

УДК 004.896

DOI <https://doi.org/10.32782/EIS/2025-107-11>

МЕТОДОЛОГІЯ ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОКАНАЛЬНИХ АЕРОКОСМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ У МОДЕЛІ ПЕРЕСЛІДУВАННЯ ДЛЯ КОРПОРАТИВНИХ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ ІГОР

Гнатушенко Володимир Володимирович,

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-3140-3788
SCOPUS ID: 6505609275

Олевський Віктор Ісаакович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID : 0000-0003-3824-1013
SCOPUS ID: 56419822400

Грищак Дмитро Дмитрович,

кандидат фізико-математичних наук,
докторант кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-8956-8468
SCOPUS ID: 57220062399

Олевська Юлія Борисівна,

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри прикладної математики
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-0235-1360
SCOPUS ID: 57191851171

Війна в Україні призвела до значних змін у геополітичному ландшафті, що стимулює розвиток нових технологій, зокрема безпілотних літальних апаратів, дронів та сучасних систем озброєнь. Дослідження математичних моделей переслідування в комбінації з методами корпоративних диференціальних ігор може допомогти в розробленні новітніх систем керування транспортними засобами (СКТЗ) у цивільній та військовій сферах.

Мета дослідження полягає в розробленні методології використання даних багатоканальних супутникових знімків у системах керування транспортними засобами, які базуються на моделях переслідування в корпоративних диференціальних іграх.

Методологія дослідження полягає в інтеграції даних багатоканальних аерокосмічних зображень у розрахунки параметрів руху літальних апаратів методами теорії ігор і створення сучасної інформаційної технології для запобігання протидії супротивника. Використання аерокосмічних знімків (АКЗ) стало невід'ємною частиною більшості сучасних технологій у СКТЗ і системах дистанційного управління. Хоча не існує надійних СКТЗ, що використовують ці АКЗ, вони поширені в повсякденному житті й відповідають за збереження великої кількості людських життів. Водночас АКЗ схильні до впливу великої кількості факторів збудження, які роблять інформацію на них спотвореною і часто не дозволяють правильно її використовувати безпосередньо для СКТЗ. Це зумовлює актуальність і глобальну значимість завдання створення інтелектуальних СКТЗ нового покоління з включеними в них інформаційними системами оброблення та аналізу АКЗ для моделей переслідування в задачах корпоративних диференціальних ігор. Основним напрямом підвищення точності оброблення та аналізу АКЗ є використання багатоканальних зображень (БКЗ), тобто серій зображень одного і того ж об'єкта, отриманих на різних частотах випромінювання, з різних положень, кутів або за різний час зйомки. У цій техніці реалізуються біонічні принципи оптимального контролю, перевірені еволюцією живої природи. Технологія оброблення БКЗ і вбудовування результатів у моделі СКТЗ ще не до кінця розроблена і вимагає подальшого доопрацювання.

Наукова новизна дослідження полягає в розробленні методологічних основ використання даних багатоканальних аерокосмічних зображень у системах керування транспортними засобами та створенні сучасної інформаційної технології оптимального керування літальними апаратами, яка базується на моделях переслідування в корпоративних диференціальних іграх і методах машинного навчання нейронних мереж.

Таким чином, у статті розглянуто актуальну проблему створення методології використання даних багатоканальних супутникових знімків у системах керування транспортними засобами, які базуються на моделях переслідування в корпоративних диференціальних іграх. Подальший розвиток цього напрямку передбачається шляхом побудови спеціалізованих нейронних мереж згорткового типу для автономної роботи літальних апаратів.

Ключові слова: багатоканальні космічні зображення, корпоративні диференціальні ігри, нейронна мережа, геоінформаційні системи.

Hnatushenko Volodymyr, Olevskyi Viktor, Hryshchak Dvytro, Olevska Yuliia. Methodology of using multi-channel aerospace images in a pursuit model for corporate differential games

The war in Ukraine has led to significant changes in the geopolitical landscape, driving the development of new technologies, including unmanned aerial vehicles, drones, and modern weapons systems. The study of mathematical models of harassment in combination with the methods of corporate differential games can help in the development of the latest vehicle management systems (VMS) in the civil and military spheres.

The purpose of the study is to develop a methodology for using multichannel satellite imagery data in vehicle control systems based on pursuit models in corporate differential games.

The methodology of the study is to integrate the data of multichannel aerospace images into the calculations of aircraft movement parameters using the methods of game theory and the creation of modern information technology to prevent enemy counteraction. The use of aerospace imagery (ASI) has become an integral part of most modern technologies in VMS and remote control systems. Although there are no reliable VMSs using these ASIs, they are common in everyday life and are responsible for saving a large number of human lives. At the same time, ASIs are subject to the influence of a large number of excitation factors, which make the information on them distorted and often do not allow it to be used correctly directly for VMS. This determines the relevance and global significance of the task of creating a new generation of intelligent VMS with the included information systems for processing and analysis of ASI for pursuit models in the tasks of corporate differential games. The main direction of improving the accuracy of processing and analysis of ASI in this direction is the use of multichannel images (MCI), i.e. a series of images of the same object obtained at different radiation frequencies, from different positions, angles or at different shooting times. In this technique, the bionic principles of optimal control, tested by the evolution of living nature, are implemented. The technology of processing MCI and embedding the results into the VMS models has not yet been fully developed and requires further refinement.

The scientific novelty of the study lies in the development of methodological bases for the use of multichannel aerospace image data in vehicle control systems and the creation of modern information technology for optimal aircraft control, which is based on pursuit models in corporate differential games and methods of machine learning of neural networks.

Thus, the article discusses the topical problem of creating a methodology for using multichannel satellite image data in vehicle control systems, which are based on pursuit models in corporate differential games. Further development of this direction is envisaged by building specialized convolutional neural networks for the autonomous operation of aircraft.

Key words: multi-channel space images, information technologies, neural network, geo-information systems.

Актуальність проблеми. Багатоканальні аерокосмічні зображення (далі – БКЗ) – це дані, отримані від дронів чи супутників, які фіксують електромагнітне випромінювання в різних спектральних діапазонах. Кожен канал може відображати різні фізичні властивості об'єктів, що дозволяє отримувати більш детальну інформацію про них. Використання багатьох каналів значно покращує можливості для класифікації, виявлення змін та моніторингу.

З метою отримання комплексного розуміння складних процесів, які відбуваються на поверхні Землі, важливо поєднувати дані з різних джерел. Методологічні основи інформаційних технологій дозволяють інтегрувати інформацію з космічних зображень з іншими формами даних, як-от наземні спостереження, демографічні дані та ін.

Завдяки постійному вдосконаленню технологій збору даних обсяги інформації, що генеруються космічними супутниками, зростають експоненційно. Це вимагає розроблення нових методів та алгоритмів для оброблення, аналізу і візуалізації цих даних, зокрема в режимі реального часу. Використання інформаційних технологій для аналізу космічних зображень може сприяти оптимізації прийняття рішень у сфері екології, агрономії, урбаністики та інших галузях.

Війна в Україні призвела до значних змін у геополітичному ландшафті, що вплинуло на міжнародні ринки супутників, авіації та оборони і стимулює розвиток нових технологій, зокрема безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та сучасних систем озброєнь. Сучасні війни вимагають інтеграції передових технологій, як-от

використання багатоканальних супутникових знімків для підвищення ефективності управління літальними апаратами. Це особливо актуально в умовах ведення бойових дій, де швидкість і точність прийняття рішень визначають успіх воєнних операцій. БКЗ, які забезпечують дані в різних спектральних діапазонах (оптичний, інфрачервоний, радарний тощо), дозволяють розв'язувати завдання розвідки, спостереження та координації дій літальних апаратів. Використання аерокосмічних знімків (далі – АКЗ) стало невід'ємною частиною більшості сучасних технологій у СКТЗ і системах дистанційного управління. Дослідження математичних моделей переслідування в комбінації з методами корпоративних диференціальних ігор може допомогти в розробленні новітніх систем керування різноманітними транспортними засобами (СКТЗ) у цивільній та військовій сферах.

Диференціальна теорія ігор – це розділ теорії ігор, який вивчає математичні моделі взаємодії між гравцями в динамічному середовищі, описаному диференціальними рівняннями. Вона є важливим інструментом для аналізу систем, де гравці приймають рішення в часі та взаємодіють один з одним. Основні особливості диференціальної теорії ігор такі.

По-перше, це динамічний характер взаємодії: гравці приймають рішення в реальному часі. Результати дій залежать від попередніх станів системи та впливають на її майбутнє. Динаміка описується системами диференціальних рівнянь виду

$$\frac{dx}{dt} = f(x(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)), \quad (1)$$

де $x(t)$ – вектор стану системи в момент часу t ,
 $u(t)$ – вектор керування в момент часу t .

Гравці керують системою за допомогою керувальних параметрів $u_i(t)$, щоб максимізувати (або мінімізувати) свої цільові функції, які для кожного i -о гравця зазвичай описується інтегралом виду

$$J_i = \int_0^T g_i(x(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)) dt. \quad (2)$$

По-друге, в диференціальних іграх важливу роль відіграє доступність інформації. Розглядаються два випадки: повна інформація (усі гравці знають стан системи та стратегії один одного) і неповна інформація (гравці обмежені в знаннях про стан системи чи стратегії інших). Завданням у розв'язанні таких задач є досягнення рівноваги, а ключовою концепцією є рівновага Неша, де жоден гравець не може покращити свою вигоду, змінюючи лише власну стратегію, тобто

$$u_i(t) = \arg \max J_i(u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)) \quad (3)$$

Диференціальні ігри враховують взаємодію не лише в конкретний момент часу, але й протягом усього періоду гри. Початковий стан системи суттєво визначає подальший розвиток гри. Різні початкові умови можуть призводити до різних станів рівноваги і результатів. Диференціальна теорія ігор є потужним інструментом для аналізу динамічних взаємодій у різних системах. Її особливості, зокрема динамічний характер, залежність від початкових умов та врахування довгострокових цілей, роблять її незамінною в задачах оптимізації та моделювання конфліктів.

Існує низка моделей переслідування літальних апаратів у контексті корпоративних диференціальних ігор з кількома супротивниками, які можуть включати кілька важливих аспектів. Модель багатостороннього переслідування аналізує взаємодії між кількома супротивниками, які можуть перехоплювати один одного. Тут важливо враховувати, як один літальний апарат може реагувати на дії інших в ситуаціях, коли всі вони намагаються досягти однієї і тієї ж мети. У моделях гри з неповною інформацією учасники не знають точної інформації про стратегії та ресурси конкурентів. Це може призвести до стратегій обману або заплутування, коли літальний апарат намагається створити ілюзію слабкості, щоб збити з пантелику супротивників. Динамічні моделі стратегічної взаємодії вивчають, як зміна стратегій одного гравця впливає на інших у динамічному середовищі. Це може включати моделювання реакцій на нові технології або зміни в русі об'єкту. Моделі протидій досліджують, як літальні апарати можуть реагувати на агресивні дії конкурентів, наприклад, за допомогою маневрування, зміни маршрутів або зміни тактики. Еволюційні моделі розглядають, як стратегії літальних апаратів змінюються з часом під впливом конкурентного тиску. Кооперативні моделі досліджують можливості співпраці між конкурентами для досягнення спільних цілей, наприклад, у досягненні та враженні визначеної цілі. Усі ці моделі дозволяють аналізувати складні взаємодії в конкурентному середовищі, де літальні апарати намагаються досягти своїх цілей у боротьбі з кількома супротивниками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз БКЗ є галуззю, яка динамічно розвивається та активно досліджується в наукових колах. Одним з основних напрямів використання БКЗ є військова розвідка. Ці знімки забезпечують інформацію про місце розташування

ворожих об'єктів, їх активність і стан інфраструктури. Наприклад, дослідження [1] демонструють, що інфрачервоні супутникові знімки дозволяють виявляти приховані об'єкти, як-от замаскована техніка чи укриття, навіть у складних погодних умовах. БКЗ є основою для стратегічного планування військових операцій. За даними [2], ці знімки використовуються для оцінювання придатності місцевості для розгортання техніки, побудови маршрутів руху військ та прогнозування можливих сценаріїв розвитку бойових дій. Наприклад, інфрачервоні знімки можуть бути використані для виявлення джерел тепла, як-от двигуни техніки, що дозволяє прогнозувати пересування противника. Робота [3] показує, як використання мультиспектральних супутникових знімків покращує координацію між підрозділами, знижуючи ризики недооцінювання ворожих дій. Супутникові знімки в оптичному діапазоні, як зазначено в роботах [4], використовуються для створення високоточної картографії, яка може бути інтегрована в навігаційні системи безпілотних літальних апаратів. Це дозволяє забезпечити їх точну орієнтацію на місцевості та автоматичне виконання бойових завдань. Робота літальних апаратів, особливо в умовах війни, залежить від точності навігації, уникнення перешкод та автономного прийняття рішень. БКЗ забезпечують ці можливості завдяки інтеграції супутникових даних із системами керування БПЛА. У дослідженні [5] розглянуто методи поєднання супутникових даних з алгоритмами машинного навчання для автоматичного розпізнавання об'єктів на знімках. Це дозволяє БПЛА ідентифікувати цілі в реальному часі. Дослідження [6] демонструють, як радарні супутникові знімки дозволяють БПЛА працювати в умовах поганої видимості, наприклад, уночі або під час сильного дощу. Ці знімки забезпечують детальну інформацію про рельєф і можливі перешкоди.

Використання БКЗ для керування БПЛА в умовах війни, де швидкість прийняття рішень і точність є критично важливими, супроводжується низкою технічних, організаційних і технологічних проблем, розв'язання яких має першорядне значення. Однією з основних є технічні обмеження, пов'язані з якістю та швидкістю отримання даних. У дослідженні [7] зазначено, що супутникові знімки високої роздільної здатності мають значні затримки передачі, що ускладнює їх використання для реального часу в умовах активних бойових дій. Іншою проблемою є обмеження спектрального діапазону. Згідно з [8], деякі види знімків (наприклад, інфрачервоні або радарні) менш ефективні

в певних умовах, як-от густий туман або складний рельєф. Це обмежує їх застосування в різних кліматичних зонах і природних умовах.

БКЗ потребують складного оброблення для інтеграції з системами керування літальними апаратами. Дослідження [9] вказують на те, що поточні алгоритми оброблення не завжди можуть забезпечити точне розпізнавання об'єктів в умовах високої динаміки бойових дій. Крім того, велика кількість даних створює проблему зберігання та передачі. Як зазначено у [10], обсяг даних багатоканальних знімків значно перевищує можливості оперативної передачі через військові канали зв'язку. Це обмежує швидкість доступу до критичної інформації. Сучасні дослідження демонструють, що новітні технології, як-от штучний інтелект і оброблення великих даних, значно підвищують ефективність використання БКЗ. У роботі [11] було запропоновано методи об'єднання даних із супутників із розвідувальними даними від наземних сенсорів, що дозволяє створювати єдину інформаційну картину бойової обстановки. Дослідження [12] показують, що технології прогнозного аналізу дозволяють на основі супутникових даних прогнозувати рух противника й можливі сценарії розвитку подій, що значно полегшує роботу командування в умовах швидкоплинної ситуації.

Інтеграція БКЗ у системи керування літальними апаратами також супроводжується низкою проблем. Як зазначено у [13], багато систем керування БПЛА мають обмежену сумісність із сучасними платформами оброблення супутникових даних. Іншим викликом є затримка в передачі даних. Робота [14] демонструє, що навіть невеликі затримки можуть спричинити збій у роботі автономних систем керування, що критично в умовах бойової обстановки.

У воєнних конфліктах використання супутникових даних пов'язане з ризиками кібератак. Згідно з [15], супутники та канали зв'язку часто стають об'єктами атак, що може призвести до перехоплення або спотворення даних. Ці ризики значно ускладнюють інтеграцію багатоканальних знімків у бойові системи. У роботі [16] обговорюється проблема точності даних, зокрема можливість спотворення через перешкоди або навмисне втручання. Це створює додаткові труднощі для прийняття рішень у реальному часі.

Використання БКЗ для керування літальними апаратами в умовах війни є однією з ключових технологій, яка значно підвищує ефективність і точність воєнних операцій. Інтеграція цих даних у системи керування БПЛА, поєднання

з технологіями штучного інтелекту та розвиток методів прогнозного аналізу відкривають нові можливості для сучасної війни. Проблеми використання БКЗ для керування літальними апаратами є багатограничними й охоплюють технічні, організаційні та кібербезпекові аспекти. Розв'язання цих проблем вимагає інтегрованого підходу, який включає вдосконалення технологій оброблення даних, підвищення рівня кібербезпеки і створення універсальних платформ для інтеграції з літальними апаратами. Подальші дослідження в цій галузі є ключем до підвищення ефективності використання супутникових знімків у сучасних воєнних операціях і будуть сприяти вдосконаленню військових технологій та їх адаптації до потреб сучасних конфліктів.

Мета дослідження полягає в розробленні методології використання даних багатоканальних супутникових знімків у системах керування транспортними засобами, які базуються на моделях переслідування в корпоративних диференціальних іграх.

Виклад основного матеріалу дослідження. Математичне формулювання задачі переслідування в диференціальних іграх. Задача переслідування в диференціальних іграх має на меті моделювання ситуації, в якій один гравець (переслідувач або хижак) прагне скоротити дистанцію до іншого гравця (того, хто ухиляється або здобич) і здійснити так зване «перехоплення». Математичне формулювання задачі переслідування базується на системі диференціальних рівнянь, що описують динаміку руху переслідувача й об'єкта, що ухиляється. Позначимо:

t – час;

$x_p(t) \in \mathbb{R}^n$ – позиція переслідувача в момент часу t у просторі;

$x_t(t) \in \mathbb{R}^n$, $x_t(t) \in \mathbb{R}^n$ – позиція здобичі в момент часу t у просторі;

U_p, U_t – області допустимих керувань хижак і здобичі відповідно;

$u_p(t) \in U_p$ – вектор керування переслідувача;

$u_t(t) \in U_t$ – вектор керування об'єкта, що ухиляється;

$f_p(x_p, u_p, t)$ та $f_t(x_t, u_t, t)$ – функції динаміки для хижак і здобичі.

Рух хижак і здобичі описується такими системами диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dx_p}{dt} = f_p(x_p, u_p, t), \\ \frac{dx_t}{dt} = f_t(x_t, u_t, t), \end{cases} \quad (4)$$

де f_p і f_t визначають залежність швидкості від поточної позиції і керувань гравців.

Керування u_p і u_t вибираються гравцями в реальному часі з метою досягнення своїх цілей. Критерієм успішного переслідування є досягнення моменту часу t_x , за якого відстань між переслідувачем і об'єктом, що ухиляється, буде менше певного порогового значення $\varepsilon > 0$:

$$\|x_p(t_x) - x_t(t_x)\| \leq \varepsilon. \quad (5)$$

Хижак прагне звести до мінімуму час t_x , а здобич – уникати цього стану якомога довше або взагалі не допустити його досягнення. Для формалізації цілей кожного з гравців вводимо функцію виграшу. Нехай функція виграшу для переслідувача J_p має вигляд

$$J_p = -t_x, \quad (6)$$

де t_x — момент досягнення порогу ε .

Об'єкт, що ухиляється, відповідно, прагне максимізувати час t_x . Таким чином, для об'єкта, що ухиляється, функція виграшу J_t може бути виражена як

$$J_t = t_x. \quad (7)$$

Задача переслідування є оптимізаційною, де гравці вибирають керування u_p і u_t з метою оптимізації своїх функцій виграшу.

Переслідувач прагне вибрати керування u_p^* , яке мінімізує час досягнення t_x

$$u_p^* = \arg \min_{u_p \in U_p} J_p. \quad (8)$$

Об'єкт, що ухиляється, вибирає керування u_t^* , яке максимізує час t_x

$$u_t^* = \arg \max_{u_t \in U_t} J_t. \quad (9)$$

Ці оптимізаційні умови утворюють сідлову точку в задачі переслідування, яка є рішенням у межах диференціальної гри.

Для пошуку оптимальних стратегій можна застосовувати метод динамічного програмування Беллмана, який дає змогу розв'язувати задачу з використанням функції вартості $V(x_p, x_t, t)$, тобто мінімального часу, необхідного для досягнення переслідування за оптимальних дій.

Інший метод – принцип максимуму Понтрягіна передбачає побудову функціонала Гамільтона для визначення оптимальних керувань у формі:

$$H = \lambda_p \cdot f_p(x_p, u_p, t) + \lambda_t \cdot f_t(x_t, u_t, t) \quad (10)$$

де λ_p і λ_t – множники Лагранжа. Принцип максимуму вимагає максимізації або мінімізації цього функціонала, що дозволяє знаходити керування u_p та u_t , які є оптимальними.

Математичне формулювання задачі переслідування в корпоративних

диференціальних іграх. У корпоративних диференціальних іграх задача переслідування моделює процес взаємодії між декількома гравцями, які прагнуть досягти своїх цілей у динамічному середовищі. Вона базується на математичному формулюванні, що враховує цільові функції, обмеження та динаміку стану гравців. У воєнних умовах ці гравці можуть бути представлені такими суб'єктами, як:

- власні сили (управління літальним апаратом, оптимізація ресурсів, виконання завдань);
- супротивник (розташування, дії, передбачення стратегій);
- середовище (географія, погодні умови, інфраструктура).

Основні задачі, які вирішуються шляхом розв'язання корпоративних диференціальних ігор у цих умовах, такі:

- 1) визначення оптимального маршруту літального апарату з урахуванням ризиків;
- 2) максимізація виконання бойового завдання за мінімізації втрат;
- 3) реакція на зміни в динамічному середовищі.

У грі кожен гравець має власний стан, який описується векторною змінною $x_i(t)$, де t – час. Стратегії гравців задаються їх керуванням $u_i(t)$. Стан системи загалом описується вектором станів усіх гравців:

$$x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]. \quad (11)$$

Система еволюціонує відповідно до системи диференціальних рівнянь:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_N(t)), \quad (12)$$

де f_i — функція, яка враховує взаємодію між гравцями.

Кожен гравець прагне максимізувати або мінімізувати свою цільову функцію, яка може бути записана у вигляді

$$J_i = \int_0^T g_i(x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_N(t)) dt, \quad (13)$$

де g_i описує вигоду або втрати i -о гравця.

Реальні обмеження системи, як-от розташування зон ураження, наявність ресурсів чи технологічні межі БПЛА, можуть бути виражені рівняннями або нерівностями виду

$$h_j(x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_N(t)) \leq 0, j=1, 2, \dots, M \quad (14).$$

Оскільки обмеження є динамічними і пов'язують стани всіх гравців, вони дозволяють врахувати нову інформацію про рух супротивників. Саме це є головним у побудові розв'язку варіаційної задачі знаходження оптимального керування і траєкторії руху літального апарату. Треба зауважити, що знайдена ціна

гри відображає гарантований виграш (або програш) гравця незалежно від дій супротивників. Тому розв'язки гри можуть бути використані для побудови нейронної мережі для знаходження необхідних значень параметрів і початкового стану літального апарату, які б гарантували виконання завдання.

Розв'язок корпоративної гри досягається не в сідловій точці, а в умовах досягнення рівноваги, наприклад, Неша. Рівновага Неша визначає такий стан, в якому жоден гравець не може покращити своє становище, змінюючи свою стратегію, якщо стратегії інших залишаються незмінними. Цей підхід забезпечує стабільність у прийнятті рішень гравцями. Проблема оптимізації може бути записана так: максимізувати J_i (13) для всіх i , за умови (12) та (14).

Таким чином, математичне формулювання задачі переслідування в корпоративних диференціальних іграх базується на системі диференціальних рівнянь і функції виграшу, що оптимізується кожним із гравців. Використання методу Беллмана та принципу максимуму Понтрягіна дає змогу знаходити оптимальні стратегії, адаптовані для корпоративних умов та специфічних ситуацій.

Методика застосування багатоканальних супутникових знімків у задачі корпоративних диференціальних ігор. Сучасні воєнні конфлікти вимагають високоточного аналізу даних і прийняття оперативних рішень у реальному часі. Багатоканальні супутникові знімки надають базову інформацію для більш точного визначення обмежень у диференціальних іграх. Літальні апарати (дрони, літаки, вертольоти) виконують критично важливі задачі, включаючи розвідку, логістику, підтримку бою та моніторинг ситуації. Багатоканальні супутникові знімки є унікальним джерелом даних, які можна використовувати для забезпечення ефективного керування літальними апаратами. У цьому контексті методика, заснована на корпоративних диференціальних іграх, дозволяє врахувати динамічну взаємодію різних факторів і супротивників. Багатоканальні супутникові знімки дозволяють отримати інформацію про стан місцевості (рельєф, виявлення укриттів, перешкод), динаміку її змін (руйнування об'єктів, розливи води). Особливо вагомим є можливість отримати критично важливу інформацію про розташування сил противника (виявлення транспортних засобів, техніки, концентрації сил, моніторинг їх переміщень). З їх допомогою можна також оцінити погодні умови (хмари, вітри, вологість ґрунту), спрогнозувати зміни зовнішнього середовища. Ці дані інтегруються

в моделі корпоративних диференціальних ігор для прогнозування сценаріїв і прийняття рішень. Методика застосування багатоканальних знімків така.

1. Збір даних з використанням супутників із високою роздільною здатністю (WorldView, Sentinel, PlanetScope), які забезпечують багатоканальне покриття (оптичні, інфрачервоні, радарні діапазони);

2. Попереднє оброблення знімків: калібрування та виправлення спотворень, аналіз спектральних характеристик для виявлення типів об'єктів (рослинність, техніка, ґрунт), геологічна прив'язка для точного визначення координат. Перед початком аналізу необхідно провести попереднє оброблення зображень, наприклад, за методикою [17], яка включає:

- корекцію геометрії: усунення спотворень, викликаних рухом супутника або атмосферними умовами;
- атмосферну корекцію: видалення впливу атмосфери на спектральні дані;
- нормалізацію яскравості: приведення зображень до єдиного масштабу для подальшого аналізу.

Найбільш перспективною є розроблена в роботах [18; 19] нова технологія геометричної та спектральної корекції космічних зображень високого просторового розрізнення з урахуванням фізичних механізмів фіксації інформації (рис. 1).

Для визначення ефективності розробленої інформаційної технології отримано кількісні оцінки якості синтезованих багатоканальних зображень, зокрема ентропія по Шеннону, сигнальна ентропія та інші. У роботі пропонується метод об'єднання на основі використання пакетної побудови вейвлет-базисів [20] з декореляцією первинних видових даних, бікубічної інтерполяції, перетворення RGB-зображень у формат HSV та гіперсферичного перетворення (НСТ) [21]. Основними етапами перетворення первинних багатоканальних зображень є завантаження фотограмметричних моноканальних (МКЗ) і багатоканальних (БКЗ) зображень, отриманих зі супутника; потім передискретизація БКЗ і приведення його розмірності до розмірності МКЗ на основі бікубічної інтерполяції. Далі проводиться геометрична, радіометрична та контрастна корекція БКЗ та МКЗ і перетворення зображення з формату RGB у кольорову систему HSV. Після заміни компоненти яскравості багатоканального зображення такою ж компонентою монохромного зображення проводиться обернене перетворення отриманого на попередньому етапі зображення

з формату HSV в кольорову систему RGB. Отримане зображення вже буде мати підвищене просторове розрізнення в порівнянні з первинним знімком у натуральних кольорах. Наступним етапом є застосування розробленого методу геометричної та спектральної корекції за допомогою пакетного вейвлет-перетворення, також представленого в [21]. Зворотний пакетний вейвлет-розклад та одержання зображення БКЗ у форматі RGB дозволяє зробити перетворення 8-канального зображення, яке після інтерполяції в гіперсферичний колірний простір НСТ і зворотного НСТ-перетворення призводить до отримання результату Fusion. Аналіз отриманих результатів показує, що використання запропонованої методики підвищує якість первинних космічних знімків та якість розпізнавання об'єктів на 10–12%.

У розробленому в цій роботі алгоритмі використання БКЗ для отримання оптимальної СКТЗ ми будемо користуватися модифікованою технологією, замінивши бікубічну інтерполяцію на розроблену нами багатовимірну інтерполяцію типу Паде, яка є більш точною і компактною [22] (рис. 1).

3. Інтеграція в модель: моделювання середовища (побудова цифрової карти місцевості з використанням GIS-систем), облік динаміки (регулярне оновлення даних для моделювання руху супротивника та змін місцевості), прогнозування ризиків (оцінювання безпечних і небезпечних зон).

На цьому етапі доцільно створювати нейронні мережі алгоритмами машинного навчання і застосувати їх для автоматизації, класифікації та виявлення аномалій. Нами розроблено систему машинного і глибокого навчання нейронної мережі [23], яка може бути застосована також для аналізу аерокосмічних знімків (рис. 1).

Початковий рівень – це згортовка нейронна мережа (VGGNet), яка ідентифікує підозрілі на наявність небезпеки зони на зображеннях. Основною метою цього першого рівня є побудова глибокої архітектури з численними згортковими шарами для ефективного вилучення функцій із зображень. Це забезпечує високу точність розпізнавання завдяки спеціалізації мережі для певного типу зображення, тим самим зменшуючи кількість помилкових спрацьовувань. Модель глибокого навчання для отримання оптимальної СКТЗ навчається за допомогою бази даних, як показано на рис. 1.

Другий рівень призначений для створення оптимальної СКТЗ. Він виконує класифікацію проблемних об'єктів, виявлених на першому

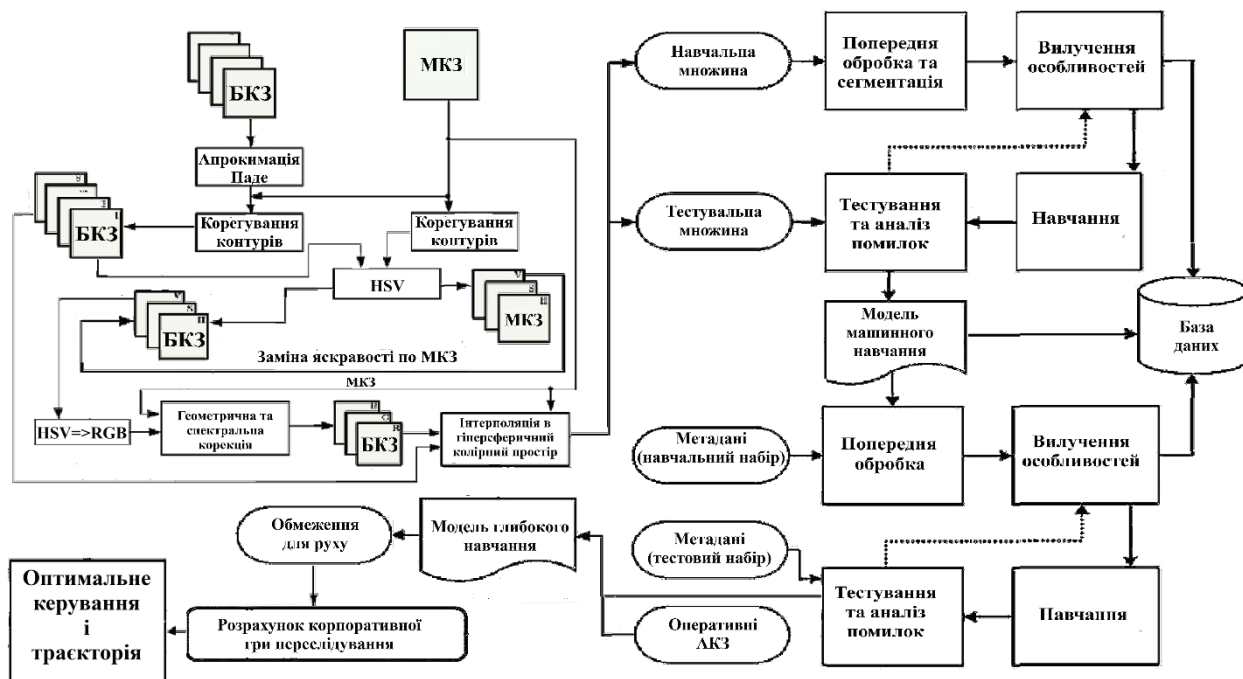


Рис. 1. Схема розробленого алгоритму використання БКЗ для побудови оптимальної СКТЗ

шарі, й генерує рекомендації для подальших досліджень і протоколів дій. У процесі глибокого навчання другий рівень використовує дані об'єктів із першого рівня разом із метаданими з бази даних.

Наявні СКТЗ стикаються зі значними проблемами в розпізнаванні підозрілих об'єктів на основі монохроматичних даних. Наша архітектура нейронної мережі для оптимальної СКТЗ вирішує це, об'єднуючи кілька зображень на першому рівні, щоб підвищити точність виявлення об'єктів. Ці зображення масштабуються до єдиного розміру, який відповідає їх фізичному розташуванню на поверхні, а статистичний критерій узгодження застосовується до точок контуру об'єкту із заданим рівнем достовірності.

Ця модель для глибокого навчання може проводити поглиблений аналіз великих наборів даних і відкривати нові відомості, для пошуку яких вона, можливо, не була спеціально навчена.

Важливо використовувати саме згорткові мережі, тому що передбачається автономне застосування літальних апаратів і обрахунки треба проводити безпосередньо на мікропроцесорах, розташованих на борту прилада, і за вкрай короткий проміжок часу. При цьому обсяг машинної пам'яті є також обмеженим і треба використовувати методи стиснення даних і прискорення обчислень [24].

4. Попередні кроки дозволяють провести оптимізацію маршрутів шляхом розрахунку моделі переслідування в корпоративних іграх: визначити найкращий маршрут літального апарата з урахуванням мінімізації витрат пального, обходу зон високого ризику враження засобами супротивника, який гарантує максимальну ймовірність виконання завдання незалежно від дій супротивника.

У разі розвідки в умовах бойових дій, коли літальний апарат запускається для моніторингу території, дані багатоканальних супутникових знімків інтегруються в модель таким чином:

1) виявляються укріплення противника через спектральний аналіз інфрачервоного діапазону;

2) визначається безпечний маршрут для зони польоту;

3) прогнозується можливість зустрічі з ворожими засобами ППО.

У разі атаки літального апарату на стратегічний об'єкт супутникові дані допомагають визначити точну локацію цілі, змодельовати реакцію противника і забезпечити оптимальне виконання завдання.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Інформаційні технології, зокрема використання багатоканальних аерокосмічних зображень, мають великий потенціал для покращення управління літальними апаратами в моделях корпоративних диференціальних ігор переслідування. Вони забезпечують важливу

інформацію для прийняття рішень у реальному часі, дозволяючи оптимізувати стратегії та підвищувати ефективність місій. Подальші дослідження в цій області можуть відкривати нові можливості та перспективи для застосування інформаційних технологій у сфері аерокосмічних досліджень та управління літальними апаратами. Методика застосування багатоканальних

супутникових знімків у задачах корпоративних диференціальних ігор забезпечує підвищення ефективності управління літальними апаратами, мінімізацію ризиків і втрат, а також адаптацію керування до динамічних змін у середовищі. Ця методика відкриває нові можливості для тактичного планування, стратегічного аналізу та оперативного реагування в умовах воєнних дій.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Zhang L., Wang Y. Infrared imaging for hidden object detection. *International Journal of Remote Sensing*. 2021. V. 42, Issue 5. P. 1234–1245.
2. Chen X., Li Z. Multispectral data for military strategy planning. *Remote Sensing in Defense Applications*. 2020. V.18, Issue 4. P. 199–210.
3. Johnson R., Baker S. Coordinating military units using multispectral satellite imagery. *Journal of Military Operations*. 2021. V. 27, Issue 3. P. 88–102.
4. Miller J., Cooper D. High-precision mapping for UAV navigation using optical satellite imagery. *Geospatial Research*. 2019. V. 15, Issue 2. P. 78–89.
5. Lee H., Park J. Machine learning approaches for real-time object detection in UAV systems. *Journal of Artificial Intelligence in Defense*. 2020. V. 8, Issue 3. P. 45–62.
6. Smith T., Patel R. Radar imaging for UAV operations in low visibility conditions. *Defense Technology Review*. 2022. V. 10, Issue 1. P. 33–49.
7. Smith T., Patel R. Challenges of real-time satellite data in military operations. *Defense Technology Review*. 2021. V. 10, Issue 2. P. 101–115.
8. Lee H., Park J. Spectral limitations of satellite imagery in complex environments. *Journal of Remote Sensing*. 2020. V. 8, Issue 4. P. 78–89.
9. Chen X., Li Z. Data processing bottlenecks in multispectral satellite imagery. *Remote Sensing Applications*. 2022. V. 15, Issue 3. P. 56–72.
10. Garcia F., Martinez C. Bandwidth constraints in satellite data transmission for military purposes. *Journal of Military Technology*. 2021. V. 20, Issue 1. P. 33–44.
11. Garcia F., Martinez C. Integrating satellite and ground-based data for unified battlefield awareness. *Advanced Defense Systems*. 2023. V. 14, Issue 2. P. 201–219.
12. Harris P., Moore T. Predictive analytics for military decision-making using satellite data. *Defense Analysis Quarterly*. 2021. V. 19, Issue 4. P. 55–73.
13. Miller J., Cooper D. Integration challenges for UAV control systems using satellite data. *Journal of UAV Systems*. 2019. V. 14, Issue 2. P. 42–58.
14. Zhang L., Wang Y. Latency issues in satellite-based UAV operations. *International Journal of Remote Sensing*. 2021. V. 42, Issue 6. P. 123–145.
15. Johnson R., Baker S. Cybersecurity risks in satellite communication systems. *Cyber Defense Quarterly*. 2020. V. 9, Issue 3. P. 67–85.
16. Harris P., Moore T. Data accuracy issues in high-risk environments. *Defense Analysis Quarterly*. 2021. V. 19, Issue 1. P. 88–102.
17. Каштан В. Ю., Гнатушенко В. В. Технологія геометричної та спектральної корекцій оптико-електронних космічних знімків. *Вісник ХНТУ*. 2017. Т. 3. № 62. С. 286–291.
18. Pansharpening technology of high-resolution multispectral and panchromatic satellite images / V.Yu. Shevchenko та ін. *Науковий вісник НГУ*. 2015. Т. 4. № 148. С. 91–98.
19. Kahtan V. Yu., Shedlovska Y. I. Processing technology of multispectral remote sensing images. *International Young Scientists Forum on Applied Physics 2017 Proceedings*, 2017. P. 355–358.
20. Каштан В.Ю., Гнатушенко В.В. Інформаційна технологія підвищення інформативності багатоканальних даних на основі пакетних вейвлет-перетворень. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2016. С. 77–83.
21. Шевченко В.Ю., Гнатушенко В.В., Кавац О.О. Підвищення просторового розрізнення багатоканальних аерокосмічних зображень високого просторового розрізнення на основі гіперсферичного перетворення. *Науковий журнал Запорізького національного технічного університету*. 2015. Т. 1. № 32. С. 73–79.

22. Olevskiy V.I., Olevska Yu.B., Olevskiy O.V., Hnatushenko V.V. Raster image processing using 2D Padé-type approximations. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. V. 2675, Issue 1. Art. ID 012015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2675/1/012015>.

23. Aziukovskyi O., Hnatushenko V., Zavizion V., Olevskiy V., Bulana T., Ivanov D., Gadiatskiy, V. Decision support system Oncoassist for breast cancer computer-aided diagnostic. *Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'2024) : матеріали XX Міжнародної наукової інтернет-конференції (20-23 червня 2024 р., м. Хмельницький, м. Усті над Лабем)*. 2024. С. 21–22.

24. Хабарлак К.С. Прискорення фази адаптації оптимізаційного мета-навчання. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2022. Т. 82. № 1. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-1-10>.

REFERENCES:

1. Zhang, L., & Wang, Y. (2021). Infrared imaging for hidden object detection. *International Journal of Remote Sensing*, 42(5), 1234–1245.
2. Chen, X., & Li, Z. (2020). Multispectral data for military strategy planning. *Remote Sensing in Defense Applications*, 18(4), 199–210.
3. Johnson, R., & Baker, S. (2021). Coordinating military units using multispectral satellite imagery. *Journal of Military Operations*, 27(3), 88–102.
4. Miller, J., & Cooper, D. (2019). High-precision mapping for UAV navigation using optical satellite imagery. *Geospatial Research*, 15(2), 78–89.
5. Lee, H., & Park, J. (2020). Machine learning approaches for real-time object detection in UAV systems. *Journal of Artificial Intelligence in Defense*, 8(3), 45–62.
6. Smith, T., & Patel, R. (2022). Radar imaging for UAV operations in low visibility conditions. *Defense Technology Review*, 10(1), 33–49.
7. Smith, T., & Patel, R. (2021). Challenges of real-time satellite data in military operations. *Defense Technology Review*, 10(2), 101–115.
8. Lee, H., & Park, J. (2020). Spectral limitations of satellite imagery in complex environments. *Journal of Remote Sensing*, 8(4), 78–89.
9. Chen, X., & Li, Z. (2022). Data processing bottlenecks in multispectral satellite imagery. *Remote Sensing Applications*, 15(3), 56–72.
10. Garcia, F., & Martinez, C. (2021). Bandwidth constraints in satellite data transmission for military purposes. *Journal of Military Technology*, 20(1), 33–44.
11. Garcia, F., & Martinez, C. (2023). Integrating satellite and ground-based data for unified battlefield awareness. *Advanced Defense Systems*, 14(2), 201–219.
12. Harris, P., & Moore, T. (2021). Predictive analytics for military decision-making using satellite data. *Defense Analysis Quarterly*, 19(4), 55–73.
13. Miller, J., & Cooper, D. (2019). Integration challenges for UAV control systems using satellite data. *Journal of UAV Systems*, 14(2), 42–58.
14. Zhang, L., & Wang, Y. (2021). Latency issues in satellite-based UAV operations. *International Journal of Remote Sensing*, 42(6), 123–145.
15. Johnson, R., & Baker, S. (2020). Cybersecurity risks in satellite communication systems. *Cyber Defense Quarterly*, 9(3), 67–85.
16. Harris, P., & Moore, T. (2021). Data accuracy issues in high-risk environments. *Defense Analysis Quarterly*, 19(1), 88–102.
17. Shevchenko, V. Yu., Hnatushenko, V. V., Hnatushenko, Vik. V., & Kavats, O. O. (2015). Tekhnolohiia heometrychnoi ta spektralnoi korektsii optyko-elektronnykh kosmichnykh znimkiv [Pansharpening technology of high-resolution multispectral and panchromatic satellite images]. *Naukovyi visnyk NGU*, 4(148), 91–98. [in Ukrainian].
18. Kahtan, V. Yu., & Shedlovska, Y. I. (2017). Tekhnolohiia obrobky multispektralnykh zobrazhen dystantsiinoho zonduvannya [Processing technology of multispectral remote sensing images]. *International Young Scientists Forum on Applied Physics 2017 Proceedings*, 355–358.
19. Kashtan, V. Yu., & Hnatushenko, V. V. (2017). Tekhnolohiia heometrychnoi ta spektralnoi korektsii optyko-elektronnykh kosmichnykh znimkiv [Technology of geometric and spectral corrections of optoelectronic space images]. *Visnyk KhNTU*, 3(62), 286–291.
20. Kashtan, V. Yu., & Hnatushenko, V. V. (2016). Informatsiina tekhnolohiia pidvyshchennia informatyvno-sti bahatokanalnykh danykh na osnovi paketnykh veivlet-peretvoren [Information technology for increasing the

informativeness of multispectral data based on packet wavelet transforms]. *Kompiuterno-intehrovani tekhnologii: osvita, nauka, vyrobnytstvo*, 77–83.

21. Shevchenko, V. Yu., Hnatushenko, V. V., & Kavats, O. O. (2015). *Pidvyshchennia prostorovoho rozrznennia bahatokanalnykh aerokosmichnykh zobrazen na osnovi hipersferychnoho peretvorennia* [Improving spatial resolution of multispectral aerospace images based on hyperspherical transformation]. *Naukovyi zhurnal ZNTU*, 1(32), 73–79.

22. Olevskiy, V. I., Olevska, Yu. B., Olevskiy, O. V., & Hnatushenko, V. V. (2023). Raster image processing using 2D Padé-type approximations. *Journal of Physics: Conference Series*, 2675(1), 012015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2675/1/012015>

23. Aziukovskiy, O., Hnatushenko, V., Zavizion, V., Olevskiy, V., Bulana, T., Ivanov, D., & Gadiatskiy, V. (2024). Decision support system Oncoassist for breast cancer computer-aided diagnostic. *Proceedings of ISDMCI 2024: XX International Scientific Online Conference*, 21–22.

24. Khabarлак, K. S. (2022). *Pryskorennia fazy adaptatsii optymizatsiinoho meta-navchannia* [Acceleration of the adaptation phase of optimization meta-learning]. *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, (1), 82. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-1-10> [in Ukrainian].