

ПОБУДОВА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ГРУПОЮ ТАКТИЧНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Безпілотні літальні апарати (БпЛА) стають важливими платформами ведення бойових дій, оскільки вони значно знижують ризик життя людини під час виконання бойових завдань. Група БпЛА може бути використана для виконання широкого кола військових завдань: проведення розвідки (моніторингу) місцевості, знищення техніки противника, побудови повітряних мереж тощо.

В умовах зміни тактичної обстановки, протидії супротивника ефективно управління групою БпЛА неможливо без відповідної системи управління. На систему управління покладаються такі основні завдання: визначення та узгодження порядку спільних дій автономних БпЛА групи; формування польотних завдань і траєкторій польоту групи БпЛА; динамічне корегування польотного завдання і ролі кожного БпЛА в ході його виконання; організація мережі зв'язку між центром управління та БпЛА, між БпЛА групи тощо.

Запропоновано функціональну модель системи управління групою БпЛА. Синтез системи управління групою БпЛА пропонується здійснювати за функціональними підсистемами, основними з яких є: управління польотом, телекомунікаційна, навігації та орієнтування, збору даних про стан групи, координації та прийняття рішень, виконання завдань. Визначені завдання та цільові функції управління кожної з підсистем. Описано особливості циклу управління групою БпЛА.

Розглянуто основні етапи синтезу системи управління: вибір способу управління (централізованого, ієрархічного, децентралізованого та змішаного); вибір алгоритмів (протоколів) та організація процесу обміну даними між БпЛА; варіанти стрійових і ройових моделей переміщення БпЛА в групі; багатоагентних моделей прийняття рішень з організації виконання завдань групою БпЛА.

Ключові слова: група БпЛА, система управління, переміщення групи БпЛА, багатоагентні системи.

Романюк В.А., Гримуд А.Г. Построение системы управления группой тактических беспилотных летательных аппаратов. Беспилотные летательные аппараты (БпЛА) становятся важными платформами ведения боевых действий, поскольку они значительно снижают риск жизни человека во время выполнения боевых задач. Группа БпЛА может быть использована для выполнения широкого круга военных задач: проведение разведки (мониторинга) местности, уничтожение техники противника, построения воздушных сетей и т.п.

В условиях изменения тактической обстановки, противодействия противника эффективное управление группой БпЛА невозможно без соответствующей системы управления. На систему управления возлагаются следующие основные задачи: определение и согласование порядка совместных действий автономных БпЛА группы; формирование полетных заданий и траекторий полета группы БпЛА в соответствии с требованиями; динамическая корректировка полетного задания и роли каждого БпЛА в ходе его выполнения; организация сети связи между центром управления и БпЛА, между БпЛА группы.

Предложена функциональная модель системы управления группой БпЛА. Синтез системы управления группой БпЛА предложено осуществлять по функциональным подсистемам, основными из которых являются: управление полетом, телекоммуникационная, навигации и ориентирования, сбора данных о состоянии группы, координации и принятия решений, выполнения заданий. Определены задачи и целевые функции управления каждой их подсистем. Описаны особенности цикла управления группой БпЛА.

Рассмотрены основные этапы синтеза системы управления: выбор способа управления (централизованного, иерархического, децентрализованного и смешанного); выбор алгоритмов (протоколов) и организация процесса обмена данными между БпЛА; варианты строевых и роевых моделей перемещения БпЛА в группе; многоагентных моделей принятия решений по организации выполнения задач группой БпЛА.

Ключевые слова: группа БпЛА, система управления, перемещение группы БпЛА, многоагентные системы.

V.Romaniuk, A.Hrymud Building a control system for a group of tactical unmanned aerial vehicles. Unmanned aerial vehicles (UAVs) are becoming important platforms for warfare because they significantly reduce the risk of human life during combat missions. The UAV group can be used to perform a wide range of military tasks: reconnaissance (monitoring) of the area, destruction of enemy equipment, building air networks, etc.

In a changing tactical situation, enemy counteraction, effective control of a UAV group is impossible without an appropriate control system. The following main tasks are assigned to the control system: determination and coordination of the order of joint actions of autonomous UAVs of the group; formation of flight tasks and flight trajectories of the UAV group in accordance with the requirements; dynamic adjustment of the flight mission and the role of each UAV during its implementation; organization of a communication network between the control center and the UAV, between the UAV of the group.

A functional model of the UAV group control system is proposed. It is proposed to synthesize a control system for a group of UAVs by functional subsystems, the main of which are: flight control, telecommunications, navigation and orientation, collection of data on the state of the group, coordination and decision-making, task execution. The tasks and target functions of management of each of their subsystems are determined. The features of the UAV group control cycle are described.

The main stages of the synthesis of the control system are considered: the choice of the control method (centralized, hierarchical, decentralized and mixed); selection of algorithms (protocols) and organization of the process of data exchange between UAVs; options for formation and swarm models for moving UAVs in a group; multi-agent decision-making models for organizing the tasks performed by a UAV group.

Key words: UAV group, control system, UAV group movement, multi-agent systems.

Постановка завдання в загальному вигляді. В даний час групове застосування різних видів безпілотних літальних апаратів (БпЛА) є перспективним й актуальним напрямком їх використання при вирішенні широкого кола військових завдань [1 – 5]: проведення розвідки (моніторингу) території; здійснення ударів бойових БпЛА по цілях; створення повітряних мереж зв'язку; створення перешкод і придушення засобів зв'язку противника; виконання завдань по установці димових завіс; мінування місцевості; доставка вантажів тощо.

Ефективне вирішення проблем групового застосування БпЛА вимагає комплексного (системного) підходу до вирішення всієї сукупності організаційних, технічних, комунікаційних та управлінських завдань. В умовах частої зміни тактичної обстановки, виходу з ладу (знищення) частки БпЛА, колективного характеру їх дій актуальним завданням є побудова системи управління групою тактичних БпЛА.

Аналіз останніх публікацій. Проблемі управління групою БпЛА присвячена значна кількість публікацій. Монографія [1] розглядає організаційно-технічні проблеми групового застосування БпЛА при вирішенні широкого кола військових і цивільних завдань. В монографії [2] визначаються основні задачі управління рухом групи БпЛА в умовах недружніх обставин. В статті [3] проведений аналіз ройової зброї на базі БпЛА провідними країнами світу та визначені основні тенденції її розвитку. В роботі [4] визначені проблеми та напрями побудови повітряних мереж зв'язку на базі телекомунікаційних аероплатформ. У статті [5] пропонується метод синтезу алгоритму координації автономних БпЛА у безпілотних авіаційних системах, що забезпечує синхронне управління кожним з них для організації руху строєм по заданій траєкторії з урахуванням обмежень БпЛА. В [6] вирішується задача децентралізованого координованого управління траєкторних рухом у горизонтальній площині групою різнотипних безпілотних літальних апаратів. В [7] досліджується управління групою БпЛА при організації польоту з лідером, що реалізує рух в щільних строях при забезпеченні безпеки спільного польоту. В [8] запропонований алгоритм ройового управління рухом групи БпЛА для обмеженого кола завдань. В [9] автором проведений стислий аналіз моделей переміщення групи БпЛА та запропонований децентралізований алгоритм переміщення строю на основі методу векторного поля.

В статтях [10 – 14] розглянуті підходи щодо створення мультиагентних систем управління групою БпЛА для рішення певних класів завдань.

Таким чином, більшість публікацій присвячена розгляду окремих процесів управління групою БпЛА (переміщення, організація зв'язку, прийняття рішень), або з припущенням наявності ідеальної системи зв'язку, тобто системного підходу щодо варіантів створення системи управління групою БпЛА із врахуванням системи зв'язку запропоновано не було.

Метою статті є аналіз способів, моделей, методів управління групою БпЛА та варіантів побудови системи управління групою тактичних БпЛА.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Тактичні БпЛА виконують завдання за призначенням в умовах частої зміни тактичної обстановки, протидії засобів вогневого враження та РЕП противника, обмеженості ресурсів тощо. Тому для ефективного управління групою БпЛА необхідне створення відповідної системи управління (СУ). СУ являє собою апаратно-програмний комплекс, який здійснює ієрархічну взаємодію наземного (повітряного) центру управління із системами управління

БпЛА, а також взаємодію систем управління кожного БпЛА між собою (рис. 1) для досягнення певних цільових функцій.

На систему управління (СУ) групою БпЛА покладені наступні основні завдання:

визначення кількості та складу БпЛА різних типів, необхідних для гарантованого виконання поставлених завдань, визначення варіантів оснащення, індивідуальних маршрутів і порядку дій;

визначення й узгодження порядку спільних дій автономних БпЛА групи при спільному виконанні призначених завдань;

формування польотних завдань групи БпЛА відповідно до заданих користувачем вимог (по оптимальному використанню наявних ресурсів, безпеки тощо);

розрахунок траєкторії з урахуванням рельєфу місцевості та об'єктів тактичної обстановки;

динамічне корегування польотних завдань і ролі кожного БпЛА в ході його виконання з урахуванням обстановки та поточних наборів технічних засобів з їх характеристиками в режимі реального часу;

організації мережі (напрямку, каналу) зв'язку між наземним центрами управління (ЦУ) та БпЛА, між БпЛА;

побудова розкладу роботи окремих БпЛА в складі групи за подіями;

завдання й зміна вихідних даних для планування (даних про тактичну обстановку) тощо.



Рис. 1. Функціональна модель системи управління групою БпЛА

Синтез СУ являє собою складне завдання, тому його краще вести за функціональними підсистемами, основними з яких є: управління польотом, телекомунікаційна, навігації та орієнтування, збору даних про стан групи, прийняття рішень, виконання завдань. Кожна з них вирішує свої завдання управління, має свої цільові функції управління.

Підсистема управління польотом розраховує траєкторії польоту як кожного БпЛА так і групи БпЛА, забезпечує сам процес польоту.

Телекомунікаційна підсистема забезпечує обмін даними між ЦУ та БпЛА, між БпЛА.

Підсистема збору даних про стан групи здійснює обмін службовими повідомленнями між ЦУ-БпЛА, БпЛА-БпЛА, що містять інформацію про стан певного БпЛА та підтримує відповідну базу даних стану групи.

Підсистема координації та прийняття рішень координує роботу підсистем і здійснює пошук рішення по реалізації певних цілей управління групою БпЛА.

Підсистема навігації визначає положення апарату щодо курсових точок у глобальній системі координат, підсистема орієнтування визначає положення навколишніх об'єктів і вектора переміщення апарату в локальній системі координат.

Сенсори поділяють на два види залежно від даних вимірювань.

Внутрішні сенсори діагностують стан БпЛА й інформують про його динамічні параметри: швидкість, положення та орієнтацію. Зовнішні сенсори визначають положення перешкод і параметри руху об'єктів.

Підсистема управління завданням призначена для аналізу стану виконання завдань, розподілу та корегування виконання завдань за функціональним призначенням кожного БпЛА з урахуванням наявних ресурсів та обстановки.

Геоінформаційна система використовується ЦУ для побудови траєкторій руху БпЛА із врахуванням рельєфу місцевості, міської забудови та перешкод.

Тактичні БпЛА, які відносяться до класу мікро та міні, мають відповідно, ряд ресурсних обмежень, що призводить до:

зменшення дальності їх дії;

застосування обмеженої кількості бортових сенсорних пристроїв;

зменшення дальності роботи активних засобів збору даних (лазерних далекомірів, ультразвукових датчиків тощо), хоча актуальним залишається пошук і своєчасне виявлення перешкод (будівлі, дерева, лінії електропередач) тощо;

зменшення потужності передачі радіозасобів та зменшення дальності радіозв'язку;

обмеженої обчислювальної можливості процесорів та необхідності реалізації алгоритмів управління з меншою обчислювальною складністю;

обмеженої стійкості польоту (малі БпЛА в більшій мірі схильні до турбулентності атмосфери, особливо в умовах щільної міської забудови).

Способи, моделі, алгоритми управління групою БпЛА, які будуть реалізовані в спеціальному програмному забезпеченні системи управління групою БпЛА, значною мірою залежать від типу, технічних характеристик, цільового призначення БпЛА, їх кількості в групі, способу управління, організації та можливостей системи зв'язку, моделей переміщення БпЛА, моделей прийняття рішень тощо.

Розглянемо складові варіантів побудови системи управління групою БпЛА (рис. 2).



Рис. 2. Складові варіантів побудови системи управління групою БпЛА

Група БпЛА може представляти собою множину однорідних або неоднорідних БпЛА за: типом (літаковий, роторний), функціями (розвідник, ударні, телекомунікаційні, багатоцільові тощо), технічними характеристиками (маса, габарити, час польоту, т.п.) тощо.

1. Способи управління групою БпЛА

Організація управління групою БпЛА може бути реалізована централізованим, ієрархічним, децентралізованим або змішаним способами.

Централізований спосіб може бути реалізований двома варіантами: 1-й – із наземного центру управління (ЦУ) шляхом дистанційного управління окремо кожним БпЛА; 2-й – ведучим (лідером) БпЛА в групі, який керує поведінкою та виконанням завдань веденими БпЛА в групі.

Ведучий БпЛА може визначатись заздалегідь наземним ЦУ (в певний час ЦУ передає йому управління), або ведучий може визначатись між БпЛА групи на основі певного алгоритму вибору, який не залежить від наземного ЦУ.

Перевагою централізованого способу управління є простота організації й, отже, алгоритмізації, можливість глобальної оптимізації дій всієї групи на всьому проміжку часу виконання завдання для досягнення мети.

Однак, при збільшенні кількості БпЛА підвищується обчислювальна складність задач оптимізації дій БпЛА для досягнення групової мети. Цей недолік призводить до того, що в системі управління проводиться планування виконання завдання та його реалізація за принципом „програмного управління” без урахування заздалегідь непередбачених змін ситуації.

Тому результат реалізації прийнятого рішення може бути не оптимальним, або в непередбачених заздалегідь ситуаціях завдання може бути взагалі не виконаним групою БпЛА.

Іншими недоліками централізованого управління є: низька живучість (вихід з ладу ЦУ або втрата каналу радіозв'язку може привести до відмови всієї системи); обмежена дальність радіозв'язку між наземним ЦУ та БпЛА. Для збільшення живучості системи здійснюється резервування наземного ЦУ (ведучого БпЛА) та передача їм управління, але це призводить до ускладнення процесу управління.

Ієрархічний спосіб управління застосовується в ієрархії: наземний ЦУ – БпЛА лідер групи – окремий БпЛА. Можливі два варіанти реалізації взаємодії лідера з апаратами в своїй групі: 1-й – БпЛА-лідер має зв'язок безпосередньо з кожним БпЛА групи; 2-й – створення ієрархії підпорядкованості лідер-БпЛА₁-...-БпЛА_n (це характерно при стройовому переміщенні групи БпЛА). Зазвичай лідер групи має більші ресурсні можливості, що дозволяє зменшити вимоги до дальності зв'язку для більшості БпЛА (відстань між БпЛА в групі значно менша за відстань між БпЛА та наземним ЦУ). Недоліки аналогічні централізованому способу управління.

При децентралізованому способі управління кожен БпЛА групи повинен: визначати своє місце положення, параметри руху, ступінь виконання завдань; здійснювати обмін даними стану з іншими БпЛА; корегувати власні дії після отримання даних; реалізувати власну стратегію поведінки з координацією своїх дій з іншими БпЛА для досягнення групової мети.

Такий спосіб управління групою масштабує і має високу живучість, але складний в координації процесу прийняття рішень та досягнення оптимуму (в загальному випадку, локальна оптимальність управління окремими БпЛА не означає досягнення глобальної оптимальності управління групою в цілому). Крім цього:

потрібні значні обчислювальні та телекомунікаційні можливості на борту БпЛА (відносно наявних апаратних ресурсів) для взаємодії з іншими БпЛА під час польоту в складі групи і обробки інформації, що збирається в режимі реального часу;

потрібне надійне функціонування каналів (мережі) зв'язку в групі в умовах високої динаміки топології мережі, що призводить до значного службового трафіку та потребує створення відповідної системи управління мережею передачі даних.

При змішаному способі поєднуються централізований та децентралізований способи. Наприклад, певний час управління групою здійснюється наземним ЦУ, або ведучим БпЛА групи, решта часу – децентралізовано.

Цей спосіб характерний для БпЛА військового призначення: в умовах постановки завдання, управління початку польоту здійснюється з наземного ЦУ, потім управління передається лідеру групи, при виході в район виконання завдання та впливу РЕБ противника кожен БпЛА реалізує власну стратегію поведінки для реалізації загального завдання.

Етапи циклу управління групою БпЛА включають в себе наступні складові (рис. 3):

а) Збір інформації про стан групи БпЛА здійснюється ($T_{зб}$ – час збору інформації): наземним ЦУ (БпЛА-лідером) про стан кожного БпЛА;

кожним БпЛА про стан інших БпЛА, перелік яких визначається алгоритмом координації сумісних дій БпЛА (наприклад, сусідніх БпЛА), та можливостями по дальності наявних засобів зв'язку.

При цьому важливо врахувати обсяг та інтенсивність трафіку збору управляючої інформації. Інформація про стан БПЛА (визначається сукупністю множин параметрів стану підсистем СУ та збирається з різною інтенсивністю) може представляти собою:

координати положення, напрям, параметри руху тощо (підсистема управління рухом – збирає дані за потребою, в межах сусідніх та/або визначених алгоритмом взаємодії БПЛА);

наявність та якість каналів зв'язку з іншими БПЛА, маршрутні таблиці, рівень навантаження тощо (підсистема телекомунікацій може збирати дані за подіями, за вимогою та періодично; в межах сусідніх та/або визначених БПЛА);

ступінь виконання завдання, наявність ресурсів тощо (підсистема управління завданням – за подіями, за потребою, періодично; в межах взаємодії).

б) Аналіз інформації про стан групи ($T_{ан}$ – час аналізу) проводиться кожною з підсистем СУ, наприклад, підсистемою виконання завданням – визначаються: ступінь виконання групою БПЛА своїх функцій, необхідність управляючого впливу, тощо;

в) Прийняття рішення ($T_{пр}$ – час прийняття рішення) здійснюється кожною з підсистем за цілями та об'єктами управління; приймається централізовано – наземною станцією (БПЛА-лідером) з виконання завдання групою або певним БПЛА; децентралізовано – кожним БПЛА в кооперації з іншими БПЛА;

г) доведення ($T_{др}$ – час доведення рішення) та виконання рішення ($T_{вр}$ – час на виконання рішення) групою або конкретним БПЛА.

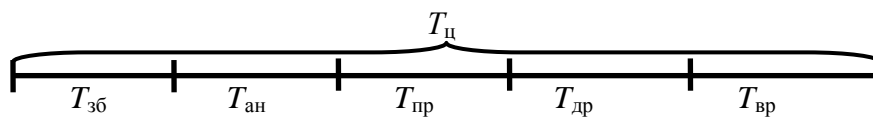


Рис. 3. Цикл управління групою БПЛА

Необхідно відмітити, що час циклу управління $T_{ц}$ включає в себе час реалізації всіх складових: $T_{ц} = T_{зб} + T_{ан} + T_{пр} + T_{др} + T_{вр}$ та буде відрізнятися для кожної з підсистем СУ.

2. Організація та управління зв'язком в групі БПЛА

Головною проблемою забезпечення взаємодії в групі є організація системи зв'язку як між ЦУ (БПЛА-лідером) та окремими БПЛА, так і між БПЛА в групі. Більшість публікацій по управлінню групою БПЛА не враховують обмеження, які накладає система зв'язку на процес взаємодії (постійна зміна топології мережі, наявність затримок в передачі, обмеженість дальності каналу та швидкості передачі даних, тощо).

В процесі управління групою БПЛА можуть бути сформовані різні варіанти топології мережі (рис. 4), що в умовах високої зміни її динаміки приносить значний обсяг службового трафіка та призводить до значних затримок обміну даними між БПЛА [4].

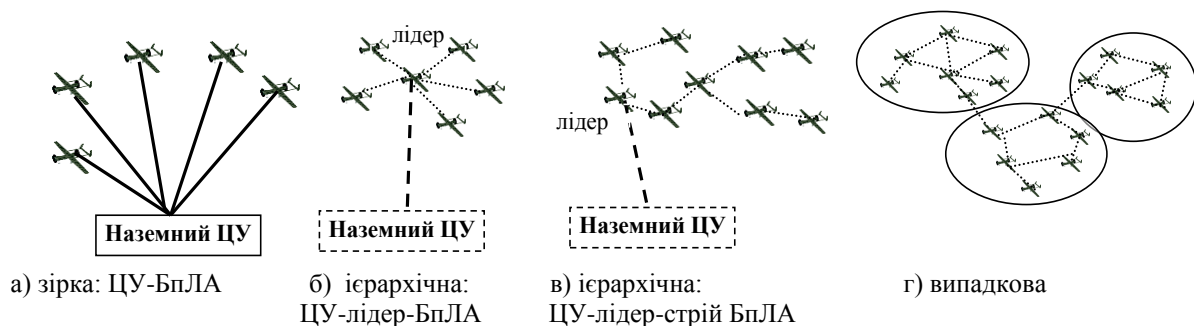


Рис. 4. Варіанти топології мережі БПЛА

Топологія мережі типу „зірка” (рис. 4а) характерна при централізованому способі управління та визначає наявність прямих окремих каналів радіозв'язку між центром управління та кожним БПЛА. БПЛА пов'язані між собою через наземний ЦУ, налаштовується тільки канал ЦУ-БПЛА, він легко масштабується, затримки передачі даних мінімальні при

нормальному функціонуванню каналу радіозв'язку. Недоліки: втрата взаємодії між вузлами при відмові ЦУ, обмежена дальність каналу радіозв'язку.

Ієрархічна топологія мережі характерна для ієрархічного способу управління. На рис. 4б ЦУ керує БпЛА-лідером, якому безпосередньо підпорядковані відомі БпЛА (в цьому випадку топологія між лідером та БпЛА типу „зірка”). На рис. 4в зображена взаємодія ЦУ з БпЛА лідером та відомими БпЛА по ієрархії в строю (топологія між БпЛА-лідером та відомими БпЛА типу „дерево”).

При роевому русі найбільш характерна випадкова топологія, в цьому випадку СУ реалізує алгоритми самоорганізації в мережі (flying ad-hoc networks, FANET). Кожен БпЛА в мережі для підтримки зв'язності з іншими БпЛА виконує функції безпроводового маршрутизатора. На рис. 4г наведений приклад випадкової топології трьох груп БпЛА.

Затримки передачі даних між БпЛА залежать від: діаметру мережі та її топології, кількості ретрансляцій у маршрутах передачі даних, якості каналів, обсягу та інтенсивності трафіка, прийнятих методів (алгоритмів, протоколів) управління передачею даних на всіх рівнях еталонної моделі взаємодії відкритих систем (OSI), які суттєво впливають на вибір моделей прийняття рішень з управління групою БпЛА [4].

На фізичному рівні моделі OSI на якість радіоканалу значно впливає висока мобільність БпЛА, тип та кількість антен, значна різниця відстаней між БпЛА тощо. На каналному рівні вибір методу розподілу каналного ресурсу між БпЛА, на мережевому рівні – метод побудови та підтримки маршрутів передачі даних суттєво впливають на пропускну здатність та час затримки передачі даних, що особливо критично для додатків реального часу.

Ресурсні обмеження (по енергії та потужності передавача) тактичних БпЛА визначають обмежену дальність радіоканалу як з наземним центром управління, так і між БпЛА.

Друге завдання, що виникає при використанні груп БпЛА – це організація каналу зі значною швидкістю передачі даних (наприклад, передача зображення потребує кілька Мбіт/с). Рішенням цієї задачі може стати застосування централізованої ієрархічної структури управління, в якій тільки у деяких (ведучих) БпЛА є зв'язок з наземним пунктом управління, або використанням сукупності наземних, повітряних, супутникових ретрансляторів (маршрутизаторів) [16].

Зазвичай наземний ЦУ для управління польотом БпЛА використовує окремий радіоканал телеметрії, а для передачі корисної інформації використовується окремий інформаційний канал. Останній час існує тенденція поєднання цих каналів, особливо при реалізації децентралізованого управління в групі БпЛА.

Крім цього, для організації скритності взаємодії в групі БпЛА військового призначення зазвичай використовують декілька каналів з різними діапазонами електромагнітного випромінювання: радіо, оптичного, інфрачервоного, що додатково обмежує дальність каналу зв'язку.

Таким чином, система зв'язку повинна враховувати технічні характеристики БпЛА, розмірність групи БпЛА, варіанти топології мережі, тип та інтенсивність трафіка та мати власну систему управління. Варіанти рішення задачі передачі інформації в групах БпЛА на основі мереж типу FANET (Flying ad-hoc networks) запропоновані в [4].

3. Управління переміщенням групи БпЛА

Завдання управління польотом груп БпЛА набагато складніше, ніж управління одиночним БпЛА, так як необхідно не тільки керувати рухом БпЛА, а й враховувати взаємне розташування БпЛА в групі. Відомі два основних режими групового руху БпЛА (рис. 2):

1. Режим стройового руху – впорядкований груповий рух БпЛА зі збереженням заданого просторового положення: клин, сітка, решітка, ланцюжок та інші формації. В строю при цьому встановлюється дворівнева або багаторівнева ієрархія: ведучі та ведені БпЛА.

Недоліком такого режиму є залежність ведених БпЛА від БпЛА-лідерів, вихід з ладу яких може розформувати стрій.

2. Режим ройового руху – колективний рух децентралізованої самоорганізованої групи БпЛА без необхідності витримувати певну геометричну топологію. Такий режим може бути більш гнучким при позаштатних ситуаціях.

Методи стройового управління

При застосуванні груп БпЛА доцільно формувати певні просторові положення. Необхідне (цільове) розташування БпЛА в просторі називають строем, а завдання формування групою БпЛА заданого строю називають стройовим завданням.

При цьому на систему управління польотом групи БпЛА покладається завдання узгодженого управління кожним з літальних апаратів для організації руху строем по заданій траєкторії, яка забезпечує ефективне досягнення мети, поставленої перед групою. Система управління польотом БпЛА в строю здійснює контроль правильності утримання траєкторії кожним літальним апаратом з точністю, що забезпечує безпеку в щільних групових порядках.

На цю ж систему покладається завдання навігації й організації взаємодії БпЛА по каналам зв'язку з метою визначення взаємних координат.

Формування просторово-часової моделі побудови групи БпЛА має базуватися на обліку обмежень за існуючою енергетикою, маневреними можливостями, взаємною розстановкою і т.д.

Траєкторія польоту може бути: плоска (польот в горизонтальній площині на однаковій висоті) та просторова (польот на різних висотах); з перетинанням та без перетинання траєкторій польоту; в замкнутому порядку та з розірванням строю.

З точки зору просторово-часового положення БпЛА в групі, вони можуть виконувати:

груповий маневр, при якому номінальні траєкторії руху всіх БпЛА когерентні;

індивідуальний маневр, при якому кожен БпЛА, незалежно від інших, може змінювати параметри траєкторії руху;

змішаний маневр, при якому можлива зміна параметрів руху як всією групою БпЛА, так і окремими БпЛА.

Теорія стройового управління, особливо в застосуванні до БпЛА, досить широко поширена [1, 2, 6, 7, 9]. У більшості випадків для вирішення стройового завдання (збереження відносного розташування БпЛА) використовуються наступні підходи.

Перший підхід заснований на застосуванні *теорії жорсткості графів*.

Цільова структура строю задається за допомогою графа, вершини якого відповідають бажаному розташуванню агентів, а ребра – цільовим відстаням r_{ij}^0 між парами БпЛА. Таким чином, кожен БпЛА, знаючи координати сусідніх БпЛА, прагне відповідати набору просторових обмежень $r_{ij}(t) \rightarrow r_{ij}^0$ при русі строем, за умови, що система обмежень є здійсненою. Недоліками даного підходу є негнучкість, неможливість задавати орієнтацію строю відносно напрямку руху, ризик порушення властивостей жорсткості графа при виході з ладу БпЛА-лідера, відносного якого збудований граф, і невизначеність поведінки БпЛА в ситуації, коли початкове розташування агентів значно відрізняється від цільового строю.

Другий підхід заснований на *правилах консенсусу*, який передбачає приведення до єдиного значення певного параметра стану БпЛА шляхом усереднення. Одним із завдань пошуку консенсусу є завдання „рандеву”, що полягає в зборі всіх БпЛА в одній точці. Завдання „рандеву” із зсувом є модифікацією завдання збору в одній точці і передбачає побудову геометричної структури, яка задається кососиметричною матрицею зрушень b_{ij} . Управління БпЛА в цьому випадку може мати такий вигляд:

$$u_i(t) = \sum_{j \neq i} (r_j(t) - r_i(t)) + b_{ij},$$

де $u_i(t)$ – управляючий вплив для i -го БпЛА, $r_i(t)$ – вектор положення i -го агента, $r_j(t)$ – вектор положення j -го сусіднього БпЛА, b_{ij} – задане відносне розташування i -го та j -го

БПЛА в системі координат. Як і у випадку з першим методом, даний спосіб не передбачає управління орієнтацією строю в залежності від напрямку руху ладу.

Третій підхід пов'язаний із застосуванням віртуальних формацій/лідерів. Ключова ідея полягає в тому, що кожен БПЛА слідує за деякою точкою (віртуальним лідером), що рухається по певному закону руху, координати якої розраховуються в центрі управління і передаються БПЛА по каналам зв'язку.

Ставлячи кожному БПЛА точку спостереження, можна забезпечити рух із збереженням геометричної структури строю. Проте, третій спосіб управління не є децентралізованим і залежить від надійності зв'язку з ЦУ.

Методи ройового управління

У групі БПЛА, які взаємодіють на основі ройового інтелекту, кожен апарат реалізує децентралізований метод управління та здійснює обмін інформацією про свій стан та хід виконання задачі з найближчими БПЛА (тому дальність зв'язку та енерговитрати на передачу даних відносно невеликі). БПЛА приймають рішення відносно поточної поведінки, спираючись на самостійно зібрані дані про навколишнє середовище, а також на отримані дані від сусідніх апаратів. Зв'язок з ЦУ відбувається за необхідністю і лише для того, щоб отримати інформацію про завдання, які стоять перед групою.

При ройовій взаємодії кожен БПЛА визначає дистанції до сусідів і сам корегує свій курс таким чином, щоб дотримуватись потрібних дистанцій між апаратами.

Ройове управління отримало розвиток з кінця 20-го століття. Крейг Рейнольдс в своїй роботі „Boids”, присвяченій симуляції стайного руху птахів, описав алгоритм поведінки кожного птаха на основі трьох простих правил: „Згуртованість” (агенти намагаються триматися якомога ближче один до одного), „Поділ” (агенти прагнуть розійтись і зберегти безпечну відстань один від одного), „Вирівнювання швидкостей” (агенти з однієї групи прагнуть рухатися з однаковою швидкістю).

У 1995 році Джеймс Кеннеді і Рассел Еберхарт запропонували метод рою частинок для імітації соціальної поведінки. Переміщення частинок підпорядковується принципу найкращого знайденого в просторі положення, постійно змінюється при знаходженні частинками вигідних положень. Управління швидкістю кожної частинки при цьому має вигляд:

$$v_i(t) = v_i(t-1) + a_1 \text{rnd}() (pbest_i - x_i) + a_2 \text{rnd}() (gbest_i - x_i),$$

де $v_i(t)$ – швидкість i -ї частинки, $v_i(t-1)$ – швидкість i -ї частинки в попередній ітерації, x_i – положення i -ї частинки, $\text{rnd}()$ – функція випадкових значень $[0...1]$, a_1 й a_2 – постійні прискорення, $pbest_i$ – краща знайдена точка i -ї частинки, $gbest_i$ – краща точка серед всіх, яка знайдена для однієї з частинок рою. В наступній ітерації значення кращих точок оновлюється та цикл повторюється. Сьогодні одним з найбільш поширених способів для вирішення завдання ройового руху є метод потенційних функцій. Суть методу полягає в тому, що закон управління БПЛА визначається на основі штучних сил, залежних від потенційної функції або потенційних силових полів, які призводять або до тяжіння БПЛА, або відштовхування. Керуючий вплив при цьому може розраховуватися по наступному закону:

$$u_i = \sum_{r_{ij} > r_0} c_1 r_{ij} + \sum_{r_{ij} \leq r_0} \frac{c_2 r_{ij}}{r_{ij}^2},$$

де r_{ij} – вектор відстані між i -м та j -м агентом, c_1 та c_2 – константи, які налаштовуються, r_0 – радіус силового поля (при $r_{ij} \leq r_0$ агенти відштовхуються, при $r_{ij} > r_0$ агенти притягуються).

4. Прийняття рішень з виконання завдання групою БПЛА

Очевидно, що існує ряд особливостей прийняття рішень в умовах колективної роботи БПЛА: неповнота і суперечливість знань БПЛА про зовнішнє середовище (в умовах її непередбачуваності) та інші БПЛА; різноманіття цілей управління та варіантів їх досягнення, складу групи, розподілу ролей тощо; розподілений і динамічний характер планування дій групи; проблема надійної комунікації [1, 2, 16].

Сутність управління групою полягає у визначенні та узгодженні порядку спільних дій автономних БпЛА групи при спільному виконанні завдань за призначенням з метою досягнення певних цільових функцій.

Цільові функції управління, насамперед, будуть визначатися функціоналом як групи, так і функціоналом кожного БпЛА, наприклад:

БпЛА-розвідник – мінімум часу виявлення цілі, максимальна площа моніторингу тощо;
ударний БпЛА – максимально можливий збиток об'єктам противника мінімальними ресурсами, мінімальний час підльоту тощо;

телекомунікаційна аероплатформа – максимальна пропускна здатність, максимальна зона покриття мобільних абонентів тощо.

Традиційні методи управління не ефективні для вирішення складних багатофакторних задач, особливо в умовах високої динаміки в розподіленому середовищі.

Один з підходів у вирішенні проблеми управління ресурсами заснований на використанні мультиагентних систем (МАС). При мультиагентному підході БпЛА виконує функції „агента”, який за допомогою спеціального програмного забезпечення та встановленої апаратури (датчиків) оцінює ситуацію, приймає рішення та взаємодіє з іншими „агентами” .

Спеціальне програмне забезпечення „агента” групи БпЛА дозволяє вирішувати наступні задачі: визначати місцеположення; визначати ступінь виконання завдань; здійснювати обмін інформацією між іншими „агентами” ; корегувати свої дії за прийнятими даними.

Характерною особливістю мультиагентних систем є їх здатність до колективного поведіння [10 – 14, 16] з метою вирішення загального завдання. Колективом називають групу агентів (БпЛА), які вирішують одне загальне цільове завдання і взаємодіють між собою для вирішення цього завдання.

Метод колективного управління полягає в тому, що кожен БпЛА самостійно управляє процесом свого функціонування (визначає свої дії), а також погоджує ці дії з іншими агентами групи для ефективного (з мінімальними витратами і максимальною вигодою для групи) рішення цільового завдання. Основними принципами колективного управління є:

кожен БпЛА групи самостійно формує своє управління в поточній ситуації;

вибір дій кожним членом колективу здійснюється тільки на основі інформації про колективну мету, що стоїть перед групою, ситуації в середовищі в попередній відрізок часу і в поточний момент, свого поточного стану і поточних дій інших членів колективу;

оптимальність дії кожного члена колективу в поточній ситуації – максимально можливе збільшення цільового функціоналу при переході системи „колектив-середовище” з поточного стану в кінцеве;

оптимальне управління реалізується членами колективу протягом найближчого відрізка часу в майбутньому, а потім визначається нова дія;

допускається прийняття компромісних рішень, які відповідають всім членам колективу, тобто кожен член колективу може відмовитися від дій, що приносять йому максимальну вигоду, якщо ці дії приносять малу вигоду або навіть шкоду колективу в цілому.

Конкретні методи координації, які використовують в теорії і практиці МАС, досить відомі [16]: координація за допомогою задоволення загальних правил групової поведінки; координація поведінки на основі обміну інформацією на метарівні; командна робота; координація в умовах конкуренції агентів. До основних переваг МАС відноситься низька обчислювальна складність алгоритмів, що дозволяє за короткі проміжки часу приймати оптимальні, або близькі до них рішення в умовах, які динамічно змінюються. Крім цього, зараз пропонується використання інтелектуальних агентів, характерними особливостями яких є [16]:

колегіальність (здатність до колективної цілеспрямованої поведінки в інтересах вирішення загального завдання);

автономність (здатність самостійно вирішувати локальні завдання);
активність (здатність до активних дій задля досягнення спільних і локальних цілей);
інформаційна та рухома мобільність (здатність активно переміщатися і цілеспрямовано шукати і знаходити інформацію, енергію й об'єкти, необхідні для кооперативного вирішення спільного завдання);

адаптивність (здатність автоматично пристосовуватися до невизначених умов в динамічному середовищі).

Ці можливості кардинально відрізняють мультиагентні системи від існуючих „жорстко” організованих систем управління групи автономних БпЛА.

Висновки. В умовах зміни тактичної обстановки, протидії супротивника ефективно управління групою БпЛА неможливо без відповідної системи управління на яку покладаються такі основні завдання: визначення та узгодження порядку спільних дій автономних БпЛА групи при спільному виконанні завдань; формування та корегування польотних завдань і траєкторій польоту групи БпЛА; організація мережі зв'язку між центром управління та БпЛА, між БпЛА групи; визначення завдання й ролі кожного БпЛА в ході його виконання.

В роботі проведено аналіз способів, методів, моделей управління, які можна використати для побудови системи управління групою тактичних БпЛА. Запропоновано функціональну модель системи управління групою БпЛА. Синтез системи управління групою БпЛА пропонується здійснювати за функціональними підсистемами, основними з яких є: управління польотом, телекомунікаційна, навігації та орієнтування, збору даних про стан групи, координації та прийняття рішень, виконання завдань.

Визначені завдання та цільові функції управління кожної з підсистем. Описано особливості циклу управління групою БпЛА. Розглянуто основні етапи синтезу системи управління групою БпЛА: вибір способу управління; вибір алгоритмів (протоколів) й організація процесу обміну даними між БпЛА; визначення стройових або ройових моделей переміщення БпЛА в групі; реалізація мультиагентних моделей прийняття рішень з організації виконання завдань групою БпЛА.

В подальшому дослідженні планується побудувати систему управління мережею телекомунікаційних аероплатформ для забезпечення заданої якості обслуговування мобільних абонентів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Моисеев В.С. Групповое применение беспилотных летательных аппаратов: монография. Казань: Редакционно-издательский центр „Школа”, 2017. 572 с.
2. Абросимов В. К. Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической среде: монография. М.: Издательский дом «Наука», 2013. 168 с.
3. Лупандін В.А., Мегельбей Г.В., Мацько О.Й., Куртсеїтов Т.Л., Міроненко П.О. Основні тенденції створення та застосування груп безпілотних літальних апаратів. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, 2019, № 2(35). С. 88 – 94. DOI: 10.30748/nitps.2019.35.11.
4. Романюк В.А., Степаненко Є.О., Панченко І.В., Восколович О.І. Літаючі самоорганізуючі мережі. Збірник наукових праць ВІТІ. 2017. № 1. С. 104 – 114.
5. Ефанов В. Н., Мизин С. В., Неретина В. В. Управление полетом БпЛА в строю на основе координации взаимодействия группы летательных аппаратов. Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18, № 1 (62). С. 114 – 121.
6. Буков В.Н., Бронников А.М., Сельвесюк Н.И. Децентрализованное координированное управление группой беспилотных летательных аппаратов. <https://www.researchgate.net/publication/273040552>.
7. Самодов И.О., Дмитриев Д.Д. Синтез алгоритма управления группой беспилотных летательных аппаратов с лидером // Аэрокосмический научный журнал. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 04. С. 15 – 24. DOI: 10.7463/aersp.0415.0813298.
8. Иванов Д.Я. Методы роевого интеллекта для управления группами малоразмерных

беспилотных летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки 2011. с. 221 – 229.

9. Муслимов Т. З. Алгоритмы управления строем автономных беспилотных летательных аппаратов самолетного типа с помощью метода векторного поля // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 187 – 214. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10407.

10. Скобелев П.О., Rzevski G.A., Будаев Д.С., Мочалкин А.Н. Мультиагентная система планирования задач для согласованного управления группой беспилотных летательных аппаратов / Актуальные проблемы информационной безопасности. Теория и практика использования программно аппаратных средств: материалы X Всероссийской научно-технической конференции, 2017. с. 131 – 137.

11. Амелин К.С., Антал Е.И., Васильев В.И., Граничина Н.О. Адаптивное управление группой автономных летательных аппаратов. 2009. С. 157 – 166.

12. Евдокименков В.Н., Красильщиков М.Н., Себряков Г.Г. Распределенная интеллектуальная система управления группой беспилотных летательных аппаратов: архитектура и программно-математическое обеспечение // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1 (174). С. 29 – 44.

13. Халимов Н.Р., Мефедов А.В. Распределенная сетцентрическая система управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 1 – 13. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10301.

14. Ерофеева В.А., Иванский Ю.В., Кияев В.И. Управление роем динамических объектов на базе мультиагентного подхода. Компьютерные инструменты в образовании. 2015. С. 34 – 42.

15. Пантелеймонов И.Н., Белозерцев А.В., Монастыренко А.А., Боцва В.В., Наумкин А.В. Основные направления создания высоконадежной системы связи и управления БпЛА. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. № 6 (723). 2020. С. 78 – 88. DOI: 10.18698/0536-1044-2020-6-78-88.

16. Городецкий В.И., Карсаев О.В., Самойлов В.В., Серебряков С.В. Прикладные многоагентные системы группового управления. Искусственный интеллект и принятие решений. №2. 2009. С. 3 – 34.