

Гладун Анатолій, Хала Катерина. Розділ II. Збагачення онтологічних моделей онлайнними вебресурсами для інтелектуального планування місій рою БпЛА. Штучний інтелект у науці : монографія / [авт. колектив]; за ред. Яцишина Андрія та Яцишин Анни. – Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2025. – С. 26-43. ISBN 978-617-8830-09-0

РОЗДІЛ II. ЗБАГАЧЕННЯ ОНТОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОНЛАЙНОВИМИ ВЕБРЕСУРСАМИ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ПЛАНУВАННЯ МІСІЙ РОЮ БПЛА

DOI

Гладун Анатолій¹[0000-0002-4133-8169], Хала Катерина¹[0000-0002-9477-970X]

¹Інститут інформаційних технологій та систем Національної академії наук
України, Київ, Україна
khala@irtc.org.ua

Анотація У розділі розглядається застосування онтологічних моделей, збагачених зовнішніми ресурсами для інтелектуального планування місій рою БпЛА. Обґрунтовано актуальність онтологій для формалізації знань про місії, середовище та загрози. Запропоновано метод збагачення онтологій з онлайнних баз знань, енциклопедій, словників та інших відкритих джерел з застосуванням концепції інформаційного поля для попереднього оцінювання та оброблення інформації. Представлено методологію адаптивного оновлення онтологій. Запропонований підхід із застосуванням онлайнних зовнішніх інформаційних ресурсів дозволяє враховувати динаміку оновлення поточної інформації про об'єкти дослідження, скорочує час оновлення онтології, забезпечує отримання якісних знань для самоорганізації рою БпЛА, координації руху, виявлення загроз та гнучкості реагування на зовнішнє середовище.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати (БпЛА), мультиагентні системи (МАС), онтологічні моделі, збагачення онтологій, інтелектуальне планування місій, зовнішні он-лайнні ресурси, інформаційне поле.

ENRICHING OF ONTOLOGICAL MODELS WITH EXTERNAL WEB RESOURCES FOR INTELLIGENT PLANNING OF UAV SWARM MISSIONS

Gladun Anatoly, Khala Kateryna

Abstract. The chapter considers the application of ontology models enriched with external resources for intelligent planning of a UAV swarm mission. The relevance of ontologies for formalizing knowledge about missions, environment, and threats is substantiated. A method for enriching ontologies from online knowledge bases, encyclopedias, dictionaries, and other open sources using the information field concept for preliminary information assessment and processing is proposed. A methodology for adaptive ontology updating is presented. The proposed approach using online external information resources allows to take into account the dynamics of updating current information about research objects, reduces ontology update time, provides high-quality knowledge for UAV swarm self-organization, movement coordination, threat detection, and flexible response to the external environment.

Keywords: unmanned aerial vehicles (UAVs), multi-agent systems (MAS), ontology models, ontology enrichment, intelligent mission planning, external online resources, information field.

Вступ

У сучасному світі безпілотні літальні апарати (БПЛА) стали важливим інструментом у різних сферах, таких як військові операції, рятувальні місії, сільське господарство, моніторинг навколишнього середовища, доставлення посилок, а також у медіа та кінематографії. Їхня здатність до автономного виконання складних завдань у важкодоступних або небезпечних умовах робить їх незамінними в багатьох галузях.

Однак для ефективного використання БПЛА, особливо у складних завданнях, що вимагають залучення великої кількості дронів, необхідно забезпечити їх злагоджену та скоординовану роботу. Використання мультиагентних систем (МАС) дає змогу дронам взаємодіяти, обмінюватися інформацією та спільно досягати поставлених цілей. МАС складається з групи автономних агентів, здатних до взаємодії та співпраці для досягнення спільної мети [1].

Для ефективної роботи МАС БПЛА необхідне інтелектуальне керування мультиагентними системами. Перспективним підходом до цього є використання

онтологічних моделей [2], які дають змогу формалізувати знання про предметну область місії, її цілі, середовище, загрози та функціональні можливості БпЛА. Онтології забезпечують семантичну основу для покращення ситуаційної обізнаності, інтероперабельності та обміну інформацією між БпЛА [3], покращують адаптацію системи до змінюваних умов середовища та підтримують прийняття обґрунтованих рішень на основі наявних знань. Однак у реальних умовах БпЛА часто стикаються з непередбачуваними ситуаціями та динамічними змінами середовища, що вимагає постійного оновлення та збагачення онтологічних моделей новими знаннями.

У цій статті ми розглядаємо підхід до збагачення онтологічних моделей зовнішніми онлайновими ресурсами для підвищення якості планування місій БпЛА у МАС. Досліджено, як інтеграція зовнішніх даних, таких як інформація з сенсорів, онлайнових баз даних та відкритих джерел, може збагачувати онтологічні моделі та робити їх актуальнішими та інформативнішими.

Ця робота має практичне значення для розроблення інтелектуальних систем керування роями БпЛА, які можуть бути використані в широкому спектрі застосувань, від пошуково-рятувальних операцій до моніторингу навколишнього середовища.

Аналіз літератури та постановка проблеми

Розвиток онтологічних моделей у сфері БпЛА є важливим напрямом сучасних досліджень, що спрямований на формалізацію знань, автоматизацію прийняття рішень та підвищення автономності рою. У зв'язку з динамічністю зовнішнього середовища та складністю оброблення інформації актуальним є вдосконалення методологій формування та оновлення онтологій. Сучасні підходи передбачають адаптивне збагачення моделей за рахунок зовнішніх джерел, що забезпечує їхню семантичну узгодженість та актуальність. Це вимагає розроблення ефективних методів виявлення, структурування та інтеграції даних, що сприятиме підвищенню точності ситуаційного аналізу й оптимізації керування роєм БпЛА.

Одним із ключових підходів є семантична інтеграція даних, яка передбачає агрегування неоднорідної інформації з різнорідних джерел із урахуванням їхнього семантичного змісту [4, 5]. Підхід забезпечує синхронізацію концептів онтології та мінімізує інформаційну надлишковість завдяки гармонізації неоднорідних форматів даних.

Ще одним ефективним підходом є використання онтологічних шаблонів, що дає змогу уніфікувати процес модифікації онтологічних моделей [6, 7]. Шаблони сприяють стандартизації механізмів долучення нових концептів та відношень, а також спрощують автоматизоване оброблення структурованих даних.

Автоматизоване видобування знань здійснюється шляхом застосування методів оброблення природної мови [8, 9, 10] та алгоритмів машинного навчання [11, 12, 13]. Ці методи дають змогу екстрагувати релевантну інформацію з текстових та мультимедійних ресурсів, що сприяє поповненню онтологічної бази знань новими концептами та фактами.

Метод співставлення (matching) онтологій забезпечує ідентифікацію відповідників концептів, атрибутів чи відношень між концептами різних онтологічних моделей, що дає змогу досягти їхньої взаємної інтероперабельності та інтеграції [14, 15]. Це сприяє побудові єдиної глобальної онтологічної бази знань.

Розширення онтологічних моделей також можливе за допомогою семантичних анотацій, які застосовуються для супроводу зовнішніх онлайнових інформаційних ресурсів метаданими [16], що, у свою чергу, дає змогу описати їх семантичний контент, здійснити категоризацію та встановити відношення з уже наявними концептами. Подібним чином функціонують семантично збагачені веб-сервіси, що сприяють онтологічному збагаченню шляхом залучення інформації з онтологічно структурованих репозиторіїв, які містять відкриті семантичні дані [17, 18].

Для забезпечення цілісності онтологічних моделей застосовується метод злиття онтологій, який передбачає консолідацію декількох онтологічних моделей в одну структуру з урахуванням їхньої синтаксичної та семантичної сумісності. Це сприяє формуванню єдиного інформаційного середовища [5, 19].

Онтологічні медіатори відіграють важливу роль у процесі інтеграції, забезпечуючи проміжне узгодження та трансляцію концептів між різними онтологіями [20, 21]. Це сприяє збереженню логічної цілісності онтологічного середовища. У свою чергу, впровадження онтологічних репозиторіїв забезпечує централізоване зберігання онтологій, що полегшує їхню інтеграцію, повторне використання та збагачення інформаційними ресурсами [22].

З огляду на динамічність інформаційного середовища, важливим напрямом є метод адаптивного оновлення онтологій, який дає змогу динамічно змінювати їхню структуру у відповідь на зміну зовнішніх даних [23, 24]. Це забезпечує їхню релевантність та відповідність актуальним знанням предметної області.

Метод онтологічної еволюції [25] є ще одним підходом, що дає змогу онтологіям поступово модифікувати свою структуру у відповідь на зміни у зовнішньому середовищі, використовуючи методи дедуктивного аналізу та машинного навчання.

Окремо варто виділити метод семантичного зіставлення, який передбачає аналіз семантичних подібностей між концептами різних джерел даних [26, 27]. Це дає змогу сформувати єдину онтологічну базу знань, забезпечуючи її внутрішню несуперечливість та когерентність.

Одним із ключових аспектів є забезпечення узгодженості онтологічної моделі, що досягається шляхом використання логічного виведення та перевірки узгодженості за допомогою резонерів (reasoner), таких як Pellet [28], HermiT [29] або FaCT++ [30]. Проте традиційні онтології часто є статичними, що обмежує їхню адаптивність до швидких змін у реальному середовищі.

Отже, сучасні підходи до формування та оновлення онтологічних моделей базуються на методах інтеграції, збагачення, автоматизованого видобування знань, адаптивного оновлення та семантичного зіставлення. Їхнє поєднання дає змогу створювати гнучкі, узгоджені та самонавчальні онтологічні системи, здатні ефективно адаптуватися до змін у зовнішньому середовищі.

Ефективне керування роєм безпілотних літальних апаратів (БпЛА) у динамічно-змінюваному середовищі вимагає не лише точного відображення

просторових координат, а й аналізування прихованих закономірностей у доступних даних. Інформація про об'єкти середовища може бути неповною або ненадійною, тому її потрібно структуровано опрацьовувати для виявлення важливих відношень у межах інформаційного простору. Відповідно, постає завдання побудови надійного інформаційного поля, яке забезпечуватиме ситуаційну обізнаність та слугуватиме основою для процесів прийняття рішень у керуванні роєм БпЛА.

Для розроблення онтологій, які використовують в МАС рою БпЛА необхідно поповнювати актуальними знаннями онтології, використовуючи зовнішні онлайн-ресурси. Серед компонентів онтологій – концептів, відношень, аксіом, правил, концепти є найважливішими елементами під час концептуалізації домена. Інформаційне поле (словник домену) необхідне для детальнішого опрацювання та вибору найвагоміших концептів домену.

Інформаційне поле — це концепція, яка описує структуру та організацію інформації в певному домені або контексті. Воно охоплює всі дані, терміни, концепти та відношення між ними, які використовуються для опису конкретного інформаційного об'єкта.

Забезпечення адаптивного оновлення знань у системах керування роями БпЛА потребує розроблення семантичних моделей, зокрема онтологій, таксономій та тезаурусів, що дають змогу формалізувати знання про середовище, його динаміку та загрози. Важливим аспектом є методологія структурування інформаційного поля, яка охоплює синтаксичний, семантичний і прагматичний рівні організації даних та їх інтеграцію з онтологічними моделями. Таким чином, проблема полягає у створенні методів формування та адаптивного збагачення онтологічних моделей на основі інформаційного поля, що підвищить ефективність керування роєм БпЛА в умовах невизначеності та змінного середовища.

Концепція структури об'єкта інформаційного поля для розробки онтології

Ефективне керування роєм БпЛА потребує не лише точного відображення середовища, а й аналізу прихованих закономірностей у доступній інформації. У

цьому контексті ключову роль відіграє неявне знання, яке впливає на процеси прийняття рішень. Інформація про об'єкти середовища може бути як безпосередньо доступною, так і непрямую, що вимагає відповідного оброблення для виявлення значущих відношень між елементами інформаційного простору. Надійне інформаційне поле стає основою для побудови онтологічних моделей, забезпечуючи постійне оновлення знань відповідно до змін у середовищі.

Інформаційне поле можна розглядати як сукупність ресурсів, що характеризують стан середовища рою БПЛА. Воно містить дані різного ступеня надійності, представлені в числових, текстових, аудіо- чи відеоформатах. Його структуризація передбачає виокремлення підполів за певними характеристиками, що оптимізує аналіз і інтеграцію даних у систему прийняття рішень. У контексті керування роєм БПЛА критично важливими є три аспекти: синтаксичний (структура та форматування даних для онтологічної моделі), семантичний (моделювання відношень між об'єктами та прогнозування змін) і прагматичний (оцінювання актуальності та впливу інформації на процеси керування). Враховуючи динамічність середовища, оновлення та адаптивне збагачення онтологій сприяє підвищенню ситуаційної обізнаності, узгодженості знань у системі та ефективності прийняття рішень у реальному часі.

На рисунку 1 подано метод розроблення структури інформаційного поля об'єкта, детальніше методологію розроблення структури надійного інформаційного поля наведено в нашій роботі [31].

Поповнення та оновлення онтологій із зовнішніх відкритих інформаційних ресурсів – це процес, що забезпечує релевантність та повноту онтологій і є надзвичайно важливим з огляду на такі ключові аспекти, як 1) *підтримка актуальності* – світ постійно змінюється, з'являються нові знання, концепції, технології, а онтології, які не оновлюються, швидко застарівають і втрачають свою цінність і оновлення онтології відображає останні знання про домен; 2) *розширення знань* – бази даних, публікації, словники, енциклопедії містять величезну кількість інформації і це дає змогу розширити онтології новими поняттями, зв'язками, фактами; 3) *покращення якості даних* – різні зовнішні

джерела можуть надавати різні точки зору на один і той же домен, однак, інтеграція даних з різних джерел дає змогу виявити та виправити помилки, неточності, суперечності, що покращує якість та достовірність онтологій; 4) *забезпечення інтероперабельності* – використання стандартних форматів даних, таких як RDF, OWL, дає змогу інтегрувати онтології з різних джерел, що забезпечує інтероперабельність між різними системами та застосунками, які використовують онтології; 5) *підтримка розвитку штучного інтелекту* – онтології є важливим компонентом багатьох систем штучного інтелекту, а актуальні та повні онтології дозволяють створювати більш ефективні системи обробки природної мови, пошуку інформації, виведення висновків і це сприяє розвитку штучного інтелекту в цілому та 6) *автоматизація процесів* – використання автоматичних методів видобування інформації та інтеграції даних дає змогу ефективно обробляти великі обсяги інформації, а це зменшує необхідність людського втручання та прискорює процес поповнення та оновлення онтологій.

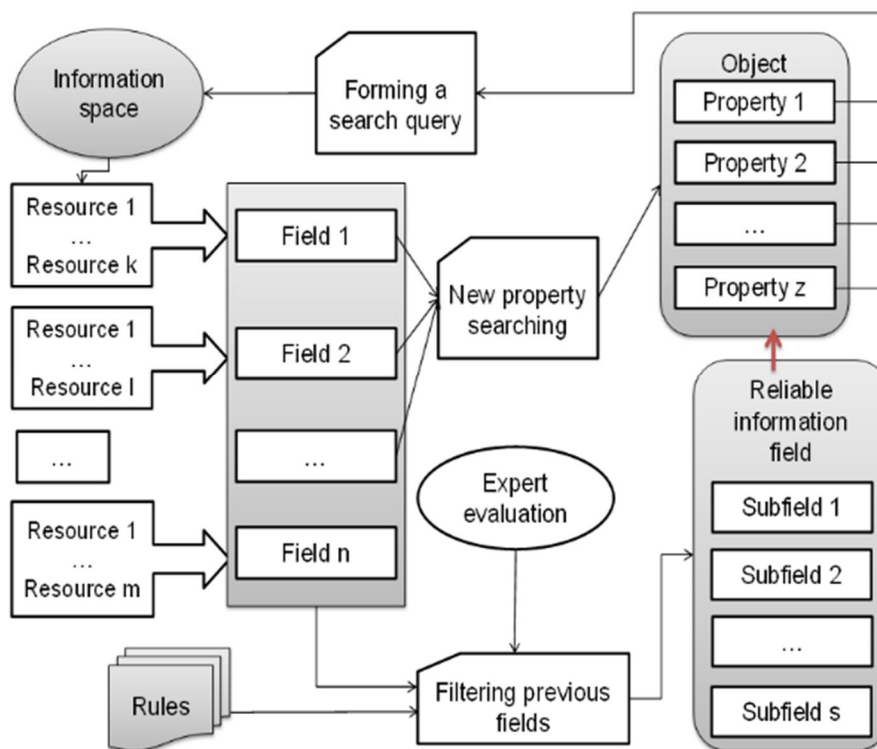


Рис. 1. Методологія розроблення структури інформаційного поля об'єкта [31]

Таким чином, поповнення та оновлення онтологій з зовнішніх джерел є критично важливим для їхнього успішного використання в різних галузях, особливо в контексті розвитку штучного інтелекту.

Збагачення онтології з зовнішніх ресурсів для застосовування в рої БпЛА

Для оновлення розробленої онтології та її розширення в умовах динамічного змінення інформації про об'єкти в середовищі рою БпЛА запропоновано метод збагачення формальних онтологій [32] предметних областей із інформаційного поля зовнішніх ресурсів. На рисунку 2 подано принцип методу збагачення онтології. Даний метод містить кілька ключових етапів.

Етап 1. Створення початкової версії онтології OI та її збереження. У разі, якщо зовнішній ресурс містить структуровані дані, сумісні з онтологією рою БпЛА, доцільно використовувати визначені імена для класів, властивостей та інших елементів. Можна долучати специфічні для предметної області концепти, які відображають особливості інформації, критичної для функціонування рою БпЛА.

Нехай онтологія OI має таке формульне подання:

$$OI = \{C, A, R\},$$

де: C – множина концептів (класів) та $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, а $c_n = \{Nc, Ac\}$, де Nc – назва концепту; Ac – множина атрибутів концепту; A – множина атрибутів та $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, а $a_m = \{Na, T, V\}$, де Na – назва атрибута, T – тип даних, V – значення атрибута; R – множина відношень між концептами та $R = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$, а $r_k = \{Rt, c_1, c_2\}$, де Rt – тип відношення, c_1 та c_2 – концепти. Тоді долученням нового концепту до онтології буде: $c_{new} = \{Nc_{new}, A_{new}\}$.

Етап 2. Розмітка зовнішнього ресурсу, що містить структуровані або напівструктуровані дані, які можуть бути використані для онтологічного моделювання. Ресурси можуть охоплювати інформаційні бази, сенсорні мережі, дані з відкритих API або інші сховища знань, що містять критичні відомості для роботи рою БпЛА. Формульне подання для розміченого зовнішнього ресурсу, який буде використовуватися для оновлення онтології буде таким:

$$D_{externa} = \{C_{external}, A_{external}, R_{external}\},$$

де $D_{externa}$ – це множина, що містить концепти, атрибути та відношення, видобуті з зовнішнього ресурсу.



Рис. 2. Метод збагачення онтології

Етап 3. Автоматичне оновлення даних у інформаційному полі ресурсів та моніторинг змін. Зміни можуть стосуватися появи нових об'єктів, зміни характеристик вже відомих елементів або додавання нових відношень між ними. Система повинна періодично перевіряти оновлення з певною частотою, яка залежить від швидкості змін у середовищі, в якому працює рій БпЛА. Формульне подання для даних які були додані, змінені або видалені буде таким:

$$\Delta D = D_{external}^{t+\Delta t} - D_{external}^t,$$

де ΔD визначає зміни у зовнішньому ресурсі між двома моментами часу t та $t+\Delta t$.

Етап 4. Оновлення онтології $O1$ до $O2$ шляхом інтеграції тільки тих нових даних, які відповідають встановленим критеріям. Це дасть змогу зберігати узгодженість онтологічної моделі та уникати надлишкової або нерелевантної інформації. Відбір здійснюється за допомогою аналітичних методів, які визначають відповідність нових концептів і відношень загальній структурі онтології рою БпЛА. Формульне подання для онтології $O2$ буде таким:

$$O2 = O1 \cup \Delta D_{relevant},$$

тобто $O2$ є об'єднанням початкової онтології $O1$ та релевантних змін $\Delta D_{relevant}$ з зовнішнього ресурсу, якщо $\Delta c \in \Delta C$, $\Delta a \in \Delta A$, $\Delta r \in \Delta R$ відповідають структурі онтології.

Запропонований метод дає змогу адаптивно збагачувати онтологію з урахуванням поточних даних та динамічного оновлення інформації, що критично важливо для ефективного функціонування роїв БпЛА у складних та змінних умовах експлуатації. Збагачення онтологічної моделі забезпечує 1) *комплексне моделювання загроз*, оскільки ширший спектр загроз і контрзаходів дає змогу отримати повніше розуміння потенційних ризиків і стратегій їх пом'якшення; 2) *покращення прийняття рішень*, оскільки онтологія може формувати логічні висновки про складні сценарії, даючи змогу рою приймати обґрунтовані рішення щодо реагування на загрози та розподілення ресурсів; 3) *покращення ситуаційної обізнаності*, у тому числі деталі про вразливі місця інфраструктури та зв'язок із самою інфраструктурою, коли рій отримує повніше уявлення про ситуацію.

Розглянемо приклад завдання моніторингу інфраструктури під час природної катастрофи (наприклад, повені або землетрусу) за допомогою роєвої системи БпЛА. БпЛА мають різні типи сенсорів для збору даних, які забезпечують безперервне спостереження та оцінювання стану інфраструктури, виявлення можливих загроз та реагування на них. У таблиця 1 наведено різницю у плануванні дій рою БпЛА на те саме завдання за наявності даних та можливостей початкової онтології $O1$ та збагаченої онтології $O2$.

Порівняння реагування рою БпЛА використовуючи онтології O1 та O2

Дія рою БпЛА	Онтологія O1	Онтологія O2
Ідентифікація критичності інфраструктури (C_Infrastructure)	C_Infrastructure (location, vulnerability, R_monitors)	C_Infrastructure (criticalityLevel, securityFeatures, R_monitors), C_GeographicArea (areaType, coordinates), R_locatedIn
Моніторинг стану інфраструктури (C_Infrastructure)	C_UAV (batteryLevel, operationalRange, payloadCapacity, R_monitors, R_hasSensor)	C_UAV (batteryLevel, operationalRange, payloadCapacity, R_monitors, R_communicatesWith, R_hasMissionType), C_Sensor (sensorType, accuracy), R_capturesData, C_Data (dataType, timestamp)
Виявлення загроз (C_Threat)	C_Threat (severity, urgency, R_detects)	C_Threat (severity, urgency, threatType, impact, R_detects), C_NaturalDisaster (disasterType, intensity), R_causesThreat, C_BiologicalHazard (hazardType, contaminationLevel)
Оцінювання серйозності загрози (C_Threat)	Оцінює рівень загрози (severity) на основі даних C_VisualCamera та властивості weatherConditions класу C_Environment.	Оцінює рівень загрози (severity) на основі weatherConditions класу C_Environment, рівня води (властивість), стану C_Dams, потенційних C_EnvironmentalThreat, C_NaturalDisaster та C_BiologicalHazard, використовуючи R_causesThreat
Реагування на загрози (R_respondsTo, R_mitigates)	C_Countermeasure (R_mitigates), Передає дані про пошкодження рятувальним службам.	C_Countermeasure (R_mitigates), Передає дані про пошкодження та рівень загрози рятувальним службам, координує дії з іншими C_UAV для евакуації людей та доставки допомоги, використовуючи відношення R_respondsTo для C_Threat та R_mitigates для C_Countermeasure, C_Evacuation (evacuationRoute, numberOfPeople), R_performsEvacuation
Виявлення пошкоджень (C_Infrastructure)	Виявляє пошкодження C_Bridge та C_PowerPlant за допомогою сенсора C_VisualCamera.	Виявляє пошкодження C_Bridge, C_PowerPlant, C_CommunicationNetworks, C_WaterTreatmentFacilities та C_Dams за допомогою сенсорів C_VisualCamera, C_ThermalCamera та C_LiDAR.
Реагування на пошкодження (C_Infrastructure)	Передає дані про пошкодження рятувальним службам.	Передає дані про пошкодження рятувальним службам, а також координує дії з іншими C_UAV для доставки необхідних матеріалів або проведення ремонтних робіт, використовуючи C_Material (materialType, quantity), R_requiresMaterial, R_performsRepair
Моніторинг екологічної ситуації (C_Environment)	Збирає дані про weatherConditions.	Збирає дані про weatherConditions, рівень забруднення води та повітря (властивість), а також відстежує поширення C_EnvironmentalThreat, використовуючи

Дія рою БпЛА	Онтологія O1	Онтологія O2
		C_Pollution (pollutionType, concentration), R_monitorsPollution
Координація рою БпЛА	C_UAV (R_hasInteractionType)	C_UAV (R_hasInteractionType, R_hasMissionType), C_Task (taskType, priority), R_assignsTask

Збагачення онтологічної моделі O1 до O2 при використанні зовнішніх ресурсів дає змогу рою БпЛА розширити спектр можливостей, оскільки O2 має більше типів C_Infrastructure та C_Threat, що допомагає рою БпЛА отримувати повнішу картину ситуації; підвищити точність оцінювання загроз, оскільки O2 враховує більше факторів, що впливають на рівень загрози (severity), таких як стан C_Dams та C_EnvironmentalThreat; покращити координацію дій, O2 дає змогу рою БпЛА не лише збирати дані, але й координувати дії з іншими системами та службами за допомогою R_communicatesWith для ефективного реагування на катастрофу; забезпечити ефективніше реагування, оскільки O2 дає змогу C_UAV виконувати додаткові завдання, використовуючи R_respondsTo та R_mitigates, такі як евакуація людей та доставка допомоги.

У таблиці 2 подано порівняння онтологій базової O1 та розширеної O2 за визначеними показниками, а також ефективність роботи рою БпЛА під час використання онтології O1 та онтології O2.

На рисунку 3 видно, що онтологія O2 дає змогу рою БпЛА отримувати повнішу та точнішу інформацію про навколишнє середовище та потенційні небезпеки, завдяки майже вдвічі більшій кількості класів інфраструктури, типів сенсорів та загроз, а також факторів оцінювання загроз.

Порівняння ефективності онтологій O1 та O2

Показник	Онтологія O1	Ефективність рою БпЛА (O1)	Онтологія O2	Ефективність рою БпЛА (O2)
Кількість класів інфраструктури	5	0.36	14	0.65
Кількість типів сенсорів	3	0.28	7	0.55
Кількість типів загроз	13	0.61	21	0.80
Кількість факторів оцінювання загроз	8	0.43	16	0.75
Можливість координації евакуації	0	0.14	1	0.90
Можливість координації ремонту	0	0.11	3	0.85
Кількість параметрів еко-моніторингу	6	0.58	11	0.82
Можливість розподілу завдань між БпЛА	1	0.73	1	0.88

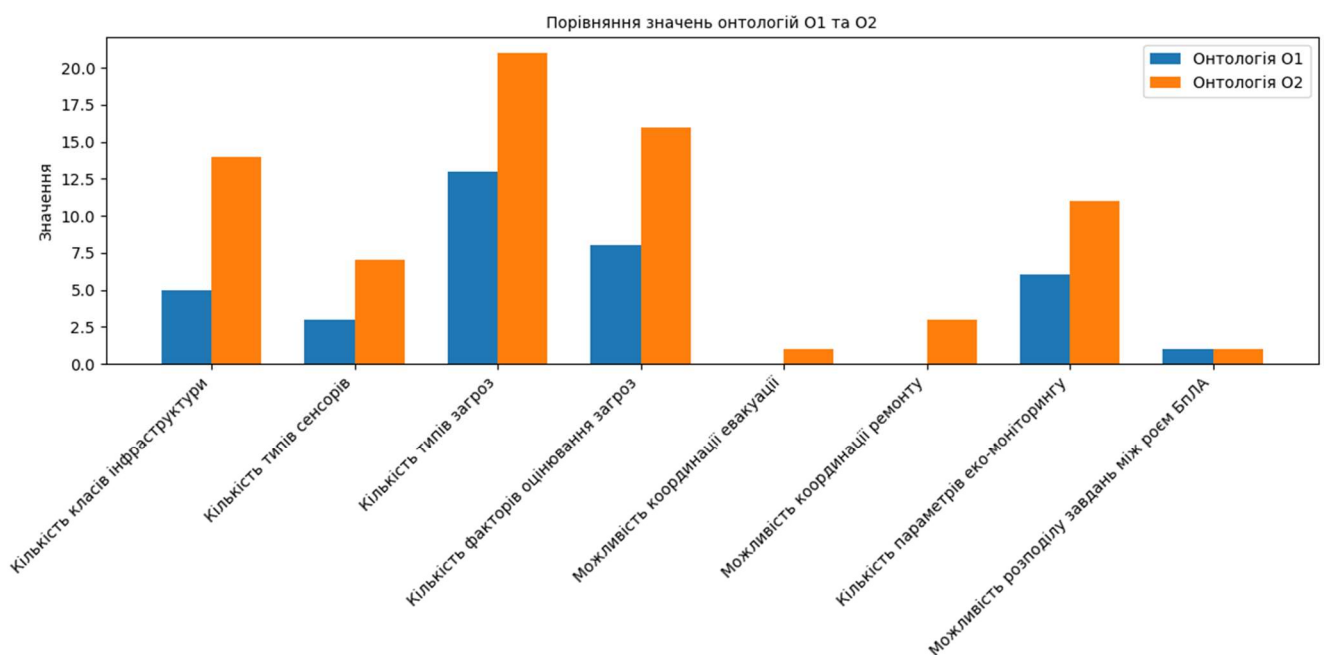


Рис. 3. Графік порівняння онтологій O1 та O2

На рисунку 4 також видно, що ефективність рою БпЛА під час використання онтології O2 значно вища, ніж для онтології O1. Це підтверджує, що онтологія O2 забезпечує ефективніше використання рою БпЛА для реагування на різні ситуації.

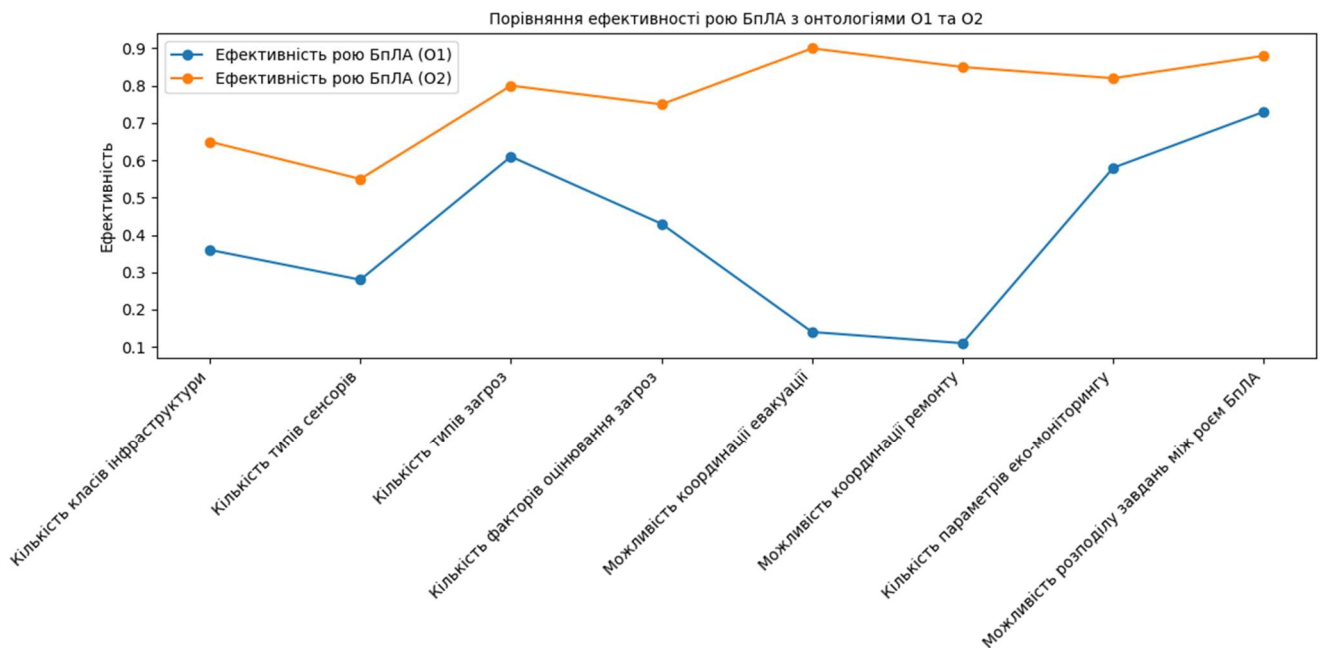


Рис. 4. Графік порівняння ефективності рою БПЛА з онтологіями O1 та O2

Отже, збагачення онтологічних моделей зовнішніми ресурсами значно підвищує якість планування місій БПЛА у мультиагентних системах, дозволяючи здійснювати більш точне, ефективне та адаптивне управління роєм в умовах динамічного середовища.

Висновки. Семантичні моделі є потужним інструментом для розвитку інтелектуальних систем рою БПЛА. Вони дають змогу децентралізованим системам БПЛА розуміти та інтерпретувати навколишнє середовище, що є критично важливим для багатьох завдань таких як навігація та картографування, уникнення перешкод та прийняття рішень в складних умовах, виявлення та розпізнавання об'єктів, розуміння контексту ситуації та прийняття рішень, оцінка ризиків, оброблення та інтерпретація даних з датчиків, комунікація та співпраця, координації дій рою БПЛА.

Результати дослідження підтверджують, що використання онтологічних моделей, збагачених зовнішніми ресурсами, є ефективним підходом для інтелектуального планування місій рою БПЛА. Запропонований методологічний підхід до оновлення онтологій через інформаційне поле дає змогу забезпечити актуалізацію знань про середовище та загрози, що сприяє підвищенню рівня ситуаційної обізнаності та автономності рою. Аналіз порівняльних

експериментів між базовою та розширеною онтологіями показав, що рій із розширеною онтологією демонструє кращу координацію, здатність до своєчасного виявлення загроз і гнучкість у прийнятті рішень. Це підтверджує доцільність використання онтологічних моделей для структурованого представлення знань у мультиагентних системах БпЛА та обґрунтовує необхідність їх подальшого удосконалення, зокрема шляхом інтеграції автоматизованих механізмів видобування знань.

Подальші дослідження можуть бути зосереджені на вдосконаленні методів семантичного узгодження та адаптивного оновлення онтологій у режимі реального часу. Перспективним напрямом є розроблення механізмів глибокого навчання для автоматичного аналізування нових джерел даних і включення їх у онтологічні моделі без втрати когерентності системи. Крім того, варто дослідити можливості інтеграції розширених онтологічних моделей із технологіями розподіленого обчислення, що дасть змогу масштабувати їх застосування у великих роях БпЛА. Отримані результати можуть стати основою для створення гнучких і самонавчальних систем керування БпЛА, ефективних у динамічних середовищах.

Список джерел

1. Гладун, А.Я., & Хала, К.О. (2022). Мультиагентна система мережі дронів для захисту критичної інфраструктури з онтологічним поданням знань. *III Всеукраїнська науково-практична Інтернет-конференція «Сучасні комп'ютерні та інформаційні системи і технології»*, 12–19 грудня, 431–436.
2. Гладун, А.Я., & Хала, К.О. (2022). Онтологічний підхід до керування дронами на основі мультиагентної системи та роєвої взаємодії. *Інформаційні технології та безпека: XXII міжн. наук.-практ. конф.*, Київ, 16 листопада, 34–36.
3. Гладун, А.Я., & Хала, К.О. (2023). Застосування онтологічно-орієнтованої структури обміну даними та децентралізованого керування роєм БпЛА. *XXII міжн. наук.-практ. конф. Інформаційні технології та безпека*, Київ, 30 листопада, 65–69.
4. Berners-Lee, T., Hendler, J., & Lassila, O. (2001). The semantic web. *Scientific american*, 284(5), 34-43.
5. Noy, N. F., & Musen, M. A. (2000). Algorithm and tool for automated ontology merging and alignment. *Proceedings of the seventeenth national conference on Artificial intelligence*, 69-74.

6. Gangemi, A., & Presutti, V. (2009). Ontology design patterns. In S. Staab & R. Studer (Eds.), *Handbook on ontologies* (2nd ed., pp. 195-217). Springer. (International Handbooks on Information Systems).
7. Presutti, V., Lodi, G., Nuzzolese, A., Gangemi, A., Peroni, S., Asprino, L. (2016). The Role of Ontology Design Patterns in Linked Data Projects. In: Comyn-Wattiau, I., Tanaka, K., Song, IY., Yamamoto, S., Saeki, M. (eds) *Conceptual Modeling. ER 2016. Lecture Notes in Computer Science()*, vol 9974. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-46397-1_9.
8. Manning, C. D., & Schütze, H. (1999). *Foundations of statistical natural language processing*. MIT press.
9. Krek, S. (2019). Natural Language Processing and Automatic Knowledge Extraction for Lexicography. *International Journal of Lexicography*, 32(2), 115–118. DOI: <https://doi.org/10.1093/ijl/ecz013>.
10. Basereh, M., Caputo, A., & Brennan, R. (2023). Automatic transparency evaluation for open knowledge extraction systems. *J Biomed Semant*, 14(12). DOI: <https://doi.org/10.1186/s13326-023-00293-9>.
11. Mitchell, T. M. (1997). *Machine learning*. McGraw-Hill.
12. Ivanisenko, T. V., Demenkov, P. S., & Ivanisenko, V. A. (2024). An Accurate and Efficient Approach to Knowledge Extraction from Scientific Publications Using Structured Ontology Models, Graph Neural Networks, and Large Language Models. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(21), 11811. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms252111811>.
13. Sarker, I. H. (2021). Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions. *SN Computer Science*, 2(160). DOI: <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00592-x>.
14. Euzenat, J., & Shvaiko, P. (2013). *Ontology matching*. Springer Science & Business Media. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38721-0>.
15. Shvaiko, P., & Euzenat, J. (2005). A survey of schema-based matching approaches. In S. Spaccapietra (Ed.), *Journal on Data Semantics IV*, Vol. 3730, Springer, Berlin, Heidelberg, 146-171. DOI: https://doi.org/10.1007/11603412_5.
16. Hitzler, P., Krotzsch, M., & Rudolph, S. (2009). *Foundations of Semantic Web Technologies* (1st ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781420090512>
17. McIlraith, S. A., Son, T. C., & Zeng, H. (2001). Semantic web services. *IEEE intelligent systems*, 16(2), 46-53. DOI: <https://doi.org/10.1109/5254.920599>.
18. Bizer, C., Heath, T., & Berners-Lee, T. (2009). Linked data-the story so far. *International journal on semantic web and information systems (IJSWIS)*, 5(3), 1-22. DOI: [doi:10.4018/jswis.2009081901](https://doi.org/10.4018/jswis.2009081901).
19. Dou, D., McDermott, D., & Qi, P. (2002). Ontology translation by ontology merging and automated reasoning. In *Proc. EKAW2002 Workshop on Ontologies for Multi-Agent Systems*, 3-18.
20. Wiederhold, G. (1995). Mediation in information systems. *ACM Computing Surveys*, 27(2), 380–382. Retrieved from <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/210376.210390>

21. Levy, A. Y., Rajaraman, A., & Ordille, J. J. (1996). Querying heterogeneous information sources using source descriptions. *Proceedings of the 22nd international conference on very large data bases*, 251-262.
22. Harris, S., Seaborne, A., & Prud'hommeaux, E. (2013, March 21). *SPARQL 1.1 query language*. W3C Recommendation. Retrieved from <https://www.w3.org/TR/sparql11-query/>.
23. Klein, M. C. A. (2004). *Change management for distributed ontologies* [PhD thesis, Vrije Universiteit Amsterdam].
24. Haase, P., & Stojanovic, L. (2005). Consistent Evolution of OWL Ontologies. *Lecture Notes in Computer Science*, 3532, 182-197. DOI: 10.1007/11431053_13.
25. Stojanovic, L. (2003). *Methods and tools for ontology evolution* [PhD thesis, University of Karlsruhe].
26. Resnik, P. (1995). Using information content to evaluate semantic similarity in a taxonomy. *IJCAI*, 1, 448-453. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.cmp-lg/9511007>.
27. Pedersen, T., Patwardhan, S., & Michelizzi, J. (2004). WordNet::Similarity - Measuring the relatedness of concepts. *Demonstrations at HLT-NAACL 2004*, 38-41. DOI: <https://aclanthology.org/N04-3012/>.
28. Sirin, E., Parsia, B., Grau, B. C., Kalyanpur, A., & Katz, Y. (2007). Pellet: A practical OWL-DL reasoner. *Journal of web semantics*, 5(2), 51-53.
29. Glimm, B., Horrocks, I., Motik, B., & Sattler, U. (2014). HermiT: An OWL 2 Reasoner. *Journal of Automated Reasoning*, 53(3), 245-269. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10817-014-9305-1>.
30. Tsarkov, D., & Horrocks, I. (2006). FaCT++ Description Logic Reasoner: System Description. In U. Furbach & N. Shankar (Eds.), *Automated Reasoning. IJCAR 2006* (Vol. 4130, pp. 292-297). Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/11814771_26.
31. Gladun, A., Khala, K., & Martínez-Beha, R. (2021). *Development of object's structured information field with specific properties for its semantic model building*. *CEUR Workshop Proceedings*, 3241, 102-111.
32. Гриценко, В.І., Гладун, А.Я., & Рогушина, Ю.В. (2018). Моделі та методи використання семантичних wiki-ресурсів як джерела знань для поповнення формальних онтологій предметних областей. *Кибернетика та обчислювальна техніка*, 2(192), 23-43, DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt192.02.023>.