



ДИНАМІЧНЕ ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЙ РУХУ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ В ПРОЦЕСІ ВИКОНАННЯ СКЛАДНИХ ОПЕРАЦІЙ

УДК 004.9

DOI: <https://doi.org/10.35546/2313-0687.2020.27.7-22>

Володимир Шерстюк,

д.т.н., професор, Херсонський національний технічний університет, Україна,

E-mail: vgsherstyuk@gmail.com, **ORCID** 0000-0002-9096-2582

Ігор Сокол,

к.т.н., доцент, докторант Херсонського національного технічного університету

ORCID 0000-0002-7324-1441

Віктор Гусев,

к.т.н., доцент, начальник коледжу Херсонської державної морської академії

ORCID 0000-0001-7775-2276

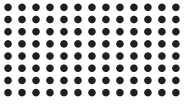
Руслан Левківський,

заст. начальника коледжу Херсонської державної морської академії

ORCID 0000-0001-9280-8098

Анотація. В статті розглянуто особливості керування спільним рухом великої групи безпілотних апаратів, що рухаються у тривимірному просторі взаємодії в межах різних середовищ при виконанні складних операцій з невизначеними та динамічними цілями. Запропоновано підхід до динамічного планування траєкторій руху безпілотних апаратів, заснований на інтуїтивно-евристичних методах. Побудовано модель гетерогенного ансамблю безпілотних апаратів та модель складної операції, що заснована на виконанні групою автономних безпілотних апаратів спільних місій, які відповідають певним ролям, що обираються на підставі відповідності технічних та функціональних характеристик безпілотних апаратів, та для виконання яких розробляються прототипи планів, що містять сценарії, складовими яких є траєкторії руху, визначені у дискретній багатовимірній моделі простору взаємодії. Новизна запропонованого підходу полягає у розв'язанні задачі динамічного планування множини маршрутів спільного руху групи безпілотних апаратів, організованих у гетерогенні ансамблі, що дозволяє безпілотним апаратам замінюючи, додаючи або видаляючи визначені послідовності дій у сценаріях та синхронізуючи їх у часі й просторі, маневрувати, уникаючи зіткнень і перешкод, та зберігаючи при цьому задану структурну та геометричну конфігурацію. Практична значимість запропонованого підходу полягає в тому, що його обчислювальна складність слабо залежить від числа об'єктів, які одночасно рухаються, що забезпечує продуктивність, достатню для роботи у реальному часі у складі бортової системи управління безпілотним апаратом.

Ключові слова: траєкторія руху, місія, сценарій, план, динамічне планування, безпілотний апарат, складна операція, гетерогенний ансамбль.



Постановка проблеми. Технічний прогрес стимулює застосування великих груп безпілотних апаратів (далі – БА) для вирішення низки задач, небезпечних для життя та/або здоров'я людини. Безпілотні апарати, що мають різний розмір, можливості, ролі та навіть середовище руху, можуть спільно виконувати призначені їм місії заради досягнення спільно визначеної мети. Група БА, що може бути подана як упорядкована множина виконавців, які спільно і одночасно за певними ролями виконують різні сценарії в межах призначених їм місій для досягнення заданої спільної мети, та має певну визначену структуру і стрій, утворює гетерогенний ансамбль БА. Оскільки дистанційно керовані операторами БА такі місії у великих групах виконувати не можуть через відсутні проблеми координації, виконавцями мають бути автономні БА, які наділені інтелектуальними можливостями та здатні самостійно або колективно приймати рішення в динамічному, частково спостережуваному та непередбачуваному середовищі.

Автономний БА має створити попередній план, який передбачає рух до певних визначених точок у просторі та виконання необхідних дій в цих точках простору з урахуванням міркувань безпеки та ефективності. Виконання місії потребує виконання цього плану. Оскільки рух БА є однією з найважливіших його функцій, складовою плану виконання місії є запланована траєкторія руху, яку подають послідовністю точок у тривимірному просторі, які пов'язують з конкретними відліками часу. Хоча під час планування намагаються врахувати всі, можливо, навіть суперечливі критерії, внаслідок непередбачуваності, динамічності, невизначеності та слабкої спостережуваності середовища спланована траєкторія руху БА не є остаточною, оскільки динаміка середовища часто створює необхідність змінювати заздалегідь визначені траєкторії.

Оскільки БА є рухомими об'єктами, їх спільний рух зазвичай обмежено динамічними параметрами, технічними можливостями, різними динамічними та ситуаційними збуреннями. Рухаючись, вони мають підтримувати певну задану просторову конфігурацію (стрий), тобто зберігати відносну позицію або місце в побудові просторової структури ансамбля під час виконання місії, а також зберігати безпечну відстань від інших БА ансамблю та оминати різного роду перепони.

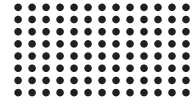
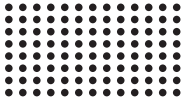
Впливи середовища на заздалегідь сплановані траєкторії руху збурюють їх і змушують БА маневру-

вати, змінюючи свої траєкторії. Однак, при спільному русі великих груп зміна траєкторії руху одним з БА, який оминає динамічну перешкоду, може відчутно вплинути на траєкторії руху інших БА, змушуючи їх з міркувань безпеки також маневрувати. Враховуючи наявність обмежень щодо безпечної відстані між БА одночасно із збереженням просторової конфігурації, а також певні відмінності в законах і особливостях руху БА різними середовищами, керування їх спільним рухом під час виконання операцій гетерогенним ансамблем є доволі складним. Особливо ускладнює керування спільним рухом ансамбля БА наявність невизначених та динамічних цілей, що змушує «на льоту» змінювати виконувани сценарії та місії з відповідними змінами траєкторій руху.

Отже, враховуючи складність проблем керування, що виникають під час спільного руху гетерогенного ансамблю БА, актуальною є задача дослідження і розробки моделей і методів управління спільним рухом безпілотних апаратів у гетерогенних ансамблях у реальному часі. Питання керування спільним рухом БА знайшли своє відображення в роботах багатьох вітчизняних і зарубіжних вчених, проте на даний час ці питання відпрацьовані недостатньо, отже, їх дослідження є актуальною та перспективною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. БА, що спільно виконують місії, рухаючись у заданому тривимірному просторі, мають координувати та синхронізувати свій рух та дії в часі й просторі [1]. Маршрут та траєкторію руху БА планують з огляду на виконання певного сценарію, враховуючи при цьому як міркування безпеки та ефективності, так і низку суперечливих критеріїв, таких як наявність палива, часу, дистанція зв'язку тощо. Оскільки середовище руху є динамічним і непередбачуваним, його впливи та впливи інших рухомих об'єктів створюють збурення, які змушують БА змінювати заплановану траєкторію руху (маневрувати) [2].

Оскільки зміна траєкторії руху одним БА може відчутно впливати на траєкторії руху інших БА, як з міркувань безпеки руху, так і з міркувань збереження заданої структури та просторової конфігурації, бортова система управління БА має вирішувати задачу динамічного планування траєкторії руху [3] безпосередньо під час виконання сценарію у реальному часі, що включає в тому числі уникнення перешкод, підтримку заданого строю й конфігурації та пом'якшення умов невизначеності та ризику.



Зазвичай, задачу планування траєкторії руху БА при їх індивідуальному застосуванні вирішують за допомогою достатньо простих методів, заснованих на використанні потенційних полів або методів RRT та PRM [4].

В умовах одночасного маневрування декількох БА їх взаємні впливи обумовлюють ітеративні обчислення, які мають тим більшу обчислювальну складність, чим більше рухомих об'єктів зосереджено у просторі взаємодії. Отже, використання вищеназваних методів у великих групах БА є недоречним [5].

Використання класичних методів штучного інтелекту на кшталт нейронних мереж, генетичних та еволюційних алгоритмів тощо, які є нелінійними, також не є релевантним через неможливість отримання рішення за кінцевий заданий час [6].

Отже, існує певне протиріччя між складністю проблеми управління спільним рухом гетерогенного ансамбля БА в контексті динамічного планування їх маршрутів і траєкторій та необхідністю вирішувати цю проблему в реальному часі. Чим більшою є чисельність виконавців в ансамблі та складнішою є його структура, тим важче забезпечити можливість виконавцям одночасно рухатися до заданих цілей, уникаючи перешкод і зіткнень та підтримуючи заздалегідь визначену просторову конфігурацію [7].

Для усунення вказаного протиріччя доречно використати нетрадиційні, інтуїтивно-евристичні підходи до динамічного планування траєкторій руху БА, однак, наразі такі підходи опрацьовані недостатньо, а проблема є надто далекою від вичерпного рішення, що істотно стримує використання великих груп БА для виконання спільних операцій на обмеженому просторі. Отже, задача розробки моделей і методів динамічного планування траєкторій руху групи БА при виконанні ними складних операцій в умовах невизначеності та динаміки цілей є актуальною.

Проблеми динамічного планування траєкторій руху групи БА найчастіше досліджувалися з точки зору виявлення та уникнення зіткнень [8]. Проблема виявлення та уникнення зіткнень за умов спільного руху тісно пов'язана як з безпекою БА, так і з успішністю виконання місії.

Існуючі підходи до динамічного планування траєкторій руху БА за умов виявлення зіткнення можна поділити на активні і пасивні, відповідно до типу датчиків, що забезпечують вхідну інформацію. У більшості випадків ці дані базуються на активному типі датчиків

(радіолокатори, сонари тощо) [9], проте застосовуються і пасивні датчики, такі як електрооптичні або інфрачервоні камери [10].

Існуючі методи динамічного планування траєкторій руху БА за умов виявлення зіткнення можна в основному поділити на методи, засновані на кінематиці та геометрії [7], методи, що базуються на нечіткій логіці [11], та методи, що засновані на комп'ютерному моделюванні навігаційної ситуації [12]. Методи керування спільним рухом можуть також бути поділені на реактивні та попереджувальні [13]. Перші звичайно змінюють траєкторію руху БА у відповідь на виникнення перешкоди руху чи виявлення можливого зіткнення, тобто працюють у реальному часі, на відміну від других, які зазвичай намагаються прогнозувати потрібні траєкторії всіх учасників спільного руху під час вирішення задачі планування маршрутів (path planning).

Зрозуміло, що при використанні великих груп БА, що рухаються одночасно в різних середовищах, використання як реактивних, так і попереджувальних методів суттєво ускладнюється, бо за допомогою перших стає складно забезпечити реагування в реальному часі, а за допомогою других складно точно спрогнозувати можливі траєкторії одночасно всіх рухомих об'єктів, а значне число обмежень не завжди дає можливість отримати рішення задачі планування маршрутів.

Активні підходи, як правило, засновані на кінематиці та геометрії, і ґрунтуються на так званій «точці зіткнення» [14], яка за умов пасивного підходу не буде доступною. Проте, використання пасивного підходу дозволяє «візуально» виявляти маневрування динамічних об'єктів, що при застосуванні активного підходу складає певну проблему [10]. Обидва підходи мають свої переваги і недоліки, що ставить питання доцільності їх комбінації [15].

Методи, засновані на кінематиці та геометрії, зазвичай використовують відносні просторові оцінки, такі як «конуси зіткнення», «домени безпеки», «точки найкоротшого зближення» тощо [16]. Альтернативну оцінку, засновану на аналізі складного руху об'єктів на підставі їх кінематики, запропоновано в [17], проте, такі оцінки можуть використовуватися за умов пасивного підходу. Треба зауважити, що за умов спільного руху великої групи динамічних об'єктів використання методів, заснованих на кінематиці та геометрії, є неприйнятним для реактивного керування, бо обчислювальна складність

експоненційно зростає відносно числа рухомих об'єктів. Методи, що засновані на комп'ютерному (в т.ч. мультиагентному) моделюванні [18], мають такий самий недолік.

Отже, для динамічного планування траєкторій руху безпілотних апаратів доцільно використовувати інтуїтивно-евристичні методи, отже, необхідно шукати гібридні рішення, які дозволять забезпечити достатньо низьку обчислювальну складність, яка не залежить або слабо залежить від числа динамічних об'єктів, що одночасно рухаються, від чого залежить працездатність методів динамічного планування траєкторій руху у реальному часі.

Мета дослідження. Метою даної статті є опрацювання підходу до динамічного планування траєкторій руху безпілотних апаратів у великих гетерогенних ансамблях, що є працездатними у реальному часі, на підставі сценарних методів, що адекватні виконанню складних операцій з динамічними та невизначеними цілями.

Виклад матеріалу дослідження. Розглянемо тривимірний евклідовий простір C , який дискретизовано сіткою $D = \{d_{xyz}\}$ ізометричних кубічних комірок d_{xyz} однакового розміру, де x, y, z відповідають координатам комірок. Таким чином, кожна клітина $d_{xyz} \in D$ є просторовим об'єктом найменшого розміру. Розташування кожного БА, а також перепон та цілей, є дискретним та окреслено у просторі межами певних комірок.

Визначимо T як відкриту множину відліків часу. Побудуємо дискретну модель часу за допомогою відношення суворого порядку $<_t$ на множині відліків T , таку що $T = ([t_i, t_{i+1} = t_i + \Delta t], <)$.

Нехай U – множина БА, Φ – множина виконуваних ними функцій, Cl – множина класів БА, F – множина їх параметрів, та H – множина заданих цілей. Будемо розглядати певну підмножину БА $u_i, \dots, u_m \in U$ та певну підмножину цілей $h_e, \dots, h_l \in H$, розсіяних у межах простору руху D в процесі виконання спільної операції Op .

Отже, кожен БА $u_i \in U$ належить до певного класу $cl_k \in Cl$ відповідно до своїх параметрів і можливостей і може виконувати певний набір функцій $\Phi_i = \{\varphi_{0k}, \varphi_{1k}, \dots, \varphi_{mk}\}$. Відзначимо, що кожен u_i певного класу cl_k має виконувати принаймні одну функцію $\varphi_{0k} \in \Phi$, яка є функцією руху.

Треба відзначити, що на відміну від багатьох задач, в яких множину цілей визначено наперед та відповідно задано їх розташування у просторі, задача виконання операції у контексті даного дослідження відрізняється тим, що ні склад цілей, ні їх розташування у просторі наперед невідомо. Отже, під час виконання операції потрібно знайти певні цілі $h_l \in H$, ідентифікувати їх саме як цілі даної операції, та визначити їх розташування у простору руху D .

Стан кожного БА $u_i \in U$ може бути описано динамічним набором значень параметрів $F_i(t) = \{f_{i1}(t), \dots, f_{is}(t)\}$ на заданий момент часу $t \in T$. Рухаючись, БА змінюють своє просторове положення (координати) та, відповідно, свій стан $F_i(t)$ з плином часу та мають уникати перешкод та зіткнень з іншими БА.

Нехай задано функцію $Pos(u_i)$, яка повертає позицію БА $u_i \in U$ у вигляді тривимірних координат в межах простору руху D , тобто $\langle Pos(u_i), t_l \rangle = (\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)_{u_i}$, $Pos(u_i) \in X$. Нехай тепер TP є певним моментом часу, $TP \in T$, WP є певною точкою шляху, за яким рухається БА, поданою у межах простору руху у вигляді комірки $d \in D$, або у вигляді тривимірної області $b = \{d_{ijk}, \dots, d_{lmn}\} \in D$, та FP є станом БА у певний момент часу $t \in T$, $FP = F_i(t)$.

Очевидно, що шлях (маршрут) кожного БА може бути подано як певну послідовність точок шляху WP , пов'язаних з певними моментами часу TP . Іншими словами, маршрут можна визначити як упорядкований масив пар (TP, WP) , що є зручним способом контролю та координації спільної діяльності БА, і насамперед їх спільного руху. Очевидно також, що будь-яку WP може бути подано з певним наближенням як тривимірну область $b \in D$, що є зручним способом подання невизначеності щодо просторового положення БА або будь-яких інших об'єктів.

Отже, $\langle t_l, Pos(u_i) \rangle = \langle TP, WP \rangle_{(i,l)}$, і траєкторія БА $u_i \in U$ протягом інтервалу часу $t \in [t_l, t_m]$ може бути визначена як послідовність $[\langle TP, WP \rangle_{(i,l)} \dots \langle TP, WP \rangle_{(i,m)}]$.

Припустимо, що БА $u_i \in U$ повинен зайняти певну позицію $Pos(u_i)$ в момент часу $t_l \in T$ для виконання певної функції $\varphi_j \in \Phi$. Відзначимо, що важливо розрізняти функції, які виконуються лише один раз у певній

позиції (наприклад, вивантажити улов), від функції, які виконуються безперервно під час руху БА від однієї до іншої точки шляху (наприклад, траління).

Відповідно, кортеж (пентада)

$$\langle t_l, Pos(u_i), F_i(t_l), \varphi_j, t_j \rangle$$

встановлює, що БА $u_i \in U$ має виконувати певну функцію $\varphi_j \in \Phi$ протягом інтервалу часу $[t_l, t_j] \in T$, попередньо зайнявши позицію $Pos(u_i)$ (WP) і перебуваючи у стані $F_i(t_l)$ (FP) в момент часу $t_l \in T$ (TP).

В такому разі, послідовність

$$Tr(u_i)_l^m = \left[\langle t_l, Pos(u_i), F(u_i, t_l), \varphi_j, t_j \rangle \dots \langle t_m, Pos(u_i), F(u_i, t_m), \varphi_k, t_k \rangle \right]$$

є траєкторією активності БА $u_i \in U$ на інтервалі часу $t \in [t_l, t_m]$ що повністю визначає активність зазначеного БА на даному інтервалі часу. Він також може бути поданий у вигляді вектору

$$Tr(u_i)_l^m = \left[\langle \langle WP, TP, FP \rangle_{(i,l)}, \varphi_j, t_j \rangle \dots \langle \langle WP, TP, FP \rangle_{(i,m)}, \varphi_k, t_k \rangle \right].$$

Нехай G є множиною груп БА. Кожна група $g_q \in G$, в свою чергу, є динамічною множиною БА, оскільки в різні моменти часу $t \in T$ така група може складатися з різної кількості різних БА.

Розглянемо множину груп $g_1, \dots, g_m \in G$ та окремих БА $u_1, \dots, u_n \in U$, розсіяних у межах простору руху D задля проведення спільної операції Op з певною метою, для рибальської операції – вилов певного обсягу риби із знайдених в процесі виконання операції косяків. Просторова позиція кожної із цілей $h_p \in H$, тут може змінюватися з плином часу та може бути представлена приблизно парою $\langle t_l, Pos(h_p) \rangle$ за допомогою функції $Pos(h_p)$, яка повертає тривимірну просторову область $b_p \in D$ в межах простору руху D .

Довготривала операція Op складається з множини місій $M = \{m_1, \dots, m_n\}$, які можуть виконуватися як послідовно, так і паралельно (одночасно). Виконання певної місії $m_j \in M$ може бути призначене певному БА $u_i \in U$ або групі БА $g_q = \{u_j, \dots, u_l\} \subseteq U$.

Нехай R є множиною ролей. Місія $m_j \in M$ може призначати одну або декілька конкретних ролей певним

БА, які мають виконувати їх спільно і одночасно. Таким чином, множина призначених ролей R має охоплювати всю множину можливих місій $M = \{m_1, \dots, m_n\}$, необхідних для виконання Op . Для цього підмножині БА $u_1, \dots, u_n \in U$ призначаються відповідні ролі з множини ролей R , кожна з яких визначає спроможність певного БА виконувати ту чи іншу місію.

Отже, розглянемо БА $U_{op} = \{u_i, \dots, u_n\} \subseteq U$ відповідних класів $\{cl_k, \dots, cl_z\} \in Cl$ об'єднаних в певні групи $G_{op} = \{g_1, \dots, g_m\} \subseteq G$. Якщо БА $\{u_i, \dots, u_n\} \in U_{op}$ виконують певні місії $M_{op} = \{m_1, \dots, m_u\} \subseteq M$ з призначеними (відмінними) ролями $R_{op} = \{r_1, \dots, r_n\} \in R$ в контексті певної операції Op , то означені БА $\{u_i, \dots, u_n\} \in U_{op}$ утворюють гетерогенний (неоднорідний) ансамбль En , що може бути визначений множиною БА U_{op} та груп G_{op} , які беруть участь в ансамблі, а також множиною оперативних місій M_{op} та ролей R_{op} .

Однозначно, ансамбль En має деревоподібну структуру $Str(En)$ і форму (стрій) $Shp(En)$; остання визначає його динамічну просторову конфігурацію $V(En, t)$. Структура $Str(En)$ подає головним чином структурний аспект, тоді як форма $Shp(En)$ подає геометричний (просторовий) аспект ансамблю щодо виконуваної операції Op .

Отже, $En = \langle Op, U_{op}, G_{op}, M_{op}, R_{op}, Str(En), Shp(En) \rangle$ (рис. 1).

Якщо БА $u_k \in U_{op}$ є учасником En , він має виконувати певну послідовність призначених йому місій $M_k = [m_{k1}, \dots, m_{kn}]$ відповідно до заданих ролей $R_k = [r_{k1}, \dots, r_{kn}]$. Кожна роль $r_{kj} \in R$ в рамках місії $m_{ki} \in M$ може бути реалізована шляхом виконання певного сценарію активності Ω_{kl} (рис. 2). Зазвичай сценарій вимагає, щоб БА рухався відповідно до заданої послідовності позицій $[WP_{k1}, \dots, WP_{kp}]$ і виконував призначені дії у визначених WP/TP. Отже, траєкторія активності $Tr(u_k) \in U_{op}$ є об'єктивацією сценарію Ω_{kl} під час його виконання.

Тож сценарій певної БА-місії можна представити як бажану траєкторію його активності, що визначається послідовністю точок шляху, пов'язаних із відповідними точками часу та станом БА у відповідних точках часу, а отже, може бути подана як вектор трійок виду $\langle WP, TP, FP \rangle$. Крім того, активність має містити певні

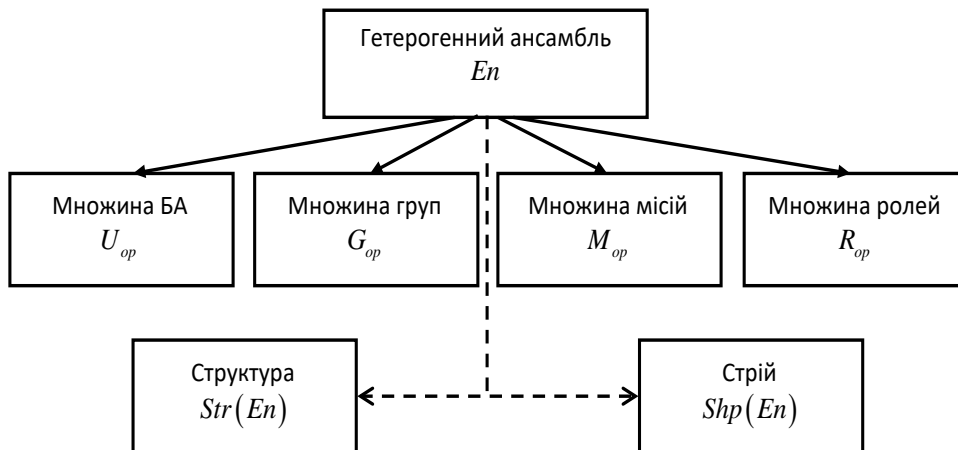


Рис. 1 – Визначення гетерогенного ансамблю БА

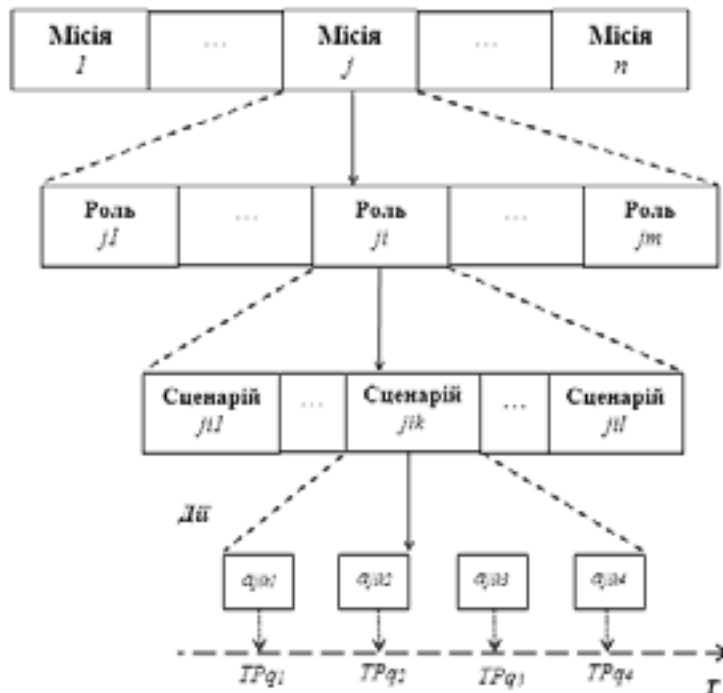


Рис. 2 – Структура складної операції

дії, пов'язані з виконанням БА конкретної функції. За сценарієм, БА $u_k \in U_{op}$ в кожній визначеній TP повинен знаходитись у відповідній точці WP , маючи певний стан FP і виконуючи певну функцію $\varphi_{hk} \in \Phi$ або множину функцій $\{\varphi_{hk}, \dots, \varphi_{sk}\} \in \Phi$.

Взаємне розташування точок шляху WP всіх задіяних у ансамблі БА $\{u_i, \dots, u_n\} \in U_{op}$ в певний момент часу $t \in T$ (або в певній точці часу TP) визначає його просторову конфігурацію $V(En, t)$. Позначимо певну пентаду, таку що $\langle t_i, Pos(u_k), F_k(t_i), \varphi_j, t_j \rangle$, через ρ_{kl} . Тоді

сценарій активності Ω_{kl} може бути поданий послідовністю пентад $\Omega_{kj} = [\rho_{ki}, \dots, \rho_{kl}]$, де $t_i < t_l$.

Розглянемо операцію в цілому. Схема операції $Sch(Op) = \{m_1, \dots, m_n\}$ містить множину місій, які мають бути призначеними певним БА $\{u_i, \dots, u_n\} \in U_{op}$, що є членами ансамблю En в контексті операції Op . Деякі місії можна виконувати паралельно, а інші послідовно, після завершення іншої місії. У свою чергу кожна місія $m_j \in M_{op}$ містить множину ролей $\{r_{j1}, \dots, r_{jm}\} \in m_j$. Певний БА може брати участь у виконанні конкретної ролі,

виходячи з відповідності його функціональних та технічних можливостей.

Далі, кожна i -та роль r_{ji} в межах певної місії m_j може бути подана множиною альтернативних сценаріїв активності $r_{ji} = \langle \Omega_{ji1} | \dots | \Omega_{ji1} \rangle$, які формують деревоподібну схему операції (рис. 3), яка може бути подана як

$$Sch(Op) = \left\{ \left\{ \langle \Omega_{111} | \dots | \Omega_{1m1} \rangle, \dots, \langle \Omega_{jm1} | \dots | \Omega_{jml} \rangle \right\}, \dots \right\},$$

$$\left\{ \left\{ \langle \Omega_{n11} | \dots | \Omega_{nml} \rangle, \dots, \langle \Omega_{nm1} | \dots | \Omega_{nml} \rangle \right\} \right\},$$

де перший індекс сценарію подає місію в рамках операції Op , другий індекс – роль в рамках цієї місії,

а третій індекс – альтернативу сценарію в рамках цієї ролі.

Множина всіх сценаріїв, які виконуються спільно та одночасно у межах схеми операції, розподіляє активність ансамблю En у просторі та часі. Очевидно, що спільна активність всіх залучених виконавців $\{u_i, \dots, u_n\} \in U_{op}$ має бути синхронізована у часі та просторі.

Структура $Str(En)$ ансамблю En залежить від його форми (строю) $Sch(Op)$, тоді як останній залежить від зміни просторових позицій усіх учасників ансамблю En та їх ролей $r_{kj} \in R_{op}$, а також від зміни місця розташування виявлених цілей $Pos(h_j, t_l)$, $h_j \in H$, $t_l \in T$.

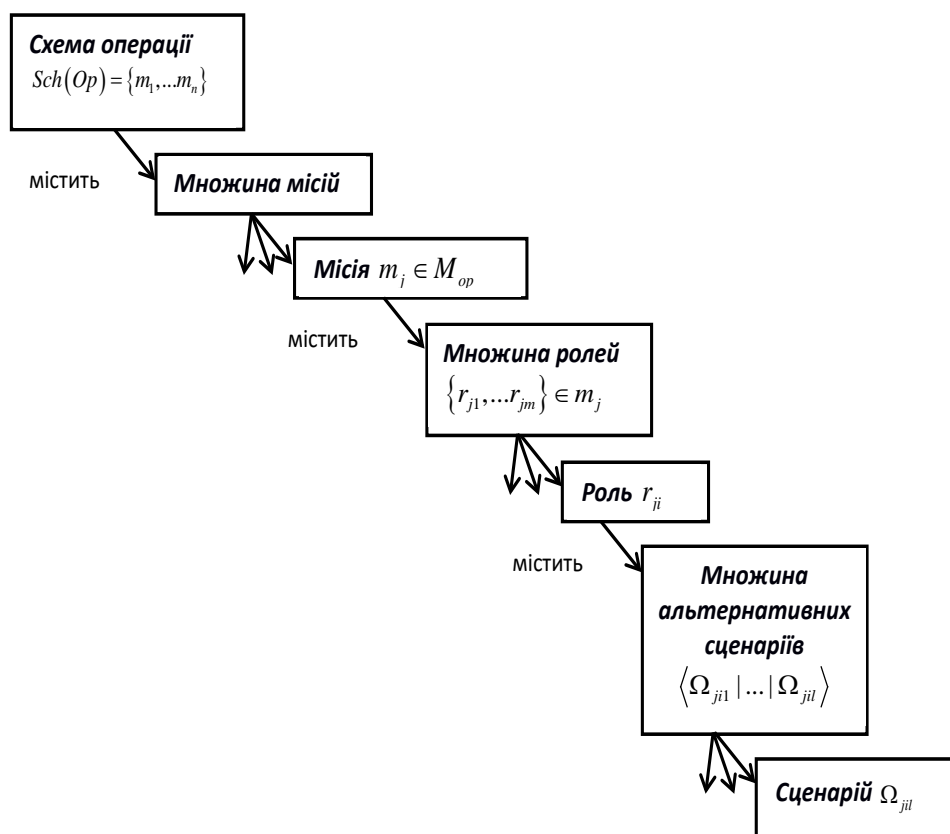


Рис. 3 – Визначення схеми операції

Отже, просторові позиції всіх учасників ансамблю En становлять його схему $Shp(En)$, яка суттєво залежить від поточної ситуації Sit , що, в свою чергу, визначається поєднанням просторового розподілу виявлених цілей та просторової конфігурації $V(En, t)$ ансамблю, стану БА, стану навколишнього середовища, заданих обмежень тощо.

Нехай існує функція $\zeta_U(U_{op}, r_{kj}) \rightarrow u_k$, що призначає задану роль $r_{kj} \in R_{op}$ найбільш релевантному БА $u_k \in U_{op}$ на основі відповідності його функціональних та технічних можливостей, та функція $\zeta_S(r_{kj}, u_k) \rightarrow \Omega_{kj}$, яка обирає релевантний сценарій Ω_{kj} , виходячи з заданої ролі $r_{kj} \in R_{op}$ та її виконавця $u_k \in U_{op}$. Ці функції мають обов'язково міститись у схемі операції.

Розглянемо питання планування місії. Для кожного БА $u_k \in En$ попередньо будується план $\dot{u} \left(\begin{smallmatrix} k \\ \end{smallmatrix} \right)$ виконання кожної чергової місії $m_j \in M_{op}$, у вигляді певного прототипу сценаріїв у контексті поточної ситуації Sit , який містить в тому числі заплановану траєкторію активності $Tr(u_k)$. У свою чергу, для кожного прототипу $Pl(M_k)$ має обиратися відповідний сценарій Ω_{kj} .

Отже, здійснення рибальської операції Op можна представляти як реалізацію певного спільного плану $Pl(Op) = Pl(m_i) \circ \dots \circ Pl(m_l)$, який складається з планів окремих місій $m_i, \dots, m_l \in M_{op}$, виконуваних БА $u_i, \dots, u_l \in U_{op}$ відповідно до своїх ролей $r_j \in R_{op}$ у ансамблі En .

Кожен план місії $Pl(m_k)$ є лише початковим, попереднім планом, який отримують як розв'язок задачі глобального планування для відповідного сценарію Ω_{kj} , який визначає послідовність точок шляху, точок часу та виконуваних функцій. Наразі, він містить лише абстрактні (формальні) значення всіх вищенаведених параметрів, а тому є прототипом плану. Як тільки формальні параметри будуть замінені фактичними параметрами, що відповідають поточній ситуації Sit , цей план буде конкретизований у конкретний сценарій активності (актуалізований) з чітко визначеною траєкторією $Tr(u_k)$. Отже, початковий план всієї операції $Pl(Op)$, а також відповідні плани місій $Pl(m_k)$ окремих БА $u_k \in En$, слід визначати виходячи із їх взаємного про-

сторового положення та позицій виявлених цілей h_j , на які мають бути націлені ці місії.

Безсумнівно, реалізація вищезазначених планів може бути порушена через збурення середовища руху. Адже, через непередбачуваність зовнішнього середовища (погодні умови, непередбачувані перешкоди тощо) БА $u_k \in En$, що виконує призначений йому сценарій Ω_{kj} , піддається впливу численних динамічних та ситуаційних збурень, тому його запланована траєкторія активності $Tr(u_k)$ може бути суттєво порушена. Очевидно, що зміна позицій будь-яких рухомих об'єктів, в тому числі БА, перешкод та цілей, призводить до необхідності зміни виконуваних планів шляхом оновлення значень їх фактичних параметрів, що, в свою чергу, призводить до реактуалізації або навіть заміни певних сценаріїв.

Отже, БА, рухаючись, мають маневрувати, уникаючи зіткнень та оминаючи перешкоди, та при цьому підтримуючи визначений стрій ансамбля $Shp(En)$, що разом є складною задачею, розв'язання якої вимагає належної реактуалізації призначеного сценарію Ω_{kj} , що призводить до необхідності частих змін плану $Pl(m_k)$ «на льоту», які можуть виконуватися шляхом заміни, додавання або видалення пентад ρ_{kl} в межах $\dot{u} \left(\begin{smallmatrix} k \\ \end{smallmatrix} \right)$.

Розглянемо приклад, стосовний операції промислового рибальства. Нехай БА u_0 і u_1 разом виконують парну місію вилову зграї риби h_1 , тягнучи знаряддя лову (сітку) назустріч руху рибної зграї. Відповідні плановані траєкторії БА u_0 і u_1 представлено на рис. 4.

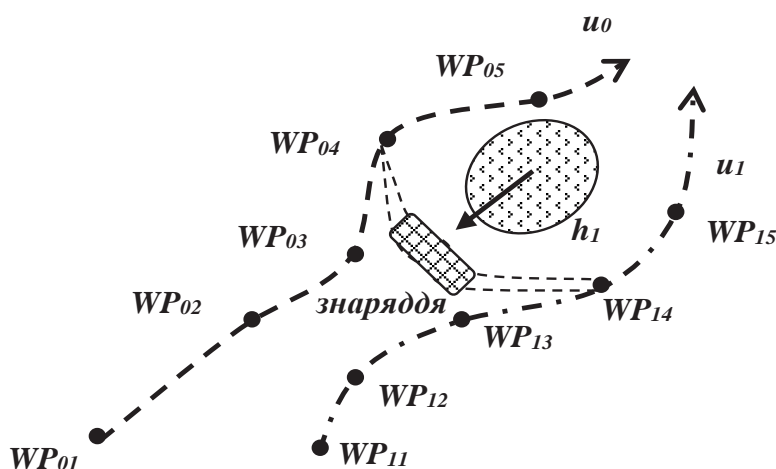


Рис. 4 – Початкова ситуація

Можливу трансформацію траєкторій руху БА u_0 і u_1 у відповідь на ситуативне збурення, спричинене непередбачуваною зміною напрямку та швидкості руху зграї h'_1 , представлено на рис. 5. Як видно, реакція на ситуацію, що сталася внаслідок збурення, здійснюється зміною точок шляху WP_{04} , WP_{05} , WP_{14} , WP_{15} у відповідності до точок часу TP_4 , TP_5 .

Будемо вважати будь-які зміни будь-яких параметрів спільного руху БА в ансамблі En подіями. Події віддзер-

калюють такі зміни траєкторії БА, що рухаються спільно і одночасно, які можуть змінювати хід процесу спільного виконання їх місій, тому потребують адекватної реакції. Кожна подія, яка виникає внаслідок збурення, спричиняє певну ситуацію Sit . Оскільки умови виконання поточного сценарію Ω_{kj} для БА $u_k \in En$ внаслідок збурення змінюються, це вимагає зміни виконуваного сценарію (тобто «перебудови» послідовності дій) задля своєчасного та адекватного реагування на цю подію.

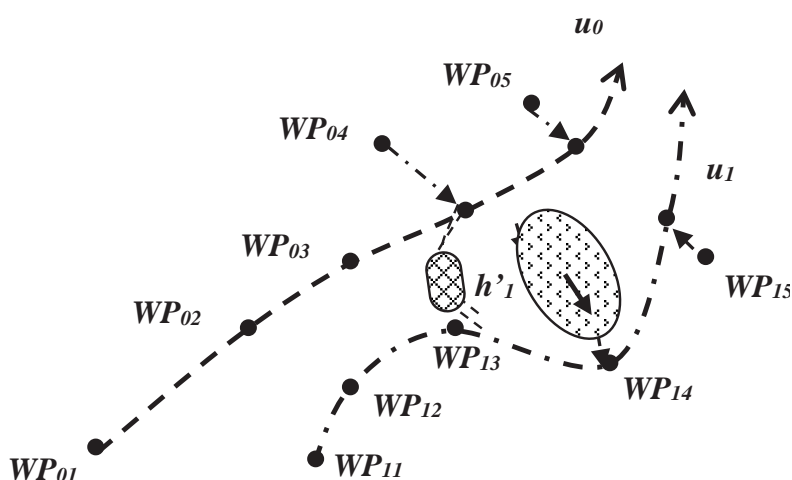


Рис. 5 – Виникнення ситуаційного збурення

Припустимо, що сценарій є певною варіабельною послідовністю дій $\Omega_{kj} = [a_{kj1}, \dots, a_{kjq}]$, де кожна дія a_{ij} розглядається як певна зміна значень параметрів руху БА (наприклад, швидкості руху або напрямку). Така реакція на подію може бути реалізована або шляхом зміни плану місії $Pl(m_k)$, або перебудови, коригування або адаптації поточного сценарію Ω_{kj} шляхом додавання, заміни або видалення певних пентад, або через пошук нового, більш релевантного сценарію Ω'_{kj} , або (за потреби) навіть через зміну форми $Str(En)$ або структури $Str(En)$ ансамблю En (рис. 6).

Оскільки подія, що виникла, може призвести до зміни умов виконання сценарію не тільки для окремого БА, але і для декількох оточуючих БА або навіть для цілої групи БА одночасно, всі вони можуть почати одночасно реагувати на подію, змінюючи свої плани та виконувані сценарії (рис. 7).

Отже, головною проблемою і викликом складної операції Op є вимушені зміни спільного руху її вико-

навців $\{u_1, \dots, u_n\} \in U_{op}$, що втілюються в одночасну зміну їх виконуваних сценаріїв $\Omega_{i1}, \dots, \Omega_{np}$. Оскільки зміни сценарію для одного з БА призводять до зміни умов виконання сценарію для інших БА, існує потреба вирішити проблему узгодження їх траєкторій активності $Tr(u_1), \dots, Tr(u_n)$ у часі та просторі, щоб, з одного боку, попередити можливість зіткнень з іншими БА, але, з іншого боку, зберегти заданий стрій всього ансамблю $Shp(En)$.

Отже, впродовж виконання операції Op основними компонентами схеми її виконання $Sch(Op)$ будуть спільні маневри певних виконавців u_1, \dots, u_l , які відображаються у відповідних сценаріях $\Omega_{i1}, \dots, \Omega_{jl}$ та повинні бути синхронізованими. Для здійснення синхронізації траєкторій $Tr(u_1), \dots, Tr(u_n)$, крім зміни плану місії, перебудови сценарію або пошуку нового сценарію, зміни форми або структури ансамблю, існує також ефективний інструмент реагування на події у вигляді зміни точок шляху у часі та просторі (рис. 8).

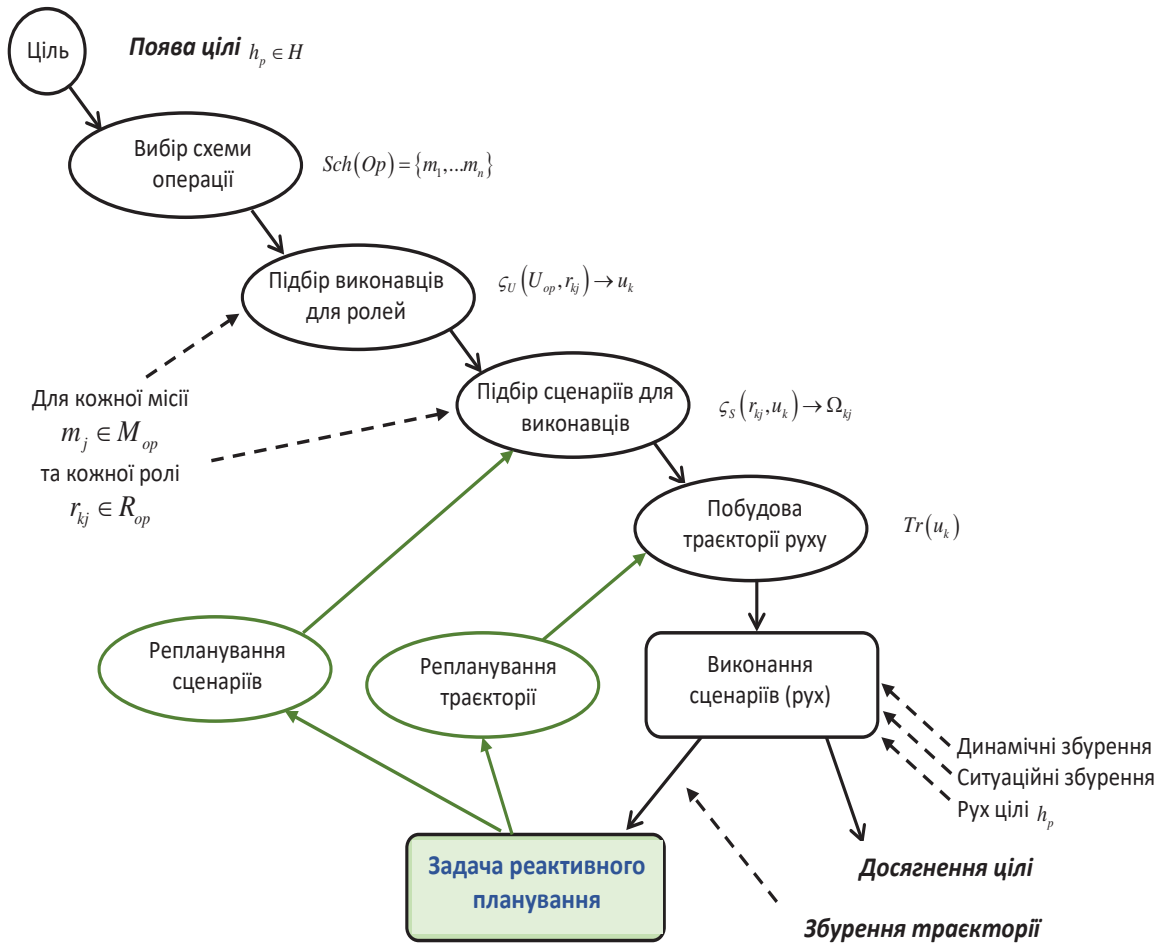


Рис. 6 – Варіанти реакції на ситуаційне збурення

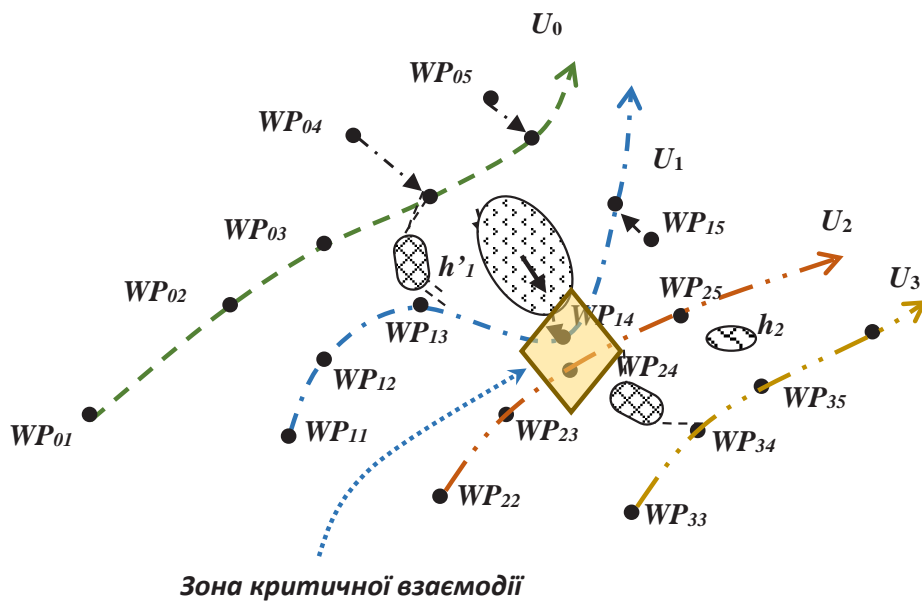


Рис. 7 – Виникнення множинного ситуаційного збурення

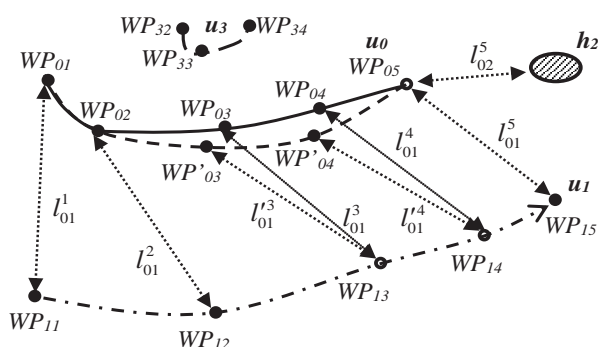


Рис. 8 – Зміни траєкторії руху

Зміна траєкторій руху БА-виконавцями $\{u_i, \dots, u_n\} \in U_{op}$ під час виконання операції Op у відповідь на ситуаційні збурення представляє собою задачу динамічного планування шляху, що відноситься до класу задач локального планування. Така задача має розв'язуватися системою управління БА у реальному часі.

Інструмент реактивного перепланування траєкторій руху пропонується у динамічному планувальнику «Вояджер», функціональну схему якого представлено на рис. 9, а структурну схему – на рис. 10.

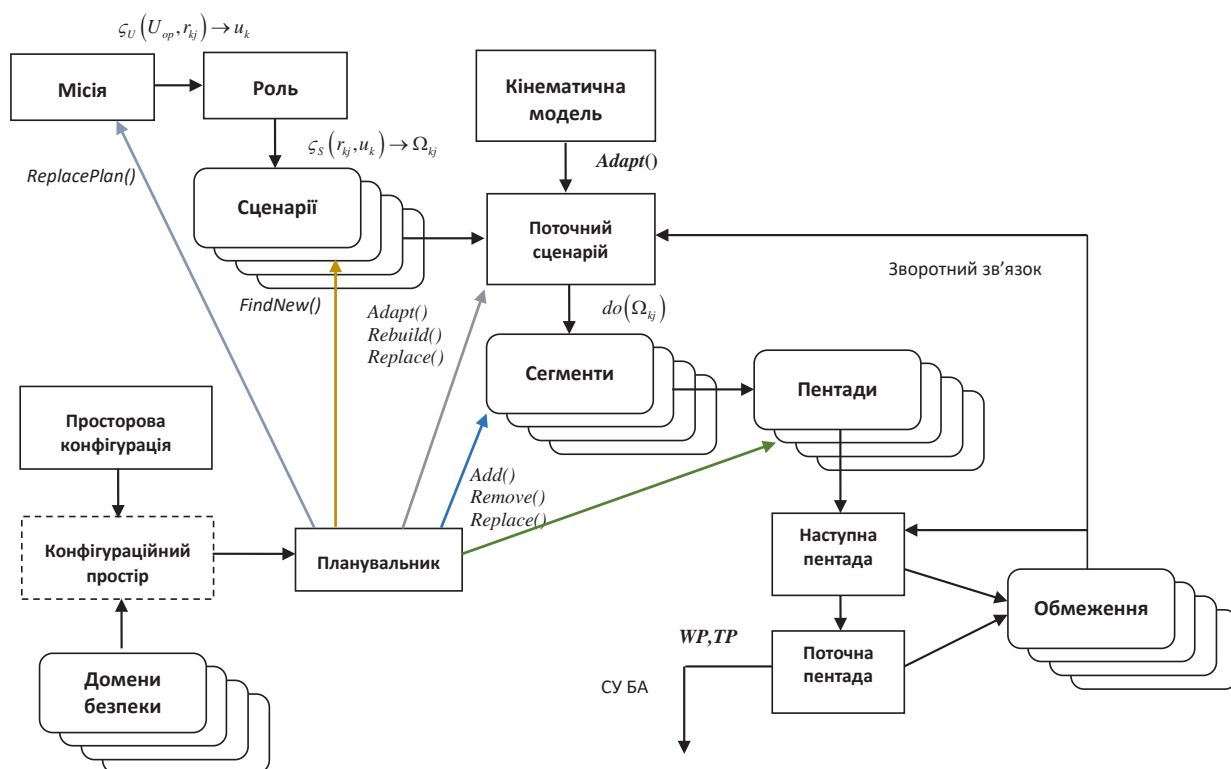


Рис. 9 – Функціональна схема планувальника траєкторій «Вояджер»

Динамічний планувальник «Вояджер» засновано на використанні гібридного методу пошуку безпечних траєкторій спільного руху та виконано у вигляді програмного модуля з використанням програмного інструментарію GNU для вбудованих процесорів ARM включно з мовою програмування C++ та відкритих програмних бібліотек ToPo та SoftTo. Розроблений програмний модуль реалізує представлений у статті підхід до динамічного планування траєкторій руху БА на основі моделі гетерогенного ансамблю безпілотних апаратів та моделі складної операції.

Динамічний планувальник «Вояджер» складається із програмної моделі конфігураційного простору, модуля визначення потенційних полів, модуля побудови коридорів руху та модуля суміщення траєкторій, які взаємодіють з процедурами, що реалізують алгоритм планування RRT. Він дозволяє змінювати план місії БА, шукати сценарій, релевантний поточній ситуації, виконувати реактуалізацію, зміну, або адаптацію поточного (виконаного) сценарію до умов виниклої ситуації, а також додавати, видаляти або замінювати

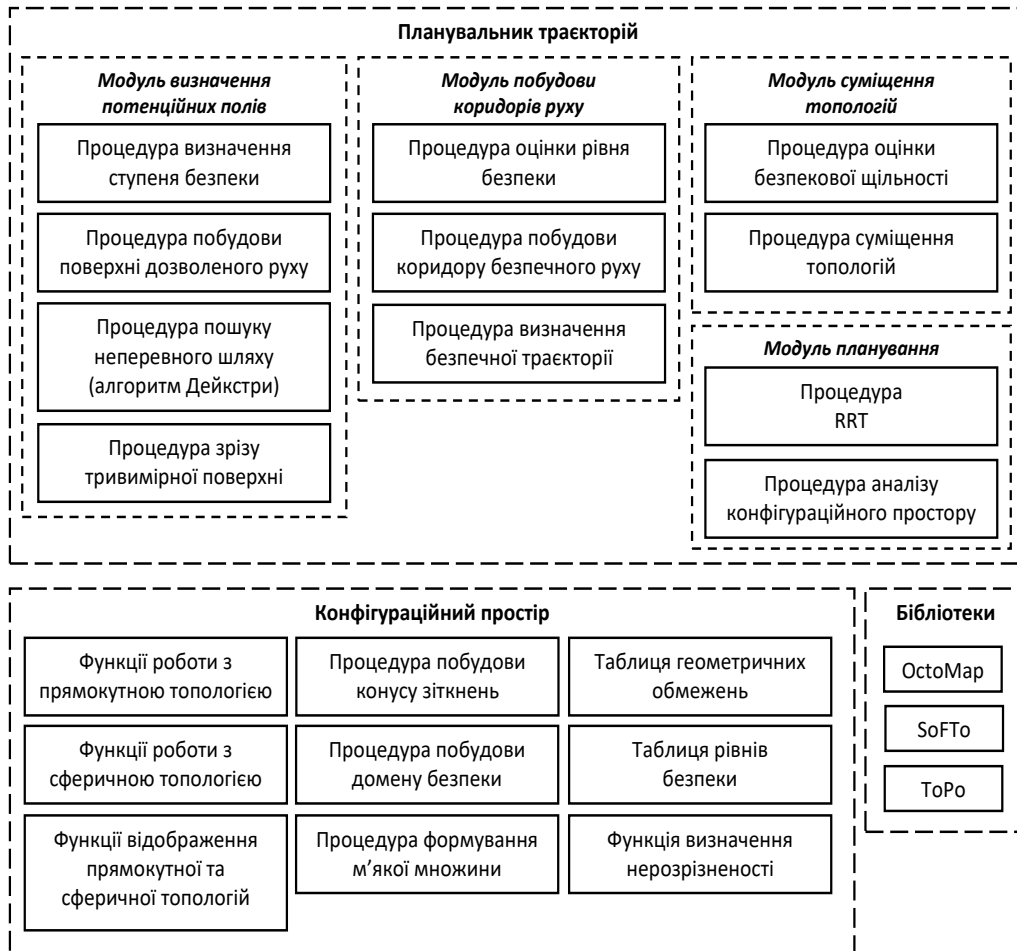


Рис. 10 – Структурна схема планувальника траєкторій «Вояджер»

сегменти шляху або пентади, що містяться в поточній траєкторії руху БА.

Програмний модуль було інтегровано до прототипу бортової системи управління, яку реалізовано на основі вбудованого мікроконтролера STM32F429 (180 МГц Cortex M4, 2 Мб Flash / 256 Кб ОЗП, QSPI Flash N25Q512). Динамічний планувальник траєкторій «Вояджер» використовує м'яку наближену модель конфігураційного простору, дозволяє визначити домени безпеки для кожного рухомого об'єкту, що спостерігається у просторі виконання операції, та будує траєкторії руху, що є адекватними умовам поточної ситуації.

Місце динамічного планувальника траєкторій «Вояджер» у бортовій системі управління БА «Бріз-М» представлено на рис. 11. Його використання у складі системи управління «Бріз-М» забезпечує продуктивність, достатню для здійснення динамічного планування безпечних траєкторій спільного руху БА у реальному часі.

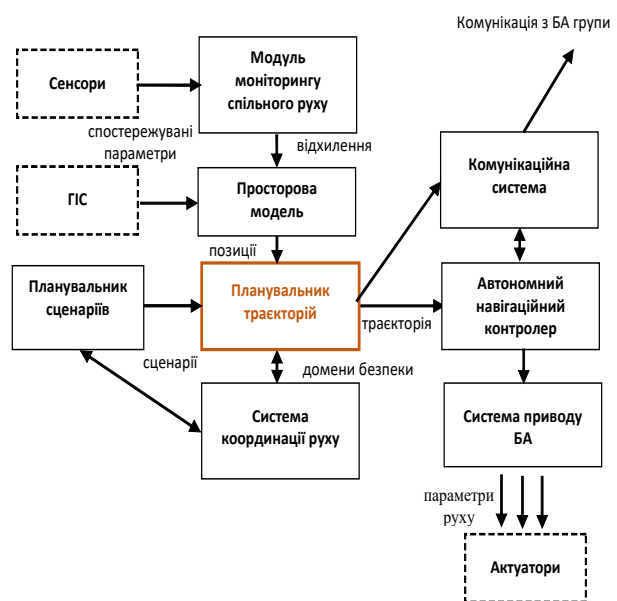
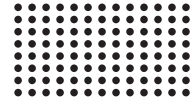


Рис. 11 – Структурна схема планувальника траєкторій «Вояджер»



Висновки. В статті розглянуто особливості керування спільним рухом великої групи безпілотних апаратів, що рухаються у тривимірному просторі взаємодії в межах різних середовищ при виконанні складних операцій з невизначеними та динамічними цілями. Запропоновано підхід до динамічного планування траєкторій руху безпілотних апаратів, заснований на інтуїтивно-евристичних методах, побудовано модель гетерогенного ансамблю безпілотних апаратів та модель складної операції, що заснована на виконанні групою автономних безпілотних апаратів спільних місій, які відповідають певним ролям, що обираються на підставі відповідності технічних

й функціональних характеристик безпілотних апаратів, та для виконання яких розробляються прототипи планів, що містять сценарії, складовими яких є траєкторії руху, визначені у дискретній багатовимірній моделі простору взаємодії. Запропонований підхід дозволяє безпілотним апаратам заміняючи, додаючи або видаляючи визначені послідовності дій у сценаріях та синхронізуючи їх у часі й просторі, маневрувати, уникаючи зіткнень і перешкод, та зберігаючи при цьому задану структурну та геометричну конфігурацію, та забезпечує продуктивність, достатню для роботи у реальному часі у складі бортової системи управління безпілотним апаратом.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Sherstjuk, V., Zharikova, M., & Sokol, I. (2018). Forest Fire-Fighting Monitoring System Based on UAV team and Remote Sensing. In *Proceedings of 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology* (pp. 99–106). <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.8477527>
2. Sherstjuk, V. (2015). Scenario-Case Coordinated Control of Heterogeneous Ensembles of Unmanned Aerial Vehicles. In *Proceedings of the 2015 IEEE 3rd International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments* (pp.275–279). <https://doi.org/10.1109/APUAVD.2015.7346620>
3. Sargolzaei, A., Abbaspour, A., Crane, C.D. (2020). Control of Cooperative Unmanned Aerial Vehicles: Review of Applications, Challenges, and Algorithms. In: Amini M. (eds) Optimization, Learning, and Control for Interdependent Complex Networks. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1123, 229–255. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34094-0_10
4. Seif, R., Oskoei, M.A. (2015). Mobile Robot Path Planning by RRT* in Dynamic Environments. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 7(5), 24–30 <https://doi.org/10.5815/ijisa.2015.05.04>
5. Patle, B.K., Babu L, G., Pandey, A., Parhi, D.R.K., Jagadeesh, A.: A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot. *Defence Technology*, 2019, 15(4), 582–606. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.04.011>
6. González, D., Pérez, J., Milanés, V., Nashashibi, F.: A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(4), 1135–1145. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2498841>
7. Kang, S., Choi, H., Kim, Y.: Formation flight and collision avoidance for multiple UAVs using concept of elastic weighting factor. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2013, 14, 75–84. <https://doi.org/10.5139/IJASS.2013.14.1.75>
8. Cruz, G.C.S., & Encarnação, P.M.M. (2012). Obstacle Avoidance for Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Intelligent Robotic Systems*, 65(1-4), 203–217. <https://doi.org/10.1007/s10846-011-9587-z>
9. Lapierre, L., Zapata, R., & Lepinay, P. (2007). Combined Path-following and Obstacle Avoidance Control of a Wheeled Robot. *International Journal of Robotics Research*, 26(4), 361–375. <https://doi.org/10.1177/0278364907076790>
10. Carvalhosa, S., Pedro Aguiar, A., & Pascoal, A. (2010). Cooperative Motion Control of Multiple Autonomous Marine Vehicles: Collision Avoidance in Dynamic Environments. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(16), 395–400. <https://doi.org/10.3182/20100906-3-IT-2010.00069>
11. Ge, S.S., Lai, X.-C., & Al Mamun, A. (2007). Sensor-based path planning for nonholonomic mobile robots subject to dynamic constraints. *Robotics and Autonomous Systems*, 55(7), 513–526. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2007.02.003>
12. Skowron, M., Chmielowiec, W., Glowacka, K., Krupa, M., & Srebro, A. (2019). Sense and avoid for small unmanned aircraft systems: Research on methods and best practices. *Journal of Aerospace Engineering*, 233(16), 6044–6062. <https://doi.org/10.1177/0954410019867802>
13. Orefice, M., Di Vito, V., & Torrano, G. (2015). Sense and Avoid: Systems and Methods. In *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, J. Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae1149>
14. Tsourveloudis, N.C., Doitsidis, L., & Valavanis, K.P. (2005). Autonomous Navigation of Unmanned Vehicles: A Fuzzy Logic Perspective. In *Cutting Edge Robotics*, IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/4654>
15. Lyu, Y., Pan, Q., Zhao, C., Yu, C., & Hu, J. (2016). A UAV Sense and Avoid System Design Method Based on Software Simulation. In *Proceedings of 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems* (pp. 572–579). <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2016.7502673>
16. Häusler, A.J., Saccon, A., Pedro Aguiar, A., Hauser, J., & Pascoal, A. (2012). Cooperative Motion Planning for Multiple Autonomous Marine Vehicles. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(27), 244–249. <https://doi.org/10.3182/20120919-3-IT-2046.00042>
17. Polvara, R., Sharma, S., Wan, J., Manning, A., & Sutton, R. (2018). Obstacle Avoidance Approaches for Autonomous Navigation of Unmanned Surface Vehicles. *Journal of Navigation*, 71(1), 241–256. <https://doi.org/10.1017/S0373463317000753>
18. Hoy, M., Matveev, A., & Savkin, A. (2015). Algorithms for Collision-Free Navigation of Mobile Robots in Complex Cluttered Environments: A Survey. *Robotica*, 33(3), 463–497. <https://doi.org/10.1017/S0263574714000289>



DYNAMIC PLANNING OF UNMANNED VEHICLES' TRAJECTORIES IN THE PROCESS OF PERFORMING COMPLEX OPERATIONS

Volodymyr Sherstiuk,

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Kherson National Technical University, Ukraine,
e-mail: vgsherstyuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-9096-2582

Ruslan Levkivlyi,

Deputy Director of
Maritime Applied College of Kherson State Maritime Academy,
ORCID 0000-0003-3114-179X

Viktor Husiev,

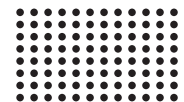
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of
Maritime Applied College of Kherson State Maritime Academy,
ORCID 0000-0001-7775-2276

Ihor Sokol,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Doctoral Student,
Kherson National Technical University,
ORCID 0000-0002-7324-1441

The paper considers the peculiarities of joint motion control of a large group of unmanned vehicles that move in three-dimensional interaction space within different environments when performing complex operations with uncertain and dynamic goals. An approach to dynamic planning of unmanned vehicles' trajectories based on intuitive-heuristic methods is proposed. A model of a heterogeneous ensemble of unmanned vehicles and a model of a complex operation based on the implementation of joint missions by a group of autonomous unmanned vehicles, which correspond to certain roles, selected on the basis of their technical and functional characteristics, and for which plsn prototypes are developed that contain scenarios, the components of which are the trajectories of motion, defined within a discrete multidimensional model of the interaction space. The novelty of the proposed approach is to solve the problem of dynamic planning of multiple trajectories of joint motion of a group of unmanned vehicles organized in heterogeneous ensembles, which allows unmanned vehicles to maneuver and avoid obstacles maintaining the specified structure and geometric configuration. through replacing, adding, or removing certain sequences of actions in scenarios and synchronizing them in time and space. The practical significance of the proposed approach is that its computational complexity is weakly dependent on the number of objects moving simultaneously, which provides sufficient performance for real-time operation in an on-board unmanned vehicle control system.

Keywords: *trajectory, mission, scenario, plan, dynamic planning, unmanned vehicle, complex operation, heterogeneous ensemble.*



ДИНАМИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ В ПРОЦЕССЕ ВЫПОЛНЕНИЯ СЛОЖНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Владимир Шерстюк,

д.т.н., профессор,

Херсонский национальный технический университет, Украина,
e-mail: vgsherstyuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-9096-2582

Руслан Левковский,

зам. начальника колледжа

Херсонской государственной морской академии
ORCID 0000-0003-3114-179X

Виктор Гусев,

к.т.н., доцент, начальник колледжа

Херсонской государственной морской академии,
ORCID 0000-0001-7775-2276

Игорь Сокол,

к.т.н., доцент, докторант,

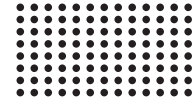
Херсонский национальный технический университет, Украина,
ORCID 0000-0002-7324-1441

В статье рассмотрены особенности управления совместным движением большой группы беспилотных аппаратов, движущихся в трехмерном пространстве взаимодействия в рамках различных сред при выполнении сложных операций с неопределенными и динамическими целями. Предложен подход к динамического планирования траекторий движения беспилотных аппаратов, основанный на интуитивно-эвристических методах. Построена модель гетерогенного ансамбля беспилотных аппаратов и модель сложной операции, основанной на выполнении группой автономных беспилотных аппаратов совместных миссий, которые соответствуют определенным ролям, выбираемых на основании соответствия технических и функциональных характеристик беспилотных аппаратов, и для выполнения которых разрабатываются прототипы планов, содержащих сценарии, составляющими которых являются траектории движения, определенные в дискретной многомерной модели пространства взаимодействия. Новизна предложенного подхода заключается в решении задачи динамического планирования множества траекторий общего движения группы беспилотных аппаратов, организованных в гетерогенные ансамбли, что позволяет беспилотным аппаратам заменяя, добавляя или удаляя определенные последовательности действий в сценариях и синхронизируя их во времени и пространстве, маневрировать, избегая столкновений и препятствий, и сохраняя при этом заданную структурную и геометрическую конфигурацию. Практическая значимость предложенного подхода заключается в том, что его вычислительная сложность слабо зависит от числа объектов, которые одновременно двигаются, что обеспечивает производительность, достаточную для работы в реальном времени в составе бортовой системы управления беспилотным аппаратом.

Ключевые слова: траектория движения, миссия, сценарий, план, динамическое планирование, беспилотный аппарат, сложная операция, гетерогенный ансамбль.

REFERENCES:

1. Sherstjuk, V., Zharikova, M., & Sokol, I. (2018). Forest Fire-Fighting Monitoring System Based on UAV team and Remote Sensing. In Proceedings of 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (pp. 99–106). <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.8477527>
2. Sherstjuk, V. (2015). Scenario-Case Coordinated Control of Heterogeneous Ensembles of Unmanned Aerial Vehicles. In *Proceedings of the 2015 IEEE 3rd International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments* (pp.275–279). <https://doi.org/10.1109/APUAVD.2015.7346620>



3. Sargolzaei, A., Abbaspour, A., Crane, C.D. (2020). Control of Cooperative Unmanned Aerial Vehicles: Review of Applications, Challenges, and Algorithms. In: Amini M. (eds) Optimization, Learning, and Control for Interdependent Complex Networks. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1123, 229–255. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34094-0_10
4. Seif, R., Oskoei, M.A. (2015). Mobile Robot Path Planning by RRT* in Dynamic Environments. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 7(5), 24–30 <https://doi.org/10.5815/ijisa.2015.05.04>
5. Patle, B.K., Babu L, G., Pandey, A., Parhi, D.R.K., Jagadeesh, A.: A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot. *Defence Technology*, 2019, 15(4), 582–606. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.04.011>
6. González, D., Pérez, J., Milanés, V., Nashashibi, F.: A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(4), 1135–1145. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2498841>
7. Kang, S., Choi, H., Kim, Y.: Formation flight and collision avoidance for multiple UAVs using concept of elastic weighting factor. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2013, 14, 75–84. <https://doi.org/10.5139/IJASS.2013.14.1.75>
8. Cruz, G.C.S., & Encarnação, P.M.M. (2012). Obstacle Avoidance for Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Intelligent Robotic Systems*, 65(1-4), 203–217. <https://doi.org/10.1007/s10846-011-9587-z>
9. Lapiere, L., Zapata, R., & Lepinay, P. (2007). Combined Path-following and Obstacle Avoidance Control of a Wheeled Robot. *International Journal of Robotics Research*, 26(4), 361–375. <https://doi.org/10.1177/0278364907076790>
10. Carvalhosa, S., Pedro Aguiar, A., & Pascoal, A. (2010). Cooperative Motion Control of Multiple Autonomous Marine Vehicles: Collision Avoidance in Dynamic Environments. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(16), 395–400. <https://doi.org/10.3182/20100906-3-IT-2019.00069>
11. Ge, S.S., Lai, X.-C., & Al Mamun, A. (2007). Sensor-based path planning for nonholonomic mobile robots subject to dynamic constraints. *Robotics and Autonomous Systems*, 55(7), 513–526. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2007.02.003>
12. Skowron, M., Chmielowiec, W., Glowacka, K., Krupa, M., & Srebro, A. (2019). Sense and avoid for small unmanned aircraft systems: Research on methods and best practices. *Journal of Aerospace engineering*, 233(16), 6044–6062. <https://doi.org/10.1177/0954410019867802>
13. Orefice, M., Di Vito, V., & Torrano, G. (2015). Sense and Avoid: Systems and Methods. In *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, J. Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae1149>
14. Tsourveloudis, N.C., Doitsidis, L., & Valavanis, K.P. (2005). Autonomous Navigation of Unmanned Vehicles: A Fuzzy Logic Perspective. In *Cutting Edge Robotics*, IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/4654>
15. Lyu, Y., Pan, Q., Zhao, C., Yu, C., & Hu, J. (2016). A UAV Sense and Avoid System Design Method Based on Software Simulation. In *Proceedings of 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems* (pp. 572–579). <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2016.7502673>
16. Häusler, A.J., Saccon, A., Pedro Aguiar, A., Hauser, J., & Pascoal, A. (2012). Cooperative Motion Planning for Multiple Autonomous Marine Vehicles. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(27), 244–249. <https://doi.org/10.3182/20120919-3-IT-2046.00042>
17. Polvara, R., Sharma, S., Wan, J., Manning, A., & Sutton, R. (2018). Obstacle Avoidance Approaches for Autonomous Navigation of Unmanned Surface Vehicles. *Journal of Navigation*, 71(1), 241–256. <https://doi.org/10.1017/S0373463317000753>
18. Hoy, M., Matveev, A., & Savkin, A. (2015). Algorithms for Collision-Free Navigation of Mobile Robots in Complex Cluttered Environments: A Survey. *Robotica*, 33(3), 463–497. <https://doi.org/10.1017/S0263574714000289>