Радарний захист та активне перехоплення дронів-камікадзе

Дмитро Гуменний [1], *Олег Кузін*[2], *Євгенія Шабала*[3]

[1,3]Kyiv National University of Construction and Architecture
Povitroflots'kyi Ave, 31, Kyiv, Ukraine, 03037
[2]Kyiv National University of Trade and Economics
Korpus A, Vulytsya Kioto, 19, Kyiv, 02156
[1]apollo.d.g@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6736-0543,
[2]o.kuzin@knute.edu.ua, https://orcid.org/0009-0009-3592-0345,
[3]shabala.ieie@knuba.edu.ua, https://orcid.org/0000-0002-0428-9273

Received 13.05.2024, accepted 20.05.2024
https://doi.org/10.32347/uwt.2024.14.1301

Анотація. Сучасне бойове середовище відзначається активним використанням дронів-камікадзе, що представляють серйозну загрозу для легкобронькованої техніки. Розвиток радіолокаційних технологій у поєднанні з мікроконтролерними засобами керування дозволяє ефективно виявляти та нейтралізувати ці загрози. У цій роботі розглянуто комплекс технічних засобів для виявлення та протидії дронам-камікадзе, що використовує радарне виявлення та активні методи перехоплення. Проведено аналіз існуючих рішень у цій галузі, виділено їх переваги та недоліки, а також наведено технічні пропозиції щодо побудови системи управління радаром, блоку наведення та засобу протидії. Особливу увагу приділено інтеграції систем для підвищення ефективності та автоматизації процесів. Представлені результати підтверджують доцільність та ефективність використання запропонованих рішень у реальних бойових умовах, що підтверджено досвідом застосування під час війни Росії проти України.

Ключові слова. Суперкритичні системи, системи активного захисту, надійні та відмовостійкі системи, моделювання, інформаційне середовище.

Dmytro Humennyi
Associate Professor of the Department,
Candidate of Technical Sciences

Oleg Kuzin
Graduate student of the Department of Digital Economy and System Analysis

Yevheniia Shabala
Associate Professor of the Department,
Candidate of Technical Sciences

ВСТУП

Сучасне бойове середовище характеризується активним використанням дронів-камікадзе, що представляють серйозну загрозу для легкобронькованої техніки [6].

Розвиток радіолокаційних технологій, у поєднанні з мікроконтролерними засобами керування, дозволяє ефективно виявляти та нейтралізувати ці загрози, що є критично важливим для забезпечення виживаності бойової техніки [7].

Об’єкт дослідження

Так, об’єкт дослідження публікації - комплекс технічних засобів для виявлення та протидії дронам-камікадзе з малої дистанції. Шляхом застосування радарного детектування та зустрічного пострілу по дрону.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В епоху стрімкого розвитку безпілотних літальних апаратів, використання дронів-камікадзе стало новою проблемою для

Збройних Сил України. Ці малорозмірні, дистанційно керовані, чи автоматично-керовані пристрої здатні нести вибухові заряди, надаючи противнику здатність наносити точні удари по техніці з відносної безпеки для операторів. Типова ціль для Дрона-камікадзе - легкобронювана техніка, яка часто використовувана для патрулювання та розвідки, знаходиться під особливою загрозою через свою обмежену захищеність від таких атак.

Традиційні методи протиповітряної оборони мають низьку ефективність проти дронів-камікадзе через їх невеликі розміри та висоту польоту мають низьку ефективність проти дронів-камікадзе через їх розміри та висоту польоту.

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

Тематика не є новою. Її актуальність засвідчена роботами у цій галузі. Серед основних варто відзначити наступні:
Розробка компанії Weibel Scientific [1], де розглянуто систему детектування БПЛА на великих відстанях, базовану на радарах нового покоління. Переваги: здатність відстежувати та класифікувати цілі на великих відстанях. Недоліки: висока вартість обладнання та необхідність оновлення алгоритмів.

Розробка компанії Toshiba [2], де показано систему для коротких та середніх дистанцій. Ідея: використання спеціалізованих радарів. Переваги: висока точність та швидке реагування. Недоліки: обмежена дальність та проблеми в урбанізованих середовищах .
Розробка компанії SpotterRF [3], де описано систему для урбанізованих середовищ. Ідея: точне визначення координат у складних умовах. Переваги: ефективність в урбанізованих середовищах та легкість встановлення. Недоліки: обмежена дальність та складнощі інтеграції.

У роботі Robin Radar Systems [4] представлено систему швидкого розгортання для захисту критичних об'єктів. Ідея: швидке виявлення загроз. Переваги: швидке розгортання та ефективність. Недоліки: висока вартість та необхідність спеціального навчання .

У роботі Rohde & Schwarz [5] розглянуто інтегровану систему для виявлення та протидії дронам. Ідея: використання електронних контрзаходів та радарного тестування. Переваги: висока точність та можливості класифікації. Недоліки: складність інтеграції та висока вартість .

Спільні риси та основні відмінності

- Спільні риси:
  - Використання радарних технологій для детектування дронів.
  - Інтеграція систем для підвищення ефективності.
  - Застосування цифрової обробки сигналів та класифікації цілей.
- Основні відмінності нашої роботи:
  - Інтеграція активних методів перехоплення з радарним детектуванням.
  - Автоматичне прийняття рішень для нейтралізації загроз.
- Переваги: висока точність та автоматизація процесів.
- Недоліки: висока складність та вартість реалізації.

ОПИС КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

Ширина застосування дронів-камікадзе вимагає побудови доступного, малогабаритного виробу для протидії дронам-камікадзе, мав би технічні можливості автоматичної роботи. Зокрема, для детектування цілі, наведення на ціль, прийняття технічного рішення щодо відпрацювання по цілі.

Так, розробка системи, що інтегрує радарне детектування з активними методами перехоплення може підвищити ефективність протидії БПЛА на підході до їхніх цілей.
Реалізація такої системи потребує вирішення перерахованих далі інженерних задач:

1. системне проектування та дизайн;
2. алгоритмами обробки радарних даних;
3. моделювання поведінки цілей;

4. оптимізацію механізмів наведення;
5. приймання оптимальних технічних рішень;
6. інтеграція та тестування.

Дана публікація акцентована на задачі 1, 2, 4 та 5 з наведеного вище списку.

СТРУКТУРНА СХЕМА КОМПЛЕКСУ ТЕХЕІЧНИХ ЗАСОБІВ

Структурна схема комплексу технічних засобів декомпозована на блоки і сигнали, як це показано на Рисунку 1.

Радар, засоби враження дронів-камікадзе розташовуються на базовій платформі безпосередньо, формуючи визначену відстань між радаром та засобом враження.

Система керування наведенням та засоби прийняття технічних рішень (ж, Рис. 1) забезпечують отримання директиви про активацію від оператора базавої платформи. Після отримання директиви проводиться постійний радарний пошук об'єктів протидії. При виявленні такого об'єкту, проводиться прийняття технічного рішення про залучення засобі протидії (є, Рис. 1). При позитивному рішенні, Блок наведення засобу протидії (е), під керівництвом даних з Радара, супроводжує об'єкт протидії до її входження я радіус враження. Проводиться враження боєприпасам для протидії.

Цілісність композиції на стуктурній схемі комплексу досягається зв'язками, що подані Таблицею 1 далі.

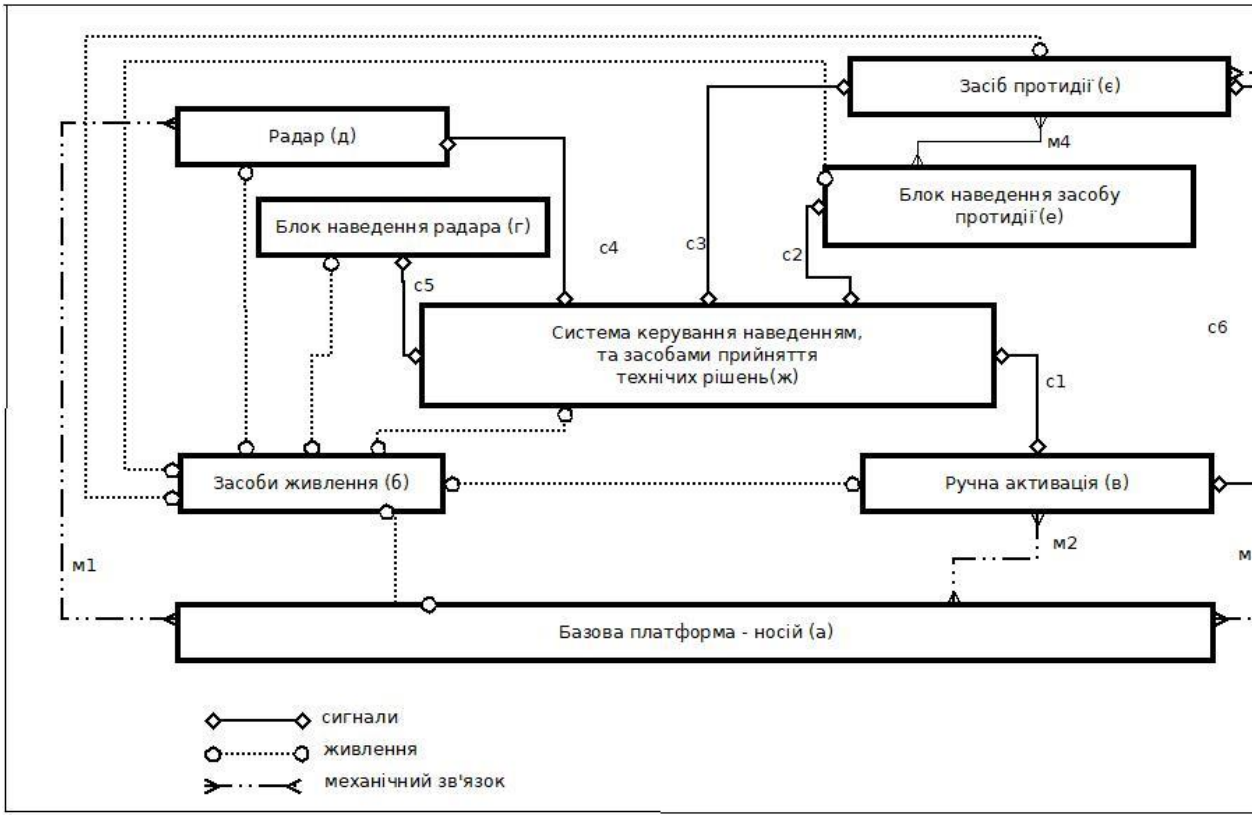

Рис. 1. Структурна схема комплексу технічних засобів

Fig. 1. Structural diagram of a complex of technical means

Таблиця 1. Опис сигналів структурної схеми

Table 1. Description of structural diagram signals

Назва	Опис
с1	Ручна активація та дезактивація комплексу технічних засобів
с2	Параметри наведення Засобу протидії на об’єкт протидії. Описує дві полярні координати та швидкості їх зведення.
с3	Директива до Засобу протидії про постріл.
с4	Потокові данні з Радара. Подаються у полярній системі координат і покликані оцінити наступні характеристики об'єкту: - Форму об’єкту враження; - Відстань до нього; - Швидкість його наближення.
с5	Сигнали управління кутовим положенням радара. Забезпечують послідовний перебір кадру. Ці дані також застосовуються Системою керування для наведення Засобу протидії.
с6	Аварійний сигнал. Забезпечує блокування Засобу протидії вруну.
м1, м2, м3, м4	Механічне кріплення компонентів композиції на базовій платформі. Ключом є відносне кріплення м1 до м3. Значення м3 задає ергономіку системи ручної активації. Зв’язок м4 визначає жорсткий зв’язок між Блоком наведення засобу протидії та власне Засобом протидії, що розташовується на спільному кронштейні.
	На структурній схемі також відмічені зв’язки живлення. Вони не специфіковані на даному рівні абстракції.

АЛГОРИТМ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НАВЕДЕННЯМ ТА ЗАСОБАМИ ПРИЙНЯТТЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

Алгоритм роботи системи керування декомпозовано на дві частини: робота з радаром та визначення об’єкту; наведення засобу протидії та застосування засобу протидії.

Рисунок 2 містить опис роботи з радаром. Тоді як Рисунок 3 містить опис роботи з системою наведення. Опис блок-схем з Рисунків 2 та 3 наступний:

1. Ініціалізація мікроконтролера, зокрема його таймінгів, частоти, периферії;
2. Ініціалізація комплексу технічних засобів. Підванатження параметрів моделі виробу;
3. Управління кутовим положенням радара шляхом його прогонки зліва на право, зверху до низу. Проводиться базуючись на поточних положеннях радара у полярних координатах, отриманим з блоку 23;
4. Затримка на роботу радара. Обумовлена його технічними властивостями;
5. Читання даних з радара та збереження їх до пам’яті. Зберігаються дані про два кути полярної системи координат та відстань до об’єкта. Для роботи блока залучені блоки 13 та 18;
6. Процедура перевірки відповідності контуру об’єкта до еталону. Базується на даних з радара і на еталонах, що початково завантажені до мікро-контролера;
7. У випадку співпаніння по формі, алгоритм переходить до наступного етапу веріфікації. У випадку неспівпадіння, алгоритм продовжує сканувати простір у пошуках об’єкта;
8. Процедура перевірки відповідності поведінки оба’єка до еталонної поведінки за швидкістю його наближення;
9. У випадку співпадіння поведінки до еталонної, процес переходить до наступної перевірки. У випадку неспівпадіння, алгоритм переходить до процесу сканування простору;
10. Процедура перевірки, що об’єкт знаходиться у зоні враження;

11. Якщо об’єкт знаходиться у зоні враження, алгоритм переходить на другої частини, а саме до наведення засобу протидії на об’єкт. Друга частина поведінки комплексу починається з блоку 19 і наведено на Рис.3;
19. Обрахунок траєкторії об’кту та внесення відповіднних поправок до сисеми наведення. Наведення системи на об’єкт. Ведення його по даних з Радару;
20. При умові, що оператор дозволив автоматичне прийняттят технічних ріщень (дані з блоку 24), і при другій умові, що система наведення успішно веде об’єкт, даний блок формує директиву про введення протидії;
21. Проведення протидії;
22. Надання оператору інформації про проведену протидію;
23. Завершення оперування. Вимкнення системи для проведення її перезерядки.

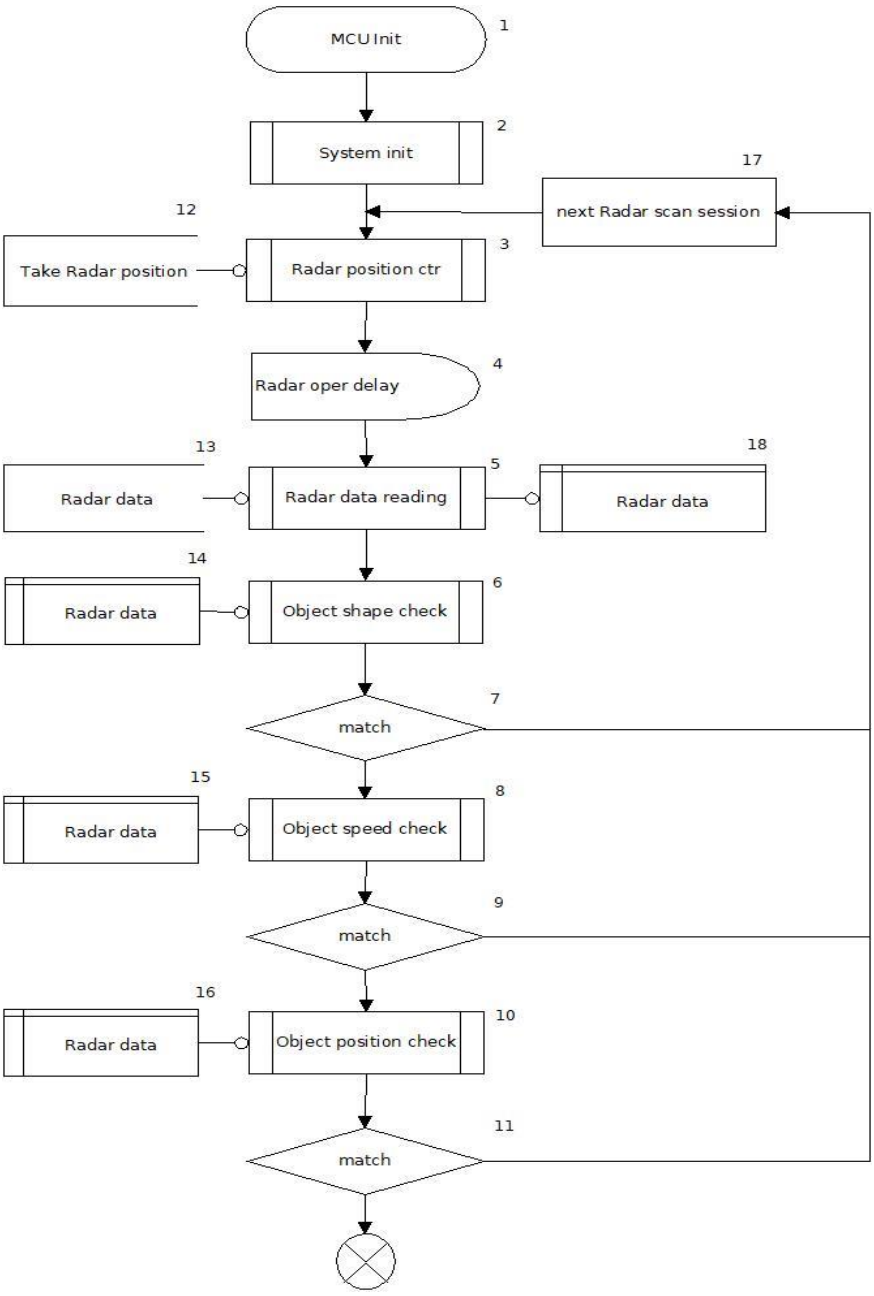

Рис. 2. Алгоритм взаємодії системи керування та радару

Fig. 2. Interaction algorithm of the control system and the radar

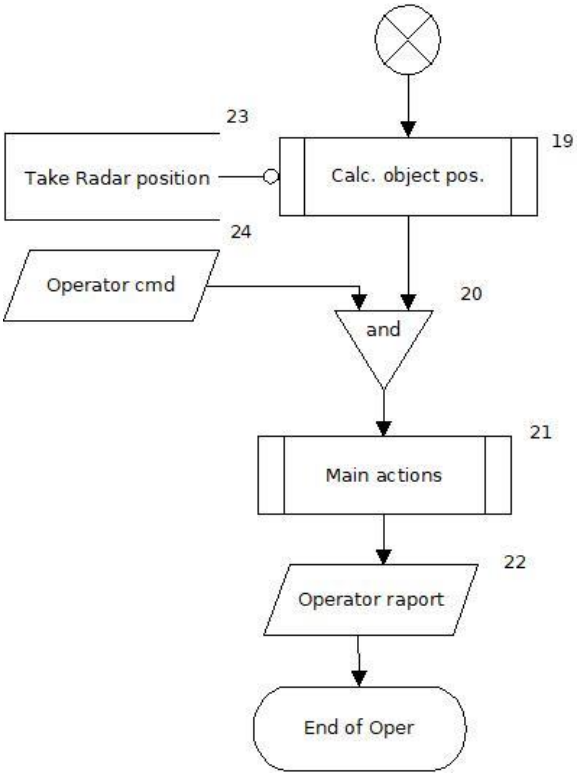

Рис. 3. Алгоритм взаємодії системи керування та блоку наведення

Fig. 3. Interaction algorithm of the control system and the guidance unit

ТЕХНІЧНІ ПРОПОЗИЦІЇ ДО ПОБУДОВИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РАДАРОМ, БЛОКУ НАВЕДЕННЯ ТА ЗАСОБУ ПРОТИДІЇ

Побудова засобу протидії.

Пропонується застосувати модифіковану гладкоствольну гармату 12 калібра із набоєм, що містить чотири сегменти кулі, зв’язані один-з -одною сіткою, яка і є зупиняючим засобом для дрона. Постріл здійснбється.

Побудова Блоку наведення радара.

Блок наведення радара виконує ключову функцію у виявленні та супроводженні цілі. Для цього використовується мікроконтролер STM32F7 від STMicroelectronics, який забезпечує високу продуктивність і надійність. Основні компоненти блоку наведення включають радарний сенсор FMCW радарний модуль AWR1843 від Texas Instruments, що забезпечує високу роздільну здатність і дальність виявлення. Використовуються алгоритми цифрової обробки сигналів для точного визначення координат і супроводження цілей. Інтерфейси зв'язку, такі як CAN та Ethernet, застосовуються для передачі даних між компонентами системи.

Побудова системи керування, блоку живлення та системи ручної автивації.

Система керування координує роботу всіх компонентів і базується на контролері STM32F7. Основні компоненти системи включають блок керування на основі контролера STM32F7, який забезпечує обробку даних, прийняття рішень і управління засобами протидії. Живлення системи здійснюється за допомогою блоків DC-DC перетворювачів Mean Well, що забезпечують стабільне живлення всіх компонентів, включаючи резервне живлення. Система ручної активації представлена механічними перемикачами та електронними контролерами, що дозволяють ручне керування системою.

Система використовує різноманітні датчики для забезпечення ефективної

роботи. Датчики руху, такі як акселерометри та гіроскопи MPU-6050, визначають положення і рух. Датчики температури TMP36 контролюють температуру компонентів. Засоби введення включають клавіатури та сенсорні екрани для взаємодії оператора з системою, тоді як засоби виведення представлені РК-дисплеями та світлодіодними індикаторами для відображення стану системи.

Система радару забезпечує виявлення і супроводження цілей за допомогою радарного модуля AWR1843. Основні компоненти системи радару включають радарний модуль AWR1843, який забезпечує високоточне виявлення цілей на різних відстанях, та алгоритми цифрової обробки сигналів на основі STM32F7 для точного визначення координат цілі. Система наведення використовує серводвигуни для точного супроводження цілі відповідно до даних з радару.

МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ

Математичне забезпечення для радарного виявлення, керування системою, наведення засобів протидії та прийняття технічного рішення про постріл можна подати як послідовність рівнянь та алгоритмів.

Математика Радара:

Передавальний радарний сигнал:

$$s(t) = A\cos\big(2\pi f0t + \phi(t)\big), \quad (1)$$

де A - амплітуда сигналу, f_0— частота сигналу, $\phi(t)$ — фаза сигналу.

Прийнятий радарний сигнал:

$$r(t) = A\cos\big(2\pi f0(t-\tau) + \phi(t-\tau)\big), \quad (2)$$

де τ — час затримки сигналу.

Обчислення відстані до цілі:

$$d = \frac{c\tau}{2}, \quad (3)$$

де c — швидкість світла.

Обробка радарних даних (Фільтр Калмана):

Прибрано з публікації з метою безпеки
Система керування та наведення:
Модель стану системи:

$$x^{\cdot} = Ax + Bu\,. \quad (4)$$

Модель спостереження:

$$y = Cx + Du\,. \quad (5)$$

PID регулятор:

$$u(t) = -Kpe(t) - Ki\int^{e}(t)dt - \\ - Kd\cdot\frac{de(t)}{dt}, \quad (6)$$

де $e(t) = r(t) - y(t)e(t) = r(t) - y(t)$ - похибка.

Блок наведення засобів протидії:
Модель руху цілі у полярних координатах:

$$r^{\cdot} = vr\cos(\alpha - \theta); \quad (7)$$

$$\theta^{\cdot} = \frac{(u_r sin\alpha - \theta)}{r}, \quad (8)$$

де r — відстань до цілі, θ — азимутальний кут, v_r— швидкість цілі, α — курс цілі.

PID регулятор для наведення:

$$u(t) = -Kpe(t) - Ki\int^{e}(t)dt \; - \\ - Kd\cdot\frac{de(t)}{dt}, \quad (9)$$

де $e(t) = r_{desired}(t) - r(t)e(t) = r_{desired}(t) - r(t)$ - похибка.

Блок засобу протидії:

Рівняння руху боєприпасу:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial q^{\cdot}}\right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q, \quad (10)$$

де L - лагранжіан системи, q — узагальнені координати, Q — узагальнені сили.

Розрахунок траєкторії боєприпасу:

$$\overline{r}(t) = \overline{r}_0 + \overline{u_0}t + \frac{1}{2}\overline{a}t^2. \quad (11)$$

Корекція траєкторії:

$$u(t) = K\left(r_{terget}(t) - r(t)\right). \quad (12)$$

Прийняття технічного рішення про постріл:

- Виявлення цілі:
  Система радарного виявлення визначає місцезнаходження цілі за допомогою рівнянь радарного сигналу та обробки даних фільтром Калмана;
- Наведення засобів протидії:
  Система керування та наведення використовує PID регулятор для точної фіксації цілі;
- Активація засобу протидії:
  Після виявлення цілі та наведення, система надсилає команду на активацію засобу протидії та випуск боєприпасу з розрахунком траєкторії.

Перспективи та досвід застосування радарних технологій у війні Росії проти України

Розвиток радіолокаційних технологій у поєднанні з мікроконтролерними системами дозволяє ефективно детектувати та нейтралізувати загрози, що критично важливо для живучості бойової техніки.

Перспективи технології

- Точність виявлення: Радарні системи точно визначають координати та швидкість дронів.
- Автоматизація: Мікроконтролери автоматизують процеси виявлення та нейтралізації.
- Інтеграція: Радарні системи можуть інтегруватися з іншими оборонними системами.

Досвід застосування у війні Росії проти України

- Реальна ефективність: Українські військові успішно використовують радарні системи для виявлення та знищення дронів-камікадзе.
- Спеціалізовані системи: Інтеграція радарного виявлення з методами перехоплення підвищує ефективність нейтралізації дронів.
- Вдосконалення: Постійне покращення технологій у відповідь на нові загрози.

ВИСНОВОК

Розвиток радіолокаційних технологій, у поєднанні з мікроконтролерними системами керування, є важливим кроком у підвищенні ефективності виявлення та нейтралізації дронів-камікадзе. Сучасне бойове середовище характеризується активним використанням цих дронів, що становлять серйозну загрозу для легкоброньованої техніки.

Застосування систем, що поєднують радарне виявлення з активними методами перехоплення, дозволяє створювати комплексні рішення для протидії дронам. Такі системи забезпечують високу точність виявлення, автоматизацію процесів і можливість інтеграції з іншими оборонними системами.

Війна Росії проти України демонструє ефективність цих технологій у реальних бойових умовах. Українські військові активно використовують радарні системи для виявлення та нейтралізації дронів-камікадзе, що підтверджує доцільність подальшого вдосконалення та розширення застосування таких систем.

Продовження досліджень у цій галузі та розвиток технологій обіцяє значне покращення ефективності системи, що є ключовим для забезпечення живучості та безпеки бойової техніки.

REFERENCES

1. Weibel Scientific. (2023). What is a Drone Detection radar - Counter-UAS. Отримано з Weibel Scientific
2. Toshiba. (2023). C-UAS Solution | Defense & Electronic Systems. Отримано з Toshiba
3. SpotterRF. (2023). Drone Detection | SpotterRF. Отримано з SpotterRF
4. Robin Radar Systems. (2023). 10 Types of Counter-drone Technology to Detect and Stop Drones Today. Отримано з Robin Radar Systems
5. Rohde & Schwarz. (2023). Drone detection - RF monitoring, GNSS and radar test solutions for drone detection. Отримано з Rohde & Schwarz
6. **Kunertova D.** (2023). The war in Ukraine shows the game-changing effect of drones depends on the game. Journal of Military Studies. Retrieved from ETH Zurich.

7. Detection and Classification of Small UAS for Threat Neutralization. (2020). Retrieved from DSIAC.

Radar Defense and Active Interception of Kamikaze Drones

Dmytro Humennyi, Oleh Kuzin, Yevheniia Shabala

Abstract. The modern combat environment is marked by the active use of kamikaze drones, posing a serious threat to lightly armored vehicles. The development of radar technologies combined with microcontroller-based control systems allows for the effective detection and neutralization of these threats. This paper examines a complex of technical means for detecting and countering kamikaze drones, utilizing radar detection and active interception methods. An analysis of existing solutions in this field is conducted, highlighting their advantages and disadvantages, and technical proposals for constructing a radar control system, guidance unit, and countermeasure device are provided. Special attention is given to the integration of systems to enhance efficiency and automate processes. The presented results confirm the feasibility and effectiveness of the proposed solutions in real combat conditions, as evidenced by their application during Russia's war against Ukraine.

Keywords: supercritical systems, active protection systems, reliable and fault-tolerant systems, modeling, information environment.