

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-10>

УДК 004.8:004.6:681.3

Буров Євген Вікторович, д.т.н., професор<http://orcid.org/0000-0001-8653-1520>**Веремєєнко Андрій Андрійович**, аспірант<https://orcid.org/0009-0000-1916-3254>**Жовнір Юрій Іванович**, PhD<https://orcid.org/0009-0006-6186-2861>**Захарія Олег Васильович**, аспірант<https://orcid.org/0009-0008-6979-129X>**Павлів Ігор Ігорович**, аспірант<http://orcid.org/0009-0003-0957-0843>

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

РОЗВИТОК МЕТОДІВ КОНСОЛІДАЦІЇ ІНФОРМАЦІЇ У СИСТЕМАХ З СИТУАЦІЙНОЮ ОБІЗНАНІСТЮ

Буров Є. В., Веремєєнко А. А., Жовнір Ю. І., Захарія О. В., Павлів І. І. Розвиток методів консолідації інформації у системах з ситуаційною обізнаністю. Науковий напрямок консолідації інформації та побудови систем з ситуаційною обізнаністю набуває особливої актуальності у зв'язку з розвитком інтелектуальних автономних агентів та систем на основі штучного інтелекту. Розроблення ефективних методів об'єднання, узгодження та представлення інформації відіграє ключову роль у підвищенні адаптивності, точності та контекстної обізнаності сучасних цифрових систем. Для подальшого розвитку цього напрямку важливо здійснити всебічний аналіз попередніх досягнень, адже більшість новітніх розробок спираються на вже сформовані підходи, архітектури та перевірені практики. У цій роботі представлено огляд наукових підходів і проаналізовано основні тенденції розвитку методів консолідації інформації у системах з ситуаційною обізнаністю. Зокрема, розглянуто ключові терміни, етапи розвитку концепції ситуаційної обізнаності, способи представлення знань, роль онтологічних моделей, підходи до опрацювання нечіткої та контекстної інформації. Визначено актуальні виклики, відкриті питання та окреслено перспективні напрями подальших досліджень.

Ключові слова: ситуаційна обізнаність; консолідація інформації; онтології; представлення знань; інтелектуальні системи; контекстна інформація; системи штучного інтелекту; автономні агенти; нечітка інформація; інформаційне моделювання.

Burov Ye., Veremeyenko A., Zhovnir Yu., Zakhariya O., Pavliv I. Development of Information Consolidation Methods in Situation Awareness Systems The scientific field of information consolidation and the development of situation awareness systems is gaining increasing relevance due to the rapid advancement of intelligent autonomous agents and systems based on artificial intelligence. The development of effective methods for integrating, harmonizing, and representing information plays a crucial role in enhancing the adaptability, accuracy, and contextual awareness of modern digital systems. For the further advancement of this field, it is essential to conduct a comprehensive analysis of previous achievements, as most recent developments are based on already established methods, architectures, and practical implementations. This paper presents a review of scientific approaches and analyzes the main trends in the development of information consolidation methods in situation awareness systems. In particular, it addresses key terminology, stages in the evolution of the situation awareness concept, approaches to knowledge representation, the role of ontological models, and methods for processing fuzzy and contextual information. The study also identifies current challenges, open issues, and outlines promising directions for future research.

Keywords: situation awareness; information consolidation; ontologies; knowledge representation; intelligent systems; contextual information; artificial intelligence; autonomous agents; fuzzy information; information modeling.

Постановка наукової проблеми. У динамічному середовищі, де проблеми виникають спонтанно, непередбачувано і вимагають швидкого вирішення, консолідація інформації, ситуаційна обізнаність і прийняття рішень на основі такого усвідомлення є важливими частинами людського пізнання. Однак зростаюча складність середовища і властиві людині обмеження в прийнятті швидких і правильних рішень в складних ситуаціях створюють потребу перекладання частини оцінювання ситуації і прийняття рішень на інтелектуальні комп'ютерні системи.

Поняття ситуаційної обізнаності уперше було застосоване ще під час Першої світової війни льотчиком і військовим тактиком Освальдом Більке [1], який підкреслив важливість усвідомлення стратегії та дій противника до того, як він отримає аналогічні знання. Перші дослідження ситуаційної обізнаності як частини систем прийняття рішень були проведені для військових, авіаційних, безпекових та інших складних людино-машинних систем для підтримки діяльності операторів. У таких системах ціна помилки дуже велика, а оператору доводиться враховувати велику кількість факторів при прийнятті рішення, тому важливого значення набуває комп'ютерна підтримка прийняття рішень.

Аналіз досліджень. Здатність консолідувати інформацію, що надходить з різних джерел, в єдину логічно несуперечливу та достовірну модель є важливою складовою процесів у всіх областях, що використовують інформацію для прийняття рішень, таких як безпекові системи, військова справа, охорона здоров'я, управління бізнесом та інші.

За визначенням [2] консолідація інформації базується на використанні методів автоматичного або напівавтоматичного перетворення інформації з різних джерел і створення у різні моменти часу у форму, що забезпечує ефективну підтримку прийняття рішень людиною або штучним інтелектуальним агентом. Також, під консолідацією інформації часто розуміють сферу досліджень, що вивчає такі методи.

Поняття консолідації інформації в інтелектуальних системах, особливо в безпекових, військових та автономних нерозривно пов'язані з поняттями ситуаційної обізнаності та прийняття рішень. Їх взаємозв'язок можна подати як ієрархічний процес, де кожен компонент спирається на попередній, щоб забезпечити ефективну та розумну реакцію системи у динамічному середовищі.

Процес консолідації інформації лежить в основі інтелектуальної системи з ситуаційною обізнаністю. Його метою є інтеграція даних із кількох джерел для створення більш повного, логічно цілісного та точного подання моделі середовища. Він передбачає збір, опрацювання та об'єднання первинних даних з сенсорів, баз даних та інформації від персоналу для зменшення невизначеності та покращення якості інформації. Наприклад, система відеоспостереження поєднує дані з камер, давачів руху та біометричних сканерів для виявлення потенційних зловмисників.

Консолідація інформації відбувається на таких рівнях [3]:

1. Консолідація даних передбачає поєднання первинних даних з кількох сенсорів для покращення якості сигналу та виявлення особливостей, які не можна розпізнати, користуючись окремими джерелами даних. Для цього використовують такі методи, як усереднення, фільтрація та перетворення.

2. Консолідація на рівні характеристик забезпечує отримання інформації з первинних даних, а консолідація відбувається шляхом їх узагальнення. Цей підхід зменшує обсяги даних і зосереджується на релевантних характеристиках, сприяючи більш ефективному опрацюванню та аналізу.

3. Консолідація на рівні прийняття рішень базується на інтеграції результатів використання декількох моделей (алгоритмів) або систем для досягнення остаточного висновку. Високорівнева консолідація особливо корисна при роботі з різнорідними джерелами інформації або при опрацюванні інформації, що походить з декількох незалежних систем.

Крім того, в літературі [3] також розрізняють консолідацію даних, інформації та знань. Консолідація даних зосереджується на інтеграції первинних даних з кількох джерел для створення нових даних, які є більш інформативними та синтетичними. Цей процес має важливе значення у застосунках, які працюють у режимі реального часу. Консолідація інформації передбачає об'єднання опрацьованих даних для висновків вищого рівня, таких як оцінки ситуації або прогнози. Ця сфера стосується синтезу інформації для підтримки процесів прийняття рішень. Консолідація знань містить інтеграцію інформації та розуміння контекстів для формування баз знань. Цей рівень підтримує складні системи міркувань і навчання, забезпечуючи адаптивну та розумну поведінку.

Ситуаційна обізнаність – це сприйняття та осмислення стану поточного середовища та прогнозування майбутніх станів на основі консолідованої інформації. Ситуаційна обізнаність дозволяє інтелектуальним системам і операторам-людям інтерпретувати складні сценарії та виявляти аномалії [4]. Наприклад, у безпековій системі після консолідації даних, отриманих на основі спостереження, система виявляє, що невідома особа затримується біля входу, і розпізнає це як підозрілий паттерн поведінки на основі попередньо сформованих моделей загроз.

У системах з ситуаційною обізнаністю виділяють три рівні сприйняття, яке полягає у розпізнаванні релевантних сутностей та їхніх відношень у середовищі; розуміння, що означає встановлення взаємозв'язків між цими сутностями; та передбачення, тобто прогнозування майбутніх станів системи або потенційних загроз [4]. На основі цієї обізнаності здійснюється процес прийняття рішень, що є вибором курсу дій за визначеними критеріями. Існує декілька типів прийняття рішень, серед яких автоматичне, при якому системи на базі штучного інтелекту самостійно реагують на події (наприклад, активують сигналізацію або зачиняють двері); автоматизоване — коли рішення приймає людина на основі рекомендацій, що надходять від системи (наприклад, аналітик отримує сповіщення та вживає заходів); та спільне, при якому штучний інтелект і людина працюють разом для точнішої оцінки загроз і кращої координації дій у відповідь.

Інтелектуальний автономний агент у таких системах виконує всі основні функції — консолідує інформацію, формує ситуаційну обізнаність, приймає рішення і реалізує відповідні дії — причому все це відбувається в реальному часі та в умовах динамічного середовища з метою досягнення заданих цілей. Реалізація ситуаційної обізнаності на основі консолідованої інформації супроводжується низкою викликів. Серед них — потреба поєднання процесів сприйняття навколишнього середовища з механізмами передбачення, міркування та моделювання наслідків можливих дій. Також важливо забезпечити цілеспрямовану поведінку агента, яка передбачає наявність чітких цілей, здатність вибирати пріоритетну мету на поточний момент і визначати дії, що сприятимуть її досягненню. Ще одним аспектом є необхідність концентрації на обмеженій частині середовища, що пов'язана з поточною метою, із відповідним перемиканням уваги на релевантні параметри. Крім того, у процесі аналізу ситуацій важливу роль відіграють контекстуальні знання, які формуються на основі конкретної конфігурації властивостей об'єктів. Знання часто мають нечіткий характер — один і той самий концепт може мати багато різних прототипів залежно від контексту, а ці прототипи виступають як шаблони, що визначають закономірності та обмеження. Нарешті, динамічність середовища потребує постійного оновлення та валідації онтологічних і поведінкових моделей, щоб зберігати актуальність і ефективність реакцій системи.

Консолідація інформації — це міждисциплінарна наукова галузь, яка вирішує задачу об'єднання даних з кількох джерел для досягнення більш високого рівня ситуаційної обізнаності та прийняття рішень. Її історичний розвиток охоплює декілька десятиліть, еволюціонуючи від ранніх теоретичних моделей до складних методів на основі машинного навчання, які використовуються в сучасних застосунках.

Витоки напряму консолідації інформації можна простежити від ранньої теорії статистичних рішень і методів оцінки у середині 20-го століття. Однією з основоположних фігур у цій галузі був Норберт Вінер, чия праця з кібернетики (1948) [5] ввела принципи керування зворотним зв'язком та опрацювання сигналів, які згодом вплинули на алгоритми консолідації. Одночасно розробка теорії інформації Клодом Шенноном (1948) [6] заклала основу для розуміння невизначеності в комунікації та опрацюванні даних, яка стала ключовим аспектом консолідації інформації.

Протягом 1950-х та 1960-х років поява баєсового оцінювання та фільтрації Кальмана значно вплинули на методології консолідації даних. Фільтр Кальмана, представлений Рудольфом Е. Кальманом у 1960 році, став наріжним каменем у динамічних системах та застосунках відстеження, особливо в аерокосмічній та оборонній галузях. Можливість ітеративної оцінки станів системи на основі зашумлених спостережень стала фундаментальним кроком на шляху до застосувань консолідації у реальному часі.

1970–1980-ті відбулося формування консолідації інформації як наукової дисципліни. 1970-х роках зріс інтерес до інтеграції даних сенсорів, в основному завдяки військовим застосуванням, таким як радіолокаційне та сонарне відстеження. Модель консолідації Joint Directors of Laboratories (JDL), сформульована в 1980-х роках, стала фундаментальною спробою структурувати процеси консолідації. Модель JDL представила ієрархічні рівні консолідації, починаючи від опрацювання даних сенсорів і закінчуючи прийняттям рішень на більш високому рівні [7].

У той же час просунулися математичні теорії, що підтримують моделювання невизначеності. Теорія Демпстера-Шафера, запропонована Артуром Демпстером (1967) і пізніше вдосконалена Гленном Шафером (1976) [8], стала альтернативою баєсовій ймовірності для управління невизначеністю та неповною інформацією. Ця робота вплинула на доказове обґрунтування, важливий підхід до консолідації інформації в оборонній галузі, медичній діагностиці та робототехніці.

Іншою важливою віхою стало розроблення нечіткої логіки Лотфі Заде (1965), яка дозволила системам консолідації опрацьовувати неточні або нечіткі дані. Поєднання ймовірнісних підходів, теорії доказів і нечіткої логіки заклало основу для гібридних підходів до консолідації інформації.

У цей період почав формуватися зв'язок між консолідацією інформації та ситуаційною обізнаністю. Військові і дослідники визнали, що ефективне прийняття рішень вимагає інтеграції численних джерел інформації для побудови цілісного розуміння динамічних середовищ. У 1980-х роках Майки Ендслі (Mica Endsley) у роботах з ситуаційної обізнаності (CO) створила формальну основу, наголошуючи на ролі сприйняття, розуміння та передбачення у прийнятті рішень. Консолідація інформації стала важливою для вдосконалення CO шляхом надання надійних і синтезованих даних у режимі реального часу.

1990–2000-ті роки спостерігалася експансія на цивільне та комерційне застосування. Після 1990-х років консолідація інформації вийшла за межі військового застосування і поширилася на такі сфери, як автономні системи, медична діагностика, моніторинг навколишнього середовища, безпекові системи та фінанси. Зростаюча доступність цифрових сенсорів у поєднанні з досягненнями в галузі штучного інтелекту сприяла інтеграції мультисенсорних і мультимодальних даних.

При цьому, мережецентричні застосування та розподілені мережі сенсорів стали основними рушійними силами досліджень. Методи консолідації були розроблені для підтримки прийняття рішень у режимі реального часу, що призвело до вдосконалення штучних нейронних мереж та методів машинного навчання для розпізнавання образів та класифікації.

У 2001 році Холл і Ллінас опублікували книгу «Довідник з мультисенсорної консолідації даних» [9], яка стала настільною книгою для дослідників і практиків. У книзі формалізовані методи та методології консолідації даних, спрямовані на подолання розриву між теорією та реальними застосуваннями.

У міру того, як застосування ситуаційної обізнаності розширювалося, консолідація інформації стала ключовим фактором, у таких сферах, як реагування на надзвичайні ситуації, управління повітряним рухом і автономна навігація транспортних засобів. Здатність інтегрувати та інтерпретувати великі потоки даних у режимі реального часу дозволила системам покращити виявлення загроз, оцінку ризиків та прийняття оперативних рішень, тісно узгоджуючись із трирівневою моделлю СО Ендслі.

2010-ті – теперішній час з'явився тісний зв'язок між штучним інтелектом і великими даними. Останнє десятиліття ознаменувалося зміною парадигми консолідації інформації, чому сприяє швидкий прогрес у машинному навчанні, аналітиці великих даних та системах штучного інтелекту. Поширення пристроїв IoT, мобільних обчислень і хмарних технологій викликало потребу в більш масштабованих і адаптивних фреймворках консолідації.

Сучасна консолідація інформації все частіше використовує архітектури глибокого навчання, такі як згорткові нейронні мережі (CNN) і трансформери, для автоматичного екстрагування та інтеграції інформації зі складних потоків даних. Навчання з підкріпленням і моделі на основі графів виявилися потужними інструментами для динамічної та контекстно-залежної консолідації інформації.

Крім того, з появою систем штучного інтелекту дослідники тепер зосереджуються на інтерпретованих моделях консолідації, які забезпечують прозорість у прийнятті рішень, особливо у застосунках для галузей з високими ризиками, таких як охорона здоров'я, кібербезпека та автономні транспортні засоби.

Зв'язок між консолідацією інформації та ситуаційною обізнаністю продовжує поглиблюватися, особливо з розвитком контекстно-залежних систем штучного інтелекту. Сучасні інтелектуальні системи не тільки інтегрують дані, але й адаптуються до змінних середовищ, прогнозують потенційні результати та підтримують прийняття рішень людиною.

Мета роботи. Збільшення складності сучасних інформаційних систем та швидкий розвиток технологій штучного інтелекту відкривають нові можливості для розвитку систем підтримки прийняття рішень з ситуаційною обізнаністю на основі консолідованої інформації. Науковий напрямок систем з ситуаційною обізнаністю та органічно пов'язана з ним проблематика консолідації інформації динамічно розвиваються, що створює потребу розуміння нових тенденцій у контексті еволюції існуючих методів та архітектур.

Метою дослідження є огляд та аналіз тенденцій розвитку методів побудови та моделювання систем консолідації інформації з ситуаційною обізнаністю.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Науковий напрямок консолідації інформації та ситуаційної обізнаності на сьогодні розглядає багато проблем та практичних задач. У цій роботі ми зосередимося на розвитку фундаментальних, на нашу думку, аспектів проблематики консолідованої інформації, зокрема на онтологічному поданні знань у таких системах, моделях процесів СО, опрацюванні невизначеностей та контексту.

Еволюція використання онтологій у процесах консолідації інформації. Процеси консолідації інформації у системах з СО опрацьовують інформацію подану у вигляді концептів та відношень. Стандартизація цих концептів у вигляді спільної формальної концептуалізації – онтології- створює такі переваги:

1. Онтології надають спільний словник термінів та розуміння їх значення для процесів консолідації інформації на різних рівнях і у різних прикладних галузях. Це уможливорює єдине розуміння та повторне використання інформації.
2. Використання формальних визначень необхідне для проведення складних міркувань у процесах консолідації вищих рівнів, таких як оцінка ситуації чи прогнозування наслідків.
3. Використання онтологій полегшує розуміння процесів та результатів консолідації людиною-оператором. Це дає змогу включити людину у процес прийняття рішення, а також використати когнітивні здібності оператора для уточнення та перевірки процесу консолідації та прийняття рішень.
4. Використання онтологій дає змогу подати та опрацьовувати різні форми невизначеностей, використовуючи як кількісні так і якісні метрики.
5. Використання онтологій уможливорює формування запитів щодо наявних та майбутніх ситуацій.

Онтології, що використовуються для консолідації інформації, повинні ґрунтуватися на загальній фундаментальній онтології, яка підтримує міркування про просторові та часові аспекти ситуацій, а також підтримує концептуалізацію невизначеності. Ця онтологія повинна поєднуватися з відповідною онтологією предметної галузі, що конкретизує її поняття і відношення.

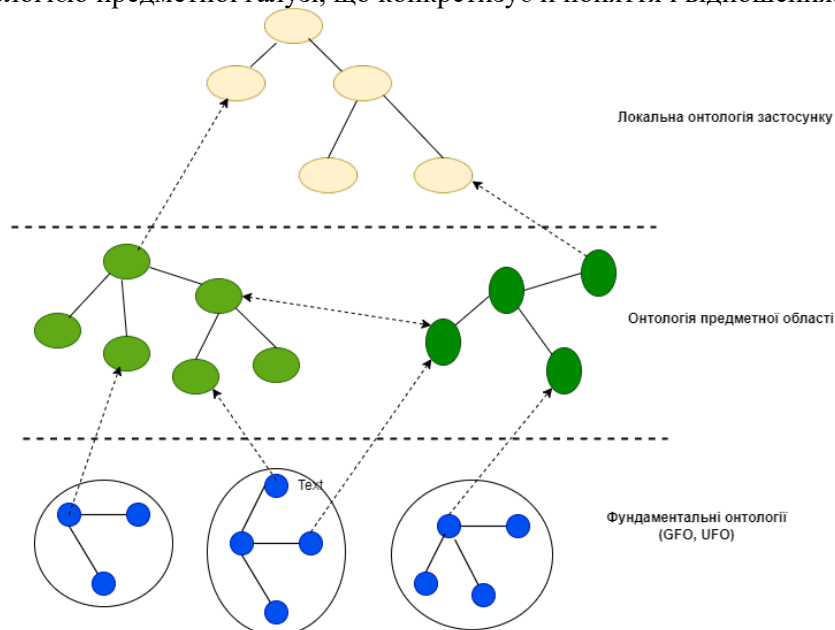


Рис.1. Трьох рівнева модель інтеграції онтологій

Розуміння важливості використання онтологій у системах з ситуаційною обізнаністю простежується вже на ранніх етапах дослідження таких систем. Так, у [10] запропоновано базову онтологію ситуаційної обізнаності (SAW Core Ontology), що містить взаємопов'язані поняття мети, ситуації, події. Для підтримки логічного виводу використовуються правила. Онтологія позиціонується як основа, яка може бути доповнена концептами та відношеннями конкретних галузей використання. У роботі [11] описано програмний засіб Situation Awareness Assistant (SAWA), що спрощує концептуалізацію знань у конкретних галузях знань у формі онтологій та наборів правил. Він також дозволяє моделювати розвиток ситуацій.

Загальноприйнятим підходом у використанні онтологій є поєднання різних онтологій, в результаті якого формується онтологія, орієнтована на досягнення ситуаційної обізнаності та підтримки прийняття рішень у конкретній предметній галузі.

Так, у роботі [12] онтологія формується як результат інтеграції онтологій з трьох рівнів (рис.1). На нижньому рівні використовують високорівневу (foundational, upper-level) онтологію, таку як OpenCyc, SUMO, DOLCE. На другому рівні застосовують онтологію предметної галузі. На

найвищому рівні задіяна онтологія конкретного застосування. Між концептами онтологій різних рівнів реалізовано відображення.

У статті [13] запропоновано онтологію, що охоплює всі рівні моделі ситуаційної обізнаності. Такий підхід дає змогу сформулювати моделі структур на багатьох рівнях та підтримує міркування як у межах конкретних рівнів, так і такі, що охоплюють декілька рівнів. При цьому використовується предметне представлення відношень, подій, ситуацій та сценаріїв, що спрощує повторне використання знань на всіх рівнях (рис.2).

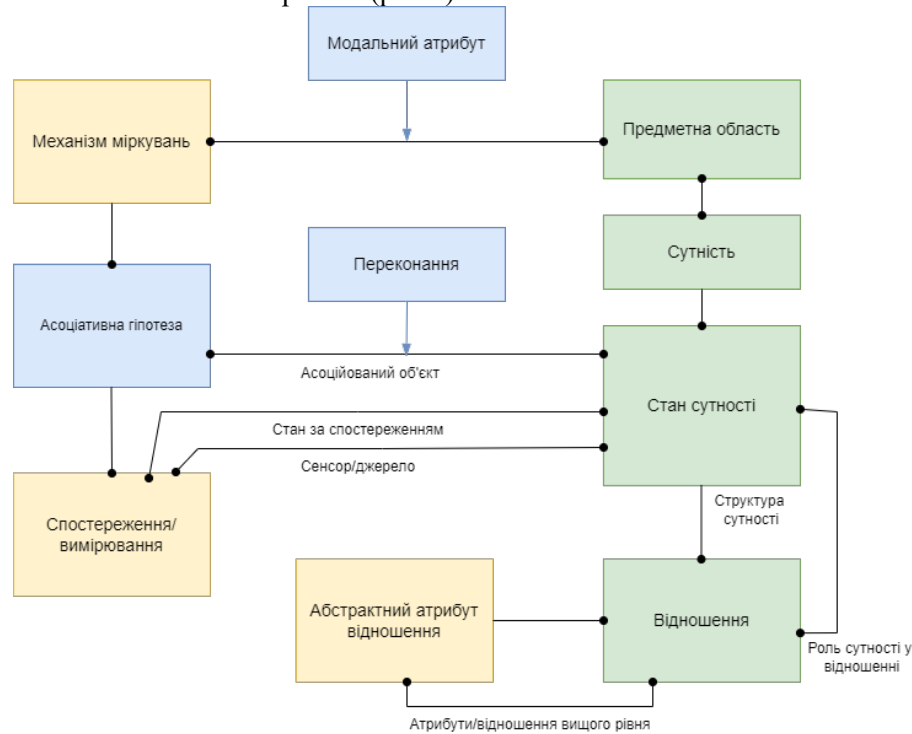


Рис.2. Високорівнева онтологія за джерелом [13]

Реалізація систем з ситуаційною обізнаністю вимагає врахування неточностей та невпевненості щодо достовірності інформації як на рівні онтології, так і на рівні міркувань та прийняття рішення. Тому підтримка концептуальних конструкцій, що дозволяють подавати та міркувати в умовах непевності є важливим напрямом розвитку онтологій СО. У роботі [14] розглянуто онтологію Probabilistic OWL (PR-OWL) що є розширенням OWL. Вона дає змогу подавати складну структуру відношень з врахуванням наявних фактів та гіпотез. PR-OWL для логічного виведення використовує ймовірнісну логіку. У роботі [15] пропонується вирішення задачі консолідації інформації з використанням мета-онтології (DS-онтології) на основі теорії функцій переконань для представлення невизначеностей у спостереженнях. Вона визначає оператори семантичного включення та перетину, розширюючи теоретичну базу для консолідації інформації.

У статті [16] розглядається проблема визначення рівня довіри до результатів консолідації інформації та пропонується фреймворк ComTrustO, який інтегрує чотири типи довіри — комунікативну, інформаційну, соціальну та когнітивну довіру — у композитну онтологію довіри для ефективного прийняття рішень у складних середовищах. Фреймворк спрямований на покращення фільтрації та об'єднання різнорідних даних для підтримки прийняття рішень. У роботі [17] наголошується на використанні онтології як семантичної моделі для консолідації інформації на рівні функцій і вводиться алгоритм опрацювання даних, який підтримує надійний рівень довіри в динамічних середовищах. Крім того, у статті запропонована модель Transferable Belief Model (TBM) для консолідації на рівні прийняття рішень, демонструючи прогрес в опрацюванні невизначеності та покращенні інтеграції даних у різних застосунках, особливо у системах реального часу. Консолідація інформації з багатьох джерел та використання багаторівневих онтологій у системах з СО вимагають узгодження значення концептів між онтологіями. Тому проблема узгодження онтологій є важливою складовою робіт по онтологіям СО.

У роботі [18] проаналізовано фреймворк для об'єднання різнорідних онтологій предметної області, наголошуючи на ідентифікації та корекції семантичних відношень, процесах консолідації та опрацювання відсутніх знань за допомогою статистичних методів. Стаття [19] присвячена аналізу

масштабованого методу об'єднання онтологій, зокрема за допомогою програми CoMerger, яка покращує консолідацію інформації шляхом групування пов'язаних концептів. Цей підхід вирішує проблеми масштабованості, пов'язані з традиційними методами бінарного об'єднання, демонструючи високу продуктивність. Значна увага також приділена вирішенню задач консолідації інформації для різних сфер застосування та розробленні відповідних онтологій. У статті [20] проаналізовано типи складних відношень, які використовуються в онтології STA (Situations and threat assessment - оцінка ситуацій і загроз), та як вони можуть слугувати теоретичною основою для вдосконалення існуючих інструментів розроблення онтологій, особливо для онтології STA. Робота [12] зосереджена на використанні онтологій для підвищення ситуаційної обізнаності у військовому контексті з використанням консолідації інформації. У ній висвітлюється розвиток онтології обізнаності про ситуацію (SAO – Situational Awareness Ontology) для інтеграції онтології військових сценаріїв (MSO-Military Scenario Ontology) та онтології управління боєм (BMO- Battle Management Ontology) для підтримки прийняття рішень та міркувань на вищих рівнях моделі ситуаційної обізнаності.

У статті [21] дослідники зосереджуються на перевагах використання онтологій у мультиагентних системах, таких як сумісність, багаторазове використання та підтримка комунікації та міркувань агентів. У запропонованій моделі наголошується на важливості онтологій у сприянні ефективній комунікації між різнорідними агентами в динамічних середовищах. Незважаючи на велику кількість наукових праць і значний інтерес до проблем подання та використання знань у системах з ситуаційною обізнаністю, аналіз наявних джерел дозволяє виявити низку невирішених проблем і перспективних напрямів розвитку онтологій для таких систем. Однією з ключових проблем є подання та моделювання динамічних ситуацій, оскільки сучасні онтології та методи формалізації знань стикаються з труднощами при адекватному відображенні змінних та еволюціонуючих ситуацій у просторі й часі. Крім того, складним залишається питання представлення просторово-часових та онтологічних обмежень, адже навіть системи з високорівневою консолідацією інформації не мають уніфікованих вимог до відображення фактів і подій, що ускладнює точне моделювання причинно-наслідкових зв'язків у конкретній предметній області та гальмує ефективну ситуаційну оцінку. Не менш важливою проблемою є консолідація інформації різного ступеня структурованості та формату, адже поки що не існує достатньо надійних методів для обґрунтованого поєднання різнорідних типів даних. Значні труднощі викликає також семантична багатозначність і проблема визначення значення символів, що вимагає розроблення формальних, строгих семантичних фреймворків для точного подання складних взаємозв'язків і контекстно-залежної семантики. Окремою невирішеною задачею залишається відсутність чітких метрик для оцінки ефективності процесів консолідації, особливо на вищих рівнях, оскільки досі немає узгодженого підходу або показників, які б дозволяли об'єктивно оцінити системи на основі онтологій у сценаріях з високою складністю взаємодій. Також актуальним напрямом є підтримка когнітивних і соціальних факторів у системах ситуаційної обізнаності, що зумовлює необхідність створення онтологій, здатних відображати, оцінювати та прогнозувати складні сценарії за участю окремих осіб або груп людей.

Розвиток моделей процесу ситуаційної обізнаності. Дослідження в області консолідації інформації та ситуаційної обізнаності використовують різні концептуалізації процесу ситуаційної обізнаності. Історично, вони були подані у вигляді різних фреймворків, архітектур і концептуальних моделей, що відображають розуміння цього процесу та визначають спрямування

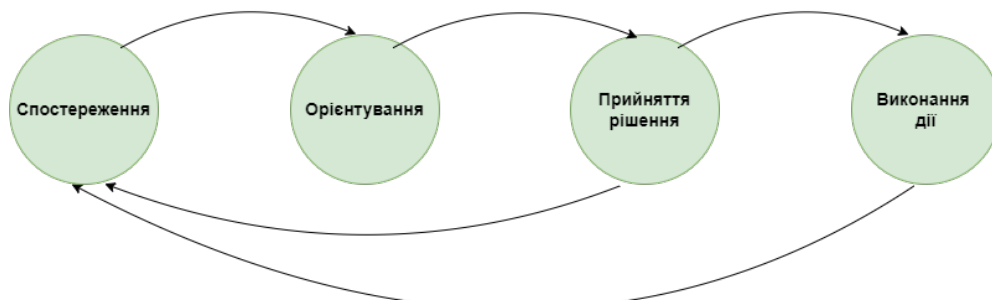


Рис.3. Петля Бойда

досліджень. Ранні моделі процесу ситуаційної обізнаності були розроблені для застосування військовими пілотами для швидкої оцінки ситуації на полі бою. Такою моделлю була петля Джона Бойда OODA (Observe-Orient-Decide-Act) [22,23] (рис.3) та модель Predict-Match- Extract-Search [24]. На думку Бойда, прийняття рішень відбувається в повторюваному циклі Спостереження – Орієнтування – Прийняття рішення- Виконання дії. Суб'єкт, який може швидко виконувати цей цикл, спостерігаючи і реагуючи на розгортання подій швидше, ніж опонент, може тим самим «проникнути» в цикл прийняття рішень опонента і отримати перевагу. Недоліком цієї моделі є те, що вона не є проактивною, не передбачає можливих наслідків дій.

Ендслі [4, 25] розробила модель ситуаційної обізнаності для авіадиспетчерів. Вона запропонувала узагальнену модель СО в термінах опрацювання інформації. Вона припустила, що СО можна розділити на три рівні або етапи ментальної репрезентації.

Рівень 1. Сприйняття особою, яка приймає рішення, статусу, атрибутів та динаміки відповідних елементів у середовищі (ситуація прийняття рішення). Рівень 1 СО є найнижчим і базовим рівнем СО. Досягнення першого рівня СО включає в себе базові процеси виявлення інформації.

Рівень 2. Розуміння особою, що приймає рішення, сприйнятої інформації, тобто рівень 2 СО досягається за допомогою розпізнавання, інтерпретації та оцінки образів. Рівень створює повну картину навколишнього середовища.

Рівень 3. Передбачення ситуації складається з передбачення елементів ситуації, оцінки впливу, моніторингу ситуації, а також спостереження за динамікою ситуації та уточнення процесу.

Ранні моделі ситуаційної обізнаності були орієнтовані на використання людиною-оператором. На наступному етапі дослідження ситуаційної обізнаності були розроблені загальніші моделі, орієнтовані на інтелектуальних агентів з ситуаційною обізнаністю.

Найвідомішою з них є функціональна модель Joint Directors Laboratories (JDL). Модель JDL поділяє процес усвідомлення ситуації на п'ять рівнів [7]:

- Рівень 0. Оцінка сигналів/ознак.
- Рівень 1. Оцінка сутностей.
- Рівень 2. Оцінка ситуацій.
- Рівень 3. Оцінка впливу.
- Рівень 4. Оцінка результативності.

На 0 рівні сигнали від різних сенсорів збираються та інтерпретуються як вхідні дані, що представляють атрибути вимірюваних об'єктів. Сигнали піддаються опрацюванню, і у вимірних даних оцінюються похибки. На 1 рівні отримані дані інтерпретуються як атрибути сутностей з онтології. Другий рівень передбачає аналіз сутностей, що беруть участь у поточному контексті, та їх взаємозв'язки з метою побудови моделі контексту та виявлення ситуацій у цьому контексті. Цей рівень оперує концептуальними моделями середовища, контексту, ситуацій. Третій рівень передбачає планування дій на основі виявлених ситуацій, прийняття рішень та аналіз наслідків цих рішень. На четвертому рівні проводиться оцінювання відповідності між поточною ситуацією і цілями системи, аналіз продуктивності, надання зворотного зв'язку на нижчі рівні моделі, оновлення моделей. Проте моделі JDL не врахували дії людини-оператора у контурі прийняття рішень. Цей недолік було виправлено у моделі DFIG (Data Fusion Information Group) (рис.4). Крім того, у ній функціональні вузли консолідації інформації були відокремлені від вузлів керування ресурсами [26].

У роботі [27] пропонується динамічну модель прийняття рішень з ситуаційною обізнаністю, яка була натхненна моделлю Ендслі. Модель має ядро СО, тоді як сенсори та компоненти прийняття рішень винесені назовні. Сенсори надають дані про стан навколишнього середовища. Отримані дані консоліднуються для усунення надлишкових, таких як кілька схожих зображень, отриманих різними камерами, або величин, виявлених різними сенсорами, що знаходяться поблизу один одного. Потім консолідовані дані передаються в ядро СО, яке складається з трьох частин, що відповідають за інтерпретацію, розуміння та передбачення. На думку авторів [27] така модель буде покладена в основу динамічних застосунків, що керують даними.

Стаття [28] ставить під сумнів доцільність ієрархічного розподілу задач консолідації, відображеного, зокрема у моделях JDL та DFIG. Автори наголошують, що ієрархічне розбиття задач не повинно бути перешкодою для рішень консолідації, що охоплюють різні рівні. Авторами розроблена більш гнучка і повна модель консолідації, що охоплює декілька рівнів.



Рис. 4. Модель DFIG

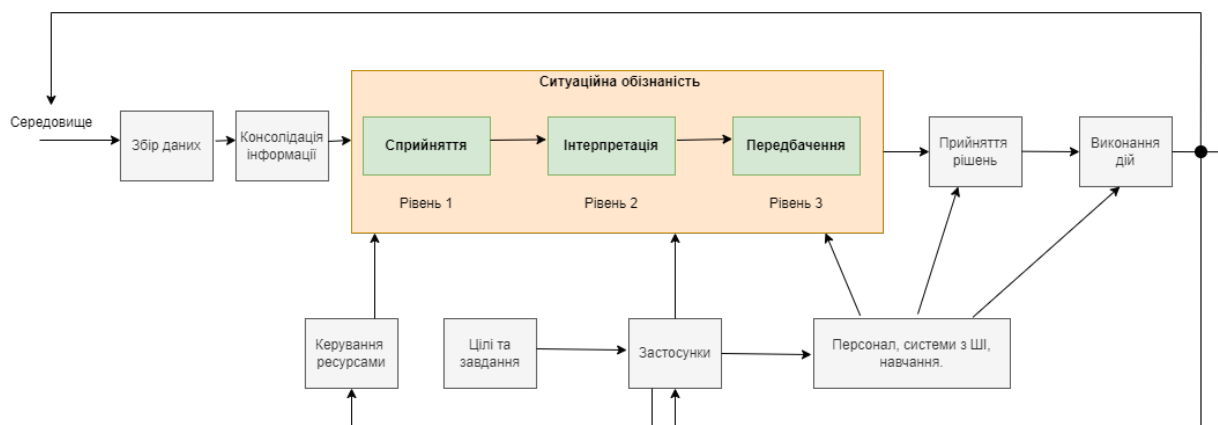


Рис.5. Динамічна модель прийняття рішень з СО

Класичні моделі реалізують послідовний процес досягнення ситуаційної обізнаності, що передбачає зчитування даних з середовища, їх інтерпретацію, оцінку ситуації, прийняття рішення. Водночас, сучасне розуміння когнітивних процесів людини вважає первинним використання знань про подібні ситуації. Інформація з середовища використовується тільки, і якщо потрібно, для корекції моделі ситуації згенерованої на основі досвіду. Такий підхід дає змогу економити ресурси на аналізі середовища (адже враховується тільки різниця між передбаченим та наявним) та зменшити час, потрібний на прийняття рішення. Стаття [29] пропонує модель процесу ситуаційної обізнаності, що керується цілями та завданнями інтелектуального агента та фокусується на передбаченні біжучої ситуації та її розвитку.

Таким чином, функціональні моделі процесів консолідації інформації у системах з ситуаційною обізнаністю продовжують розвиватися. На сьогодні вони відображають загальну орієнтацію на побудову інтелектуальних агентів, здатних сприймати та консолідувати інформацію з різнотипних джерел, інтерпретувати її, визначати ситуації та можливі варіанти їх розвитку, а також приймати рішення автономно.

Опрацювання неповної та неточної інформації у системах з ситуаційною обізнаністю. Інтелектуальний агент, що виконує консолідацію інформації та оперує у реальному середовищі, постійно стикається з неповнотою, нерелевантністю та недостовірністю інформації. Здатність опрацьовувати таку інформацію є ключовою вимогою до інтелектуального агента.

Опрацювання неповної та нечіткої інформації стикається з такими проблемами:

1. Інформація від кожного джерела має свій рівень точності та надійності. Консолідація інформації з різних джерел має це враховувати.

2. Існують різні форми неточної інформації, такі як відсутня, нерелевантна, надлишкова, неточна, помилкова, суперечлива, нечітка, багатозначна інформація, дезінформація, незнання. Кожна з цих форм нечіткості вимагає окремих моделей та методів опрацювання. Ситуація додатково ускладнюється, якщо декілька форм нечіткості комбінуються.

3. Консолідація невизначеної, сумнівної або неповної інформації часто передбачає зв'язок потоків даних або спостережень з конкретними сутностями або ситуаціями, які виступають джерелами даних. Це завдання асоціювання даних ускладнюється через неточності, неповні дані або навмисну дезінформацією. Питання правильної атрибуції та узгодження даних з кількох різномірних джерел є особливо складним, коли якість даних значно відрізняється в різних джерелах.

4. Системи консолідації інформації повинні управляти даними, достовірність, актуальність або точність яких змінюється з часом. Робота з динамічною ситуацією, особливо, коли атрибути, відношення або саме середовище швидко змінюється, - містить значні складності. Методи консолідації інформації повинні бути здатні опрацьовувати часову невизначеність і переходи в оцінюванні станів складних сутностей і ситуацій.

5. Складні сутності і ситуації включають взаємопов'язані сутності, атрибути і відношення. Системи консолідації високорівневої інформації (HLIF) повинні моделювати та міркувати про ці складні структури, включаючи непрямі висновки, багатовимірні відношення та приховану контекстуальну інформацію. Нечітка та невизначена інформація ускладнює управління цими взаємодіями та проведення надійної оцінки ситуації.

6. Навмисна дезінформація та сумнівні дані значно ускладнюють процеси консолідації. Системи повинні розрізняти автентичну та не правдиву інформацію, що особливо складно в сценаріях, пов'язаних з активним обманом або кіберзагрозами. Ця проблема підкреслює важливість надійних методів виявлення аномалій і необхідність включення метрик надійності в алгоритми консолідації.

7. Участь людини на різних рівнях консолідації вносить суб'єктивні упередження та невизначеності інтерпретації. Координація контексту, суджень і суб'єктивних даних, отриманих від людини, з автоматизованими машинними процесами (дані сенсорів) вимагає обережного поводження з інтерпретаційними невизначеностями та упередженнями, внесеними людьми. Ці питання набувають особливої гостроти в завданнях консолідації вищого рівня, що включають прийняття стратегічних рішень та прогнозування.

8. Інтеграція даних низькорівневих сенсорів з високорівневими для консолідації інформації на різних семантичних рівнях є постійною проблемою. Досягнення ефективної міжрівневої комунікації та семантичної сумісності вимагає складних механізмів подання, моделювання невизначеності та ефективного використання семантичних технологій.

Різновиди невизначеностей та методи їх опрацювання. Проблема опрацювання різного типу невизначеностей у системах з консолідацією інформації розглядається протягом довшого часу. Так, наприклад, у статті [30] розглянуто різновиди невизначеностей, що зустрічаються у системах з ситуаційною обізнаністю. Відповідно до роботи [30] всі невизначеності можна поділити на два класи:

1. Неточність як природня властивість інформаційних процесів (сенсори мають обмежену точність, при передаванні інформації бувають помилки).

2. Невідповідність як результат інтерпретації інформації інтелектуальним агентом (розуміння ситуації може бути помилковим, або не враховувати важливих факторів).

В роботі [31] розглянуто такі типи невизначеностей як неточність, недостовірність, відсутність значень, нерелевантність, конфлікт (протиріччя), нецілісність, багатозначність, дезінформація на різних рівнях моделі JDL та наведені методи їх опрацювання. Для опрацювання різних типів невизначеностей було розроблено різні математичні методи. Нижче наведено аналіз та порівняння деяких відомих методів. Ймовірнісні методи подають нечіткість за допомогою розподілів ймовірностей. Вони, як правило, використовуються для задач прогнозування та класифікації, де невизначеність фіксується статистичними варіаціями, для відстеження цілей, опрацювання сигналів, інтерпретація даних сенсорів [32].

Бассові методи оновлюють оцінки ймовірності, коли з'являються нові дані з використанням теореми Баєса. Вони особливо корисні для динамічних систем, де факти накопичуються з часом, для динамічного оцінювання ситуації, визначення загроз, медичної діагностики [33]. Теорія доказів

(теорія Демпстера-Шафера) узагальнює баєсову ймовірність для явного опрацювання та пояснення невизначеності та незнання. Вона працює з фактами, що походять з різних джерел та мають різну достовірність. І застосовуються для консолідації даних сенсорів у нечітких середовищах, прийняття рішень в умовах неповної інформації, вирішення конфліктів між повідомленнями з декількох джерел [34]. Нечітка логіка дозволяє міркувати в умовах невизначеності та неточності, використовуючи ступені істинності замість бінарної логіки. Вона підходить для задач, пов'язаних з людським міркуванням і описами у якісній формі, для взаємодії людини з комп'ютером, моделювання систем у нечітких середовищах, роботи з лінгвістичними змінними [35]. Марківські логічні мережі поєднують ймовірнісні графові моделі та логіку першого порядку, забезпечуючи основу для одночасного опрацювання невизначеності та реляційних структур, ситуаційної обізнаності, моделювання складних відношень, автоматизованого міркування в умовах невизначеності [36,37].

Порівняння методів опрацювання невизначеностей наведено у таблиці 1.

Метод	Вид невизначеності	Обчислювальна складність	Застосування	Переваги	Недоліки
Ймовірнісний	Статистичні змінні	Середня	Динамічні та середовища з невизначеністю	Надійний для відомих розподілів ймовірності	Не підтримує опрацювання незнання
Баєсові	Оновлення значень ймовірностей	Висока	Послідовні та змінні дані	Простий метод для врахування нових фактів	Вимагає наявності точних попередніх оцінок ймовірності
Теорія доказів	Двозначність та незнання	Висока	Неповна або конфліктна інформація	Явно опрацьовує незнання	Висока обчислювальна складність
Нечітка логіка	Неточність	Низька-Середня	Якісні та нечіткі визначення	Інтуїтивно зрозумілий	Наявність суб'єктивізму у визначеннях
Марківські логічні мережі	Невизначеність відношень	Висока	Складні реляційні та неточні дані	Поєднує логіку та ймовірність	Висока обчислювальна складність

Фреймворк URREF для концептуального опрацювання невизначеностей. Основним фреймворком для концептуального подання невизначеностей у системах з консолідацією інформації є Uncertainty Representation and Reasoning Evaluation Framework (URREF) [38]. Цей фреймворк розроблено для систематичного подання та опрацювання невизначеностей в системах консолідації інформації. Головні компоненти URREF такі.

1. Онтологія невизначеності встановлює семантичну основу для визначення та категоризації різних типів невизначеності, забезпечуючи більш чітку комунікацію між користувачами-людьми та автоматизованими системами. URREF наголошує на важливості семантичних онтологій для поєднання низькорівневих та високорівневих завдань консолідації.
2. Стандартизоване оцінювання полягає у поданні стандартизованих метрик та методології для систематичної оцінки та порівняння різних підходів до опрацювання невизначеностей, забезпечуючи узгодженість і повторюваність оцінок у системах консолідації інформації.
3. Можливість застосування на багатьох рівнях підтримує подання невизначеності на кількох рівнях моделі JDL, від оцінювання об'єкта (рівень 1) до оцінювання ситуації (рівень 2) та оцінювання впливу (рівень 3). Цей міжрівневий підхід забезпечує інтеграцію та перехід невизначеностей між рівнями.

4. Багатовимірною характеристикою аналізується за кількома вимірами, такими як точність, своєчасність, впевненість і значення. Ці виміри допомагають відобразити багатогранний характер невизначеності, що впливає на системи консолідації інформації.

5. Контекстуальна інтеграція наголошує на інтеграції оцінки невизначеності в операційних контекстах, удосконаленні процесів прийняття рішень шляхом уточнення оцінок невизначеності та надання більш надійних оцінок ситуації.

Концептуально URREF подає систему консолідації як «чорну скриньку», з вхідною та вихідною інформацією [38]. Опрацювання різних форм невизначеності та міркування в умовах невизначеності забезпечується використанням плагінів, що надає системі гнучкості (рис.6).



Рис. 6. Концептуальна модель URREF

Процес опрацювання інформації в URREF містить операції отримання інформації, подання невизначеностей у ній, агрегацію та комбінацію, міркування, прийняття рішення, що відповідає процесу консолідації у моделі JDL. Загалом, фреймворк URREF робить значний внесок в опрацювання невизначеності в складних сценаріях консолідації інформації, підтримуючи більш точні та дієві результати консолідації завдяки явному подання та ретельному аналізу невизначеностей різних типів.

Формування та оцінювання ступеня довіри до результатів консолідації інформації. Успіх використання систем ситуаційної обізнаності з консолідацією інформації значною мірою залежить від довіри користувачів до результатів консолідації [39-41]. У міру того, як ці системи стають все більш складними, включаючи використання методів штучного інтелекту і машинного навчання, питання про те, наскільки користувачі можуть покладатися на ці результати, стає важливим напрямком досліджень [40,41]. Сучасний стан досліджень ступеня довіри у консолідації інформації є динамічним напрямом, що вирішує проблеми, як витікають з багатогранної природи самої довіри, її складних зв'язків з невизначеністю та пояснюваністю, розвитком формальних моделей та онтологій, проблемами масштабованості та гострою потребою в надійних методологіях оцінювання.

Однією з основних проблем у цій галузі досліджень є розуміння різних вимірів довіри, що мають відношення до консолідації інформації. Довіра – це не монолітне поняття, а скоріше сукупність різних факторів. Довіра з позицій людини часто включає в себе оцінку здібностей, чесності та доброзичливості [39]. Користувачі повинні вірити в уміння системи надавати точну інформацію, правдивість повідомлень про результати та відповідність їхнім цілям. Проте з точки зору машини довіра може бути пов'язана з продуктивністю (наприклад, точність показників), достовірністю (наприклад, ступенем впевненості) і своєчасністю наданої інформації [39,41]. Врахування довіри людини та машини має вирішальне значення у людино-машинних системах, де обидва агенти повинні довіряти один одному для ефективної співпраці. Крім того, в мережних системах консолідації інформації довіра до мережі, з огляду на надійність і безпеку зв'язку, стає ще одним важливим фактором.

Дослідження довіри до консолідованих даних нерозривно пов'язані з поняттям невизначеності [40,41]. Як правило, існує зворотна залежність - чим більшою є невизначеність інформації, тим менше довіри вона заслуговує. Оскільки кількісна оцінка невизначеності лежить в основі алгоритмів консолідації інформації, оцінка та управління невизначеністю має фундаментальне значення для побудови довіри. Онтологія у фреймворку URREF забезпечила основу для оцінки

різних типів невизначеності, присутніх у системах консолідації інформації, і того, як вони пов'язані з довірою. Зіставляючи конструкції довіри з URREF, дослідники прагнуть встановити вимірювані критерії для аналізу та оцінки невизначеності довіри [41].

Значна частина досліджень зосереджена на зміцненні довіри до систем консолідації інформації на основі штучного інтелекту [40-42]. У міру того, як методи штучного інтелекту, особливо глибинного навчання, стають все поширенішим у процесах консолідації, природа «чорної скриньки» цих методів створює проблему для довіри користувачів. Користувачі повинні розуміти, як система приходить до своїх висновків, щоб розвинути відповідний рівень довіри. Дослідження досліджують різні типи пояснюваності та їх вплив на процеси побудови довіри. Концептуальні моделі, такі як Technical factors, Human factors, Assessments, Operational conditions, and Explainability (THEOX), розробляються для розуміння складної взаємодії між цими факторами та їх впливу на довіру до автоматизованих систем консолідації інформації [42]. Щоб формально моделювати та міркувати про довіру, науковці все частіше використовують онтологічні підходи [43]. Онтології забезпечують структурований спосіб представлення понять та їх взаємозв'язків, що сприяє семантичній інтеграції та міркуванням про довіру. Такі фреймворки, як ComTrustO (Composite Trust-based Ontology framework) [44] пропонують інтеграцію багатьох вимірів довіри – комунікації, інформації, соціальної та когнітивної довіри – в єдину онтологічну модель для консолідації інформації та прийняття рішень. URREF слугує онтологічним каркасом для оцінювання невизначеності, яка тісно пов'язана з довірою. Поточні дослідження вивчають, як різні онтології, пов'язані з довірою, можуть бути відображені та інтегровані, щоб забезпечити більш повне розуміння довіри в контекстах консолідації інформації. Масштабованість систем консолідації інформації є ще однією важливою проблемою для формування та підтримки довіри. Оскільки обсяг і різноманітність даних зростають, забезпечення того, щоб система могла ефективно опрацьовувати інформацію та підтримувати довіру користувачів, має першорядне значення. Дослідження свідчать про позитивну кореляцію між масштабованістю та довірою. Такі підходи як консолідація інформації на основі фізичних законів та людських суджень, яка поєднує залежності між даними, що засновані на законах фізики, з інформацією, отриманою від людини, досліджуються на предмет масштабованості та надійності. Концепція цифрових двійників також з'явилася як спосіб підвищити довіру до прийняття масштабованих рішень за допомогою використання як знань, так і моделювання фізичних процесів [39].

Важливим аспектом сучасних досліджень є розроблення надійних методологій оцінювання довіри. Це включає визначення показників продуктивності, показників ефективності та показників якості, які охоплюють різні аспекти довіри. Дослідники наголошують на необхідності аналізу як кількісних показників, так і якісних оцінок для отримання всебічного розуміння довіри. Ігрові підходи також використовуються для вивчення процесів формування довіри в невизначеному та багатокористувацькому середовищі шляхом спостереження за поведінкою людини при прийнятті рішень [40]. Крім того, дослідження відзначають часову динаміку довіри [41,45]. Довіра не є статичною. Вона розвивається з часом залежно від досвіду роботи користувача з системою, її стабільної продуктивності та змін у робочому контексті. Розуміння того, як довіра будується, руйнується та потенційно відновлюється з часом, є важливою сферою поточних досліджень.

Сучасний стан досліджень довіри до систем консолідації інформації визначає кілька ключових проблем і майбутніх напрямків досліджень. Центральною проблемою залишається інтеграція людського фактора з технічними можливостями для створення систем, які є одночасно ефективними та заслуговують на довіру [39]. Існує постійна потреба в розробленні прозоріших і зрозуміліших методів штучного інтелекту для консолідації інформації. Стандартизація метрик і фреймворків для оцінювання рівня довіри у застосунках різних предметних галузей має вирішальне значення. Майбутні дослідження, ймовірно, будуть зосереджені на вдосконаленні онтологічних моделей довіри, розробленні динамічних методів оцінювання рівня довіри, які враховують часові та контекстуальні варіації, а також створенні інтерфейсів користувача, які ефективно передають невизначеність і системні міркування для побудови та підтримки довіри користувачів.

Підсумовуючи, дослідження рівня довіри до систем консолідації інформації охоплює широкий спектр перспектив, від розуміння когнітивних і психологічних аспектів людської довіри до розроблення формальних моделей і методів оцінювання рівня довіри до машин. Поточні зусилля щодо вирішення проблем, пов'язаних з невизначеністю, масштабованістю та динамічним характером рівня довіри, мають вирішальне значення для реалізації повного потенціалу систем консолідації інформації у критично важливих застосунках прийняття рішень.

Сучасні тенденції у поданні та опрацюванні невизначеності у системах з ситуаційною обізнаністю відображають зростаючий акцент на інтегрованих рамках, моделюванні передбачень та надійній кількісній оцінці невизначеності. Підходи, засновані на онтології, поширення невизначеності та мультимодальні методи стали ключовими напрямками, підкріпленими досягненнями у машинному навчанні та опрацюванні знань.

Опрацювання контексту у системах з ситуаційною обізнаністю. Використання контекстної інформації відіграє ключову роль у системах з ситуаційною обізнаністю, адже процеси консолідації інформації, міркування та моделювання, прийняття рішень залежать від контексту. Загального і стандартного визначення контексту не існує і його формалізація часто залежить від конкретного застосунку і предметної галузі [46,47].

У широкому сенсі контекст - це «інформація, яка характеризує важливу (для інтелектуального агента) ситуацію», що допомагає зрозуміти ситуацію і, можливо, відреагувати на неї [46,48]. Інше визначення стверджує, що контекст — це «будь-яка інформація (неявна або явна), яка може бути використана для характеристики ситуації сутності», де сутністю може бути особа, місце або об'єкт, що має відношення до сутності [46].

Існує низка підходів до подання контексту в системах з ситуаційною обізнаністю. Один з найпростіших ґрунтується на моделі «ключ-значення», які подають контекст за допомогою пар - імені атрибута та його значення, однак такий підхід не забезпечує перевірки структури й валідності даних [53]. Моделі на основі мов розмітки, зокрема XML, використовують ієрархічні структури з тегами, атрибутами та вмістом і дозволяють перевіряти дані за схемами [53]. Об'єктно-орієнтовані моделі застосовують принципи інкапсуляції та повторного використання - кожен клас визначає тип контексту з відповідними функціями доступу й перевірки [53]. Просторові моделі широко використовуються для опису розташування об'єктів реального світу, особливо в системах локалізації [53]. Вбудоване подання контексту формулює його як набори сенсорних ознак, характерних для певної ситуації, що застосовується на перцептивному рівні, особливо у системах реального часу, де розпізнаний контекст впливає на поведінку агента [46]. Ймовірнісні моделі використовують математичні підходи для опрацювання контексту з урахуванням невизначеності, зокрема баєсові моделі, функції густини ймовірності, приховані марковські моделі застосовуються для оцінки правдоподібності та класифікації сценаріїв [46, 47]. Моделі, засновані на логіці, використовують декларативні мови подання знань, від онтологій з правилами до логіки першого порядку, забезпечуючи механізми виведення знань, планування та міркування, де контекст представлено у формі фактів, виразів і правил [46, 53, 54]. Онтологічні моделі подають контекст, фокусуючись на відношеннях між сутностями, забезпечують повторне використання знань і формування спільних словників, а Web Ontology Language (OWL) є стандартом для такого подання в семантичному вебі [53]. Серед графічних моделей можна виділити UML, OntoUML та Object Role Model, які застосовуються для візуального подання контексту [53]. Марковські логічні мережі поєднують логіку першого порядку з ймовірнісними методами марковських мереж для подання знань на високому рівні консолідації [51]. Модель управління контекстом описує дані з урахуванням типів проблем як змінних і відповідних контекстних змінних, а також враховує фактори корисності, ймовірності та вартості [55, 56]. Нарешті, комбіновані підходи поєднують декілька типів подання, зокрема, багаторівневі моделі можуть включати логічні структури на високому рівні, ймовірнісні модулі на рівні проміжного програмного забезпечення та вбудовані подання на рівні сенсорного середовища [46].

Створення ефективних систем консолідованої інформації вимагає надійних фреймворків для інтеграції контекстно-залежної інформації у процес консолідації. Прикладом такого фреймворку є використання контекстного доступу на основі проміжного програмного забезпечення. Архітектури на основі проміжного програмного забезпечення надають стандартизований інтерфейс для доступу та керування контекстною інформацією. Цей підхід дозволяє інтегрувати контекстно-залежні сервіси в системи консолідації, зберігаючи при цьому масштабованість і гнучкість [48]. Основними властивостями цього фреймворку є:

- Сервіс-орієнтована архітектура, при цьому проміжне програмне забезпечення дозволяє інтегрувати контекстні знання різної природи.

- Взаємозв'язок процесів, оскільки, проміжне ПЗ служить рівнем абстракції, який пов'язує процеси, що працюють на різних рівнях, полегшуючи взаємодію між джерелами контексту та елементами консолідації інформації.

- Доступ до контексту та керування ним передбачає, що проміжне програмне забезпечення відповідає за надання доступу до різноманітних джерел контексту, включаючи бази даних, карти та дані в реальному масштабі часу. Це гарантує, що інформація є актуальною, що має вирішальне значення для ефективних процесів консолідації.

- Адаптація контекстної інформації забезпечується проміжним програмним забезпеченням, що відіграє важливу роль в адаптації контекстної інформації для покращення її застосовності до конкретних процесів консолідації. Воно оцінює такі фактори, як релевантність, деталізація та невизначеність, гарантуючи, що контекстна інформація добре узгоджується з потребами операцій консолідації інформації.

- Підтримка багаторівневої адаптації забезпечується завдяки тому, що проміжне програмне забезпечення підтримує багаторівневий механізм адаптації на основі моделі JDL, яка сегментує процеси відповідно до рівнів абстракції. Це дозволяє використовувати структурований підхід до управління контекстною інформацією на різних етапах процесу консолідації інформації [48].

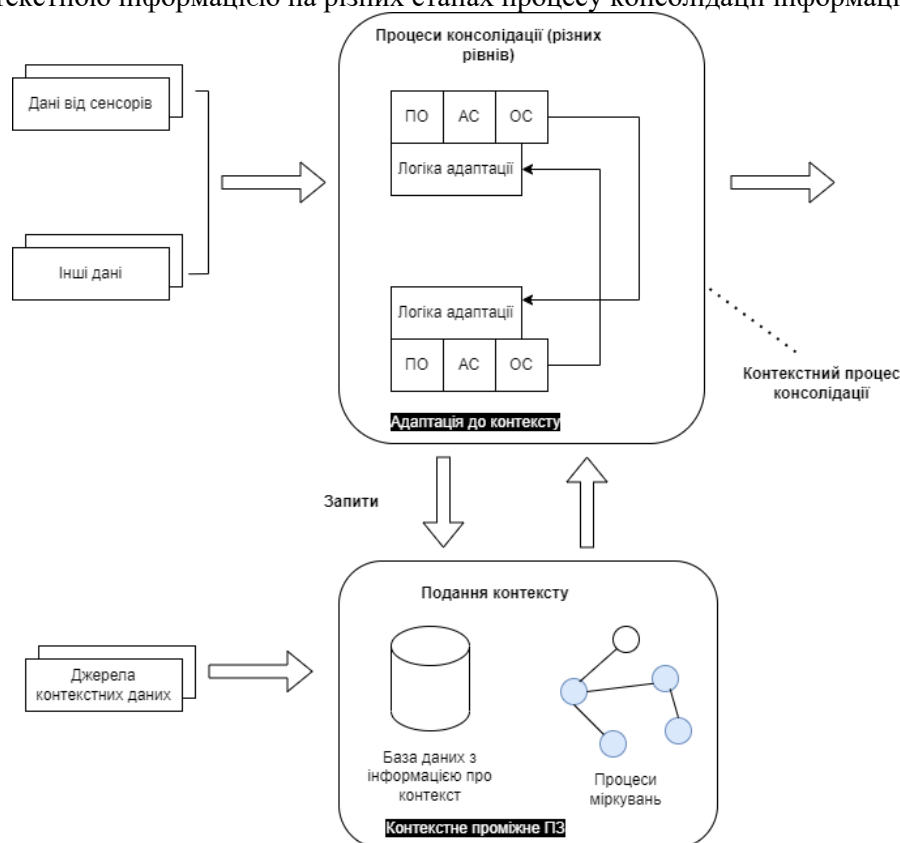


Рис. 7. Схема роботи проміжного контекстного програмного забезпечення, де ПО – попереднє опрацювання, АС- побудова асоціацій, ОС- оцінка стану

На рисунку 7 проілюстровано механізм використання контекстного проміжного програмного забезпечення, який слугує важливим компонентом в інтеграції контекстної інформації в процеси консолідації інформації. Менеджер проміжного програмного забезпечення відповідає за збір, оновлення та використання контекстної інформації для процесів консолідації. Він діє як центральний вузол, який взаємодіє з різними контекстними джерелами для збору відповідної інформації. Проміжне програмне забезпечення отримує доступ до різноманітних контекстних джерел, які можуть включати бази даних, карти, правила роботи та дані з давачів у реальному масштабі часу. Проміжне програмне забезпечення працює для підтримки запитів в основному з використанням механізмів запитів, коли вузол консолідації запитує відповідні знання контексту на основі гіпотез, які він генерує. Цей процес запиту дозволяє проміжному програмному забезпеченню повертати відповідну контекстну інформацію, адаптовану до конкретних потреб операцій консолідації. На стороні консолідації логіка адаптації бере контекстні вхідні дані, надані проміжним програмним забезпеченням, і спрямовує їх на відповідні процеси консолідації. Проміжне програмне забезпечення призначене для надання контекстної інформації, доступної для всіх компонентів системи. Проміжне програмне забезпечення також виконує важливі операції

перетворення, такі як просторове та часове узгодження контексту з даними, гарантуючи, що контекст є актуальним і застосовним до поточних завдань. Це включає визначення рівня деталізації інформації та оцінку ступеня невизначеності у вхідних даних. Інші підходи, що використовуються для опрацювання контексту, охоплюють використання JDL/DFIG та похідних від них моделей, коли пропонується інтегрувати керування контекстом на різних рівнях моделей [47,52]; багаторівневі механізми адаптації, які дають можливість процесам консолідації динамічно пристосовуватися до змінних контекстів і можуть бути реалізовані за допомогою таких методів, як динамічні баєсові мережі та адаптивне управління ресурсами [50,57]; а також сервіси семантичного посередництва, які дозволяють інтегрувати гетерогенні дані від сенсорів шляхом усунення семантичних неоднозначностей, що особливо корисно в розподілених системах консолідації, де джерела даних можуть мати різні формати та значення [58].

Невирішені проблеми та напрями розвитку контекстного менеджменту. Незважаючи на переваги у використанні контекстно залежної консолідації інформації, для повної реалізації її потенціалу необхідно вирішити кілька проблем. Подання контексту та його консолідація, коли інтеграція жорсткого та м'якого контекстів вимагає ефективних методів подання контексту при консолідації інформації. Це передбачає розроблення моделей, які можуть опрацьовувати як вимірювану, так і абстрактну інформацію [59,60]. Динамічна адаптація контексту завдяки механізмам адаптивного управління контекстом, що має важливе значення для систем, що працюють у динамічних середовищах. Для цього потрібно розробити фреймворки, які можуть постійно відстежувати та оновлювати контекстуальну інформацію [47,56]. Масштабованість і продуктивність, щоб опрацьовувати великі обсяги даних з різних джерел. Для цього потрібні ефективні алгоритми збору, подання та використання контексту [56]. Врахування семантичної неоднорідності при інтеграції різнорідних джерел даних передбачає вирішення проблеми неоднакового розуміння концептів. Це вимагає розроблення сервісів семантичного посередництва, які можуть опрацьовувати різні формати та значення даних [58].

Загалом, управління контекстом є критично важливим компонентом сучасних систем консолідації інформації, що дозволяє їм адаптуватися до динамічних середовищ і підвищувати свою продуктивність. Інтеграція контекстної інформації вимагає надійних архітектур, ефективних методів подання та консолідації, а також адаптивних стратегій управління.

Висновки. Науковий напрям консолідації інформації у системах з ситуаційною обізнаністю демонструє високу динаміку змін, що зумовлена новітніми досягненнями у сфері штучного інтелекту, багатоагентних технологій та автономних систем. Аналіз наукових публікацій та прикладів практичного застосування дає змогу окреслити ключові тенденції, що формують сучасне уявлення про розвиток таких систем. Відбувається зміщення від класичних моделей, заснованих на правилах і наперед заданих ймовірнісних розподілах, до адаптивних підходів, орієнтованих на дані, що використовують методи машинного навчання для самостійного прийняття рішень у динамічному середовищі. Значна увага приділяється інтеграції контексту та семантики, зокрема, зростає популярність методів, що базуються на знаннях, зокрема онтологічних моделей, які дозволяють ефективно інтерпретувати та об'єднувати дані з різнорідних джерел. Зростання обсягів даних і підвищення вимог до оперативності їх опрацювання зумовлюють розвиток масштабованих архітектур, що включають периферійні обчислення та хмарні фреймворки, здатні забезпечити опрацювання інформації в реальному масштабі часу у розподілених середовищах. Ще однією важливою тенденцією є посилення вимог до зрозумілості та надійності систем, що використовують методи штучного інтелекту для консолідації інформації, активно впроваджуються підходи пояснюваного ШІ, які підвищують прозорість прийнятих рішень і зміцнюють довіру користувачів, особливо в критично важливих сферах, таких як охорона здоров'я або безпека.

Еволюція моделей, методів та архітектур консолідації інформації відображає перехід від структурованих, ймовірнісних фреймворків до адаптивних підходів, заснованих на даних, які включають методи штучного інтелекту і семантичні міркування. У той час як традиційні підходи забезпечили міцну основу для консолідації структурованих даних з сенсорів, сучасні фреймворки наголошують на потребі масштабованості, контекстної обізнаності та опрацюванні у реальному масштабі часу. Майбутні дослідження будуть зосереджені на гібридних методах, які збалансують інтерпретацію з прогнозною точністю, забезпечуючи надійні системи консолідації інформації у різних сферах застосування.

Список бібліографічного опису

1. Больке О. Записна книжка авіатора / О. Больке. – Нью-Йорк : Бродвей, 1917.

2. On the definition of information fusion as a field of research / H. Boström, etc. – Skövde : University of Skövde, School of Humanities and Informatics, 2007. – 20 p. – (HSI-TR-07-006).
3. Blasch E., Bossé É., Lambert D. A. High-level information fusion management and systems design / E. Blasch, É. Bossé, D. A. Lambert. – Boston : Artech House, 2012.
4. Endsley M. R. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems / M. R. Endsley // Human Factors. – 1995. – Vol. 37, № 1. – P. 32–64. – DOI: <https://doi.org/10.1518/001872095779049543>.
5. Wiener N. Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine / N. Wiener. – Cambridge, MA : MIT Press, 2019.
6. Shannon C. E. A mathematical theory of communication / C. E. Shannon // The Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27, № 3. – P. 379–423. – DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>.
7. Blasch E. One decade of the Data Fusion Information Group (DFIG) model / E. Blasch // Commercial + Scientific Sensing and Imaging. – 2015.
8. Shafer G. Dempster-Shafer theory / G. Shafer // Encyclopedia of Artificial Intelligence. – 1992. – Vol. 1. – P. 330–331.
9. Liggins II M. Handbook of multisensor data fusion: Theory and practice / M. Liggins II, D. Hall, J. Llinas. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – 872 p.
10. Matheus C. J. A core ontology for situation awareness / C. J. Matheus, M. M. Kokar, K. Baclawski // Proc. of the Conf. – 2003. – Vol. 1. – P. 545–552.
11. SAWA: An assistant for higher-level fusion and situation awareness / C. J. Matheus etc. // Proc. of the SPIE. – 2005. – Vol. 5813. – P. 75–85.
12. Pai F.-P. Multi-layer ontology based information fusion for situation awareness / F.-P. Pai, L.-J. Yang, Y.-C. Chung // Applied Intelligence. – 2017. – Vol. 46. – P. 285–307. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10489-016-0834-7>.
13. Steinberg A. N. An ontology for multi-level data fusion / A. N. Steinberg. – 2022. – 8 p.
14. Laskey K. B. Probabilistic ontologies for Multi-INT fusion / K. B. Laskey, P. C. Costa, T. Janssen // Ontologies and Semantic Technologies for Intelligence. – Amsterdam : IOS Press, 2010. – P. 147–161.
15. Bellenger A. Semantic decision support for information fusion applications / A. Bellenger. – Rouen : INSA, 2013. – 233 p.
16. Oltramari A. ComTrustO: Composite trust-based ontology framework for information and decision fusion / A. Oltramari, J.-H. Cho // Proc. of the Conf. – 2015. – P. 542–549.
17. Research on Ontology-Based Data Fusion / S. Wang, D. Kang, Y. Li, Z. Zhang, Z. Wei // Proc. of the Conf. – 2018. – P. 714–720.
18. Maree M. A coupled statistical/semantic framework for merging heterogeneous domain-specific ontologies / M. Maree, M. Belkhatir // Proc. of the Conf. – 2010. – Vol. 2. – P. 159–166.
19. Babalou S. Towards building knowledge by merging multiple ontologies with CoMerger: A partitioning-based approach / S. Babalou, B. König-Ries // Applied Ontology. – 2023. – Vol. 18, № 4. – P. 307–341. – <https://doi.org/10.3233/AO-230020>.
20. Little E. Principles for the development of upper ontologies in higher-level information fusion applications / E. Little, L. Vizenor // Proc. of the Conf. – 2006. – Vol. 150. – P. 309.
21. Sobh T. S. Information Fusion Using Ontology-Based Communication between Agents / T. S. Sobh // International Arab Journal of e-Technology. – 2009. – Vol. 1, № 2. – P. 18–25.
22. Richards C. Boyd's OODA loop / C. Richards. – 2020.
23. Shahbazian E. The extended OODA model for data fusion systems / E. Shahbazian, D. Blodgett, P. Labbé // Proc. of Fusion01. – 2001.
24. Jousselme A. Interpreted systems for situation analysis / A. Jousselme, P. Maupin // 10th International Conference on Information Fusion : Proceedings. – IEEE, 2007. – P. 1–11.
25. Endsley M. R. Situation awareness / M. R. Endsley // Handbook of Human Factors and Ergonomics. – 2021. – P. 434–455.
26. Top ten trends in high-level information fusion / E. Blasch, etc. // Information Fusion (FUSION), 2012 15th International Conference On. – 2012. – P. 2323–2330.
27. Munir A. Situational Awareness: Techniques, Challenges, and Prospects / A. Munir, A. Aved, E. Blasch // AI. – 2022. – Vol. 3, № 1. – P. 55–77. – <https://doi.org/10.3390/ai3010005>.
28. Steinberg A. Levels? 1985–1992 / A. Steinberg, L. Snidaro // Proc. of the 18th International Conference on Information Fusion. – Washington, DC, 2015. – July 6–9.
29. Burov Y. Goal-driven Situation Awareness Process Based on Predictive Modeling / Y. Burov // Proc. of the Conf. – 2024. – P. 157–168.
30. Jousselme A.-L. Uncertainty in a situation analysis perspective / A.-L. Jousselme, P. Maupin, É. Bossé // Proc. of the Conf. – 2003. – Vol. 2. – P. 1207–1214.
31. Микіч Х. Дослідження причин виникнення невизначеностей у системах із ситуаційною обізнаністю та аналіз методів їх опрацювання / Х. Микіч, С. Буров // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2016. – № 1/79 (4). – С. 19–27.
32. Song T. L. Iterative joint integrated probabilistic data association for multitarget tracking / T. L. Song, H. W. Kim, D. Musicki // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2015. – Vol. 51, № 1. – P. 642–653.
33. Urban flood mapping using SAR intensity and interferometric coherence via Bayesian network fusion / Y. Li, etc. // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, № 19. – Article ID 2231.
34. Fault Matters: Sensor data fusion for detection of faults using Dempster-Shafer theory of evidence in IoT-based applications / N. Ghosh, R. Paul, S. Maity, K. Maity, S. Saha // Expert Systems with Applications. – 2020. – Vol. 162. – Article ID 113887. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113887>.

35. Fracczak L. Data fusion using fuzzy logic techniques supported by modified weighting factors (FLMW) / L. Fracczak, L. Podsedkowski, A. Kobierska // *International Journal of Fuzzy Systems*. – 2016. – Vol. 18. – P. 72–80. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40815-015-0095-3>.
36. Gayathri K. Probabilistic ontology based activity recognition in smart homes using Markov Logic Network / K. Gayathri, K. Easwarakumar, S. Elias // *Knowledge-Based Systems*. – 2017. – Vol. 121. – P. 173–184.
37. Richardson M. Markov logic networks / M. Richardson, P. Domingos // *Machine Learning*. – 2006. – Vol. 62. – P. 107–136. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10994-006-5833-1>.
38. URREF: Uncertainty representation and reasoning evaluation framework for information fusion / P. Costa, etc. // *Journal of Advances in Information Fusion*. – 2019. – Vol. 13, № 2. – P. 137–157.
39. Blasch E. P. Scalable information fusion trust / E. P. Blasch, D. Braines. – 2021. – 8 p.
40. Evaluating Trust in an Uncertain and Multisource Environment / A.-L. Jousselme, P. C. Costa, E. Blasch, C. Laudy // *2021 IEEE 24th International Conference on Information Fusion (FUSION)*. – 2021. – P. 1–8. – DOI: [10.23919/FUSION49465.2021.9626878](https://doi.org/10.23919/FUSION49465.2021.9626878)
41. Uncertainty Evaluation of Temporal Trust in a Fusion System Using the URREF Ontology / J. P. de Villiers et al. // *2021 IEEE 24th International Conference on Information Fusion (FUSION)*. – 2021. – P. 1–8.
42. Relations between explainability, evaluation and trust in AI-based information fusion systems / G. Pavlin et al. // *2021 IEEE 24th International Conference on Information Fusion (FUSION)*. – 2021. – P. 1–9
43. Semantically-guided acquisition of trustworthy data for information fusion / D. Millar et al. // *2021 IEEE 24th International Conference on Information Fusion (FUSION)*. – 2021. – P. 1–8.
44. ComTrustO: Composite trust-based ontology framework for information and decision fusion / A. Oltramari, J.-H. Cho // *18th International Conference on Information Fusion (FUSION)*. – Washington, D.C.: IEEE, 2015. – P. 542–549
45. Distributionally Robust Resource Allocation with Trust-aided Parametric Information Fusion / Y. Guo, et al. // *arXiv preprint arXiv:2411.01428*. – 2024. – 6 p.
46. Context in robotics and information fusion / D. D. Bloisi, D. Nardi, F. Riccio, F. Trapani // *Context-Enhanced Information Fusion: Boosting Real-World Performance with Domain Knowledge*. – Cham: Springer, 2016. – P. 675–699. – DOI: [10.1007/978-3-319-28971-7_25](https://doi.org/10.1007/978-3-319-28971-7_25)
47. Kadar I. A framework for context change detection and management in probabilistic models for context in fusion / I. Kadar, C.-Y. Chong, R. W. Schutz // *Proc. SPIE 11018: Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXVIII*. – 2019. – Vol. 11018. – P. 224–234.
48. García J. Architectural aspects for context exploitation in information fusion / J. García, L. Snidaro, J. Llinas // *Context-Enhanced Information Fusion: Boosting Real-World Performance with Domain Knowledge*. – Cham: Springer, 2016. – P. 185–203.
49. Turner R. M. Context-mediated behavior for intelligent agents / R. M. Turner // *International Journal of Human-Computer Studies*. – 1998. – Vol. 48, № 3. – P. 307–330.
50. A framework for dynamic context exploitation / L. Snidaro et al. // *Proc. of the Conf.* – 2015. – P. 1160–1167.
51. Context-enhanced information fusion / L. Snidaro, J. Garcia-Herrera, J. Llinas, E. Blasch // *Proc. of the Conf.* – 2016. – (Boosting Real-World Performance with Domain Knowledge) – P. 25–29.
52. Steinberg A. N., Bowman C. L. Adaptive context exploitation / A. N. Steinberg, C. L. Bowman // *Proc. SPIE 8758: Sensor Fusion and Target Recognition XXII*. – 2013. – Vol. 8758. – P. 875804. – DOI: [10.1117/12.2015623](https://doi.org/10.1117/12.2015623)
53. Borges V. Survey of context information fusion for ubiquitous Internet-of-Things (IoT) systems / V. Borges // *Computing*. – 2016. – Vol. 6, № 1. – P. 64–78. – DOI: [10.1515/COMP-2016-0003](https://doi.org/10.1515/COMP-2016-0003)
54. mlCAF: Multi-level cross-domain semantic context fusioning for behavior identification / M. A. Razzaq et al. // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17, № 10. – Art. 2433. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s17102433>
55. Snidaro L. Recent trends in context exploitation for Information Fusion and AI / L. Snidaro et al. // *AI Magazine*. – 2019. – Vol. 40, № 3. – P. 14–27. – <https://doi.org/10.1609/aimag.v40i3.2864>
56. Adaptive context assessment and context management / A. N. Steinberg, et al. // *Proc. of the 17th International Conference on Information Fusion (FUSION)*. – Salamanca, Spain, 2014. – P. 1–8.
57. Context for dynamic and multi-level fusion / L. Snidaro, I. Visentini // *Context-Enhanced Information Fusion: Boosting Real-World Performance with Domain Knowledge*. – Cham: Springer, 2016. – P. 431–451.
58. A dynamic and context-aware semantic mediation service for discovering and fusion of heterogeneous sensor data / M. Bakillah et al. // *Journal of Spatial Information Science*. – 2013. – Vol. 6. – P. 155–185.
59. An integrated model of hard and soft context in sensor management / K. J. Hintz, I. Kadar // *Proc. SPIE Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXV (Vol. 9842)*. – 2016. – P. 215–224.
60. Context representation and fusion: Advancements and opportunities / A. M. Khatkhat et al. // *Sensors*. – 2014. – Vol. 14. – P. 9628–9668. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s140609628>
61. An Adaptive Bayesian System for Context-Aware Data Fusion in Smart Environments / A. De Paola, et al. // *IEEE Transactions on Mobile Computing*. – 2017. – Vol. 16, № 6. – P. 1502–1515. – DOI: [10.1109/TMC.2016.2599158](https://doi.org/10.1109/TMC.2016.2599158)

References

1. Bölcke O. *An Aviator's Field Book* / O. Bölcke. – New York: Broadway, 1917..
2. On the definition of information fusion as a field of research / H. Boström, etc. – Skövde : University of Skövde, School of Humanities and Informatics, 2007. – 20 p. – (HSI-TR-07-006).
3. Blasch E., Bossé É., Lambert D. A. High-level information fusion management and systems design / E. Blasch, É. Bossé, D. A. Lambert. – Boston : Artech House, 2012.
4. Endsley M. R. *Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems* / M. R. Endsley // *Human Factors*. – 1995. – Vol. 37, № 1. – P. 32–64. – DOI: <https://doi.org/10.1518/001872095779049543>.
5. Wiener N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine* / N. Wiener. – Cambridge, MA : MIT Press, 2019.

6. Shannon C. E. A mathematical theory of communication / C. E. Shannon // The Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27, № 3. – P. 379–423. – DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>.
7. Blasch E. One decade of the Data Fusion Information Group (DFIG) model / E. Blasch // Commercial + Scientific Sensing and Imaging. – 2015.
8. Shafer G. Dempster-Shafer theory / G. Shafer // Encyclopedia of Artificial Intelligence. – 1992. – Vol. 1. – P. 330–331.
9. Liggins II M. Handbook of multisensor data fusion: Theory and practice / M. Liggins II, D. Hall, J. Llinas. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – 872 p.
10. Matheus C. J. A core ontology for situation awareness / C. J. Matheus, M. M. Kokar, K. Baclawski // Proc. of the Conf. – 2003. – Vol. 1. – P. 545–552.
11. SAWA: An assistant for higher-level fusion and situation awareness / C. J. Matheus etc. // Proc. of the SPIE. – 2005. – Vol. 5813. – P. 75–85.
12. Pai F.-P. Multi-layer ontology based information fusion for situation awareness / F.-P. Pai, L.-J. Yang, Y.-C. Chung // Applied Intelligence. – 2017. – Vol. 46. – P. 285–307. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10489-016-0834-7>.
13. Steinberg A. N. An ontology for multi-level data fusion / A. N. Steinberg. – 2022. – 8 p.
14. Laskey K. B. Probabilistic ontologies for Multi-INT fusion / K. B. Laskey, P. C. Costa, T. Janssen // Ontologies and Semantic Technologies for Intelligence. – Amsterdam : IOS Press, 2010. – P. 147–161.
15. Bellenger A. Semantic decision support for information fusion applications / A. Bellenger. – Rouen : INSA, 2013. – 233 p.
16. Oltramari A. ComTrustO: Composite trust-based ontology framework for information and decision fusion / A. Oltramari, J.-H. Cho // Proc. of the Conf. – 2015. – P. 542–549.
17. Research on Ontology-Based Data Fusion / S. Wang, D. Kang, Y. Li, Z. Zhang, Z. Wei // Proc. of the Conf. – 2018. – P. 714–720.
18. Maree M. A coupled statistical/semantic framework for merging heterogeneous domain-specific ontologies / M. Maree, M. Belkhatir // Proc. of the Conf. – 2010. – Vol. 2. – P. 159–166.
19. Babalou S. Towards building knowledge by merging multiple ontologies with CoMerger: A partitioning-based approach / S. Babalou, B. König-Ries // Applied Ontology. – 2023. – Vol. 18, № 4. – P. 307–341. – <https://doi.org/10.3233/AO-230020>.
20. Little E. Principles for the development of upper ontologies in higher-level information fusion applications / E. Little, L. Vizenor // Proc. of the Conf. – 2006. – Vol. 150. – P. 309.
21. Sobh T. S. Information Fusion Using Ontology-Based Communication between Agents / T. S. Sobh // International Arab Journal of e-Technology. – 2009. – Vol. 1, № 2. – P. 18–25.
22. Richards C. Boyd's OODA loop / C. Richards. – 2020.
23. Shahbazian E. The extended OODA model for data fusion systems / E. Shahbazian, D. Blodgett, P. Labbé // Proc. of Fusion01. – 2001.
24. Joussemme A. Interpreted systems for situation analysis / A. Joussemme, P. Maupin // 10th International Conference on Information Fusion : Proceedings. – IEEE, 2007. – P. 1–11.
25. Endsley M. R. Situation awareness / M. R. Endsley // Handbook of Human Factors and Ergonomics. – 2021. – P. 434–455.
26. Top ten trends in high-level information fusion / E. Blasch, etc. // Information Fusion (FUSION), 2012 15th International Conference On. – 2012. – P. 2323–2330.
27. Munir A. Situational Awareness: Techniques, Challenges, and Prospects / A. Munir, A. Aved, E. Blasch // AI. – 2022. – Vol. 3, № 1. – P. 55–77. – <https://doi.org/10.3390/ai3010005>.
28. Steinberg A. Levels? 1985–1992 / A. Steinberg, L. Snidaro // Proc. of the 18th International Conference on Information Fusion. – Washington, DC, 2015. – July 6–9.
29. Burov Y. Goal-driven Situation Awareness Process Based on Predictive Modeling / Y. Burov // Proc. of the Conf. – 2024. – P. 157–168.
30. Joussemme A.-L. Uncertainty in a situation analysis perspective / A.-L. Joussemme, P. Maupin, É. Bossé // Proc. of the Conf. – 2003. – Vol. 2. – P. 1207–1214.
31. Mykich K. Investigation of the causes of uncertainty in situation awareness systems and analysis of methods for their processing / K. Mykich, Y. Burov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – No. 1/79 (4). – P. 19–27..
32. Song T. L. Iterative joint integrated probabilistic data association for multitarget tracking / T. L. Song, H. W. Kim, D. Musicki // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2015. – Vol. 51, № 1. – P. 642–653.
33. Urban flood mapping using SAR intensity and interferometric coherence via Bayesian network fusion / Y. Li, etc. // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, № 19. – Article ID 2231.
34. Fault Matters: Sensor data fusion for detection of faults using Dempster-Shafer theory of evidence in IoT-based applications / N. Ghosh, R. Paul, S. Maity, K. Maity, S. Saha // Expert Systems with Applications. – 2020. – Vol. 162. – Article ID 113887. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113887>.
35. Fracczak L. Data fusion using fuzzy logic techniques supported by modified weighting factors (FLMW) / L. Fracczak, L. Podsedkowski, A. Kobierska // International Journal of Fuzzy Systems. – 2016. – Vol. 18. – P. 72–80. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40815-015-0095-3>.
36. Gayathri K. Probabilistic ontology based activity recognition in smart homes using Markov Logic Network / K. Gayathri, K. Easwarakumar, S. Elias // Knowledge-Based Systems. – 2017. – Vol. 121. – P. 173–184.
37. Richardson M. Markov logic networks / M. Richardson, P. Domingos // Machine Learning. – 2006. – Vol. 62. – P. 107–136. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10994-006-5833-1>.
38. URREF: Uncertainty representation and reasoning evaluation framework for information fusion / P. Costa, etc. // Journal of Advances in Information Fusion. – 2019. – Vol. 13, № 2. – P. 137–157.

39. Blasch E. P. Scalable information fusion trust / E. P. Blasch, D. Braines. – 2021. – 8 p.
40. Evaluating Trust in an Uncertain and Multisource Environment / A.-L. Joussetme, P. C. Costa, E. Blasch, C. Laudy // 2021 IEEE 24th International Conference on Information Fusion (FUSION). – 2021. – P. 1–8. – DOI: 10.23919/FUSION49465.2021.9626878
41. Uncertainty Evaluation of Temporal Trust in a Fusion System Using the URREF Ontology / J. P. de Villiers et al. // 2021 IEEE 24th International Conference on Information Fusion (FUSION). – 2021. – P. 1–8.
42. Relations between explainability, evaluation and trust in AI-based information fusion systems / G. Pavlin et al. // 2021 IEEE 24th International Conference on Information Fusion (FUSION). – 2021. – P. 1–9
43. Semantically-guided acquisition of trustworthy data for information fusion / D. Millar et al. // 2021 IEEE 24th International Conference on Information Fusion (FUSION). – 2021. – P. 1–8.
44. ComTrustO: Composite trust-based ontology framework for information and decision fusion / A. Oltramari, J.-H. Cho // 18th International Conference on Information Fusion (FUSION). – Washington, D.C.: IEEE, 2015. – P. 542–549
45. Distributionally Robust Resource Allocation with Trust-aided Parametric Information Fusion / Y. Guo, et al. // arXiv preprint arXiv:2411.01428. – 2024. – 6 p.
46. Context in robotics and information fusion / D. D. Bloisi, D. Nardi, F. Riccio, F. Trapani // Context-Enhanced Information Fusion: Boosting Real-World Performance with Domain Knowledge. – Cham: Springer, 2016. – P. 675–699. – DOI: 10.1007/978-3-319-28971-7_25
47. Kadar I. A framework for context change detection and management in probabilistic models for context in fusion / I. Kadar, C.-Y. Chong, R. W. Schutz // Proc. SPIE 11018: Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXVIII. – 2019. – Vol. 11018. – P. 224–234.
48. García J. Architectural aspects for context exploitation in information fusion / J. García, L. Snidaro, J. Llinas // Context-Enhanced Information Fusion: Boosting Real-World Performance with Domain Knowledge. – Cham: Springer, 2016. – P. 185–203.
49. Turner R. M. Context-mediated behavior for intelligent agents / R. M. Turner // International Journal of Human-Computer Studies. – 1998. – Vol. 48, № 3. – P. 307–330.
50. A framework for dynamic context exploitation / L. Snidaro et al. // Proc. of the Conf. – 2015. – P. 1160–1167.
51. Context-enhanced information fusion / L. Snidaro, J. Garcia-Herrera, J. Llinas, E. Blasch // Proc. of the Conf. – 2016. – (Boosting Real-World Performance with Domain Knowledge) – P. 25–29.
52. Steinberg A. N., Bowman C. L. Adaptive context exploitation / A. N. Steinberg, C. L. Bowman // Proc. SPIE 8758: Sensor Fusion and Target Recognition XXII. – 2013. – Vol. 8758. – P. 875804. – DOI: 10.1117/12.2015623
53. Borges V. Survey of context information fusion for ubiquitous Internet-of-Things (IoT) systems / V. Borges // Computing. – 2016. – Vol. 6, № 1. – P. 64–78. – DOI: 10.1515/COMP-2016-0003
54. mlCAF: Multi-level cross-domain semantic context fusioning for behavior identification / M. A. Razzaq et al. // Sensors. – 2017. – Vol. 17, № 10. – Art. 2433. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s17102433>
55. Snidaro L. Recent trends in context exploitation for Information Fusion and AI / L. Snidaro et al. // AI Magazine. – 2019. – Vol. 40, № 3. – P. 14–27. – <https://doi.org/10.1609/aimag.v40i3.2864>
56. Adaptive context assessment and context management / A. N. Steinberg, et al. // Proc. of the 17th International Conference on Information Fusion (FUSION). – Salamanca, Spain, 2014. – P. 1–8.
57. Context for dynamic and multi-level fusion / L. Snidaro, I. Visentini // Context-Enhanced Information Fusion: Boosting Real-World Performance with Domain Knowledge. – Cham: Springer, 2016. – P. 431–451.
58. A dynamic and context-aware semantic mediation service for discovering and fusion of heterogeneous sensor data / M. Bakillah et al. // Journal of Spatial Information Science. – 2013. – Vol. 6. – P. 155–185.
59. An integrated model of hard and soft context in sensor management / K. J. Hintz, I. Kadar // Proc. SPIE Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXV (Vol. 9842). – 2016. – P. 215–224.
60. Context representation and fusion: Advancements and opportunities / A. M. Khattak et al. // Sensors. – 2014. – Vol. 14. – P. 9628–9668. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s140609628>
61. An Adaptive Bayesian System for Context-Aware Data Fusion in Smart Environments / A. De Paola, et al. // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2017. – Vol. 16, № 6. – P. 1502–1515. – DOI: 10.1109/TMC.2016.2599158