

УДК 681.324

¹Дахно Наталія Борисівна (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-3892-4543>

²Барабаш Олег Володимирович (доктор технічних наук, професор)

<https://orcid.org/0000-0002-5030-2580>

²Миронюк Микола Юрійович (кандидат військових наук)

<https://orcid.org/0000-0002-7164-2700>

²Базіло Сергій Михайлович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-1597-3724>

²Коломієць Юрій Миколайович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-9767-0750>

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

²Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ОДНОКРОКОВОГО ВАРІАЦІЙНО-ГРАДІЄНТНОГО МЕТОДУ ДЛЯ КЕРУВАННЯ БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

В статті розглядається застосування однокрокового варіаційно-градієнтного методу в системах керування безпілотними літальними апаратами у складі програмного забезпечення систем підтримки прийняття рішень. Проведено чисельний експеримент, який показав ефективність застосування вказаного методу. Вирішено завдання розробки оптимальної програми польоту БпЛА із застосуванням наближених методів для класу завдань спостережень та пошуку заданих об'єктів, а також виконання польоту згідно з заданою програмою для використання у складі програмного забезпечення систем підтримки прийняття рішень для забезпечення якості і ефективності управління.

Ключові слова: протокол стану каналів зв'язку, інформаційно-телекомунікаційна система (мережа), алгоритм маршрутизації.

Вступ

Інтенсивний розвиток безпілотних літальних апаратів (БпЛА) за останній час привів до значного поширення переліку завдань, які успішно вирішуються безпіотною авіацією як в військовій, так і в цивільній сферах [1, 2].

У зв'язку із бойовими діями в нашій країні цей напрямок набув ще більшого значення. Застосування безпіотної авіації на лінії бойового зіткнення призводить до більш успішних дій Сил оборони та допомагає значно зменшити втрати.

Особливе місце на лінії бойового зіткнення займає клас завдань спостереження та пошуку об'єктів. Очевидно що для мінімізації витрат на виконання завдань пошуку конкретних об'єктів за їх розмірами та з урахуванням погодних умов кожного разу повинна розроблятися спеціальна програма польоту БпЛА [3, 4]. В зв'язку з цим можна стверджувати, що завдання розробки оптимальної програми польоту БпЛА із застосуванням наближених методів для класу завдань спостережень та пошуку заданих об'єктів, а також виконання польоту згідно з заданою програмою, є безумовно актуальним.

Матеріали та методи

Дослідження і розробка алгоритмів, що узгоджують динамічні характеристики об'єкта пошуку з параметрами польоту БпЛА дозволяє в реальному масштабі часу розробляти оптимальну програму польоту БпЛА для вирішення задач спостереження та пошуку заданих об'єктів.

Система підтримки прийняття рішень (СППР)

повинна вирішувати ряд основних задач, серед яких: визначення оптимальних режимів польоту в залежності від завдань, що вирішуються; визначення оптимальної траєкторії польоту для виконання польотного завдання; побудова оптимальних планів (програм) польотів [5 – 8]. З метою вирішення цих завдань в останній час широко застосовуються оберненні задачі механіки. Ці задачі по визначенню прикладених до механічної системи активних сил і моментів, а також параметрів даної системи і накладених на неї зв'язків, при яких стає можливим один із рухів із заданими властивостями. Це дає можливість побудови траєкторій, наближених до оптимальних з урахуванням прийнятих обмежень.

Метою статті є вирішення завдання розробки оптимальної програми польоту БпЛА із застосуванням однокрокового варіаційно-градієнтного методу для класу завдань спостережень та пошуку заданих об'єктів, а також виконання польоту згідно з заданою програмою у складі програмного забезпечення систем підтримки прийняття рішень із забезпечення якості і ефективності управління.

Результати

Система підтримки прийняття рішень в контурі системи управління БпЛА функціонує наступним чином: керівник розрахунку плану використання БпЛА – особа, що приймає рішення (ОПР), отримує завдання на проведення пошуку заданого об'єкта в визначеному районі, уточнює та доводить його до оператора керування БпЛА. Оператор формалізує

задачу та на її основі, з урахуванням картографічної інформації, оцінки ситуації, аналізу даних, розробляє основні вимоги до виконання польотного завдання для БпЛА. Далі він вводить в СППР відповідні необхідні дані. На основі аналізу вхідної інформації щодо виконання задачі пошуку і розрахунків параметрів польоту БпЛА, СППР за допомогою модулів побудови варіантів плану (програми) польоту формує варіанти цього плану. В модулі прийняття рішення СППР на основі отриманих варіантів здійснюється вибір оптимального плану польоту. При необхідності ОПР контролює і корегує процес вибору плану польоту та, при необхідності, вносить зміни в нього. Характеристики отриманої програми польоту від СППР передаються в підсистему керування БпЛА, яка забезпечує виконання цієї програми.

Будемо досліджувати БпЛА, що рухається в площині і моделюється матеріальною точкою масою m [9]. Його рух описується системою із трьох звичайних диференціальних рівнянь першого порядку. При відповідному виборі управляючих сил (F_r, F_φ) рівняння такого типу описують плоский рух літального апарату в фазових змінних $(r, \dot{r}, \dot{\varphi})$, де (r, φ) вихідна полярна система координат. При цих умовах динамічна модель руху літального апарату описується рівняннями:

$$m(\ddot{r} - r\dot{\varphi}^2) = F_r, \quad m(r\ddot{\varphi} + 2\dot{r}\dot{\varphi}) = F_\varphi. \quad (1)$$

Нехай управляючі сили

$$F_r = m[\mu_2^2 r^2 - r\dot{\varphi}^2 - (\mu_1 + \mu_2)(\dot{r} + \mu_2 r) + g(\dot{\varphi})], \quad (2)$$

$$F_\varphi = m[(2\dot{r} - \mu_3 r)\dot{\varphi} + r^2],$$

де μ_1, μ_2, μ_3 сталі і $g(\dot{\varphi})$ управляюча функція. Можна провести заміну змінних наступним чином:

$$x_1 = \dot{r} + \mu_2 r, \quad x_2 = r, \quad x_3 = \dot{\varphi}. \quad (3)$$

Тоді вихідні рівняння траєкторії руху БпЛА можна записати у вигляді трьохвимірної системи:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\mu_1 x_1 + g(x_3), \\ \dot{x}_2 = -\mu_2 x_2 + x_1, \\ \dot{x}_3 = -\mu_3 x_3 + x_2. \end{cases} \quad (4)$$

Ця система є основним об'єктом дослідження. Отримана система рівнянь зводиться до звичайного диференціального рівняння третього порядку

$$y''' + (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3)y'' + (\mu_1\mu_2 + \mu_1\mu_3 + \mu_2\mu_3)y' + \mu_1\mu_2\mu_3 y = g(y); \quad (5)$$

відносно невідомої $y(t) = x_3(t)$.

В класичному аналізі розроблено багато прийомів знаходження розв'язків таких рівнянь за допомогою елементарних (або спеціальних) функцій. Але часто при розв'язанні практичних задач ці методи виявляються або геть безпорадними, або надто витратними в часі. Тобто не мають застосування у режимі реального часу, у якому має коригуватися траєкторія руху та польотне завдання БпЛА. По цій причині для розв'язання задач практики були створені методи наближеного розв'язку диференціальних рівнянь. Серед великої кількості цих методів найчастіше на практиці застосовують варіаційні, проєкційні, градієнтні та різницеві методи. Останнім часом все частіше застосовуються підходи, які суттєво прискорюють швидкість збіжності градієнтних методів, мають більш широкую область застосування і більш стійкі до збурень. Ці підходи поєднують у собі ідеї як варіаційних, так і градієнтних методів [1, 10, 11].

Проведемо порівняльний експеримент з метою демонстрації реальних можливостей варіаційно-градієнтних методів в порівнянні з градієнтним методом при дослідженні динамічних моделей руху БпЛА (1), (2).

Для цього розглянемо динамічну модель, що описується рівняннями (1) і управляючими силами:

$$\begin{aligned} F_r &= m[5r^2 - r\dot{\varphi}^2 + 56 - 24t^2 - \\ &- 4 \int_0^1 G(t, \xi) \dot{\varphi}(\xi) d\xi], \\ F_\varphi &= m[2\dot{r}\dot{\varphi} + r^2], \end{aligned} \quad (6)$$

де

$$G(t, \xi) = \begin{cases} \xi, & 0 \leq \xi \leq t \\ \xi - 1, & t \leq \xi \leq 1 \end{cases}. \quad (7)$$

При умовах $\dot{\varphi}(0) = \dot{\varphi}(1) = \ddot{\varphi}(1) = 0$.

Зводячи (1), (6) до звичайного диференціального рівняння третього порядку отримаємо задачу:

$$\begin{cases} y'''(t) - 5y'(t) + 4 \int_0^1 G(t, \xi) y(\xi) d\xi = 56 - 24t^2; \\ y(0) = y(1) = y''(1) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

В процесі експерименту до динамічної моделі (8), (7) для аналізу траєкторії руху БпЛА застосовувались метод найшвидшого спуску та однокроковий і двокроковий варіаційно-градієнтні методи для рівнянь з K - позитивно визначеними K - симетричними операторами.

Задача (8), (7) задовільняє умовам теорем про збіжність однокрокового і варіаційно-градієнтного метода для рівнянь з K - позитивно визначеними K - симетричними операторами [3, 7], якщо

Таблиця 1

$$Ky(t) = \int_0^t y(\xi) d\xi, \quad \begin{cases} By(t) = y''', \\ y(0) = y(1) = y''(1) = 0. \end{cases}$$

Значить система (1), (8), що описує динамічну модель руху БПЛА має єдиний розв'язок, а також однокроковий варіаційно-градієнтний метод для цієї задачі збігається.

Для рівняння (8) точний розв'язок можна отримати аналітичним чином. Точний розв'язок має наступний вигляд (рис.1):

$$\dot{\varphi} = y^*(t) = -0.2529233637e^{2t} + 4.3030627419e^t + 11.6969372581e^{-t} - 15.7470766363e^{-2t} - 12t.$$

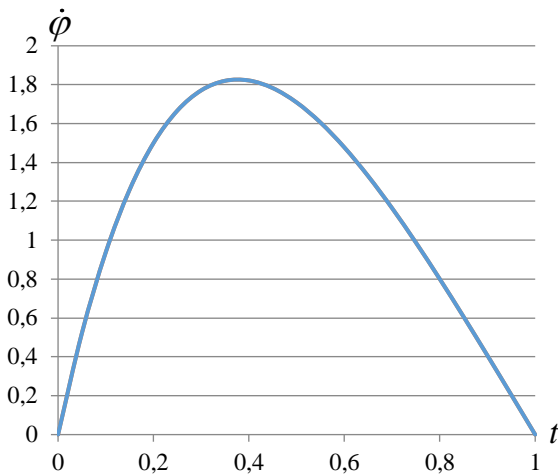


Рисунок 1. Швидкість зміни кута поворота БПЛА

Для реалізації однокрокового варіаційно-градієнтного методу обчислення проводились за допомогою математичного пакету Derive A Mathematical Assistant.

За координатні функції була взята послідовність функцій

$$\{\varphi_i(t) = t^i(t-1)^3\}_{i \geq 1} \subset H_0.$$

При побудові наближень було покладено $n = 2$, тобто брались дві координатні функції

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) &= t(t-1)^3, \\ \varphi_2(t) &= t^2(t-1)^3. \end{aligned}$$

За початкове наближення була взята довільна функція з H :

$$y_0 = t(t-1)^3.$$

При розв'язанні цієї задачі однокроковим варіаційно-градієнтним методом, вже після першої ітерації ми отримали розв'язок з точністю до $\varepsilon = 10^{-4}$. Після другої ітерації точність розв'язку вже складала $\varepsilon = 10^{-6}$.

Нижче в таблиці наведені результати обчислень.

Однокроковий варіаційно-градієнтний метод

t\y	y*-y1	y*-y2	y*-y3
0	0	0	0
0,25	8,688108·10 ⁻⁴	5,94684·10 ⁻⁷	9,920092·10 ⁻⁸
0,5	8,284705·10 ⁻⁴	1,6588193·10 ⁻⁶	6,572202·10 ⁻⁷
0,75	4,087585·10 ⁻⁴	9,157572·10 ⁻⁶	1,402053·10 ⁻⁶
1	0	0	0

Таким чином, однокроковий варіаційно-градієнтний метод показує дуже хорошу швидкість збіжності і є стійким до збурень. Такі показники дозволять суттєво зменшити розрахункові затрати при незмінній точності обчислень.

Висновки

Таким чином, в статті був розглянутий варіант вирішення завдання розробки оптимальної програми польоту БПЛА із застосуванням однокрокового варіаційно-градієнтного методу для керування безпілотними літальними апаратами у складі програмного забезпечення систем підтримки прийняття рішень, реалізація якого дозволить досягти нової якості функціонування автоматизованих систем управління, істотно підвищити оперативність обробки інформації в процесах прийняття рішень і тим самим підвищити якість і ефективність управління. Це дозволить підвищити ефективність застосування безпілотних комплексів розвідки та спостереження за рахунок автоматизації підготовки польотного завдання, оптимізації маршруту польоту з прив'язкою до електронної мапи місцевості та визначення оптимальних параметрів польоту з можливістю корегування параметрів польотного завдання в реальному масштабі часу.

Список використаних джерел

1. N. Dakhno, O. Barabash, H. Shevchenko, O. Leshchenko and A. Musienko, "Modified Gradient Method for K-positive Operator Models for Unmanned Aerial Vehicle Control," 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), KYIV, Ukraine, 2020, pp. 81-84, doi: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255516.
2. Tyurin V., Martyniuk O., Mirnenko V., Korenivska I. General Approach to Counter Unmanned Aerial Vehicles. 5th International Conference ACTUAL PROBLEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES DEVELOPMENT (APUAVD-2019) Organized by IEEE Ukraine Section Joint SP/AES Chapter and the National Aviation University (Kyiv), October 22-24, 2019 Kyiv, Ukraine, pp. 75 – 78.
3. Беспилотные летательные аппараты: Методики приближенных расчетов основных параметров и характеристик/ В.М. Ильюшко, М.М. Митрахович, А.В. Самков, В.И. Силков и др.; под об. ред. В.И. Силкова. – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2012. 302 с.
4. Беспилотные летательные аппараты: Методика сравнительной оценки боевых возможностей/ М.М. Митрахович, В.И. Силков, А.В. Самков, Х.В. Бурштгынская и др.; под об. ред. В.И. Силкова. – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2012. 288 с.
5. Сільков В.І. Бойове маневрування літальних апаратів. К.: НАОУ, 2004. 340 с.
6. Силков В.И. Динамика полета летательных аппаратов. К.: КМУ ГА, 1997. 425 с.

7. Mashkov O.A., Murasov R.K., Kravchenko Y.V., Dakhno N.B., Leschenko O.A., Trush, A.V. Optimal forecast algorithm based on compatible linear filtration and extrapolation. *Mathematical Modeling and Computing*, 2021, № 8 (2), pp. 157 – 167. <https://doi.org/10.23939/mmc2021.02.157>

8. Tymochko O., Pavlenko M., Larin V., Osieivskiy S., Kasianenko M. Research of providing the video information protection using wireless technologies for aerial reconnaissance by unmanned aerial vehicles. 6th International Conference Actual problems of unmanned aerial vehicles development (APUAVD-2021) Organized by IEEE Ukraine Section Joint SP/AES Chapter and the National Aviation University (Kyiv), October 19-21, 2021 Kyiv, Ukraine, pp. 49–52.

9. Кондратьева Л.А. Обратные краевые задачи на многообразиях // Вестник Российского университета дружбы народов, Серия Математика. Информатика. Физика. 2010. №1. С.34-38.

10. Barabash O. V., Shevchenko H. V. Modified gradient method in a decision support system for control unmanned aerial vehicles. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, 2016, №16. 60 – 62 c.

11. N. Dakhno, H. Shevchenko, O. Leshchenko and A. Musienko, "Modified Gradient Method for K-positive Operator Models for Unmanned Aerial Vehicle Control," 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), 2020, pp. 81-84.

APPLICATION OF THE ONE-STEP VARIATION-GRADIENT METHOD FOR CONTROLLING UNMANNED AIRCRAFT

¹Nataliia Dakhno (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0003-3892-4543>

²Oleg Barabash (Doctor of Technical Sciences, Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-5030-2580>

²Mykola Myroniuk (Candidate of Military Sciences)

<https://orcid.org/0000-0002-7164-2700>

²Serhii Bazilo (Ph.D.)

<https://orcid.org/0000-0002-1597-3724>

²Yurii Kolomiets (Ph.D.)

<https://orcid.org/0000-0002-9767-0750>

¹Kyiv National University named after Taras Shevchenko, Kyiv, Ukraine

²The National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy, Kyiv, Ukraine

The article considers the application of the one-step variational-gradient method in control systems of unmanned aerial vehicles as part of the software of decision support systems. A numerical experiment was conducted that showed the effectiveness of the specified method. The task of developing the optimal UAV flight program using approximate methods for the class of tasks of observation and searching for given objects, as well as flight execution according to the given program for use as part of decision support system software to ensure the quality and efficiency of management, has been solved.

Keywords: communication channel status protocol, information and telecommunication system (network), routing algorithm.

References

1. N. Dakhno, O. Barabash, H. Shevchenko, O. Leshchenko and A. Musienko, "Modified Gradient Method for K-positive Operator Models for Unmanned Aerial Vehicle Control," 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), KYIV, Ukraine, 2020, pp. 81-84, doi: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255516.

2. Tyurin V., Martyniuk O., Mimenko V., Korenivska I. General Approach to Counter Unmanned Aerial Vehicles. 5th International Conference ACTUAL PROBLEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES DEVELOPMENT (APUAVD-2019) Organized by IEEE Ukraine Section Joint SP/AES Chapter and the National Aviation University (Kyiv), October 22-24, 2019 Kyiv, Ukraine, pp. 75 – 78.

3. Bespylotnye letatelnye apparaty: Metodyky pryblzhennykh raschetov osnovnykh parametrov y kharakterystyk/ V.M. Yliushko, M.M. Mytrakhovych, A.V. Samkov, V.Y. Sylkov y dr.; pod ob. red. V.Y. Sylkova. – K.: TsNYY VVT VS Ukrayny, 2012. 302 s.

4. Bespylotnye letatelnye apparaty: Metodyky sravnytelnoi otsenky boevykh vozmozhnostei/ M.M. Mytrakhovych, V.Y. Sylkov, A.V. Samkov, Kh.V. Burshtynskaia y dr.; pod ob. red. V.Y. Sylkova. – K.: TsNYY VVT VS Ukrayny, 2012. 288 s.

5. Silkov V.I. Boiove manevruvannia litalnykh aparativ. K.: NAOU, 2004. 340 s.

6. Sylkov V.Y. *Dynamiyka poleta letatelnykh apparatov*. K.: KMU HA, 1997. 425 s.

7. Mashkov O.A., Murasov R.K., Kravchenko Y.V., Dakhno N.B., Leschenko O.A., Trush, A.V. Optimal forecast algorithm based on compatible linear filtration and extrapolation. *Mathematical Modeling and Computing*, 2021, № 8 (2), pp. 157 – 167. <https://doi.org/10.23939/mmc2021.02.157>

8. Tymochko O., Pavlenko M., Larin V., Osieivskiy S., Kasianenko M. Research of providing the video information protection using wireless technologies for aerial reconnaissance by unmanned aerial vehicles. 6th International Conference Actual problems of unmanned aerial vehicles development (APUAVD-2021) Organized by IEEE Ukraine Section Joint SP/AES Chapter and the National Aviation University (Kyiv), October 19-21, 2021 Kyiv, Ukraine, pp. 49–52.

9. Kondrateva L.A. Обратные краевые задачи на многообразиях // Вестник Росийского университета дружбы народов, Серия Математика. Информатика. Физика. 2010. №1. С.34-38.

10. Barabash O. V., Shevchenko H. V. Modified gradient method in a decision support system for control unmanned aerial vehicles. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, 2016, №16. 60 – 62 c.

11. N. Dakhno, H. Shevchenko, O. Leshchenko and A. Musienko, "Modified Gradient Method for K-positive Operator Models for Unmanned Aerial Vehicle Control," 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), 2020, pp. 81-84.