOI: 10.23939/ujit2021.03.114
 26. National Instrument, Introduction to Wireless LAN Measurements: From 802.11 a to 802.11ac. 2014. Available online: http://download.ni.com/evaluation/rf/Introduction_to_WLAN_Testing.pdf
 27. Tsmots, I. G., Teslyuk, V. M., Opotiak, Yu. V., & Oliinyk, O. O. (2023). Development of the scheme and improvement of the motion control method of a group of mobile robotic platforms. *Ukrainian Journal of Information Technology*, 5(2), 97–104. <https://doi.org/10.23939/ujit2023.02.097>
 28. Best uses of wireless IoT communication technology. Available online: <https://industrytoday.com/best-uses-of-wireless-iot-communication-technology/>.

I. G. Tsmots, Yu. V. Opotiak, K. M. Obelovska, S. V. Tesliuk

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

METHODS AND MEANS OF CONFLICT-FREE DATA EXCHANGE IN THE GROUP OF MOBILE ROBOTIC PLATFORMS

When using groups of mobile robotic platforms (MRP), problems arise related to the management of individual platforms, the organization of cooperation in the group, and the management of the group as a whole. Management of the MRP group involves managing the actions of individual platforms to achieve the group's overall goal. To ensure the management of the MRP group in such a case, it is advisable to choose a hybrid method that requires solving the problem of conflict-free data exchange and control commands between the MRPs in the group. To solve this problem, it is proposed to improve the relevant methods and tools. The scientific novelty of the obtained research results is that a method of multi-channel conflict-free data exchange has been developed, which provides a real-time mode due to the coordination of the intensity of data arrival with the intensity of access. The method of controlling the movement of a group of mobile robotic platforms has been improved, which, by taking into account the changing parameters of the platforms and the changing state of the surrounding environment, provides effective management of the MRP group in real time. The practical significance of the research results is that it is proposed to use the CSMA/CA slotted mechanism

for non-time-critical traffic to improve performance, and for time-critical traffic, coordinator-controlled access using guaranteed time slots. The hybrid method of management takes into account the advantages of centralized and distributed depending on specific tasks and conditions of use. It is proposed to use a multi-channel device for conflict-free exchange using the method of time allocation of RAM resources for data exchange in hybrid control. It is shown that global low-power networks LPWANs (Low-Power Wide Area Networks) can be used to transmit small blocks of data at a low speed when exchanging with MRP. It is proposed to use the slotted CSMA/CA mechanism for the transmission of non-time-critical traffic, and for time-critical traffic, coordinator-controlled access using guaranteed time slots. It is shown that the performance of the network during the conflict-free access period CFP depends on the results of the distribution of guaranteed GTS time slots among active users. LoRa technology was selected for long-distance data exchange between MRPs, which at the MAC (Media Access Control) sublayer allows for transmission planning and communication management between end devices and gateways, avoiding collisions and optimizing network performance.

Keywords: management of mobile robotic platforms, data transmission, media access control, conflict-free access.

Інформація про авторів:

Цмоць Іван Григорович, д-р техн. наук, професор, кафедра автоматизованих систем управління. **Email:** ivan.tsmots@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4033-8618>

Опотяк Юрій Володимирович, канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизованих систем управління. **Email:** yurii.v.opotyak@lpnu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9889-4177>

Обельовська Квітослава Михайлівна, канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизованих систем управління. **Email:** Kvitoslava.M.Obelovska@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-8714-460X>

Теслюк Софія Василівна, магістр, кафедра автоматизованих систем управління. **Email:** sofiia.tesliuk.mknus.2021@lpnu.ua; <https://orcid.org/0009-0005-6512-4447>

Цитування за ДСТУ: Цмоць І. Г., Опотяк Ю. В., Обельовська К. М., Теслюк С. В. Методи та засоби безконфліктного обміну даними у групі мобільних робототехнічних платформ. *Український журнал інформаційних технологій*. 2024, т. 6, № 1. С. 65–75.

Citation APA: Tsmots I. G., Opotyak Yu. V., Obelovska K. M., & Tesliuk S. V. (2024). Methods and means of conflict-free data exchange in the group of mobile robotic platforms. *Ukrainian Journal of Information Technology*, 6(1), 65–75. <https://doi.org/10.23939/ujit2024.01.065>