

# РОЗПОДІЛЕНІ МОДЕЛІ СИНХРОНІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ СТРУКТУР АНСАМБЛЮ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ

УДК 004.9

---

DOI: <https://doi.org/10.35546/2313-0687.2019.26.7-20>

---

**Володимир Шерстюк,**

д.т.н., професор,

Херсонський національний технічний університет, Україна,

**E-mail:** [vgsherstyuk@gmail.com](mailto:vgsherstyuk@gmail.com), ORCID 0000-0002-9096-2582

**Ігор Сокол,**

к.т.н., доцент, докторант,

Херсонський національний технічний університет, Україна,

ORCID 0000-0002-7324-1441

**Віктор Гусєв,**

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

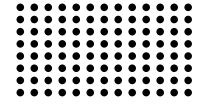
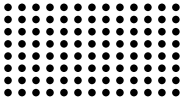
ORCID 0000-0001-7775-2276

**Руслан Левківський,**

заст. начальника коледжу Херсонської державної морської академії

ORCID 0000-0003-3114-179X

**Анотація.** У статті розглянуто актуальне питання дослідження та розробки методів координації для великих груп інтелектуальних безпілотних апаратів, що виконують спільні місії у гетерогенних ансамблях. Для управління ансамблем безпілотних апаратів використано сценарно-прецедентний підхід, що надає можливість використання ретроспективних шаблонів прийняття рішень у проблемних ситуаціях, які розглядаються як динамічні прецеденти, що містять опис прийнятних рішень у вигляді сукупності сценаріїв активності, адаптивних до змінних умов зовнішнього середовища. Цей підхід може бути використаний для координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів за умови наявності достатньої множини прецедентів, необхідних для прийняття рішень при виникненні ситуацій різних можливих класів (компетентності) та синхронізації сховищ прецедентів кожного з безпілотних апаратів. Для вирішення задач синхронізації сховищ прецедентів запропоновано модель розподіленого сховища прецедентів та модель розподіленого спільного простору спостережень. Сховище прецедентів подано як ієрархічно організовану структуру, в якій певні розподілені розділи просторово пов'язані на основі геоінформаційної системи. Доступ до всіх служб забезпечується через Інтернет-з'єднання та спеціальні хмарні шлюзи. Сховище прецедентів може надавати множину прецедентів, доречних до контексту проблемної ситуації, як безпосередньо на вимогу безпілотного апарата, так і через використання механізмів передзамовлення, реакції на вхід до спільного простору та інших методів обробки запитів із використанням XML. Модель розподіленого спільного простору спостережень подано у вигляді тривимірної розподіленої дошки, доступної



кожному з безпілотних апаратів через механізм обміну координаційними примітивами. Визначено набір координаційних примітивів, що забезпечують прозорість та надійність спільних спостережень групи безпілотних апаратів. Новизна запропонованого підходу полягає у розробці інформаційно розподілених моделей віртуального сховища прецедентів та спільного віртуального простору спостережень. Запропоновані моделі мають порівняно невисоку обчислювальну складність, що забезпечує функціонування системи управління в реальному часі. Практична значимість запропонованих моделей полягає в тому, що вони забезпечують можливість координації безпілотних апаратів у гетерогенних ансамблях під час виконання спільних місій в умовах значних обмежень за часом, неповноти та невизначеності інформації через обмін інформацією в розподілених інформаційних структурах.

**Ключові слова:** прецедент, компетентність, сховище прецедентів, координація, синхронізація, простір взаємодії, безпілотний апарат.

**Постановка проблеми.** Епіцентром сучасних досліджень є складні технічні системи, що містять групи пілотованих та безпілотних апаратів (БА), які спільно виконують певні визначені програми (місії). Завдяки суттєвому технологічному прогресу безпілотники можуть використовуватись великими і навіть надвеликими групами, що є особливо актуальним для вирішення різних задач, небезпечних для життя та/або здоров'я людини, наприклад, задач спостереження, пошуку і порятунку, запобігання та локалізації надзвичайних ситуацій, а також широкого кола військових задач. Така група апаратів може включати наземні, повітряні, надводні, підводні та інші види безпілотників. Наразі, чисельна група безпілотних апаратів може розглядатися як упорядкований набір БА, які спільно і одночасно виконують свої сценарії активності в рамках даної місії для досягнення певної загальної мети, виконуючи при цьому різні ролі й функції. Враховуючи різноманіття функцій, завдань та ролей різних БА в групі, такі групи прийнято називати різнорідними ансамблями [1].

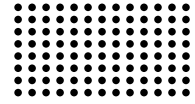
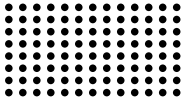
Наразі існує чимало практичних застосувань, які можуть бути вирішені гетерогенними ансамблями безпілотників, що мають різний розмір, можливості, ролі та навіть середовище руху, але використовуються разом із спільною метою [2]. Одним із таких застосувань є інтелектуальне рибальство (смарт-рибальство), де до виконання місій може залучатися широкий спектр БА різного призначення в межах своєї компетенції. Наприклад, безпілотні літальні апарати можуть залучатися як поодиночі, так і групами до пошуку рибних зграй. Безпілотні підводні апарати поодиночі або групами можуть за допомогою сенсорів ефективно розпізнавати види (породи) риб та їх чисельність у зграях, оцінюючи доцільність їх вилову. Підводні БА мають і інше групове використання – вони

можуть заганяти рибні зграї до риболовних знарядь. Носіями цих рибальських знарядь можуть бути надводні БА, які також можуть використовуватись поодиночі, попарно або групами. А носієм усіх вищезазначених безпілотників та одночасно накопичувачем виловленої риби може бути великий корабель, який може обслуговуватись командою або також може бути безпілотним.

Звичайно, що для виконання вищезазначених місій не підходять прості БА, що керуються дистанційно операторами, адже задачею є навпаки, вивести людину за межі небезпечних процесів. Отже, БА повинні бути автономними, мати можливість приймати власні рішення в динамічному, частково спостережуваному та непередбачуваному середовищі, тому вони стають дедалі розумнішими за рахунок впровадження інтелектуальних можливостей в їх системи управління.

З іншого боку, спільне виконання взаємопов'язаних місій вимагає чіткої координації. Зрозуміло, що чим складнішими є структура та функції ансамблю БА, тим складнішою є задача їх координації. Проте, розробка та практичне застосування надійних методів координації для автономних інтелектуальних БА у великих ансамблях на даний час ще відпрацьовані недостатньо, отже, їх дослідження є актуальною та перспективною задачею. Найактуальнішим питанням на сьогодні є забезпечення можливості співпраці БА у гетерогенних ансамблях через обмін інформацією у реальному часі в умовах значних обмежень у часі, неповноти та невизначеності інформації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Виконуючі місії в рамках спільної задачі ансамблю, БА повинні мати можливість спілкуватися, координуватися та співпрацювати один з одним. На цей час існує достатньо багато підходів до управління великими



групами БА, у той же час перелік задач координації та співпраці БА в ансамблі є значно ширшим та багаторівневим, починаючи від задачі уникнення зіткнень аж до задачі розподіленого планування [3]. Традиційно для координації групових дій БА використовують біоінспіровані методи, засновані на поведінці рою чи зграї [4]. Однак у багатьох випадках використання групи БА як рою (зграї) є надмірно дорогим рішенням, особливо при виконанні складних, довгострокових та багатокрокових місій. Більшість дослідників вирішували конкретні задачі координації роїв за допомогою простих наборів правил, що імітують поведінку в природних системах [5; 6].

У більш складній формі координація та співпраця БА вимагають наявності певної системи нормативних правил та процедур. Для цього запропоновано декілька підходів, заснованих на моделях і правилах, а також на алгоритмічних методах виконання процедур взаємодії [7]. Однак, складність процесів взаємодії БА у ансамблях не дозволяє використовувати безпосередньо підхід, заснований на моделях, у той час як побудувати вичерпну множину правил координації та відтестувати їх при виконанні реальних місій практично неможливо. Отже, використання підходів, заснованих на моделях або правилах, в системах реального часу є неприйнятним [8]. Використання розподілених систем правил хоча й дозволяє детально описувати та аналізувати поведінку певної групи БА, дуже важко пристосувати їх до вирішення реальних проблем навігації та взаємодії за складних умов [9].

Графові структури [10] теж іноді використовуються для подання принципів взаємодії, вони дозволяють значно спрощувати систему правил, подаючи взаємодії у вигляді графів або віртуальних структур, вершинами яких є БА, а ребрами – взаємозв'язки між ними. Однак, через високу обчислювальну складність при використанні такого підходу майже неможливо гарантувати достатню продуктивність для роботи в реальному часі [11]. Інші можливі методи спрощення системи правил взаємодії, такі як гібридизація, абстракція, логіка часу, також є нелінійними, а тому також є схильними до цього недоліку [12].

Подолати труднощі щодо обчислювальної складності можливо за використання прецедентного підходу [13], де час пошуку рішення практично не залежить від чисельності динамічних об'єктів у описі навігаційної ситуації.

Проте, цей підхід має свої недоліки, найбільш суттєвими з них є залежність часу пошуку рішення від обсягу накопиченого масиву прецедентів та необхідність підтримання достатньої компетентності масиву прецедентів відносно вичерпної множини можливих ситуацій.

Сценарно-прецедентний підхід дозволяє подавати взаємодію між БА у вигляді сценаріїв активності, що дозволяє його використання для координованого контролю різнорідних ансамблів БА [14]. На відміну від класичного прецедентного підходу, що ґрунтується на наявності ретроспективних описів фактів прийняття певних рішень у певних ситуаціях, поданих у вигляді статичних (незмінюваних) прецедентів [14; 15], сценарно-прецедентний підхід надає можливість розглядати прецеденти у динаміці, подаючи як описи ситуацій, так і описи прийнятих рішень у вигляді сценаріїв активності [16]. Подолання недоліків прецедентного підходу можливе також за рахунок певної гібридизації з підходами, заснованими на правилах та на моделях, що дозволяє подолати обчислювальну складність та забезпечити працездатність у реальному часі [17].

Сценарно-прецедентний підхід базується на наступних припущеннях:

- активність взаємодії БА є повторюваною і відтворюваною;
- існують певні стереотипи координації БА у подібних ситуаціях;
- взаємодії БА можуть бути подані у формі сценаріїв.

Таким чином, активність взаємодії БА може бути подана у вигляді певних шаблонів (прецедентів), які можуть бути адаптовані до змінних умов зовнішнього середовища за допомогою сценаріїв. Отже, цей підхід надає можливість накопичення зразків групової взаємодії для різних класів ситуацій, тому може бути використаний для вирішення задач координації ансамблю БА. Шаблони взаємодії мають накопичуватися у сховищі прецедентів (СП) у вигляді прецедентів, що містять опис ситуації (умову) та опис рішення (множину сценаріїв, що мають відтворюватися у ситуації даного класу).

Найважливішими умовами успішного застосування сценарно-прецедентного підходу для вирішення задач координації БА у гетерогенних ансамблях БА є:

- наявність достатньої множини прецедентів, необхідних для прийняття рішень при виникненні ситуацій різних можливих класів;

– синхронізація прецедентів, доступних кожному з БА, щодо часу та змісту.

Перша умова фактично вимагає наявності достатньої компетенції СП для пошуку підходящого прецеденту та вибору релевантної множини сценаріїв, а друга умова вимагає еквівалентності СП, що є доступними різним БА, які входять до ансамблю. Оскільки від виконання цих умов залежить успішність вирішення задачі координації, в цій статті розглянемо шляхи забезпечення виконання вищезазначених умов.

**Мета дослідження.** Зазвичай спільна активність БА у ансамблі суттєво обмежується простором взаємодії, обмеженнями щодо позиційної та функціональної структури, прийнятими нормативними правилами та реакцією зовнішнього середовища, що породжує множини динамічних, навігаційних та ситуативних збурень. В таких умовах спільна активність БА потребує належної координації виконуваних ними сценаріїв, і саме координація сценаріїв активності лежить в основі нашого подальшого розгляду [18].

Зрозуміло, що прийнятний рівень компетентності СП є аж надто важливим для забезпечення функціонування сценарно-прецедентної системи, що координує ансамбль БА. Однак, обсяг наявної пам'яті в системах управління БА, зазвичай, є обмеженим. Це зменшує потужність множини прецедентів, що можуть зберігатися там одночасно, та обмежує компетенцію СП. Метою даної роботи є розробка ієрархічного розподіленого сховища прецедентів для сценарно-прецедентної системи координації активності, яка зможе належним чином працювати в неоднорідному ансамблі БА та забезпечувати необхідну продуктивність для роботи в режимі реального часу.

**Виклад матеріалу дослідження.** Нехай  $s(t)$  – проблемна ситуація, опис якої подано просторовою конфігурацією [17], в якій кожен БА може бути представлений як кортеж  $\langle Pos(A_i, t_j), \varphi_k \rangle$ , де  $A_i \in i$ -м БА ансамблю,  $t_j$  – це час,  $Pos(A_i, t_j)$  – позиція  $A_i$  на час  $t_j$ , і  $\varphi_k$  – функція, яку виконує  $A_i$  на час  $t_j$ . Припустимо, що певний прототип  $e_{s(t)}$  може бути використаний для прийняття рішень у проблемній ситуації  $s(t)$  у якості прецедента. Отже, прецедент  $e_{s(t)}$  має містити певне рішення  $r_{s(t)}$ , яке може бути подане у вигляді сценарію активності  $\Sigma_{s(t)}$  або послідовності сценаріїв

(плану)  $Pl_{s(t)} = [\Sigma_{s(t)}^1, \dots, \Sigma_{s(t)}^m]$  для прийняття рішень у разі впливу  $m$  ситуативних збурень, що діють одночасно або перетинаються в часі. Вочевидь, для кожної проблемної ситуації  $s(t)$  може існувати безліч прецедентів  $E_{s(t)} = \{e_{s(t)}^1, \dots, e_{s(t)}^n\}$ , що пропонують різні прототиби рішень  $R = \{r_{s(t)}^1, \dots, r_{s(t)}^n\}$  для досягнення певної мети  $G_{s(t)}$ , які можуть відрізнятися відповідністю критеріям контролю  $Q_{s(t)}$ , дотримання обмежень  $B_{s(t)}$ , та оцінкою можливості  $\mu$  досягнення цільового стану  $G_{s(t)}$ . Отже, завданням сценарно-прецедентної системи є підбір найбільш релевантного прототипу рішення з множини  $R$  на основі певної функції уподобань  $\gamma(R)$ , беручи до уваги  $B_{s(t)}$ ,  $Q_{s(t)}$  і  $\mu(G_{s(t)})$ . Адаптація прецеденту  $e_{s(t)}$  до умов, які склалися на момент часу  $t$ , вимагає, щоб сценарій  $\Sigma_{s(t)}$  (або послідовність сценаріїв  $[\Sigma_{s(t)}^1, \dots, \Sigma_{s(t)}^m]$ ) була узгодженою з множиною накладених обмежень  $B_{s(t)}$  та контекстом  $Ctx(s(t))$  ситуації. У випадку взаємодії групи БА ансамблю, план  $Pl_{s(t)}$  має складатися з множини послідовностей сценаріїв  $\left\{ [\Sigma_{s(t)}^1, \dots, \Sigma_{s(t)}^m]_1, \dots, [\Sigma_{s(t)}^1, \dots, \Sigma_{s(t)}^m]_n \right\}$  для кожного з  $n$  БА ансамблю. Отже, сценарно-прецедентний підхід використовує сценарії активності у якості певного інструменту адаптації прототипу (прецеденту) до динаміки середовища, що спричиняє певну проблемну ситуацію.

**Структура прецедентів та організація сховища прецедентів.** У випадку виявлення проблемної ситуації  $s(t)$  для того, щоб прийняти рішення відповідно до накопиченого досвіду, необхідно знайти подібну ситуацію в минулому.

Доступні ситуації можуть бути подані множиною прецедентів (сховищем прецедентів):

$$\mathcal{M} = \{ \langle s_1, r_1 \rangle, \langle s_2, r_2 \rangle, \dots, \langle s_n, r_n \rangle \}. \quad (1)$$

Рішення  $r$  певного прецеденту  $e = \langle s, r \rangle$  – це заздалегідь визначений план взаємодії  $Pl$ , що містить множини релевантних сценаріїв активності  $\Sigma = \{ \Sigma_1, \dots, \Sigma_k \}$ . Однією з головних вимог до сценарно-прецедентної системи, що працює в реальному часі, є своєчасне і належне виконання пошуку доречних рішень. Очевидно, що поки система збирає та записує інформацію на деякому кроці  $t_{k+1}$ , вона одночасно має

оцінювати ситуацію на момент  $t_k$  і, якщо необхідно, корегувати сценарій активності, знайти відповідний прецедент, запропонувати адекватні керуючі дії, які впливають на траєкторію руху БА та виконувати ним дії. Залежно від швидкості БА, різниця  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$  може бути дуже малою.

Очевидно, що структура СП повинна відображати послідовність пошукових операцій, які будуть виконуватися системою щодо пошуку можливих рішень у проблемній ситуації. Виходячи з такої послідовності, зручно виділити низку контекстів рішень в основі структури прецедента, яка, з одного боку, надасть можливість для більш компактного зберігання та індексації прецедентів, а з іншого боку, значно спростить пошук таких ситуацій шляхом послідовного уточнення контекстів.

Ми будемо використовувати наступну вкладену послідовність контекстів:

$$s = \langle S^{SP}, \langle S^M, \langle S^{CTZ}, \langle S^{STR}, \langle S^D \rangle \rangle \rangle \rangle, \quad (2)$$

де  $S^{SP}$  – просторовий контекст, що визначається взаємним розташуванням БА у просторі взаємодії та описом множини наявних перешкод;

$S^M$  – контекст середовища, що визначається значеннями його параметрів;

$S^{CTZ}$  – безпековий контекст, що визначається домеданами безпеки та відповідними лінійними та часовими нормами і метриками;

$S^{STR}$  – структурний контекст, що описується взаємним розташуванням об'єктів (конфігурацією) відповідно до передбачуваних структури і складу ансамблю;

$S^D$  – це динамічна сцена, яка описує розвиток проблемної ситуації в часі і може бути подана у вигляді спостережуваних потоків подій (рис. 1).

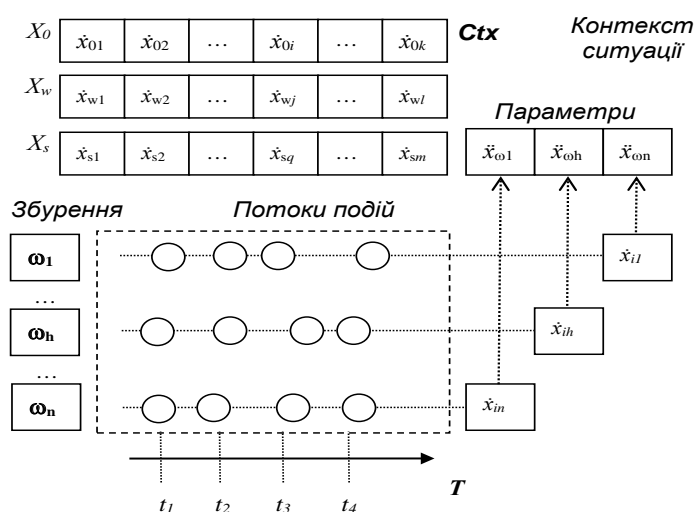


Рис. 1 – Подання прецедента як проблемної ситуації  $S(t)$  за допомогою контексту  $Ctx$  та множини потоків подій  $\omega_1, \dots, \omega_m, x_j$  – параметри активності  $i$ -го БА на моменту часу  $t_i$

Таким чином, ми можемо використовувати контекст ситуації для структурування СП та кластеризації накопичених прецедентів [14] (рис. 2).

Вкладений контекст ситуації може бути визначений за послідовністю  $\langle S^{SP}, \langle S^M, \langle S^{CTZ}, \langle S^{STR} \rangle \rangle \rangle$ , в той час як опис ситуації може безпосередньо відповідати динамічній сцені  $S^D$ . Отже, запропонована структура прецедента дозволяє організувати ефективне СП та швидко здійснити пошук подібних ситуацій на основі наступної послідовності критеріїв:

- подібність просторового контексту;
- подібність екологічного контексту;
- подібність безпекового контексту;
- подібність структурного контексту;
- подібність динамічної сцени (щодо раніше виявленої подібності контекстів).

Метою кластеризації СП є звуження простору пошуку, щоб виключити з пошуку ті прецеденти, контекст яких не відповідає контексту проблемної ситуації. Кластеризація СП виконується для кожного контексту ситуації окремо і незалежно. Для здійснення такої кластеризації

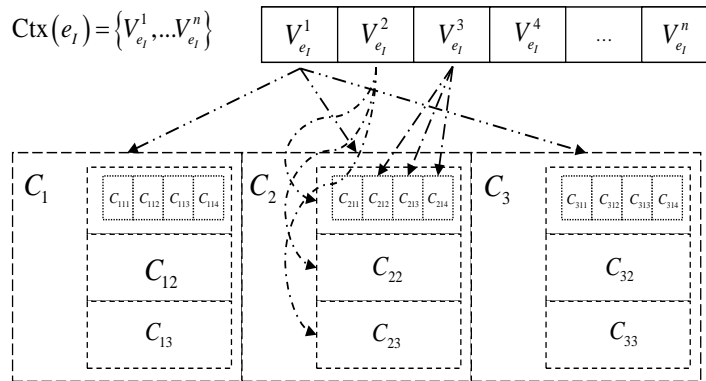
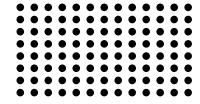
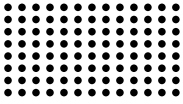


Рис. 2 – Знаходження кластерів  $C_i$  та підкластерів  $C_{ijk}$  сховища прецедентів за множиною параметрів  $\{V_1, \dots, V_n\}$  контексту ситуації  $Ctx$

може бути застосовано підхід, запропонований в [15], що заснований на використанні грубих нечітких множин та відношення нерозрізненості.

**Оцінка компетентності справи.** Ключовим фактором забезпечення ефективності та надійності процедур координації є наявність рівня компетентності СП, достатнього для прийняття рішень у конкретній проблемній ситуації. Після виявлення проблемної ситуації та формування відповідного рішення на основі множини наявних прецедентів, відповідна інформація упаковується до нового сформованого прецедента та зберігається у СП  $\mathcal{M}$ .

Множина компетентності  $\varepsilon$  може бути визначена як множина ситуацій, щодо яких система може генерувати рішення, використовуючи накопичену множину прецедентів. Рівень глобальної компетентності системи на основі прецедентів  $\varepsilon \in$  відношенням потужності множини компетентності  $\varepsilon$  до потужності множини можливих ситуацій  $S: \varepsilon = |\varepsilon|/|S|$ . Оскільки потужність множини можливих ситуацій, як правило, є апіорі невідомою, ми можемо використовувати оцінки компетентності у вигляді  $\varepsilon$ -покриття або  $\varepsilon$ -доступності [15]. Локальна компетентність щодо кожного класу контексту визначається аналогічно як відношення потужності сукупності прецедентів, які задовольняють умовам даного контексту  $S^i$ , до потужності множини всіх можливих ситуацій  $S: \varepsilon_i = |S^i|/|S|$ .

**Модель розподіленого сховища справ.** Традиційно в сценарно-прецедентних системах компетентність набувається шляхом накопичення прецедентів, які зберігаються щоразу, коли приймається рішення в поточній проблемній ситуації. Однак, цей підхід є не

завжди прийнятним щодо координації великих груп БА, які зазвичай змінюють свій стан у процесі активності, так що їх активність змінює їх стан з ситуації  $s_i$  до іншої ситуації  $s_j$ . Зрозуміло, що набута компетентність  $\varepsilon_i \in s_i$  зазвичай не застосовується в ситуації  $s_j$ , тим паче у початковий момент її розвитку  $\varepsilon_j = \emptyset$ .

Теоретично, зберігаючи та накопичуючи прецеденти для кожної ситуації  $s_i$ , можна досягти необхідного рівня компетентності СП  $\varepsilon_i$  (якщо, звичайно, БА потрапляє в ситуації класу  $s_i$  статистично досить часто). Проте, через різницю умов контекстів ситуацій, оскільки час накопичення належної кількості прецедентів для певного класу ситуацій значно перевищує час, за який БА потрапляє в таку ситуацію, прийняття обґрунтованих рішень є технічно неможливим.

Рішення цієї проблеми залежить від наступних факторів:

- якими є джерела компетентності на основі прецедентів;
- яким чином компетентність накопичується з цих джерел;
- якими є вимоги до пам'яті для забезпечення зберігання компетентцій.

Принципово, наступні джерела можна розглядати як компетентні:

- накопичення досвіду управління БА оператором (експертом);
- спостереження та моніторинг активності БА;
- самонавчання сховища прецедентів за допомогою методів машинного навчання;
- залучення доречних фрагментів СП більш високого рівня (щодо БА).

Останнє джерело має бути зовнішнім для БА і найважливішим. Оскільки на сьогоднішній день високошвидкісні канали зв'язку та хмарні технології є широко поширеними, є можливість створити децентралізоване ієрархічне сховище прецедентів (РСП), яке не має заданих у явній формі меж розподілу (наприклад, адміністративного чи фізичного) і є доступним

через певні служби та шлюзи, що засновані на сучасних технологіях Інтернет.

Відповідно, якщо компетенція є локальною щодо певного простору взаємодії  $h', h'', \dots, h^n$ , РСП  $\mathcal{M}$  може бути розділене на декілька розділів, які є розподіленими у просторі  $\mathcal{M} = \mathcal{M}' \cup \mathcal{M}'' \cup \dots \cup \mathcal{M}^n$  (рис. 3).

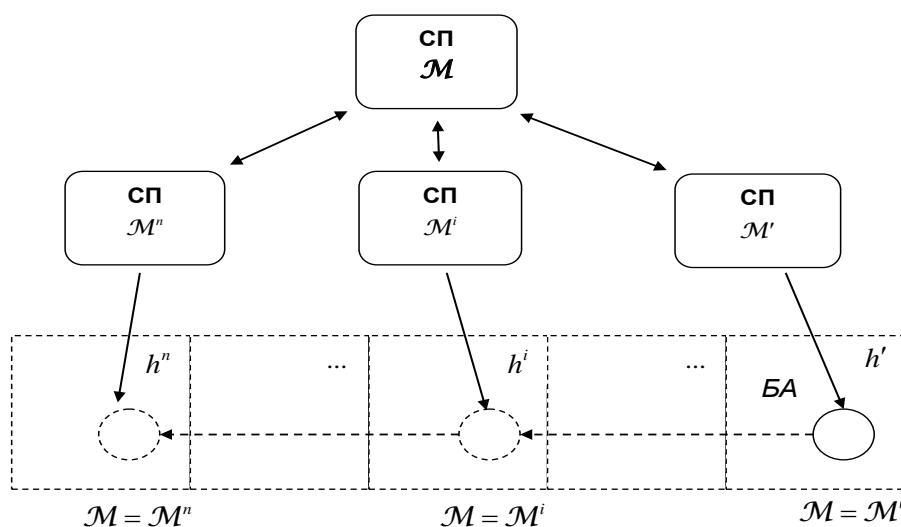


Рис. 3 – Принцип організації розподіленого сховища справ

РСП має два основних джерела компетенції:

- а) досвід управління БА на найнижчому рівні;
- б) досвід експертів, накопичений через придбання знань.

Таким чином, РСП накопичує досвід прийняття рішень у проблемних ситуаціях від усіх БА, які містяться або раніше містилися у схожих за структурою та функціями ансамблях та приймали участь у виконанні схожих місій у різних умовах контексту.

Отже, на найвищому рівні РСП може бути поділений на розділи відповідно до розподілу просторових областей взаємодії, і кожен розділ може зберігатися на окремих виділених серверах у межах необхідного просторового розташування. Кожен із цих розділів, у свою чергу, може бути розподілений на менші ділянки відповідно до місій, структури і конфігурації ансамблю БА тощо, а на наступному рівні ділянки можуть бути розділені на секції відповідно до погодних та інших умов навколишнього середовища (дощ, гроза, сильний вітер тощо).

Такий розподіл дозволяє значно пришвидшити процес обміну за рахунок менших порцій прецедентів (сек-

цій або підсекцій РСП). Вибір конкретного фрагмента, по суті, є операцією пошуку подібних прецедентів стосовно спочатку просторового контексту, потім контексту зовнішнього середовища, а потім безпекового контексту. У вибраному в РСП фрагменті здійснюється подальший пошук на основі структурного контексту та динаміки поточної ситуації.

Нехай  $\varepsilon^*$  є мінімально прийнятною оцінкою локальної компетентності. Таким чином, при перетині меж різних просторових зон вибір ділянок і перенесення потрібного фрагмента в локальне СП може бути здійснено за один раз, якщо  $\varepsilon_{SP} < \varepsilon^*$ . Подібним чином, при зміні, наприклад, погодних умов, можливо знайти відповідні фрагменти та завантажити необхідну секцію СП за один раз, якщо  $\varepsilon_M < \varepsilon^*$ . Такий підхід може значно пришвидшити роботу сценарно-прецедентної системи управління.

Обмін компетенціями між ієрархічними рівнями РСП за допомогою каналів зв'язку здійснюється за допомогою чотирьох основних методів:

- будь-який результат прийняття БА рішення у певній ситуації обов'язково передається на вищий

рівень РСП у вигляді XML-кодованого прецеденту (метод надсилання результату);

– перетин кордонів просторових зон призводить до автоматичного перенесення фрагмента та зміни вмісту локального СП БА фактичним вмістом вищого рівня РСП, що має достатню компетенцію щодо потрібної просторової області (метод безумовного отримання);

– перетин кордонів просторових зон призводить до передачі фрагмента та зміни локального СП БА фактичним вмістом від РСП за умови наявності запиту (передплати) на оновлення СП (метод замовлення) на основі Push-технологій;

– поява проблемної ситуації, сумнівної щодо компетенції СП, призводить до надсилання запиту на пошук до РСП із відповідним контекстом ситуації. Результати

пошуку мають бути відправлені назад до БА як фрагмент СП із множиною релевантних прецедентів різного ступеня подібності. Локальне СП може обрати певний прецедент та сформував відповідне рішення (метод «реакція на ситуацію»).

Накопичення необхідної компетенції на основі прецедентів може відбуватися не тільки завдяки моніторингу реальних ситуацій, але й завдяки «розігруванню» складних ситуацій у реальному часі на спеціалізованому (тренажерному) обладнанні (рис. 4). Збір досвіду можливий в результаті прийняття рішень під час моделювання реальних ситуацій досвідченими експертами, які слід своєчасно зберігати у відповідних розділах РСП.

Для опису прецедентів доречно використовувати стандартний XML.

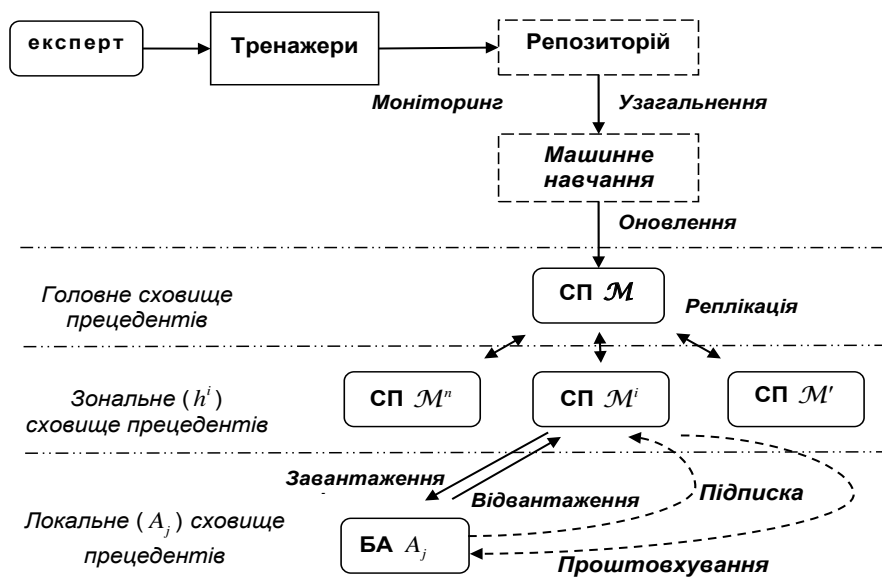


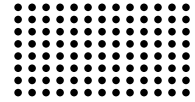
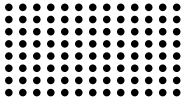
Рис. 4 – Забезпечення компетентності сховища прецедентів  $\mathcal{M}$

Отже, можна визначити наступні принципи забезпечення компетентності РСП:

- децентралізоване зберігання прецедентів, розділених відповідно до просторових зон взаємодії;
- локальна концентрація компетенції для просторових зон;
- активний двосторонній обмін прецедентами між локальним та вищими рівнями РСП;
- максимально можливий рівень узагальнення збережених прецедентів.

**Модель розподіленого спільного простору спостережень.** БА зазвичай оснащені певним набором сенсорів (датчиків), за допомогою яких вони спостерігають за своїм внутрішнім станом та зовнішнім середовищем. Так, для зовнішнього спостереження повітряні БА можуть використовувати камери з високою роздільною щільністю, підводні БА можуть використовувати ультразвукові датчики тощо. Незалежно від типу БА, з суто технічних причин кількість сенсорів є суттєво обмеженими. Кожний датчик має певну (і обмежену) точність та





певну (і теж обмежену) межу видимості. Загалом, гетерогенні ансамблі БА мають працювати в умовах неповноти й неточності інформації, тобто часткової спостережуваності зовнішнього світу.

В той же час, зрозуміло, що надійність та адекватність координації активності БА у ансамблі залежить від успішності пошуку компетентних рішень у проблемних ситуаціях, а успішність пошуку прецедентів головним чином залежить від повноти та точності наявної інформації, на підставі якої сценарно-прецедентна система шукатиме доречне рішення. Іншими словами, враховуючи обмеженість інформації, отримуваної від сенсорів, координація активності БА покладається не тільки на синхронізацію виконуваних ними сценаріїв активності, а ще й на синхронізацію у межах ансамблю інформації про зовнішній світ, яку спостерігають окремі БА цього ансамблю.

Отже, кожен БА ансамблю має необхідність знати як про положення інших БА у спільному просторі взаємодії, адже це необхідно для безпечності їх спільного руху, так і про виконувани ними дії, що впливають на дії, виконувани іншими БА ансамблю, та про результати таких дій, які в свою чергу впливають на виконання БА своїх ролей у ансамблі, а отже, безпосередньо впливають на процеси виконання сценаріїв активності.

Будемо розглядати простір взаємодії як тривимірний евклідов простір  $C$ , на який накладемо метричну

сітку координатних ліній із розміром  $\delta$ , використовуючи певну задану норму  $\xi_{\square}$  та лінійне відображення  $f$  такі, що координатні лінії утворюють набір комірок  $D$  з розміром  $\delta \times \delta \times \delta$ ,  $f: C \rightarrow D$ . Таким чином, ми дискретизуємо простір  $C$  сіткою  $D = \{d_{xyz}\}$  ізометричних кубічних комірок  $d_{xyz}$ . Розмір комірки  $\delta$  зазвичай визначається технічними можливостями сенсорів БА та обчислювальними можливостями їх бортових комп'ютерів.

Використовуючи дискретизовану тривимірну просторову модель, побудуємо модель розподіленого спільного простору спостережень БА у вигляді спільної розподіленої дошки  $\Omega$ . Кожен елемент  $\omega$  дошки  $\Omega$  відповідає конкретній комірці  $d_{ijk} \in D$ . Таким чином, кожен елемент, що позначений координатами  $(i, j, k)$  є структурою  $\omega_{ijk} = \{X_{1ijk}, \dots, X_{nijk}\}$ , що містить значення атрибутів, які визначають спостережуваний стан комірки  $d_{ijk}$  (рис. 5). Ці атрибути є залежними від спільної місії БА та процесу їх активності. Так, для задач смарт-рибальства такі атрибути можуть включати:  $x_1$  – вид риби у зграї,  $x_2$  – середня маса рибини у зграї,  $x_3$  – поточна позиція знаряддя лову (ідентифікатор),  $x_4$  – поточна позиція БА (ідентифікатор),  $x_5$  – наявність перешкоди, тощо. Кожен атрибут може розгортатися у множину підатрибутів, наприклад  $x_{41}$  – швидкість руху,  $x_{42}$  – напрям руху тощо.

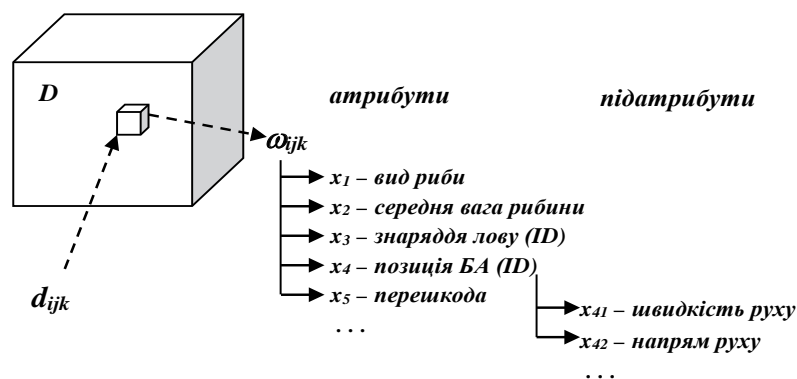


Рис. 5 – Модель розподіленої спільної дошки

Тривимірна розподілена дошка  $\Omega$  забезпечує прозорість інформації та утворює загальне інформаційне середовище, яке надається всім БА, що задіяні у ансамблі та присутні у просторі спільної взаємодії. Беручи до уваги неточність сенсорів, кожен з атрибутів комірки  $d$

може доповнюватися значенням  $\mu$  в діапазоні  $[0,1]$ , що подає впевненість у відповідній властивості всередині  $d$  згідно спостереження. Отже, враховуючи, що різні БА ансамблю мають змогу одночасно спостерігати простір взаємодії і фіксувати значення параметрів в одній

і тій же комірці, кожен параметр  $X_m$  може бути поданий як кортеж  $X_m = \langle (x_1, \mu_1), \dots, (x_i, \mu_i), \dots, (x_n, \mu_n) \rangle$ , де  $x_i$  – значення параметра  $X_m$ , спостережуване  $i$ -м БА, а  $\mu_i$  – оцінка впевненості  $i$ -го БА у значенні параметра  $x_i$ .

Таким чином, БА повинні мати можливість обмінюватися інформацією про спостережувані атрибути клітин через дошку  $\Omega$ . Умовою коректного використання спільної дошки  $\Omega$  як інструменту координації команди є збіг початкової точки системи координат та розміру комірки в системах управління кожного БА ансамблю, що дозволяє обмінюватися інформацією, прозора записуючи її на спільну дошку. Збіг цих параметрів досягається шляхом примусового встановлення однакових

значень під час початку місії або надання їх тим БА, які долучаються до простору взаємодії.

Оскільки для координації БА застосовується розподілений підхід, спільна дошка не є фізичним об'єктом простору взаємодії, а є віртуальною сутністю, адже кожен БА має власний локальний образ віртуальної спільної дошки. Таким чином, кожен БА має зберігати чинну копію спільної дошки та обмінюватися інформацією з іншими БА, для чого використовуються координаційні примітиви (повідомлення), які передаються та приймаються бортовою комунікаційною апаратурою.

Набір координаційних примітивів представлено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Координаційні примітиви

Примітиви	Функція	Опис
WIT	«Хто там»	БА запитує переклик інших БА
WIN $d_{ijk}$	«Хто тут»	БА запитує, хто знаходиться в комірці $(i,j,k)$
IMH $d_{ijk}$	«Я тут»	БА повідомляє, що він знаходиться в межах комірки $(i,j,k)$
ORG $xyz$	“Початкова точка тут”	БА повідомляє, що початкова точка має координати $(x,y,z)$
GOR	“Отримати початкову точку”	БА запитує координати початкової точки
STG $d_{ijk}$	“Встановити зграю”	БА встановлює присутність рибної зграї в комірці $(i,j,k)$
OTG $d_{ijk}$	“Встановити перешкоду”	БА встановлює наявність перешкоди руху в комірці $(i,j,k)$
ATG $d_{ijk}$	“Призначити цільову точку”	БА встановлює цільову точку в комірці $(i,j,k)$
ISE	«Бачу»	БА перераховує всі спостережувані ним об'єкти та їх атрибути в просторі взаємодії

**Впровадження.** Високий та середній рівні розподіленого сховища прецедентів розроблено для системи Мусон, що включає сценарно-прецедентний модуль та сховище прецедентів. Сценарії та тригери для кожного класу подій створюються мовою визначення сценаріїв SCDL на основі XML. Розподілене сховище прецедентів побудоване з використанням мови Python та фреймворків Django/GeoDjango, а також БД PostgreSQL.

Рівень управління БА (локальний) розроблено на основі гібридної системи Breeze. Систему віртуальної спільної дошки з відповідними примітивами координації було реалізовано в бортовій системі управління БА на основі мікроконтролера STM32F429 (180 МГц Cortex

M4, 2 Мб Flash / 256 Кб оперативної пам'яті, QSPI Flash N25Q512) та мови програмування C++. Системи Бріз і Мусон також реалізовано за допомогою мови C++.

Запропоноване рішення дозволяє досягти територіального охоплення ансамблю БА в радіусі до 50 км і забезпечує достатню швидкодію обробки запитів сценарно-прецедентної системи при виконанні запитів на пошук прецедентів у РСП у відповідності до контексту проблемної ситуації. Під час експерименту використовувалась БД PostgreSQL, що зберігала масив прецедентів потужністю 500 тис., та завадостійкий канал зв'язку з швидкістю до 10 Мбіт/с. XML-кодовані прецеденти мали середній обсяг 6 Кб. Результати експерименту представлено на рис. 6, вони дають підстави для вис-

новку, що час, який витрачається сценарно-прецедентною системою на пошук доречних прецедентів, значно переважає час, за який фрагменти РСП переміщуються до локальних СП БА. Середній час виконання запиту склав близько 5 секунд при використанні методу “push-

on-entry” та близько 7 секунд при використанні методу “case-on-demand” за обсягу відповіді до 20 прецедентів. Отже, в цілому розподілене сховище прецедентів забезпечує можливість координації ансамблю БА в реальному часі.

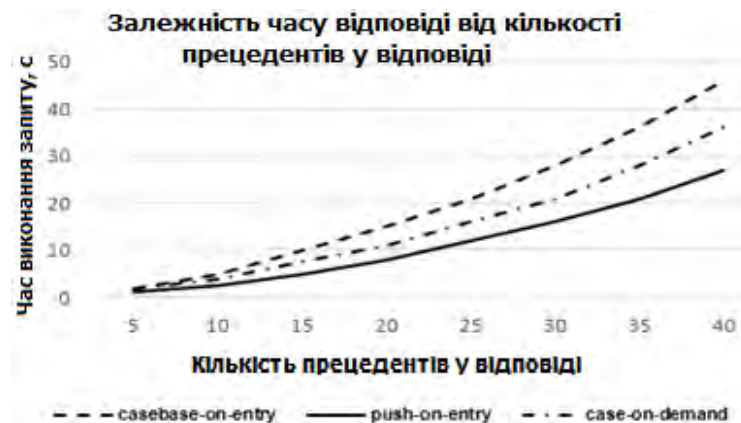


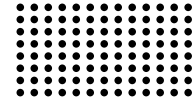
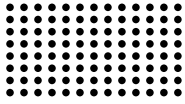
Рис. 6 – Залежність часу виконання запиту до РСП від обсягу відповіді (кількості прецедентів) для методів обміну «casebase-on-entry», «push-on-entry» та «case-on-demand»

**Висновки.** Статтю присвячено дослідженню архітектури розподіленого ієрархічного сховища прецедентів на основі оцінки компетентності для сценарно-прецедентних систем управління великими ансамблями БА. СП подано як ієрархічно організовану структуру, в якій деякі розподілені розділи просторово пов’язані на основі геоінформаційної системи. Запропоновано модель розподіленого сховища прецедентів та модель розподіленого спільного простору спостережень, визначено набір координаційних примітивів, що забезпечу-

ють прозорість та надійність спільних спостережень БА на тривимірній розподіленій дошці. Доступ до всіх служб забезпечується через Інтернет-з’єднання та спеціальні хмарні шлюзи. СП може надавати множину прецедентів, доречних до контексту проблемної ситуації, як безпосередньо на вимогу БА, так і з використанням механізмів передзамовлення, реакції на вхід до спільного простору та інших методів обробки запитів із використанням XML. Розподілене сховище прецедентів здатне забезпечити функціонування системи управління в реальному часі.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. 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>
2. Sherstjuk, V., Zharikova, M. & Sokol, I. (2017). Maintaining the order of heterogeneous ensemble of unmanned vehicles using level soft topology. In *Proceedings of the 2017 IEEE 4th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments* (pp. 245–249). <https://doi.org/10.1109/APUAVD.2017.8308821>
3. Tošić, P. & Vilalta, R. (2010). A Unified Framework for Reinforcement Learning, Co-Learning and Meta-Learning How to Coordinate in Collaborative Multi-Agent Systems. *Procedia Computer Science* 1(1), 2217–2226. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2010.04.248>
4. Dutta, K. (2010). How birds fly together: The dynamics of flocking. *Resonance* 15(12), 1097–1110. <https://doi.org/10.1007/s12045-010-0122-5>
5. Jadbabaie, A., Lin, J. & Morse, A. (2003). Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules. *IEEE Transactions on Automatic Control* 48(6), 988–1001. <https://doi.org/10.1109/TAC.2003.812781>
6. Roberts, M.E. & Goldstone, R.L. (2011). Adaptive Group Coordination and Role Differentiation. *PLoS One* 6(7), e22377. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022377>
7. Michael, N. & Kumar, V. (2011). Control of ensembles of aerial robots. *Proceedings of the IEEE* 99(9), 1587–1602. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2157275>



8. Lawton, J., Beard, R. & Young, B. (2003). A decentralized approach to formation maneuvers. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 19(6), 933–941. <https://doi.org/10.1109/TRA.2003.819598>
9. Ben-Asher, Y., Feldman, S., Gurl, P. & Feldman, M. (2008). Distributed Decision and Control for Cooperative UAVs using Ad-Hoc Communication. *IEEE Transactions on Control Systems Technologies* 16(3), 511–516. <https://doi.org/10.1109/TCST.2007.906314>
10. Chen, J., Zhang, X., Xin, B. & Fang, H. (2016). Coordination Between Unmanned Aerial and Ground Vehicles: A Taxonomy and Optimization Perspective. *IEEE Transactions on Cybernetics* 46(4), 959–972. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2015.2418337>
11. Waslander, S.L. (2013). Unmanned Aerial and Ground Vehicle Teams: Recent Work and Open Problems. *Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering* 65, 21–36. [https://doi.org/10.1007/978-4-431-54276-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-4-431-54276-6_2)
12. 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>
13. Ros, R., López De Mántaras, R., Sierra, C. & Arcos, J.L. (2005). A CBR system for autonomous robot navigation. In *Proceedings of the 2005 Conference on Artificial Intelligence Research and Developments* 131, 299–306. <https://doi.org/10.5555/1565835.1565881>
14. Шерстюк, В. (2012). Основы теории динамических сценарно-прецедентных интеллектуальных систем. Феникс.
15. Шерстюк, В. (2013). Сценарно-прецедентное управление эргатическими динамическими объектами. Lambert Academic Publishing.
16. Шерстюк, В. (2015). Модель вывода по прецедентам в интеллектуальной системе «Муссон». *Штучний інтелект*, 1-2, 103–111.
17. Zharikova, M. & Sherstjuk, V. (2016). Case-based Approach to Intelligent Safety Domains Assessment for Joint Motion of Vehicles Ensembles. In *Proceedings of the 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control* (pp. 245–250). <https://doi.org/10.1109/MSNMC.2016.7783153>
18. Sherstjuk, V., Zharikova, M., Liashenko, O., Kyrychuk, D. & Sokol, I. (2018). Motion Coordination in Heterogeneous Ensemble Using Constraint Satisfaction Method. In *Proceedings of the 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control* (pp. 54–58). <https://doi.org/10.1109/MSNMC.2018.8576270>

## DISTRIBUTED SYNCHRONIZATION MODELS FOR INFORMATION STRUCTURES OF ENSEMBLE OF UNMANNED VEHICLES

**Volodymyr Sherstiuk,**

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

**Ihor Sokol,**

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

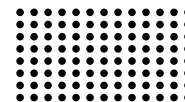
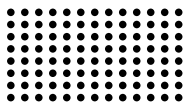
**Viktor Husiev,**

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

**Ruslan Levkivlyi,**

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

**Abstract.** The paper considers the topical issue of research and development of coordination methods for large groups of intelligent unmanned vehicles performing joint missions in heterogeneous ensembles. To manage the ensemble of unmanned vehicles, a scenario-case approach is used, which allows the use of retrospective decision-making templates in problem situations, which are considered as dynamic cases, describing acceptable decisions in the form of a set of activity scenarios adaptable to changing environmental conditions. This approach can be used to coordinate heterogeneous ensembles of unmanned vehicles by the conditions of exitance of a sufficient set of cases needed to make decisions in situations of different possible classes (competencies) and synchronize case bases for all unmanned vehicles. To solve the problems of synchronization of case bases, a model of a distributed case base as well as a model of a distributed common observation space are proposed. The distributed case base is presented as a hierarchically organized structure in which certain distributed



sections are spatially connected through a geographic information system. The access to all services is provided through Internet connections and special cloud gateways. The distributed case base can provide a variety of cases relevant to the context of the problem situation, both directly at the request of the unmanned vehicle and using pre-order mechanisms, response to the entrance to the common interaction space and other methods of processing requests using XML. The model of the distributed common space of observations is presented in the form of a three-dimensional distributed board, accessible to each of the unmanned vehicles through the mechanism of coordination primitives. A set of coordination primitives is defined, which ensure transparency and reliability of joint observations of a group of unmanned vehicles. The novelty of the proposed approach is the development of information-distributed models of virtual case base and a common virtual space of observations. The proposed models have a relatively low computational complexity, which ensures the functioning of the control systems in real time. The practical significance of the proposed models is that they provide the ability to coordinate unmanned vehicles in heterogeneous ensembles during joint missions in conditions of significant time constraints, incompleteness and uncertainty of information through the information exchange within the distributed information structures.

**Keywords:** case, competence, case base, coordination, synchronization, interaction space, unmanned vehicle.

## РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ МОДЕЛИ СИНХРОНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СТРУКТУР АНСАМБЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ

**Владимир Шерстюк,**

д.т.н., профессор,

Херсонский национальный технический университет, Украина,

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

**Игорь Сокол,**

к.т.н., доцент, докторант,

Херсонский национальный технический университет, Украина,

ORCID 0000-0002-7324-1441

**Виктор Гусев,**

к.т.н., доцент, начальник колледжа

Херсонской государственной морской академии,

ORCID 0000-0001-7775-2276

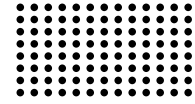
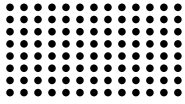
**Руслан Левковский,**

зам. начальника колледжа

Херсонской государственной морской академии

ORCID 0000-0003-3114-179X

**Аннотация.** В статье рассмотрен актуальный вопрос исследования и разработки методов координации для больших групп интеллектуальных беспилотных аппаратов, выполняющих совместные миссии в гетерогенных ансамблях. Для управления ансамблем беспилотных аппаратов использован сценарно-прецедентный подход, который предоставляет возможность использования ретроспективных шаблонов принятия решений в проблемных ситуациях, рассматриваемых как динамические прецеденты, содержащие описание приемлемых решений в виде совокупности сценариев активности, адаптивных к меняющимся условиям внешней среды. Данный подход может быть использован для координации гетерогенных ансамблей беспилотных аппаратов при наличии достаточного множества прецедентов, необходимых для принятия решений при возникновении ситуаций различных возможных классов (компетентности) и синхронизации хранилищ прецедентов каждого из беспилотных аппаратов. Для решения задач синхронизации хранилищ прецедентов предложена модель распределенного хранилища прецедентов и модель распределенного общего пространства наблюдений. Хранилище прецедентов представлено как иерархически организованная структура, в которой некоторые пространственно-распределенные разделы связаны посредством геоинформационной системы. Доступ ко всем службам обеспечивается через Интернет-соединение и специальные облачные



шлюзы. Хранилище прецедентов может представлять множество прецедентов, уместных контексту проблемной ситуации, как непосредственно по требованию беспилотного аппарата, так и при использовании механизмов предзаказа, реакции на вход в общее пространство и других методов обработки запросов с использованием XML. Модель распределенного общего пространства наблюдений представлены в виде трехмерной распределенной доски, доступной каждому с беспилотных аппаратов через механизм обмена координационными примитивами. Определен набор координационных примитивов, обеспечивающих прозрачность и надежность совместных наблюдений группы беспилотных аппаратов. Новизна предложенного подхода заключается в разработке информационно распределенных моделей виртуального хранилища прецедентов и совместного виртуального пространства наблюдений. Предложенные модели имеют сравнительно невысокую вычислительную сложность, что обеспечивает функционирование системы управления в реальном времени. Практическая значимость предложенных моделей заключается в том, что они обеспечивают возможность координации беспилотных аппаратов в гетерогенных ансамблях во время выполнения совместных миссий в условиях значительных ограничений по времени, неполноты и неопределенности информации через обмен информацией в распределенных информационных структурах.

**Ключевые слова:** прецедент, компетентность, хранилище прецедентов, координация, синхронизация, пространство взаимодействия, беспилотный аппарат.

#### REFERENCES:

1. 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>
2. Sherstjuk, V., Zharikova, M. & Sokol, I. (2017). Maintaining the order of heterogeneous ensemble of unmanned vehicles using level soft topology. In Proceedings of the 2017 IEEE 4th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (pp. 245–249). <https://doi.org/10.1109/APUAVD.2017.8308821>
3. Tošić, P. & Vilalta, R. (2010). A Unified Framework for Reinforcement Learning, Co-Learning and Meta-Learning How to Coordinate in Collaborative Multi-Agent Systems. *Procedia Computer Science* 1(1), 2217–2226. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2010.04.248>
4. Dutta, K. (2010). How birds fly together: The dynamics of flocking. *Resonance* 15(12), 1097–1110. <https://doi.org/10.1007/s12045-010-0122-5>
5. Jadbabaie, A., Lin, J. & Morse, A. (2003). Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules. *IEEE Transactions on Automatic Control* 48(6), 988–1001. <https://doi.org/10.1109/TAC.2003.812781>
6. Roberts, M.E. & Goldstone, R.L. (2011). Adaptive Group Coordination and Role Differentiation. *PLoS One* 6(7), e22377. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022377>
7. Michael, N. & Kumar, V. (2011). Control of ensembles of aerial robots. *Proceedings of the IEEE* 99(9), 1587–1602. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2157275>
8. Lawton, J., Beard, R. & Young, B. (2003). A decentralized approach to formation maneuvers. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 19(6), 933–941. <https://doi.org/10.1109/TRA.2003.819598>
9. Ben-Asher, Y., Feldman, S., Gurl, P. & Feldman, M. (2008). Distributed Decision and Control for Cooperative UAVs using Ad-Hoc Communication. *IEEE Transactions on Control Systems Technologies* 16(3), 511–516. <https://doi.org/10.1109/TCST.2007.906314>
10. Chen, J., Zhang, X., Xin, B. & Fang, H. (2016). Coordination Between Unmanned Aerial and Ground Vehicles: A Taxonomy and Optimization Perspective. *IEEE Transactions on Cybernetics* 46(4), 959–972. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2015.2418337>
11. Waslander, S.L. (2013). Unmanned Aerial and Ground Vehicle Teams: Recent Work and Open Problems. *Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering* 65, 21–36. [https://doi.org/10.1007/978-4-431-54276-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-4-431-54276-6_2)
12. 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>
13. Ros, R., López De Mántaras, R., Sierra, C. & Arcos, J.L. (2005). A CBR system for autonomous robot navigation. In Proceedings of the 2005 Conference on Artificial Intelligence Research and Developments 131, 299–306. <https://doi.org/10.5555/1565835.1565881>
14. Шерстюк, В. (2012). Основы теории динамических сценарно-прецедентных интеллектуальных систем. Феникс.
15. Шерстюк, В. (2013). Сценарно-прецедентное управление эргатическими динамическими объектами. Lambert Academic Publishing.
16. Шерстюк, В. (2015). Модель вывода по прецедентам в интеллектуальной системе «Муссон». Штучний інтелект, 1-2, 103–111.
17. Zharikova, M. & Sherstjuk, V. (2016). Case-based Approach to Intelligent Safety Domains Assessment for Joint Motion of Vehicles Ensembles. In Proceedings of the 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (pp. 245–250). <https://doi.org/10.1109/MSNMC.2016.7783153>
18. Sherstjuk, V., Zharikova, M., Liashenko, O., Kyrychuk, D. & Sokol, I. (2018). Motion Coordination in Heterogeneous Ensemble Using Constraint Satisfaction Method. In Proceedings of the 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (pp. 54–58). <https://doi.org/10.1109/MSNMC.2018.8576270>