В.А. Таршин, М.Ю. Дергоусов, М.В. Куравський

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МЕТОД САМОКОРЕКЦІЇ БОРТОВОЇ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ АЕРОБАЛІСТИЧНОГО ОБ'ЄКТА З ВИКОРИСТАННЯМ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ

В статті запропоновано метод самокорекції бортової системи навігації аеробалістичного об'єкта з використанням оптико-електронної кореляційно-екстремальної системи навігації, що на відміну від відомих дозволяє забезпечити утримання об'єкта прив'язки в центрі поточного зображення для формування унімодальної вирішальної функції як команди на корекцію траєкторії польоту аеробалістичного об'єкта. Наведені результати досліджень ефективності запропонованого методу та алгоритму формування вирішальної функції кореляційно-екстремальної системи навігації в умовах розмиття поточного зображення та місце розташування об'єкта прив'язки на поточному зображенні.

Ключові слова: кореляційно-екстремальна система навігації, вирішальна функція, поточне зображення, засіб доставки рятувального спорядження, аеробалістичний об'єкт.

Вступ

Постановка проблеми. Швидка та точна доставка рятувальних засобів у важкодоступні райони місцевості, в тому числі з різними рельєфом та кліматичними умовами, що розташовані на відстані десятків кілометрів від зони евакуації, дозволить забезпечити ефективне надання допомоги у критичних ситуаціях.

Для задоволення вимог щодо швидкості дії, у якості засобу доставки, може бути застосований аеробалістичний об'єкт (АО), що конструктивно являє собою керований снаряд. Як показано в [1], керований снаряд в такому випадку розглядається як безпілотний літальний апарат (БПЛА) одноразового використання з автономною високоточною системою навігації.

Основу системи навігації такого АО складає інерціальна система навігації [2], основним недоліком якої є накопичення помилок просторового положення в процесі польоту. Це в свою чергу призводить до збільшення значень середньоквадратичної похибки навігації АО до сотень метрів. Такі значення є неприпустимими, зокрема в умовах високогірних районів.

Для забезпечення визначення просторового положення з точністю до одиниць – десятків метрів, існуюча система навігації повинна бути доповнена системою більш високого класу точності. У якості такої розглядається оптико-електронна (ОЕ) кореляційно-екстремальна система навігації (КЕСН) [3]. Принцип роботи такої системи полягає у порівнянні поточного зображення, отриманого на борту АО, з еталонним зображенням, створеним завчасно.

Стабілізація орієнтації АО в процесі польоту

досягається за рахунок обертального руху навколо повздовжньої осі. Обертальний рух АО обумовлює зміну орієнтації отриманого поточного зображення (ПЗ) КЕСН по відношенню до еталонного зображення (ЕЗ), а також спотворення у вигляді розмиття контурів об'єкта прив'язки (ОП) та оточуючого фону (рис. 3). Як показано в [1], застосування методів компенсації розмиття контурів ОП дозволяє, в певних умовах, отримати унімодальну вирішальну функцію (ВФ), як команду на корекцію траєкторії польоту АО (рис. 4).

В той же час невирішеним залишається питання щодо місця розташування ОП на ПЗ. Оскільки зміщення ОП від центру ПЗ (рис. 5) тягне за собою зростання значень бічних екстремумів вирішальної функції (ВФ) (рис. 6), що в свою чергу призводить до хибної корекції КЕСН. В такому випадку постає необхідність в постійному уточненні місцерозташування ОП для утримання його в центрі ПЗ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перспективність застосування КЕСН обумовлена великою кількістю сучасних досліджень, аналіз яких наведений у роботах [3–4]. Останні результати досліджень, що стосуються методів формування вирішальної функції КЕСН наведені в роботі [5].

В більшості випадків при дослідженні КЕСН використовують зображення високої якості. При моделюванні розмиття використовувалось вихідне зображення, яке наведено на рис. 1.

Підходи до вибору об'єктів прив'язки та методи формування еталонних зображень наведені в роботі [6]. Особливості урахування зміни яскравості, контрасту та структури з урахуванням масштабних та перспективних спотворень викладені в роботах [7–8].

Рис. 1. Вихідне зображення S_{PP3} та фрагмент ОП
Джерело: розроблено авторами.

Рис. 2. Вирішальна функція отримана з вихідного та еталонного зображень
Джерело: розроблено авторами.

В [4] показано, що допустимий кут розузгодження ЕЗ та ПЗ складає до 15 градусів.

При цьому кругове розмиття об'єктів і фонів при обертальному русі АО у відомих роботах не розглядалось. Зміщення об'єкта прив'язки від центра, в умовах спотворень ПЗ обумовлених розмиттям (рис. 5), тягне за собою збільшення значень бічних екстремумів ВФ (рис. 6), величина яких може виявитись більшою за величину головного екстремума, що в свою чергу призводить до хибної корекції координат або до зриву функціонування КЕСН.

Виходячи з вказаного вище для місцевизначення АО в умовах кругового розмиття ПЗ необхідно автоматично утримувати ОП в центрі ПЗ для формування унімодальної ВФ, як команди на корекцію траєкторії польоту АО.

Мета статті – розробка методу та алгоритму самокорекції бортової системи навігації АО з використанням ОЕ КЕСН для автономного високоточно-

го місцевизначення ОП в умовах кругового розмиття ПЗ.

Виклад основного матеріалу

Для визначення просторового положення АО з високою точністю за допомогою оптичних датчиків, інформативними полями є яскравість та контраст [5]. Однак, в умовах спотворень ПЗ для забезпечення унімодальності ВФ необхідно використовувати додаткову інформацію, яка, зокрема, характеризує ступінь спотворення (розмиття) [9–10] яскравості, контрасту та структури об'єктів та фонів на ПЗ порівняно з ЕЗ.

Рис. 3. Спотворене ПЗ S'_{PP3} з об'єктом прив'язки розташованим в центрі зображення
Джерело: розроблено авторами.

Рис. 4. Результат формування ВФ в умовах спотворень ПЗ, наведеного на рис. 3
Джерело: розроблено авторами.

Отримати унімодальну ВФ $R_{BФ}$, при кореляційному порівнянні ЕЗ $S_{EЗ}$ та спотвореного ПЗ S'_{PP3} (рис. 4) можна, при розташуванні ОП в центрі ПЗ (рис. 3), розміром x , в умовах спотворень, обу-

мовлених розмиттям, внаслідок обертального руху АО

$$R_{B\Phi} = F(S'_{ПЗ}, S_{ЕЗ}), \quad (1)$$

де $F(S'_{ПЗ}, S_{ЕЗ})$ – оператор кореляційного порівняння спотвореного ПЗ та ЕЗ [12].

Зміщення ОП від центра ПЗ, в умовах спотворень ПЗ обумовлених розмиттям (рис. 5), тягне за собою збільшення значень бічних екстремумів ВФ, величина яких може виявитись більшою за величину головного екстремума (рис. 6), що в свою чергу призводить до хибної корекції КЕСН.

Рис. 5. Спотворене ПЗ $S'_{ПЗ}$ з об'єктом прив'язки, розташованим на краю зображення
Джерело: розроблено авторами.

Рис. 6. Результат формування ВФ в умовах спотворень ПЗ, наведеного на рис. 5
Джерело: розроблено авторами.

У зв'язку з цим пропонується уточнювати положення ОП по значенню ВФ для утримання його в центрі ПЗ. Це може бути реалізовано з використанням слідкувальної системи [11].

Вектор прогнозу положення ОП на ПЗ на $k+1$ прив'язці можна представити у вигляді [11]:

$$W_{0(k+1)} = b_k(W_k), \quad (2)$$

де $b_k(W_k)$ – оператор динамічного перетворення векторного параметра W_k з k -го кроку прив'язки на $k+1$.

Враховуючи припущення зроблені в [11] модель зміни вектора стану (2) може бути представлена у вигляді лінеаризованого стохастичного рівняння:

$$W_{k+1} = B_k W_k + \mu_k \quad (3)$$

де B_k – матриця динамічного перерахунку вектора стану з k -го кроку прив'язки на $k+1$;

W_k – вектор стану, який описує положення АО на k -му кроці прив'язки;

μ_k – вектор випадкового зміщення ОП на ПЗ.

Складові вектора μ_k характеризуються їх взаємною кореляційною матрицею поточного зміщення:

$$Q_k = \langle \mu_k \mu_k^T \rangle. \quad (4)$$

Якщо величини із виразу (3) є незалежними, кореляційну матрицю помилок прогнозування можна представити у вигляді суми кореляційної матриці зміщення та матриці помилок попереднього вимірювання:

$$M[(B_k \varepsilon_k)(B_k \varepsilon_k)^T] = B_k C_k^{-1} B_k^T, \quad (5)$$

де ε_k – помилка попереднього місцевизначення;

$C_k^{-1} = M(\varepsilon_k \varepsilon_k^T)$ – кореляційна матриця помилок місцевизначення.

З урахуванням зміщення ОП на ПЗ кореляційну матрицю помилок прогнозування можна представити як:

$$C_{0(k+1)}^{-1} = B_k C_k^{-1} B_k^T + Q_k. \quad (6)$$

В такому випадку, оцінку визначеного вектора стану можна представити як:

$$W_{k+1} = B_k W_k + C_{k+1}^{-1} C_{p(k+1)} (W_{p(k+1)} - B_k W_k), \quad (7)$$

де $C_{p(k+1)}$ – матриця точності поточної прив'язки.

Результуюча матриця точності, з урахуванням даних поточних вимірювань, набуває виду:

$$C_{k+1} = (B_k C_k^{-1} B_k^T + Q_k)^{-1} + C_{p(k+1)}. \quad (8)$$

Утримання ОП в центрі зображення здійснюється дискримінатором у виразі 7. При цьому, враховуючи особливості фоновоб'єктового складу (ФОС) використовуваних зображень, ДХ слідкувального пристрою, побудованого відповідно до виразу 7, при відсутності та наявності спотворень будуть мати різну крутизну. Результати досліджень впливу

кругового розмиття на ДХ у залежності від розміра ЕЗ (рис. 8).

За результатами досліджень встановлено, що на різних етапах ділянки траєкторії польоту АО необхідно змінювати розмір та ФОС ЕЗ для отримання максимальної крутизни ДХ. Тому схема слідкувальної моделі повинна передбачати блок адаптивного до умов спостереження ОП формування ЕЗ, на який покладаються функції зміни параметрів ЕЗ та стабілізація крутизни ДХ.

В такому випадку на кожному кроці прив'язки використовуються ЕЗ з різними параметрами відповідно до (9).

Поточне зображення

Рис. 7. Поточне зображення та еталонне зображення з різним відсотком заповнення об'єкта прив'язки

Джерело: розроблено авторами.

У випадку скалярного параметра x , в залежності від сигналу керування U_{k+1} , результат розрахунку ДХ для різних варіантів формування ЕЗ (рис. 7) наведений на рис. 8. Графік 0 відповідає ідеальній ситуації розрахунку ДХ з вихідного та ЕЗ наведених на рис. 1.

Графіки 1 – 5 відповідають ЕЗ з різним відсотком заповнення ОП наведених на рис. 7 відповідно.

На рис. 8 наведені результати розрахунків кореляційного порівняння ЕЗ $S_{E3(k+1)}$ з різним фоново-об'єктовим складом та різним відсотком заповнення об'єкта прив'язки на ПЗ, де ОП розташований в центрі ПЗ.

За результатами проведених досліджень встановлено, що значний вплив на формування ДХ дають другорядні об'єкти, розташовані на місцевості,

що потрапляють на ЕЗ при малому відсотку заповнення ОП.

Це в свою чергу обумовлено особливостями польоту АО, що окрім поступального руху, обертається навколо своєї осі.

Рис. 8. Результат розрахунку дискримінаторної характеристики для різних варіантів формування ЕЗ

Джерело: розроблено авторами.

Алгоритм формування ВФ запропонованої системи навігації представлений на рис. 9.

Значення на виході схеми алгоритму формування результуючої оцінки ВФ запам'ятовується та після перерахунку використовується для прогнозування при наступному обчисленні. Прогноз відбувається за допомогою функції $B_k \hat{W}_k$, що коректується при кожному уточненні положення ОП на ПЗ.

Дані ПЗ та дані прогнозу із встановленою матричною вагою додаються до прогнозованої оцінки.

Таким чином отримуємо результуючу оцінку ВФ $R_{B\Phi}$, а вираз (1) можна записати, як:

$$R_{B\Phi} = F(S'_{ПЗ}, S_{E3(k+1)}) . \quad (9)$$

Структурна схема алгоритму формування результуючої оцінки ВФ забезпечує формування напруги на корекцію траєкторії польоту АО, формування результуючої напруги та за результатами визначення результуючої оцінки вектору стану здійснюється адаптивне формування ЕЗ відповідно до відсотка заповнення ОП.

Як видно з результатів розрахунків, отримати унімодальну вирішальну функцію, як команду на корекцію траєкторії польоту АО, можливо при умові розташування об'єкта прив'язки в центрі ПЗ.

В такому випадку ефект спотворення у вигляді кругового розмиття має мінімальний вплив на формування ВФ.

Рис. 9. Структурна схема алгоритму формування результуючої оцінки вирішальної функції
Джерело: розроблено авторами за даними [11, С. 243].

Висновки

Розрахунки показали, чим більше ОП відхиляється від центру ПЗ, в умовах спотворень, обумовлених розмиттям об'єктів та фонів, тим більшим стає значення бічних екстремумів ВФ. В такому випадку ВФ стає багатомодовою, що не дозволяє здійснити прив'язку із заданою точністю.

Для забезпечення просторового місцевизначення АО з високою точністю розроблені метод та алгоритм як варіант практичної реалізації запропонованого методу самокорекції бортової системи навігації АО з використанням ОЕ КЕСН в умовах кругового розмиття ПЗ, які забезпечують:

- формування унімодальної ВФ, шляхом утримання ОП в центрі спотвореного ПЗ;
- адаптивну зміну параметрів ЕЗ, в залежності від ступеня розмиття ПЗ, а також з урахуванням особливостей ФОС зображення ПВ для забезпечення максимальної крутизни ДХ;
- стабілізацію крутизни ДХ в залежності від умов отримання ПЗ.

За результатами проведених досліджень встановлено, що максимальна крутизна ДХ, в умовах кругового розмиття ПЗ досягається тоді, коли площа ОП складає від 75 до 90 відсотків від площі ЕЗ.

Список літератури

1. Таршин В.А. Метод корекції траєкторії польоту засобу доставки рятувального спорядження з урахуванням розмиття поточних зображень об'єкта прив'язки / В.А. Таршин, М.Ю. Дергоусов, Г.В. Акулінін // Системи озброєння та військової техніки. – 2020. – № 3. – С. 46-54. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.63.06>.
2. Сотников А.М. Проблемы и перспективы развития навигационного обеспечения летательных аппаратов / А.М. Сотников, В.А. Таршин // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2013. – № 3(36). – С. 68-74.
3. Щербинин В.В. Построение инвариантных корреляционно-экстремальных систем навигации и наведения летательных аппаратов / В.В. Щербинин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 230 с.
4. Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения / В.К. Баклицкий. – Тверь: ТО "Книжный клуб", 2009. – 360 с.
5. Методика оценки информативности исходных изображений для высокоточных корреляционно-экстремальных систем навигации / В.А. Таршин, А.М. Сотников, Р.Г. Сидоренко, А.В. Мезенцев // Системи обробки інформації. – 2015. – № 10. – С. 60-63.
6. Таршин В.А. Подготовка эталонных изображений для высокоточных корреляционно-экстремальных систем навигации на основе использования прямого корреляционного анализа / В.А. Таршин, А.М. Сотников, Р.Г. Сидоренко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – № 2. – С. 69-73.
7. Метод коррекции перспективных искажений текущих изображений в радиометрических системах навигации / В.И. Антифеев, В.Н. Быков, А.М. Гричанюк, Я.Н. Кожушко // Системи обробки інформації. – 2005. – № 4. – С. 7-15.
8. Єрьоміна Н.С. Метод прив'язки безпілотних літальних апаратів з використанням кореляційно-екстремальних систем навігації в умовах появи хибних об'єктів на поточному зображенні: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.12.17 "Радіотехнічні та телевізійні системи" / Н.С. Єрьоміна. – Х., 2018. – 20 с.

9. Мони́ч Ю.И. Мера оценки резкости цифрового изображения / Ю.И. Мони́ч, В.В. Старовойтов // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2011. – № 1(55). – С. 80-84.
10. Кольцов П.П. Оценка размытия изображения / П.П. Кольцов // Компьютерная оптика. – 2011. – № 1(35). – С. 95-96.
11. Теоретические основы радиолокации / В.Б. Алмазов, А.А. Белов, В.Н. Кокин, В.П. Рябуха. – ХВУ, 1996. – 466 с.
12. Баклицкий В.К. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации / В.К. Баклицкий, А.М. Бочкарев, М.П. Мусьяков. – М.: Сов. радио, 1986. – 216 с.

Надійшла до редколегії 01.02.2021

Схвалена до друку 02.03.2021

Відомості про авторів:

Таршин Володимир Анатолійович

доктор технічних наук професор начальник кафедри
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-7059-6354>

Дергоусов Михайло Юрійович

ад'юнкт Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5126-6787>

Куравський Максим Віталійович

ад'юнкт Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9360-6850>

Information about the authors:

Volodymyr Tarshyn

Doctor of the Technical Sciences Professor Head of Department
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7059-6354>

Mykhailo Derhousov

Doctoral Student of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5126-6787>

Maksym Kyravskiy

Doctoral Student of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9360-6850>

МЕТОД САМОКОРРЕКЦИИ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ АЭРОБАЛЛИСТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ

В.А. Таршин, М.Ю. Дергоусов, М.В. Куравский

Для быстрой и точной доставки спасательных средств в труднодоступные районы местности, расположенные на расстоянии десятков километров от зоны эвакуации, может быть применен аэробаллистический объект (АО), который конструктивно представляет собой управляемый снаряд. Основу системы навигации такого АО составляет инерциальная система навигации, основным недостатком которой является накопление ошибок пространственного положения в процессе полета. Это в свою очередь приводит к увеличению значений среднеквадратичной ошибки навигации АО до сотен метров. Для обеспечения определения пространственного положения с точностью до единиц - десятков метров, существующая система навигации должна быть дополнена системой более высокого класса точности. В качестве такой рассматривается оптико-электронная (ОЭ) корреляционно-экстремальная система навигации (КЭСН). Стабилизация ориентации АО в процессе полета достигается за счет вращательного движения вокруг продольной оси. Вращательное движение АО обуславливает изменение ориентации полученного текущего изображения (ТИ) КЭСН по отношению к эталонному изображению (ЭЗ), а также искажения в виде размытия контуров объекта привязки (ОП) и окружающего фона. В то же время, смещение объекта привязки от центра, в условиях искажений ТИ обусловленных размытием, влечет за собой увеличение значений боковых экстремумов решающей функции (РФ), величина которых может оказаться большей величины главного экстремума, что в свою очередь приведет к ложной коррекции координат или к полному срыву функционирования КЭСН. Для автоматического удержания ОП в центре ТИ приведена модель следящей системы, применение которой позволяет обеспечить формирование унимодальной РФ. Приведенные результаты расчетов дискриминаторной характеристики (ДХ) ЭЗ и, искаженного в результате кругового вращения АО, ТИ показали, что существенное влияние при корреляционном сравнении на формирование крутизны ДХ дает процент заполнения ОП на ЭЗ.

Ключевые слова: корреляционно-экстремальная система навигации, высокоточное наведения, средство доставки спасательного снаряжения, аэробаллистический объект.

METHOD OF SELF-CORRECTION OF AIRBALLISTIC OBJECT ON-BOARD NAVIGATION SYSTEM USING OPTICAL-ELECTRONIC CORRELATION-EXTREME NAVIGATION SYSTEM

V. Tarshyn, M. Derhousov, M. Kyravskiy

The article proposes a method of correction of the onboard navigation system of an aeroballistic object using an optoelectronic correlation-extreme navigation system, which, in contrast to the known ones, allows to keep the object of binding in the center of the current image to form a unimodal crucial function flight trajectory of the aeroballistic object. The results of researches of efficiency of the offered method and algorithm of formation of a decisive function of correlation-extreme navigation system in the conditions of blurring of the current image and location of object of binding on the current image are resulted. The application of the developed method allows to provide the conditions for the formation of unimodal crucial function, because it implements the process of constant clarification of the location of the binding object. The developed method also provides for the selection of the binding object with the optimal percentage of filling in the reference image.

Keywords: correlation-extreme navigation system, high-precision guidance, rescue equipment delivery vehicle, aeroballistic object.