

С.М. Чумаченко, В.О. Перескоков, М.М. Логвиненко, П.П. Шабанов

Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ КЕРОВАНИХ АВІАЦІЙНИХ БОМБ ЧЕРЕЗ ВІЗУАЛІЗАЦІЮ ПРОЦЕСУ ПРИЦІЛЮВАННЯ

У статті обґрунтовано науковий підхід до підвищення ефективності візуалізації прицілювання під час бойового застосування керованих авіаційних бомб (КАБ). Проведено комплексне моделювання впливу типу сенсора, погодних умов, стабільності платформи, частоти кадрів та контрастності зображення на точність ураження цілі. Запропоновано підхід, що включає адаптивну фільтрацію, автоматичне розпізнавання, цифрову стабілізацію зображення та інтеграцію з навігаційними системами. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність багатоспектральних і гіперспектральних сенсорів, а також алгоритмів CLANE, Kalman, CNN. Результати можуть бути використані для модернізації авіаційних платформ, розробки автономних систем наведення та формування нормативної бази для Збройних Сил України із застосуванням керованих авіаційних бомб АБ+УМПК.

Ключові слова: візуалізація прицілювання, керовані авіаційні бомби, УМПК, сенсорні системи, стабілізація зображення, точність ураження, бойові завади.

Вступ

Постановка проблеми. Керовані авіаційні бомби (КАБ) – авіаційна бомба з універсальним модулем планування та корекції (АБ + УМПК) є одним з основних видів високоточної зброї, оскільки вони поєднують у собі високу точність влучення, значну потужність бойової частини (БЧ).

КАБ використовуються фронтовою авіацією для ураження особливо важливих цілей, таких як: залізничні та автомобільні мости, злітно-посадкові смуги, кораблі та транспортні судна, військово-промислові об'єкти та захищені командні пункти, міцні залізобетонні укриття. Ці боєприпаси скидаються з літака і можуть летіти на значні відстані, що залежать від висоти та швидкості носія, від вітру та інших погодних умов, що впливає на точність. До того ж, літак, який скидає бомби вільного падіння, повинен спиратися на тотальну перевагу в повітрі, інакше через близькість до фронту ризикує бути збитим. Чим вище та швидше летить літак, далі може досягти бомба.

У сучасних умовах ведення бойових дій, що характеризуються високою динамікою, асиметричністю та широким застосуванням високоточної зброї, через відсутність достатньої кількості крилатих ракет особливого значення набуває застосування КАБ. Їх точність та результативність значною мірою залежать від якості візуалізації цілі на борту носія на етапі прицілювання, що, у свою чергу, визначається

характеристиками систем прицілювання, алгоритмами обробки вихідної інформації та умовами бойового середовища.

Візуалізація прицілювання є критичним елементом бойового циклу: вона забезпечує виявлення, розпізнавання, супровід та точне наведення боєприпасу на ціль. У випадку КАБ, які можуть змінювати траєкторію польоту на основі введення зовнішніх даних, якість візуалізації безпосередньо впливає на точність попадання КАБу по цілі, мінімізацію побічних втрат та ефективність ураження об'єкта.

Актуальність дослідження зумовлена такими чинниками:

зростанням ролі високоточної авіаційної зброї в сучасних конфліктах;

необхідністю адаптації візуалізаційних систем до складних метеоумов, завад, диму, пилу, нічного часу доби;

потребою в розробці алгоритмів стабілізації, фільтрації та автоматичного розпізнавання цілей;

інтеграцією візуалізації з навігаційними, корекційними та бойовими модулями [2, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Оцінювання ефективності візуалізації прицілювання КАБ є предметом активних досліджень у галузях військової оптики, навігації, штучного інтелекту та систем керування.

Упродовж останніх десятиліть питання точного прицілювання авіаційних боєприпасів активно досліджуються в роботах провідних наукових центрів США (MIT Lincoln Laboratory,

RAND Corporation), Ізраїлю (Rafael), Франції (Thales), а також у публікаціях NATO Science & Technology Organization. Вітчизняні дослідження зосереджені переважно на модернізації оптико-електронних систем, адаптації до бойових умов та інтеграції з навігаційними комплексами. У США, Ізраїлі, Франції, Туреччині та Китаї дослідження шляхів підвищення ефективності візуалізації прицілювання ведуться в рамках оборонних програм, таких як DARPA (США), Rafael (Ізраїль), Thales (Франція), Aselsan (Туреччина), CETC (Китай) [2, 3, 5].

Українські наукові установи, зокрема Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І.Кожедуба активно досліджують питання точності наведення в умовах бойових завад, обмеженої видимості та нестабільної платформи. [12]

Основні акценти вітчизняних робіт:

1. Моделювання точності прицілювання в умовах вібрацій та турбулентності.
2. Аналіз ефективності телевізійних та ІЧ-каналів у реальних бойових умовах.
3. Розробка алгоритмів стабілізації зображення та компенсації завад.
4. Інтеграція геоаналітичних платформ для оцінки точності ураження.

5. Адаптація моделей до умов урбанізованого середовища та маскування цілей.

Значна увага приділяється практичному застосуванню моделей у системах управління вогнем, а також розробці рекомендацій для модернізації сенсорних платформ.

Ключові напрями зарубіжних досліджень:

1. Застосування гіперспектральних сенсорів для виявлення замаскованих цілей.
2. Інтеграція штучного інтелекту (CNN, YOLO, Transformer) для автоматичного розпізнавання об'єктів.
3. Моделювання точності прицілювання з урахуванням метеоумов, освітлення та електронних завад.
4. Розробка адаптивних систем наведення з багатоканальним аналізом зображення.
5. Використання цифрових двійників для тестування ефективності візуалізації в симульованих середовищах.

Зарубіжні моделі часто базуються на багатфакторному аналізі, включаючи машинне навчання, Bayesian-оцінювання та fuzzy logic для адаптації до нестандартних ситуацій [8, 15, с. 49].

Розглянемо порівняльну характеристику вітчизняних та зарубіжних досліджень за цими напрямками, які наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння вітчизняних та зарубіжних досліджень за визначеними критеріями

Критерій	Вітчизняні дослідження	Зарубіжні дослідження
Типи сенсорів	TV, IR, SWIR	IR, SWIR, Multispectral, Hyperspectral
Алгоритми обробки	CLANE, Kalman, фільтрація шуму	CNN, YOLO, Transformer, AI fusion
Умови моделювання	Реальні бойові сценарії, урбанізація	Цифрові двійники, симулятори
Інтеграція з платформами	Геоаналітичні системи, GIS	Цифрові бойові системи, AR/VR
Ступінь автоматизації	Часткова	Повна / автономна

Джерело: розроблено авторами

Аналіз показує, що вітчизняні дослідження мають високий рівень прикладної адаптації до реальних бойових умов, тоді як зарубіжні – демонструють глибоку автоматизацію та використання передових сенсорних технологій. Синтез обох підходів – шлях до створення ефективних систем наведення нового покоління [12].

Загальним трендом за результатами аналізу вітчизняних та зарубіжних публікацій є перехід від пасивних систем до активних, багатоспектральних платформ, здатних працювати в умовах завад, нічного часу доби та складного рельєфу. Особливу увагу приділено алгоритмам стабілізації

зображення, автоматичного розпізнавання цілей та інтеграції з системами корекції траєкторії [12].

Таким чином, **метою статті** є наукове обґрунтування шляхів підвищення ефективності візуалізації прицілювання при застосуванні КАБ, з урахуванням технічних, алгоритмічних та бойових факторів.

Виклад основного матеріалу

Ефективність візуалізації прицілювання є критичним чинником бойового застосування КАБ, оскільки саме якість зображення цілі визначає здатність системи наведення точно ідентифікувати,

захопити та супроводжувати ціль у реальному часі. Теоретичне оцінювання ефективності візуалізації базується на аналізі взаємозв'язку між фізичними параметрами сенсорної системи літака носія, алгоритмами обробки зображення та зовнішніми умовами бойового середовища [11].

Розглянемо фактори, що визначають ефективність візуалізації при прицілюванні КАБ. До основних параметрів, які впливають на ефективність візуалізації прицілювання, належать:

1. Роздільна здатність сенсора: визначає здатність розпізнавати дрібні деталі цілі, що особливо важливо при роботі в урбанізованому середовищі або при маскуванні.

2. Контрастність зображення: впливає на якість сегментації цілі; низька контрастність ускладнює автоматичне розпізнавання.

3. Частота кадрів (FPS): забезпечує плавність оновлення зображення, що критично при супроводі рухомих об'єктів.

4. Стабільність платформи: вібрації та коливання носія призводять до спотворення зображення, зниження точності наведення.

5. Тип сенсора: телевізійні, інфрачервоні, SWIR, багатоспектральні та гіперспектральні сенсори мають різну чутливість до умов освітлення, завад та маскування.

Критерії ефективності. Оцінювання ефективності візуалізації прицілювання здійснюється за такими критеріями:

1. Середнє відхилення точки попадання (СЕР): метричний показник точності ураження цілі.

2. Ймовірність захоплення цілі (P_c): визначає здатність системи виявити та ідентифікувати об'єкт.

3. Час на захоплення та супровід (Tasc): критичний для динамічних бойових сценаріїв.

4. Стійкість до бойових завад: здатність системи зберігати функціональність при впливі оптичних, електронних або метеорологічних перешкод [12].

Аналітичні моделі. Для формалізації процесу оцінювання ефективності пропонується використовувати багатофакторні моделі, що враховують взаємодію значимих параметрів, які впливають на ефективність візуалізації цілей під час застосування КАБів. В якості складових багатофакторної моделі виберемо наступні значимі параметри:

1. F – частота кадрів;
2. C – контрастність;
3. S – стабільність платформи;
4. $W(\text{sensor_type})$ ваговий коефіцієнт типу сенсора.

Модель складається з трьох основних множників, кожен з яких описує вплив відповідного параметра:

1. Частота кадрів (F).

Зворотна залежність між FPS та похибкою наведення, що моделюється раціональною функцією. Зі зростанням частоти кадрів зменшується затримка оновлення зображення, що позитивно впливає на точність супроводу цілі.

2. Контрастність зображення (C).

Експоненційна залежність, яка відображає ефективність алгоритмів сегментації та розпізнавання. Вища контрастність забезпечує кращу диференціацію цілі на фоні, зменшуючи похибку.

3. Стабільність платформи (S).

Модель враховує вплив вібрацій, коливань та турбулентності на якість зображення. Зі зростанням стабільності платформи зменшується спотворення відеопотоку, що сприяє точнішому прицілюванню.

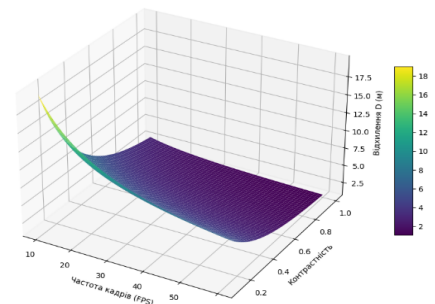
4. Ваговий коефіцієнт типу сенсора ($W(\text{sensor_type})$).

Ваговий коефіцієнт, що враховує технічні характеристики сенсорної системи. Наприклад, для телевізійного сенсора $W(\text{sensor_type}) = 1.0$, для гіперспектрального – $W(\text{sensor_type}) = 0.3$. Чим нижче значення $W(\text{sensor_type})$, тим вища точність при інших рівних умовах.

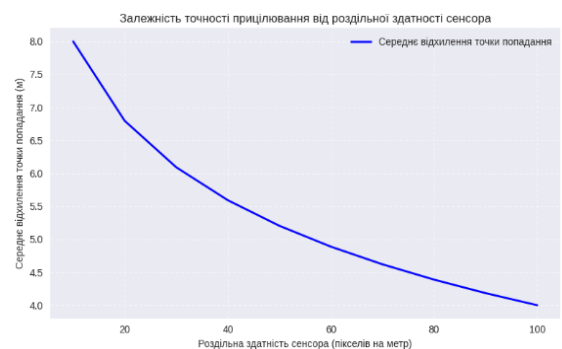
У загальному вигляді показник середнього відхилення точки попадання, як характеристика точності прицілювання, може бути представлений у вигляді функції $D = f(F, C, S, W(\text{sensor_type}))$, (м).

Розрахункові графіки були побудовані для демонстрації точності прицілювання в залежності від складових цієї моделі (рис. 1 а), б), в), г).

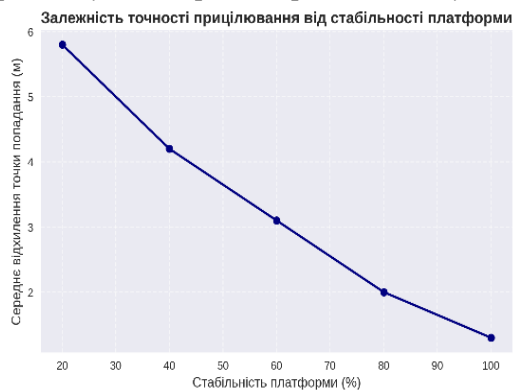
Точність прицілювання залежно від FPS та контрастності ($S = 80\%$, SWIR)



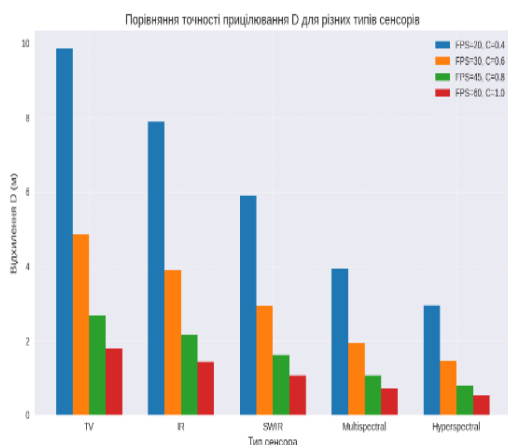
а)



б)



в)



г)

Рис. 1 а, б, в, г. Розрахункові графіки

Джерело: розроблено авторами

Запропонована модель дозволяє:
прогнозувати точність ураження цілі в
реальному часі;
адаптувати параметри сенсорної системи до

умов бойового середовища;

порівнювати ефективність різних типів сенсорів;
інтегрувати у геоаналітичні платформи для
підтримки прийняття рішень.

Ця модель, за результатами обробки графіків
авторами, може бути представлена у вигляді
наступної аналітичної залежності:

$$D = \left(\left(\frac{120}{F + 10} + 0,8 \right) \times (6 \times e^{-3,5 \times C} + 0,5) \times \right. \\ \left. \times (5,9 \times e^{-0,03 \times S} + 0,5) \right) \times W(\text{sensor_type}).$$

Сучасні авіаційні платформи оснащуються
такими типами візуалізаційних систем.

1. Тепловізійні камери – забезпечують
прицілювання в інфрачервоному діапазоні,
ефективні в нічних умовах.

2. Телевізійні камери високої роздільної
здатності – використовуються для денного
прицілювання з високою деталізацією.

3. Лазерні далекоміри та підсвітлювачі –
дозволяють точно визначати відстань до цілі та
забезпечують наведення.

4. Багатоспектральні системи – поєднують
кілька каналів (IR, TV, SWIR) для підвищення
достовірності зображення.

5. Стабілізовані платформи – компенсують
вібрації та рух носія, забезпечуючи чіткість
зображення.

Усі ці системи мають обмеження, пов'язані з
погодними умовами, димом, пилом, електронними
завадами, що вимагає розробки алгоритмів
компенсації та фільтрації [8, 10].

Таблиця 2

Порівняння технологій візуалізації прицілювання для корегуємих авіаційних боєприпасів

Технологія	Діапазон роботи	Переваги	Недоліки
Тепловізійна камера (IR)	Інфрачервоний (8–14 μm)	Робота вночі, крізь дим і пил, виявлення теплових контрастів	Низька деталізація, залежність від температурного фону
Телевізійна камера (TV)	Видимий спектр	Висока роздільна здатність, точне розпізнавання цілей	Обмеження в умовах слабкого освітлення, завади від диму/туману
Багатоспектральна система	IR + TV + SWIR	Комбінування каналів, підвищення достовірності зображення	Висока вартість, складність інтеграції
Лазерний далекомір/підсвітка	Лазерний (1064 nm)	Точне визначення відстані, наведення на підсвічену ціль	Залежність від прямої видимості, вразливість до атмосферних завад
Стабілізована платформа	Усі спектри	Компенсація руху носія, чіткість зображення при маневруванні	Висока маса, складність технічного обслуговування
Автоматичне розпізнавання	Алгоритмічне	Швидке виявлення та супровід цілі, зменшення навантаження на оператора	Ризик хибних спрацювань, залежність від якості вхідного зображення

Джерело: розроблено авторами

5. Інтеграція у інтерфейс:

усі зовнішні фактори накладаються як окремі шари на карту прицілювання;

можливість фільтрації – оператор може увімкнути/вимкнути окремі фактори;

система автоматично генерує рекомендації: зміна точки пуску, вибір альтернативної траєкторії, відкладення атаки.

Графічний макет інтерактивної карти для візуалізації прицілювання КАБ має багатоварову структуру: базова топографічна карта з рельєфом, маркер цілі, траєкторія КАБ з часовими мітками, зона ураження (еліпс), прогнозована траєкторія цілі (пунктирна лінія), вектори вітру, зона РЕБ (концентричні поля), перешкоди рельєфу (гори, забудова), адаптивне підсвічування ключових елементів.

Модель реалізується у вигляді багатоварової візуалізації, де кожен шар відповідає окремому інформаційному рівню: базова геометрія, прогнозована траєкторія, зони допустимого відхилення, сигнали корекції.

Алгоритмічна оптимізація візуального контенту. Для забезпечення високої інформативності та мінімізації когнітивного навантаження застосовуються такі алгоритмічні підходи.

1. Застосування адаптивних фільтрів для виділення ключових контурів цілі.

2. Динамічне масштабування зони прицілювання залежно від швидкості зближення.

3. Колірне кодування ризиків та відхилень (наприклад, червона зона – критичне відхилення, зелена – допустиме).

4. Інтеграція прогнозованої аналітики на основі моделей машинного навчання для візуального підсвічування найбільш ймовірної точки ураження.

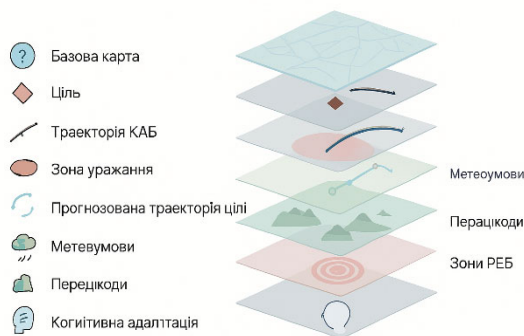


Рис. 4. Архітектура візуалізаційної моделі прицілювання КАБ

Джерело: [16, 17]

Впровадження когнітивно-орієнтованих інтерфейсів.

З метою підвищення ефективності сприйняття візуальної інформації оператором, методологія включає таке.

1. Використання ергономічних елементів інтерфейсу (розташування, контраст, рухомі маркери).

2. Моделювання сценаріїв прицілювання з урахуванням реакцій оператора.

3. Впровадження режимів навчання та симуляції для адаптації до різних типів цілей та умов.

Ефективне застосування КАБ залежить від:

точності виявлення та супроводу цілі;

стабільності зображення в умовах руху носія;

здатності системи до автоматичного коригування прицілювання;

інтеграції з навігаційними та інерційними системами.

Візуалізація прицілювання для КАБ має бути не лише інформативною, а й адаптивною – здатною змінювати параметри в реальному часі залежно від обстановки.

Підвищення ефективності візуалізації процесу прицілювання при скиданні КАБ є критичним чинником забезпечення точності ураження цілей, особливо в умовах обмеженої видимості, електронної протидії та високої динаміки бойового середовища. Запропонована методологія базується на інтеграції когнітивних принципів, алгоритмічної оптимізації та адаптивних технологій обробки даних.

Принципи побудови візуалізаційної моделі. Методологія передбачає формування візуалізаційної моделі, яка враховує:

1. Просторово-часову динаміку об'єкта прицілювання.

2. Геометричні параметри траєкторії КАБ.

3. Радіоелектронна боротьба (РЕБ).

4. Психофізіологічні особливості сприйняття оператором візуального сигналу.

Просторово-часова динаміка об'єкта прицілювання.

Вона відповідає за відображення змін положення, швидкості та прогнозованої траєкторії цілі у реальному часі, з урахуванням бойового контексту. Її реалізація дозволяє оператору не лише бачити поточне положення об'єкта, але й оцінювати його майбутнє положення у момент ураження. Просторово-часова динаміка об'єкта прицілювання включає: геопросторове позиціонування, векторну динаміку, прогнозування траєкторії, зони допустимого ураження, темпоральну шкалу.

Геопросторове позиціонування:

визначення координат цілі у системі WGS-84 або локальний UTM;

відображення на картографічному шарі з прив'язкою до рельєфу, інфраструктури, зон перешкод;

врахування похибки сенсорів (GPS, оптика, радіолокаційна станція) – візуалізується як еліпс невизначеності.

Векторна динаміка:

побудова вектора швидкості та напрямку руху цілі;

візуалізація у вигляді стрілки з довжиною, пропорційною швидкості;

колірна градація — зелений (стабільний рух), жовтий (маневр), червоний (хаотичний рух).

Прогнозування траєкторії:

алгоритмічне моделювання положення цілі у момент ураження ($T+\Delta t$);

візуалізація прогнозованої траєкторії як пунктирної лінії;

врахування типу цілі: лінійна модель (транспорт), нелінійна (дрон, маневрована техніка).

Зони допустимого ураження:

побудова динамічної зони ураження з урахуванням часу польоту боєприпасу;

візуалізація у вигляді прозорого конуса або еліпсоїда, що охоплює прогнозовану точку;

відображення меж допустимого відхилення (наприклад, ± 5 м) – критично для високоточної зброї.

Темпоральна шкала:

візуалізація часових міток: T_0 – момент скиду, T_1 – прогноз ураження, T_2 – допустимий інтервал корекції;

анімація руху цілі та боєприпасу у реальному часі або прискореному режимі;

відображення затримки сигналу, часу реакції оператора, часу обробки даних.

Всі елементи інтегруються у багатоплановий інтерфейс: базова карта, шар цілі, шар прогнозу, шар ураження. Це дозволяє забезпечити можливість перемикання режимів: статичний, динамічний, симуляційний. Також забезпечує підтримку сенсорного управління, масштабування, фільтрацію за типом цілі.

Геометричні параметри траєкторії КАБ у візуалізаційній моделі відповідають за точне графічне представлення траєкторії польоту боєприпасу з урахуванням його балістичних, аеродинамічних та керованих характеристик. Вони дозволяють оператору оцінити допустимі зони ураження, коригувати точку скиду та прогнозувати результат ураження. Геометричні параметри траєкторії КАБ включають такі компоненти.

Початкову точку скиду (P_0), яка включає:

географічні координати (широта, довгота, висота);

відображення на карті як маркер з напрямком вектора скиду;

врахування платформи скиду (тип літака чи БПЛА) – з урахуванням її швидкості та кута атаки.

Траєкторія польоту включає:

побудову тривимірної кривої польоту з урахуванням:

початкової швидкості V_0 ;

кута скидання КАБ – θ ;

кута падіння КАБ – α (критично важливого для вертикального ураження);

сили опору повітря;

корекційних імпульсів (для КАБ);

візуалізацію як гладкої кривої з маркерами часу (T_0 , T_1 , T_2 , Δt). Де T_0 – момент скиду, T_1 – момент входження в зону корекції, T_2 – момент ураження, Δt – час польоту ($T_2 - T_0$);

можливість перемикання між режимами: балістична, керована, комбінована;

відображення точки ураження на карті (P_1) з еліпсом похибки (СЕР);

візуалізацію зони ураження (радіуса R) – залежно від типу боєприпасу;

зону допустимого відхилення, що включає:

побудову еліпсоїда або конуса навколо прогнозованої точки ураження;

врахування допустимого відхилення (наприклад, ± 5 м для JDAM);

колірну індикацію: зелена – гарантоване ураження, жовта – гранична зона, червона – поза межами ефективності.

Взаємодія з ціллю включає:

визначення точки перетину траєкторії КАБ з прогнозованою траєкторією цілі;

точку перетину двох кривих (КАБ і цілі);

відображення зони корекції для оцінки можливості зміни траєкторії у реальному часі.

Радіоелектронна боротьба (РЕБ) у візуалізаційній моделі відповідає за точне графічне представлення зон радіоелектронного подавлення прицільно-навігаційного обладнання КАБ з урахуванням відповідних зон подавлення сигналів корегування.

Зони активного радіоелектронного подавлення представляють у вигляді:

відображення зон РЕБ як концентричних полів з градацією інтенсивності за такою колірною шкалою: синій – слабкий вплив, фіолетовий – середній, червоний – критичний;

інтерактивним попередженням у вигляді мигання фіолетового та червоного кольору, що попереджує про втрату сигналу або ризик втрати керування.

Психофізіологічні особливості сприйняття оператором візуального сигналу представлені окремими графічними елементами, що підвищують рівень людського сприйняття інформації під час когнітивної роботи в умовах обмеженого часу реагування на зовнішні фактори впливу:

колір, інтерфейс користувача;

розташування маркерів, їх контраст і рухомість;

урахування реакцій оператора.

Графічна схема порівняння траєкторій трьох типів КАБ наведена на рис. 5:

JDAM – висока дугоподібна траєкторія, оптимальна для вертикального ураження з великої висоти;

УПАБ – середня траєкторія з розширеною зоною ураження, адаптована до складних метеоумов;

GBU – низька, стрімка траєкторія з коротким часом польоту, ефективна для швидкого ураження.

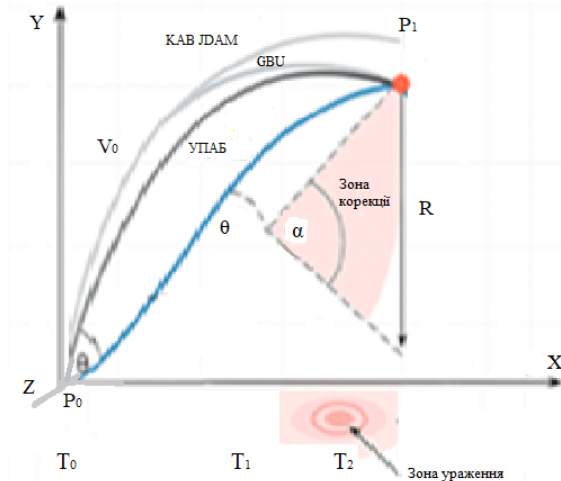


Рис. 5. Тривимірна крива польоту КАБ

Джерело: розроблено авторами

Усі траєкторії показано з точками скиду (P_0), точками ураження (P_1), кутами скиду (θ), кутами падіння (α) та зонами ураження (еліпси CEP). Це дозволяє порівняти дальність, висоту, кут входження та точність [3, 6, 8].

Основний принцип наведення всіх конфігурацій GBU-15 однаковий. Коли льотчик чи оператор визначає ціль на екрані, він здійснює захоплення зображення та скидання бомби. Система наведення безперервно порівнює поточне зображення із захопленням, і коригує курс, компенсуючи цим можливі відхилення. В іншому випадку, льотчик або оператор здійснює скидання до захоплення, та наводить бомбу в ручному режимі через апаратуру двостороннього зв'язку AN/AXQ-14. Дані способи наведення аналогічні використуваним у бомбі AGM-62 Walleye. Як і Walleye, GBU-15 дуже ефективна проти оптично контрастних цілей, але за умов низької чи змінної освітленості безпорадна [9, 10].

Наприкінці 90-х років була розроблена розширена система наведення, пов'язана з супутниковою навігаційною системою GPS. Це дозволило суттєво збільшити точність та розширити можливості застосування бомб вночі та у складних метеоумовах. На додаток до ручного та автоматичного режимів наведення з'явився режим,

в якому наведення здійснюється за допомогою приймача GPS на ціль з відомими координатами. [9]

Наразі український КАБ вже здійснює плануючий політ на 60 кілометрів і вражає визначену ціль. Як зазначили розробники, це ті вимоги, які ставитимуть військові замовники на підставі спільного рішення між конструкторським бюро (КБ) та Міноборони. Але зараз вже опрацьовується рішення, які дозволитимуть вражати цілі на дальності 80 км. Хоча формально, при висоті скидання у 10 км дальність може бути й до 100 км, але все визначатиме тактика застосування [18].

Випробувальні скиди здійснювалися з літака поки з горизонтального польоту. Вони дали позитивний результат. Зокрема, щодо дальності та системи скиду та планування бомби як такої.

Додамо, що потреба від українських військових у далекобійних бомбах дуже велика, це щонайменше сотні таких бомб на день. І вона не повністю компенсується західними зразками, такими як JDAM-ER, AASM Hammer та GBU-39/B SDB. Саме тому українське рішення справді необхідне. Більше того, його вартість на рівні навіть дослідних зразків вже дешевша за західні рішення.

Залежно від умов бомбометання (скидання з літака-носія) горизонтальна дальність польоту авіабомб і їх траєкторії можуть досягати кількох десятків кілометрів.

Запропонована авторами прицільно-навігаційна система призначена для підвищення точності прицільовання під час скидання КАБ по наземних цілях в умовах відсутності візуального контакту з ціллю та розширення можливостей навігаційного забезпечення в польоті.

Прицільно-навігаційна система складається з наступних складових:

- інерційної системи (ІС);
- чотирьох антен системи супутникової навігації (Ант-1, Ант-2, Ант-3, Ант-4);
- двох кутомірних блоків (БК-1, БК-2);
- обчислювально-комутаційного блоку (ОКБ);
- блоку введення польотної інформації (БВПІ);
- електронного планшету (ЕП);
- балістичного обчислювача (БО);
- пристрою виведення інформації на лобове скло (ПВІ);
- пристрою формування звукової інформації (ПФЗІ);
- блока живлення (БЖ);
- приймально-передавального модуля сигналів системи супутникового зв'язку (ППМ).

Функціональна схема прицільно-навігаційної системи зображена на рис. 6.

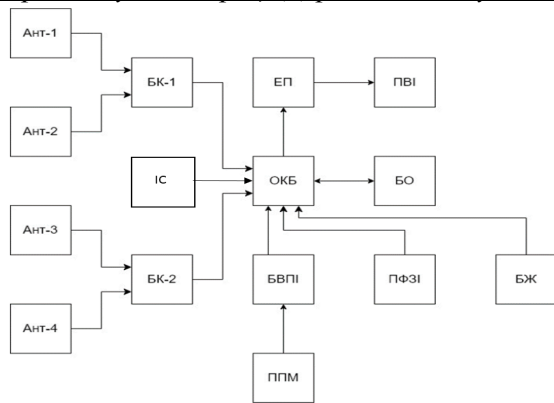


Рис. 6. Функціональна схема прицільно-навігаційної системи

Джерело: розроблено авторами

Прицільно-навігаційна система забезпечує виконання таких задач.

1) Прийом та обробка сигналів навігаційних космічних апаратів (НКА) систем GPS, GLONASS, Galileo та BeiDou антенами супутникової навігації в діапазонах роботи НКА GPS L1C/AL2C, GLONASS G1/G2, Galileo E1B/C 5b, BeiDou B1I B2I, а для боротьби з перешкодами НКА використовуються Anti-jamming та Anti-spoofing.

2) Введення інформації в польотне завдання:

- тип боєприпасу (б/п);
- координати цілі та ППМ;
- координати і тип засобів ППО противника;
- температура навколишнього середовища;
- координати точки початку бойового шляху.

3) Автоматичне визначення навігаційних параметрів в режимі навігації та відображення інформації на дисплеї:

- поточні координати літака;
- фактичний магнітний курс польоту;
- заданий магнітний курс польоту (на ціль, поворотний пункт маршруту);
- різницю між заданим та фактичним курсом польоту;
- загальну довжину маршруту;
- залишкову довжину маршруту;
- шляхову швидкість;
- висоту польоту;
- зображення умовних позначок цілі та поворотних пунктів маршруту на електронній карті;
- електронна карта місцевості з можливістю зміни масштабу (1:500 000, 1:200 000, 1:50 000);
- спеціальну позначку літака;
- візуальну та звукову сигналізацію досягнення точки початку бойового шляху;
- точку гарантованого можливого скиду КАБ;
- лінію фактичного шляху та повздовжньої вісі літака.

4) Автоматичне визначення параметрів прицілювання в режимі бомбометання та відображення інформації на дисплеї:

- мітки точок цілей та мітки зон падіння б/п;

напрямок на ціль та фактичний магнітний курс літака та дальність до цілі;

шляхова швидкість та висота;

розрахункова точка початку маневру.

5) Нанесення на електронну карту зображення точок розміщення засобів ППО противника з розрахунковими зонами досяжності.

6) Контроль поточних завдань прицільно-навігаційної системи.

7) Запис фактичного маршруту польоту літака та інформації, що виводиться на дисплей в режимі бомбометання з можливістю подальшого перегляду після польоту.

Конструктивно прицільно-навігаційна система для літака з КАБ виготовлена у вигляді окремих блоків, розміщених в кабіні, за винятком антен супутникової навігації та приймально-передавального модуля сигналів системи супутникового зв'язку.

Принцип дії прицільно-навігаційної станції полягає в наступному. Чотири антени супутникової навігації розміщені на корпусі літака Су-24М на фіксованій відстані від центру мас літака (див. Рис 7).

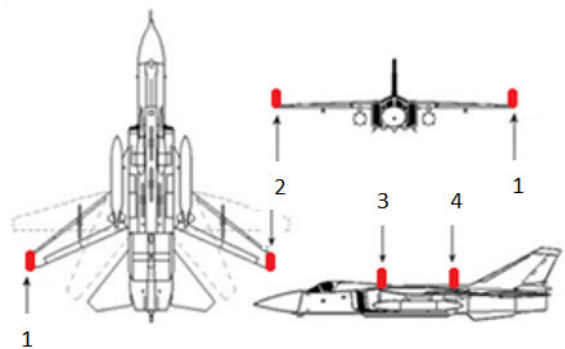


Рис. 7. Схема розміщення антен супутникової навігації

Джерело: розроблено авторами

Після отримання та обробки сигналів від навігаційних космічних апаратів визначаються координати чотирьох точок на корпусі літака.

За допомогою двох кутомірних блоків БК-1 та БК-2 і обчислювально-комутаційного блоку визначаються кути орієнтації повздовжньої осі літака у просторі, а також координати центра мас та кут крену. Лінійні координати центра мас надходять до балістичного обчислювача де розраховується траєкторія польоту УМПК до точки зіткнення з земною поверхнею у зоні ураження. Лінійні координати положення центра мас літака та зони ураження УМПК перераховуються у географічні та у вигляді спеціальних позначок відображаються разом з електронною картою місцевості та міткою цілі на екрані електронного планшета. За ціль для

Су-24М з 4хКАБ500 обрано бойовий розрахунок зенітно-ракетної батареї (ЗРБР) С-300В4 із 4 складових: три пускових установки та одна радіолокаційна станція (РЛС) (рис. 8).

При виконанні бойового завдання бомбардувальниками загальноприйнятим підходом є виділення чотирьох основних етапів польоту ЛА з метою ураження наземної цілі і повернення в зворотньому напрямку, що ідентичні між собою [9].

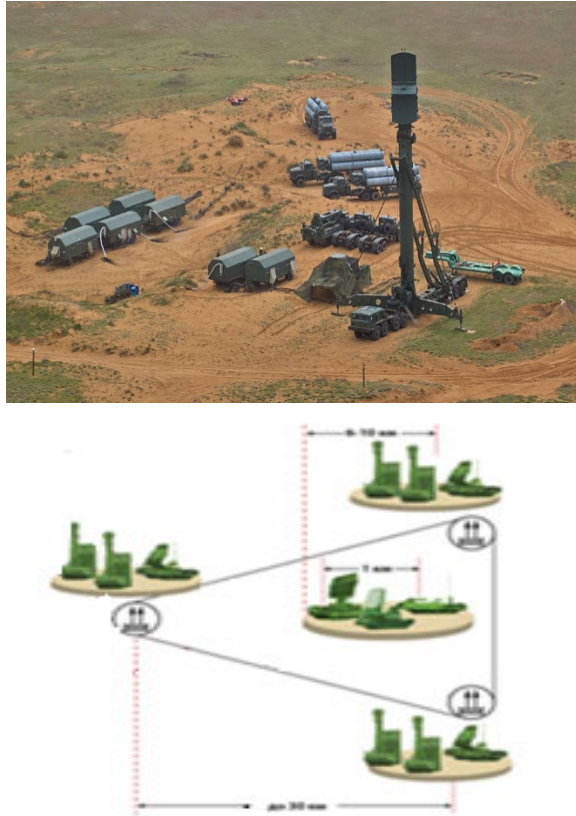


Рис. 8. Бойовий розрахунок ЗРБР С-300В4 щодо прикриття об'єктів від удару ракетами
Джерело: [11]

На першому етапі польоту – від зльоту до межі виявлення бойового порядку наземними РЛС противника та системою типу А-50 можливий раптовий удар винищувачів противника, що здійснюють самостійний пошук цілей. На другому етапі польоту – від межі радіолокаційного виявлення до лінії бойового зіткнення відбувається нарощування протидій засобів ППО противника.

У пам'яті обчислювально-комутаційного блока зберігається класична карта, супутникова карта та карта висот земної поверхні AW3D30.

Ці карти доступні для території України з охопленням частини прикордонних областей суміжних країн. Льотчик спрямовує літак у сторону цілі. На відстані (21...22) км видається команда на включення пристрою виведення інформації на екран.

На третьому та четвертому етапах льотчик суміщує мітку гарантованої зони можливих скидів з міткою цілей для кожного КАБу. В момент їхнього збігу виконується скидання КАБ. Про збіг міток льотчику сигналізує екран планшета та подається звуковий сигнал.

Висновки

Запропонований науково-методичний підхід оцінювання візуалізації прицілювання забезпечує комплексне покращення бойових характеристик систем наведення КАБ. Його впровадження дозволяє підвищити точність ураження, зменшити час реакції оператора та мінімізувати ризики помилкових дій. Отримані результати можуть бути використані для модернізації інтерфейсів авіаційних платформ, а також для розробки навчальних симуляторів з підвищеним рівнем реалістичності.

1. У статті науково обґрунтовано шляхи підвищення ефективності візуалізації процесу прицілювання при бойовому застосуванні КАБ, яка базується на когнітивно-орієнтованих принципах, алгоритмічній оптимізації та адаптивних візуальних елементах.

2. Отримані результати мають прикладне значення для розробки сучасних авіаційних платформ, навчальних симуляторів та систем управління високоточною зброєю.

Перспективи подальших досліджень.

Проведення польових випробувань у реальних умовах бойового застосування з метою верифікації результатів моделювання.

Поширення методики на інші типи озброєння, зокрема наземні та морські високоточні системи.

Інтеграція біометричних сенсорів для адаптації інтерфейсу до психофізіологічного стану оператора в реальному часі.

Розробка інтелектуальних систем рекомендацій на основі штучного інтелекту для автоматизованої корекції прицілювання.

Список літератури

1. Програмно-апаратний комплекс (ПАК) “Вуаль -15” [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://aviarm.com.ua/pages/produkt3.html>.
2. Рашевський Є.Ю., Пантелєєва Н.М., Хуторна М.Е., Гончаренко О.О. Типологія керованих авіаційних бомб. ХХІ міжнародна наукова конференція Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба “Новітні технології – для захисту повітряного простору”: тези доповідей, 09 – 10 квітня 2025 року. – Х.: ХНУПС ім. І. Кожедуба, 2025. – 888 с. – С. 97.

3. Samuel J. Cox. Naval History and Heritage Command./H-Gram Journal № 058. January 15, 2021. – P. 26.
4. Кірдей Л.М., Калетнік С.А., Гончаренко О.О. Еволюція застосування керованих авіаційних бомб: виклики та перспективи розвитку вітчизняних зразків. XXV науково-технічна конференція Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки “Випробування і сертифікація озброєння та військової техніки”: тези доповідей, Черкаси: ДНДІ ВС ОБТ, 2025. – С. 151-153.
5. Тараненко В.В. Щодо перспективних напрямків розвитку керованих авіаційних бомб / В.В. Тараненко, Д.В. Башинський // 36. наук. праць ДНДІА. – Київ: ДНДІА, 2018. – Вип. № 14(21). – С. 72-74. ISSN 2706-7386.
6. Максим Кальник Керовані авіаційні бомби: від історії до сучасних технологій. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://nfront.org.ua/ru/kerovani-aviacijni-bomby-vid-istoriyi-do-suchasnyh-tehnologij/>.
7. Гарантовані зони пусків. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/7414598/page:2>.
8. B-52 Stratofortress Units in Operation Desert Storm. Jon Lake. Osprey Publishing, 2004. – P. 47-48.
9. Засоби повітряного нападу іноземних держав та основи їх бойового застосування. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2023/06/основи-бойового-застосування-тактичної-авіації.pdf>.
10. Владислава Ткаченко, Олександр Коваленко Керовані авіаційні бомби: які бувають, особливості застосування та дальність ураження [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://fakty.com.ua/ua/ukraine/20250831-kerovani-aviacijni-bomby-yaki-buvayut-osoblyvosti-zastosuvannya-ta-dalnist-urazhennya/>.
11. Бойове застосування та ефективність комплексів авіаційного озброєння. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://libarch.nmu.org.ua/login>.
12. Нікітченко В.І., Кірдей Л.М., Гордєєв С.М. Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку високоточних авіаційних засобів ураження. Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2019. Вип. № 1. С. 129-134.
13. Endsley M. R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems / M. R. Endsley // Human Factors. – 1995. – Vol. 37, No. 1. – P. 32–64.
14. Parasuraman R., Sheridan T. B., Wickens C. D. A model for types and levels of human interaction with automation / R. Parasuraman, T. B. Sheridan, C. D. Wickens // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 2000. – Vol. 30, No. 3. – P. 286–297.
15. Гончаренко С. М. Адаптивні інтерфейси в системах управління озброєнням / С. М. Гончаренко // Вісник авіації та космонавтики. – 2022. – № 2. – С. 45–52.
16. Nielsen J. Usability Engineering / J. Nielsen. – San Francisco: Morgan Kaufmann, 1993. – 362 p.
17. Ergonomics of human-system interaction – Part 210: Human-centred design for interactive systems: ISO 9241-210:2019. – Geneva: International Organization for Standardization, 2019. – 36 p.
18. Загальна схема застосування КАБ. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://militaryni.com/uk/tag/umpk>.

Надійшла до редколегії 28.10.2025

Схвалена до друку 26.11.2025

Відомості про авторів:

Чумаченко Сергій Миколайович

доктор технічних наук
старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<http://orcid.org/0000-0002-8894-4262>

Перескоков Володимир Олексійович

науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<http://orcid.org/0000-0002-0426-4674>

Логвиненко Микола Миколайович

науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<http://orcid.org/0000-0002-1623-6654>

Information about the authors:

Sergiy Chumachenko

Doctor of Technical Sciences
Senior Researcher
Leading Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-8894-4262>

Volodymyr Pereskakov

Research Associate
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-0426-4674>

Mykola Lohvynenko

Research Associate
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-1623-6654>

Шабанов Павло Павлович

Pavlo Shabanov

ад'юнкт
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<http://orcid.org/0000-0003-4927-5534>

Adjunct
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0003-4927-5534>

**SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL APPROACHES TO INCREASING THE EFFICIENCY
OF THE USE OF GUIDED AIRCRAFT BOMBS THROUGH VISUALIZATION
OF THE TARGETING PROCESS**

S. Chumachenko, V. Pereskokov, M. Lohvynenko, P. Shabanov

This paper presents a scientific rationale for enhancing visualization efficiency during the targeting process of guided aircraft bombs (CAB). It has been determined that targeting visualization is a critical element of the combat cycle: it provides detection, recognition, tracking, and precise guidance of the munition on the target. The general trend, based on the analysis of domestic and foreign publications, is the transition from passive systems to active, multi-spectral platforms capable of operating in conditions of interference, nighttime, and complex terrain. Special attention is paid to image stabilization algorithms, automatic target recognition, and integration with trajectory correction systems. The study analyzes the impact of sensor type, weather conditions, platform stability, frame rate, and image contrast on strike accuracy. A comprehensive methodology is proposed, incorporating adaptive filtering, automatic target recognition, image stabilization, and integration with navigation systems. Visualization of aiming provides a comprehensive improvement of the combat characteristics of the KAB guidance systems. Its implementation allows to increase the accuracy of the hit, reduce the operator's reaction time and minimize the risks of erroneous actions. Experimental modeling confirms the effectiveness of multispectral and hyperspectral sensors, as well as the utility of CLAHE, Kalman filters, and CNN-based algorithms. The proposed aiming and navigation system is designed to increase the accuracy of aiming during an attack with a UMPK on ground targets in the absence of visual contact with the target and to expand the capabilities of navigation support in flight. The findings support the modernization of aerial platforms, the development of autonomous guidance systems, and the formulation of doctrinal standards for the Armed Forces of Ukraine.

Keywords: visual targeting, guided aerial munitions, UMPK, multispectral sensors, image stabilization, strike accuracy, combat interference, geoanalytics, autonomous guidance.