

**Мелешико М.А.**

Національний авіаційний університет

**Дмитренко Т.В.**

Національний авіаційний університет

## АЛГОРИТМ РЕАЛІЗАЦІЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З АДАПТИВНИМ КОДУВАННЯМ МІЖ ГРУПОЮ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ В ЄДИНОМУ ПРОСТОРИ

*У статті досліджено алгоритм реалізації передачі даних з адаптивним кодуванням між групою безпілотних літальних апаратів в єдиному просторі. Наведено поняття «радіомережа з випадковими мобільними абонентами», яке реалізує повністю децентралізоване управління за відсутності базових станцій або опорних вузлів, що покладено на мережу взаємодії безпілотних літальних апаратів. Сформувано механізм передачі даних між низкою агентів із детальним описом процесу передачі й принципу формування зв'язку. Схематично представлено структурну схему передавача й приймача з установленим взаємозв'язку між блоками схеми й описом процесу надходження, формування та передачі інформації найближчому агенту. Запропоновано алгоритм складання списку агентів, які знаходяться в групі рою. Наголошено, що групу безпілотних повітряних систем можна розглядати як сукупність інтелектуальних агентів. Розкрито роюву поведінку безпілотних літальних апаратів і принципи об'єднання. Підкреслено, що роювим агентам не вистачає постійності об'єктів, вони часто використовують чітко закодований перелік політик дій і / або мають обмежені прямі повідомлення між членами рою, команда інтелектуальних агентів має набір агентів, здатних взаємодіяти. Ці агенти часто мають спільні операційні плани й детальний обмін моделями середовища. Установлено, що запропонований алгоритм передачі даних містить евристичний підхід і методи машинного навчання, що забезпечує стабільний, але гнучкий рій безпілотних літальних апаратів, який може більш чітко адаптувати свою поведінку для вирішення задач передачі даних в єдиному просторі. Наголошено, що конструктивно система передачі даних між групою безпілотних літальних апаратів може бути представлена блоками, де кожен блок містить основну інформацію про інших членів рою та інші пристрої, які використовуються для розв'язання проблеми передачі даних. Запропоновано опис кожного блоку й реалізації взаємозв'язку між блоками в умовах алгоритму. Визначено етапи роботи роювих алгоритмів та окреслено перспективи подальших досліджень.*

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, канал передачі даних, рой, агент, мережа, простір.

**Постановка проблеми.** В умовах сучасності актуальності набувають мережі MANET<sup>1</sup> (Mobile Ad hoc NETWORKS). Це мережі – радіомережі з випадковими мобільними абонентами, які реалізують повністю децентралізоване управління при відсутності базових станцій або опорних вузлів, топологія, яких швидко змінюється з випадковим з'єднанням вузлів. Методи реалізації таких мереж за участю безпілотних автономних літальних апаратів включають: розподілену оптимізацію (для підвищення живучості мережі); ланцюг ретрансляції безпілотних літальних апаратів (далі – БПЛА); і передачу даних, коли зв'язок неможливо підтримувати. Кожен із цих методів добре вирішує проблему мережевої взаємодії у своєму конкретному контексті, але погано працює в альтер-

нативних середовищах; наприклад розподілений метод оптимізації для підвищення живучості не застосовується до відключеної мережі, де необхідний перенос даних.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розподіл наукових здобутків у сфері управління рухом безпілотних літальних апаратів та формування надійних каналів передачі даних є вражаючим. На протязі багатьох років науковці з різних країн досліджували дану тему. Так варто відзначити, що сучасні підходи до організації надійного завадостійкого та захищеного каналу супутникового зв'язку з безпілотними літальними апаратами дослідили В.В. Соболев, М.М. Геращенко, С.В. Рудніченко, С.І. Трофименко й В.М. Ільєнко [1]. Авторами надані рекомендації щодо основних вимог до організації супутникового дуплексного зв'язку поза межами прямої

<sup>1</sup> <https://uk.wikipedia.org/wiki/MANET>

радіовидимості з безпілотними літальними апаратами на базі геостационарних (середньовисотних) космічних апаратів зв'язку з високою пропускну здатністю в Ка діапазоні частот.

І.М. Журавська [2] розкрила теоретичні основи, методи та засоби створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування. Окрему увагу, авторка приділила питанню формуванню каналів передачі даних.

Методи й інформаційну технологію автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об'єктів висвітлив А.О. Бережний [3].

Стосовно формування маршруту групи БПЛА та їх взаємозв'язку між собою варто відзначити роботу О.М. Гусак [4]. Автором розроблено метод автоматизованого пошуку осередків лісових пожеж у фоновому режимі й сповіщення Державної служби з надзвичайних ситуацій із використанням паралельних обчислень розрахований на використання пристроїв керування не менше як із чотирьохядерними процесорами у фоновому режимі, що забезпечує розподіл та оптимізацію використання ресурсів БПЛА й пристрою керування.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Min-Hyuck Lee, Seokwon Yeom [5], Mustapha Bekhti, Marwen Abdennebi, Nadjib Achir, Khaled Boussetta [6], Takahiro Miki, M. Popovic, A. Gowel, G. Hitz, R. Siegwart [7], W.P. Coutinho, J. Fliege, M. Battarra [8], Durbana Habib, Habibullah Jamal, Shoab A. Khan [9], Musab Coukuna, Sencer Ünala [10], Il-Kyu Ha, You-Ze Cho [11] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання формування алгоритму реалізації передачі даних з адаптивним кодуванням між групою БПЛА в єдиному просторі залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** У роботі необхідно розробити алгоритм реалізації передачі даних з адаптивним кодуванням між групою БПЛА в єдиному просторі.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** На сьогодні найпопулярнішими методами передачі даних БПЛА між географічно розподіленими вузлами мережі є ретрансляція та передача. Передаючи дані, агент поміщає себе між двома вузлами, зменшуючи тим самим вдвічі відстань передачі, яку кожен пакет повинен пройти за одиницю часу. Кількість одиниць може рівномірно збільшитися на цій відстані, створюючи багатокроковий ланцюг передачі. Однак метод

ретрансляції обмежений діапазоном кількості використовуваних одиниць. Кожна одиниця в ланцюзі повинна мати приймача і відправника-сусіда, таким чином, максимальний діапазон системи ретрансляції становить

$$R \cdot (k + 1),$$

де  $R$  – стабільний діапазон зв'язку, а  $k$  – кількість одиниць.

«Паромний» метод передачі даних передбачає, що кожен агент переміщується таким чином, щоб знаходитись в діапазоні передавального пристрою, де він збирає кількість пакетів, рівну розміру його буфера. Потім пристрій фізично рухається до приймача, і після встановлення лінії зв'язку передає вміст буфера.

За методом передачі «конвеєрна стрічка» кожен агент здійснює проходження всього шляху, тоді як за методом «коліска Ньютона» кожна одиниця переправляється від найближчого сусіда-відправника до найближчого приймаючого сусіда. Цей підметод передачі даних можна розглядати як гібридизацію методів ретрансляції та передачі, хоча це лише одне можливе злиття методів. Як правило, спосіб має набагато більший час затримки та енергоспоживання, та може охоплювати значно більші відстані.

У роботі [1] запропоновано адаптивний агент, який здійснює реалізацію обох методів по черзі в залежності від відстані передачі. Однак дослідження лише пропонує обмін між двома агентами (передавач та приймач), а не використання особливостей обох. Крім того, рішення повинно бути відкалібровано вручну для того, щоб змінювати методи.

На рисунку 1 показана структурна схема передавальної частини системи зв'язку. Дані від джерела інформації надходять на модулятор, за допомогою якого також здійснюється управління розподілом енергетичної ефективності між каналами. Дані високошвидкісного джерела інформації надходять на другий модулятор. Комплексні сигнали з виходів модуляторів підсумовуються і нормуються для подальшої цифрової обробки сигналу. Обмеження спектру сигналу здійснюється за допомогою формуючих фільтрів, після чого сигнал переноситься квадратурним перетворювачем частоти з нульовою проміжною частотою на несучу частоту.

Структурна схема приймальної частини показана на рисунку 2. Вхідний сигнал переноситься на нульову проміжну частоту за допомогою квадратурного перетворювача частоти, потім здійснюється узгоджена фільтрація. З метою спрощення структурної схеми елементи синхронізації

приймальної частини системи зв'язку, а також блок рішення фазової неоднозначності не показані на рисунку.

Після фільтрації складові комплексного сигналу надходять на демодулятор, реалізований у вигляді двох компараторів і таблиці відповідностей (істинності). З виходу демодулятора дані надходять одержувачу низько швидкісної інформації та на вхід регенератора. Регенерація необхідна для здійснення демодуляції сигналу високошвидкісного каналу зв'язку.

Групу безпілотних повітряних систем можна розглядати як сукупність інтелектуальних агентів. Література охоплює численні напрацювання щодо здійснення агентської координації. У рамках статті зупинимося на роїнні й об'єднанні.

Ройовим агентам не вистачає постійності об'єктів, вони часто використовують, чітко закодований перелік політик дій та / або мають обмежені прямі повідомлення між членами рою. Крім того, дії, що виконуються агентами, різнонаправлені та не вирішують поставленої мети. У групі

БПЛА діють відносини стимул-дія, які часто встановлюються людьми для того, щоб організувати поведінку великих роїв (поведінка, що виникає).

Команда інтелектуальних агентів має набір агентів, здатних взаємодіяти. Ці агенти часто мають спільні операційні плани та детальний обмін моделями середовища. Деякі сприяють досягненню консенсусу або розподілених методологій на основі оптимізації. Такі підходи вимагають часу для прийняття рішення, високої пропускної здатності мережі та складних бортових обчислень; ці методи також можуть бути вразливими до введення зловмисних даних, що може заплутати або зупинити групу БПЛА. Крім того, деякі підходи вимагають рандеву агентів, що створює ланцюгову реакцію на збій, оскільки один із членів, який зазнає невдачі, призведе до зупинки членів рандеву в стані очікування.

У роботі запропоновано алгоритм реалізації передачі даних між групою БПЛА в якому враховано обидва підходи, а саме, складне вирішення проблем командної роботи, а також стійкість, гнучкість та децентралізація.

Використовуючи рої БПЛА із запропонованим алгоритмом, онлайн-планування не потрібно, і рої не впливають на вищезазначені проблеми.

Машинне навчання – загальноприйнятий підхід, що застосовується до вирішення складних проблем [12]. Політика дій засновується на рівняннях Маркова, зокрема, пошук дерева Монте-Карло та часовому навчанні. У цих дослідженнях політика пов'язує окремих стан із дією, водночас стан повністю визначає всі змінні агента на етапі часу. У цьому дослідженні агенти проводять збір політик, кожна з яких пов'язує стан і дію, яку потрібно виконати. Тобто політика  $p = \{c, a\}$ , де  $c$  визначає лише деякі змінні стану повного агента, а  $a$  є основною дією з усіх дій. Політика нараховується як винагорода за дію, створюється за допомогою евристичної генерації. У цьому підході відомі евристичні методи, розбиваються на компоненти. Система створює власну евристику шляхом випадкового повторного складання цих компонентів у набір політик. Недоліки даного підходу полягають в обчислювальній складності, проте сформована евристика може бути спеціалізованою для проблемної області.



Рис. 1. Структурна схема передавача

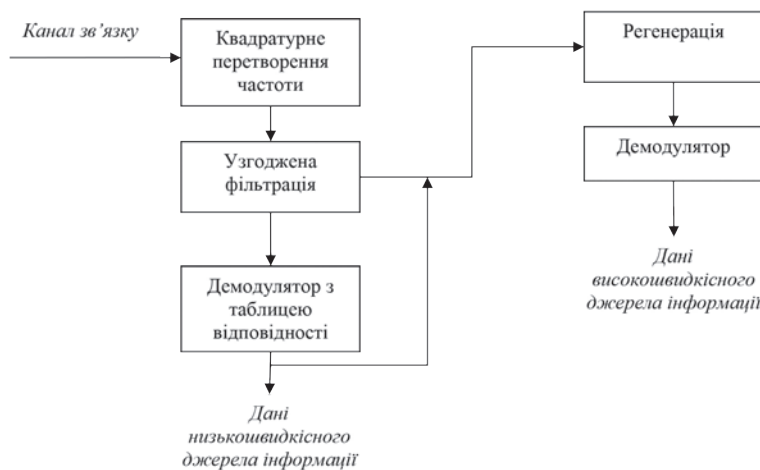


Рис. 2. Структурна схема приймача

Крім того, важливим фактором є деталізація евристичного розкладання; велика деталізація обмежить гнучкість системи, тоді як мала деталізація може надмірно розширити простір пошуку.

Поєднання евристичного підходу та машинного навчання забезпечує стабільний, але гнучкий рій БПЛА, який може більш чітко адаптувати свою поведінку для вирішення задач передачі даних в єдиному просторі.

Конструктивно система передачі даних між групою БПЛА може бути представлена блоками, де кожен блок містить основну інформацію про інших членів рою та інших пристроях, що використовуються для вирішення проблеми передачі даних; на кожному часовому кроці рій спілкується зі своїми сусідами (інші ройові вузли в діапазоні) та / або рухається навколо навколишнього середовища.

На відміну від групи розумних агентів, ройові агенти мають обмежені чутливі можливості та спільну інформацію.

Кожен агент знає про своє «сусідство», тобто про всіх агентів, що перебувають у діапазоні зв'язку  $R$  на поточному етапі часу. Кожен сусід сповіщає: відносне місце розташування, включаючи відстань та кут нахилу, а також про наявність пакету даних для передачі. Агент також веде облік усіх відомих агентів. Цей запис складається з ідентифікатора агента, його останнього відомого місцезнаходження та часу цього спостереження, що є цілим числом, яке збільшується з кожним кроком часу. Маючи ці знання, агент може планувати рух щодо інших, що перебувають за межами їхнього спілкування.

На кожному кроці часу всі сусіди додаються або оновлюються до списку, де додаються нещодавно знайдені агенти, а вже відомі агенти оновлюються з їх поточним місцезнаходженням. Також протягом часового кроку агент запитує відомі дані агента у своїх сусідів. Отримавши ці дані, агент оновлює свої записи, щоб відображати найсвіжішу інформацію (консолідує записи від сусідів та себе, використовуючи запис із найменшим часом оновлення). Цей процес дозволяє встановлювати місце розташування члена спільного рою у режимі «багато стрибків», рівноправно. Це дозволяє рою приймати більш обґрунтовані рішення; у разі відсутності цієї інформації приймаються локальні рішення.

Крім того, якщо відомий запис агента стверджує, що агент повинен знаходитися в діапазоні зв'язку, але цей агент не знайдений під час оновлення району/області пошуку, передбачається,

що він перемістився з часу створення відомого запису про місцезнаходження. Таким чином, запис видаляється, оскільки підтверджується, що він не є актуальним.

Нарешті, кожному агенту буде надано координати місця розташування.

Використовуючи вищезазначені знання, агент буде виконувати дії стосовно інших членів рою та / або не ройових пристроїв (баз). Для вибору цілей фокусуються такі фільтри та селектори: тип агента, напрямок та положення. Ці обмеження дозволяють діям бути більш конкретними у його застосуванні, і, отже, рій виконує більш складні маневри. Фільтр типу агента обмежує взаємодію лише: членів рою, лише бази або бази та членів рою. Напрямний фільтр обмежений лише членами рою / базами в напрямку розташування приймачів, подалі від місця приймачів (щодо положення агента планування) або будь-якого напрямку. Нарешті, позиція визначає одиницю або групу членів рою / баз, які будуть використані для дії. Ця вимога знаходить; найближчий до агента, другий найближчий до агента, найдалший від агента, член рою / база, найближча до пристрою приймання, всі члени рою / бази в діапазоні зв'язку або всі члени рою / бази у списку відомих агентів.

Рух агентів обмежується залученням і відштовхуванням цільових одиниць в навколишнє середовище. За допомогою цільового рою, вектори сили малюються та підсумовуються, щоб сформувати єдиний план руху наступним чином:

$$V_a = p_{ціль} - p_{агент}$$

$$V_r = \frac{1}{p_{ціль} - p_{агент}}$$

$$V_{рух} = \frac{\sum_{i=1} V_{a,i} + \sum_{i=1} V_{r,i}}{\left| \sum_{i=1} V_{a,i} + \sum_{i=1} V_{r,i} \right|},$$

де  $V_a$ ,  $V_r$  – вектори сили тяжіння та відштовхування, а  $p_{ціль}$ ,  $p_{агент}$  – розташування відповідних одиниць.

Навчання відбувається, як показано:

$$Q(c, a) = Q_t(c, a)(\alpha - 1) + \alpha(p + \gamma \cdot \max(Q(c_{t+1}, a))),$$

де  $Q(c, a)$  – показник якості для політики  $\{c, a\}$ ,  $\gamma$  – майбутній коефіцієнт політики,  $\alpha$  – швидкість навчання,  $\rho$  – винагорода за дію та  $\max(Q(c_{t+1}, a))$  – прогнозований максимальний показник якості наступної політики. На кожному кроці часу здійснюється вибір політики з умовою  $c$ , що відповідає дійсності та найбільшим значенням  $Q$ . Крім того, адаптація QS-навчання використовується для прискорення навчання.

QS-навчання використовується для спільного використання значень  $Q$  зі схожими станами.

Після встановленого часу або коли мета досягнута, навчальний процес закінчується і впроваджується вищий рівень. На цьому етапі кожен агент оцінюється за його внеском у досягнення цілей. Будь-яка одиниця, яка зробила внесок нижче середнього, коригує свою політику. Ця вимога не дозволяє вищому рівню регулювати відносно функціональних агентів.

Щоб налаштувати політики в агенті, політика з найнижчим рейтингом випадково змінює свій стан або дію на нове випадкове значення.

Після внесення цих змін усі агенти скидають показники рейтингу і  $Q$ , та операція перезапускається, а агенти перебувають у вихідних положеннях.

Навчання  $Q$  – це короткочасний, онлайн-процес навчання, який використовується для контролю на місцях.

Загальна схема роботи ройових алгоритмів заснована на виконанні наступних етапів: в області пошуку створюється певна кількість початкових наближень до шуканого рішення задачі – ініціалізується популяція агентів; за допомогою набору міграційних операторів (специфічної тактики для кожного з ройових алгоритмів) агенти переміщуються в області пошуку таким чином, щоб в кінцевому рахунку наблизитися до шуканого екстремуму цільової функції; виконується перевірка умови закінчення ітерацій. Якщо ця умова виконана, то обчислення завершуються. При цьому в якості наближеного рішення приймається най-

краще з знайдених положень агентів. Якщо умова не виконана – виконується повернення до етапу 2.

Колонія являє собою систему з дуже простими правилами автономної поведінки особин. Однак, незважаючи на примітивність поведінки кожного окремого агента, поведінка всієї колонії виявляється досить розумною. Таким чином, основою поведінки колонії служить низькорівневе взаємодія, завдяки чому колонія в цілому являє собою розумну багатоагентну систему.

**Висновки й перспективи подальших досліджень.** У роботі досліджено алгоритм реалізації передачі даних з адаптивним кодуванням між групою БПЛА в єдиному просторі. Система роїння є гнучкою та надійною, змінюючи поведінку, яка найкраще відповідає умовам навколишнього середовища, і добре працює навіть при випадковому видаленні членів рою. Представлений метод еволюції замінює або, принаймні, зменшує процес ручного евристичного розвитку, необхідний для створення роївої поведінки, що виникає. Таким чином, такий підхід дозволить середовищу або рою змінюватися між операціями, при цьому не переробляючи набори політик, щоб підтримувати ефективний рій для наступної операції.

Підводячи підсумок, можна відзначити, що використання систем передачі даних з адаптивним кодуванням між групою БПЛА в єдиному просторі, перш за все працює на основі малорозмірних моделей, здатних приймати рішення самостійно без втручання людини, та є перспективним напрямком подальших досліджень.

#### Список літератури:

1. Соболев В.В., Герашенко М.М., Рудніченко С.В., Трофименко С.І., Ільєнко В.М. Сучасні підходи до організації надійного завадостійкого та захищеного каналу супутникового зв'язку з безпілотними літальними апаратами. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. 2021. Вип. 1 (7). С. 78–87.
2. Журавська І.М. Теоретичні основи, методи та засоби створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.05 ; Чорномор. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв, 2019. 44 с.
3. Бережний А.О. Методи та інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об'єктів / Черкаський державний технологічний університет. Черкаси, 2020. 192 с. <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/1144> (дата звернення: 28.07.2021).
4. Гусак О.М. Інформаційна технологія раннього виявлення лісових пожеж. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2017. № 15. С. 33–38.
5. Lee M.H., Yeom S. Detection and tracking of multiple moving vehicles with a UAV. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*. 2018. Vol. 18 (3). P. 182–189.
6. Bekhti M., Abdennebi M., Achir N., Boussetta K. Path planning of unmanned aerial vehicles with terrestrial wireless network tracking. *2016 Wireless Days (WD)*, Toulouse, 23–25 March, 2016. IEEE. P. 1–6.
7. Miki T., Popović M., Gawel A., Hitz G., Siegwart R. Multi-agent Time-based Decision-making for the Search and Action Problem. *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE. 2018. P. 2365–2372.

8. Coutinho W. P., Fliege J., Battarra M. The Unmanned Aerial Vehicle Routing and Trajectory Optimisation Problem. *Computers and Industrial Engineering*. 2018. Vol. 120. P. 116–128. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.04.037>.
9. Habib D., Jamal H., Khan S.A. Employing multiple unmanned aerial vehicles for co-operative path planning. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2013. Vol. 10 (5). P. 235.
10. Musab Coúkuna, Sencer Ünal. Implementation of Tracking of a Moving Object Based on Camshift Approach with a UAV. *Procedia Technology*. 2016. Vol. 22. P. 556–561.
11. Ha I.K., Cho Y.Z. A probabilistic target search algorithm based on hierarchical collaboration for improving rapidity of drones. *Sensors*. 2018. Vol. 18 (8). P. 2535. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6111375/> (Date of access: 21.07.2021).
12. Старобор І.О. Використання машинного навчання в розробці ігрових механік. URL: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:QQATvaSnSjMJ:https://phm.cuspu.edu.ua/ojs/index.php/SNYS/article/download/1764/pdf+%&cd=3&hl=uk&ct=clnk&gl=ro> (дата звернення: 28.07.2021).

### **Meleshko M.A., Dmytrenko T.V. ALGORITHM FOR IMPLEMENTING DATA TRANSMISSION WITH ADAPTIVE CODING BETWEEN A GROUP OF UAVS IN A SINGLE SPACE**

*The algorithm of data transmission implementation with adaptive coding between a group of unmanned aerial vehicles in a single space is investigated in the article. The concept of a radio network with random mobile subscribers, which implements fully decentralized control in the absence of base stations or support nodes, which is entrusted to the network of interaction of unmanned aerial vehicles, is presented. The mechanism of data transfer between a number of agents with the detailed description of process of transfer and the principle of formation of communication is formed. The block diagram of the transmitter and receiver is schematically presented with the establishment of the relationship between the blocks of the circuit and a description of the receipt process. formation and transmission of information to the nearest agent. An algorithm for compiling a list of agents in a swarm group is proposed. It is emphasized that the group of unmanned aerial systems can be considered as a set of intelligent agents. The swarm behavior of unmanned aerial vehicles and the principles of unification are revealed. It is emphasized that swarm agents lack the permanence of objects, they often use a clearly coded list of action policies and / or have limited direct messages between swarm members, a team of intelligent agents has a set of agents capable of interacting. These agents often have joint operational plans and a detailed exchange of environmental models. It is established that the proposed data transfer algorithm includes a heuristic approach and machine learning methods that provide a stable but flexible swarm of UAVs that can more clearly adapt their behavior to solve data transmission problems in a single space. It is emphasized that structurally the data transmission system between a group of UAVs can be represented by blocks, where each block contains basic information about other members of the swarm and other devices used to solve the problem of data transmission. The description of each block and the description of realization of interrelation between blocks in the conditions of algorithm are offered. The stages of swarm algorithms are determined and the prospects of further research are outlined.*

**Key words:** *unmanned aerial vehicle, data transmission channel, swarm, agent, network, space.*