

УДК 629.7

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-3771322016101921>

**О. О. Пікенін**<sup>1</sup>, *аспірант*, **О. П. Мариношенко**<sup>2</sup>, *к. т. н., доцент*,  
**О. В. Прохорчук**<sup>3</sup>, *к. т. н., доцент*

## УЗГОДЖЕНИЙ ПОЛІТ ГРУПИ БЕЗПЛОТНИХ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

**En**

This paper proposes a leader following autonomous approach for UAV formation flight. The objective of UAV formation flight is that UAVs have to fly to a specified region while maintaining the distances and spatial angles between UAVs. To design the control system algorithms, the coupled dynamics of multiple UAVs is considered with assumption that each UAV follows (after) by the leader UAV. For the leader following approach algorithms of guidance system and control system algorithms are created. To verify the performance of the proposed algorithms, numerical simulation is performed for a two UAVs flight mission.

---

<sup>1</sup> Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут" факультет авіаційних і космічних систем

<sup>2</sup> Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут" кафедра теоретичної механіки

<sup>3</sup> Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут" кафедра приладів та систем кервання літальними апаратами

The approach of autonomous flight control of unmanned aerial systems (UAS) is proposed. For the development of UAS group flight control system algorithms, it is necessary to combine the dynamics of several unmanned aerial vehicles with the assumption, that each of UAV's goes the leader. In order to check the proposed algorithms effectiveness, the numerical simulation of the flight task for two unmanned aerial vehicles was carried out.

This work is confirmed, an opportunity implementation of multiple UAVs control has been provided, especially for control of UAVs formation flying, using the leader following approach. Based on this obtained algorithms most appropriate methods of virtual leader behavior method will be researched and developed.

**Ru** Преподлагается подход, для автономного управления полетом беспилотных авиационных комплексов (БАК). Для разработки алгоритмов системы управления групповым полетом БАК, объединим динамику нескольких беспилотных летательных аппаратов с предположением, что каждый беспилотный летательный аппарат следует за ведущим лидером. Проверив эффективность предложенных алгоритмов численное моделирование было выполнено для полетного задания двух беспилотных летательных аппаратов.

## Вступ

За останні десятиліття накоплений великий досвід у розробці та використанні безпілотних повітряних суден (БПС). Одним із найважливіших завдань на сьогодні, які ставляться перед БПС, є узгодження польоту БПС у формації. При вирішенні навігаційної задачі групи, постає ряд складних проблем, дослідженням яких займаються в більшості країн світу.

Серед сучасних організацій, які займаються науково-практичними дослідженнями і розробками для забезпечення задачі керування формацією, в основному зосередженні на великих літаках. Перед БПС ставляться інші вимоги – здійснення польоту у формації як на значних віддальх так із невеликими інтервалами від кількох до десятків метрів.

## Постановка задачі

Формування керування польотом кількох БПС є важливою частиною багатьох досліджень [1-3], із великою кількістю практичних застосувань: розвідки, зв'язку, пошуково-рятувальних робіт. Необхідність розробки технології контролю польоту групи БПС відкриває дуже важливу область: створення малогабаритної міжбортової безпілотної навігаційної системи для БПС.

Потреба у цьому визначається тим фактом, що відсутність міжбортової безпілотної навігаційної системи суттєво обмежує можливості БПС через їх неузгоджене поодинокі використання. Отже, технічно актуальною і важливою задачею сьогодні є розробка недорогих, точних систем керування польотом БПС у формації, що, в свою чергу, приведе до економічно ефективних і відмовостійких систем.

**Розв'язання задачі**

Розробка міжбортової безпілотної навігаційної системи (МБНС) може реалізовуватись двома способами: створення повністю автономних МБНС, які не використовують наземних станцій наведення, та систем, які використовують наземні радіо маяки. Кожен із цих способів має свої переваги та недоліки. Автономна система керування дозволяє вирішувати завдання польоту групою без обмежень, що накладаються каналами зв'язку із наземним пунктом керування, а також в умовах діючої радіопротидії.

В основу системи керування груповим польотом, покладені наступні елементи: система наведення у склад якої входить системи технічного зору (наприклад відео камера) та система розпізнавання образів (для формування контрольної інформації щодо положення ведучого БПС); система керування польотом веденого БПС в основу якої покладені закони керування для витримування веденим БПС заданого програмного польоту - положення в групі літаків; навігаційна система для забезпечення контурів керування необхідною польотною інформацією.

**Побудова траєкторії польоту групи**

Стратегія управління групою БПС в основному включає наступні три метода-поведінки групи: метод ведучий-ведений, метод віртуального лідера та контроль поведінки [6]. При використанні моделі поведінки групи під час польоту ведучий-ведений задача навігації у загальному випадку розділяється на дві під задачі: перша – полягає в тому, що ведучий БПС повинен ідентифікувати та детектувати наземні стаціонарні об'єкти для подальшого формування траєкторії польоту; друга – стосується формування польотного строю для цього ведений БПС до моменту отримання команди на вихід із польотної формації та побудови власної траєкторії польоту повинен детектувати та відслідковувати ведучий БПС, а також підтримувати свою позицію у польотному строю.

Для вирішення задачі наведення на ведучий БПС припустимо, що оптично вісь камери збігається з повздовжньою віссю БПС (вісь  $Ox^b$  нерухома (жорстко) зв'язана система координат  $Ox^b Y^b Z^b$ ,  $Ox^c Y^c Z^c$  – локальна система координат камери,  $Ox^v Y^v Z^v$  – швидкісна система координат). На рис. 1 та рис. 2 показаний зв'язок між літальним апаратом та зв'язаною системою координат БПС и системою координат камери.

Припускаємо, що еталон (джерело) опорного кадру і камери розташовані у центрі ваги літака. Управління до цілі (ведучого БПС) визначається двома кутами: азимут цілі  $\Psi_{az}$  та кут вертикального наведення на ціль  $\Theta_v$ .

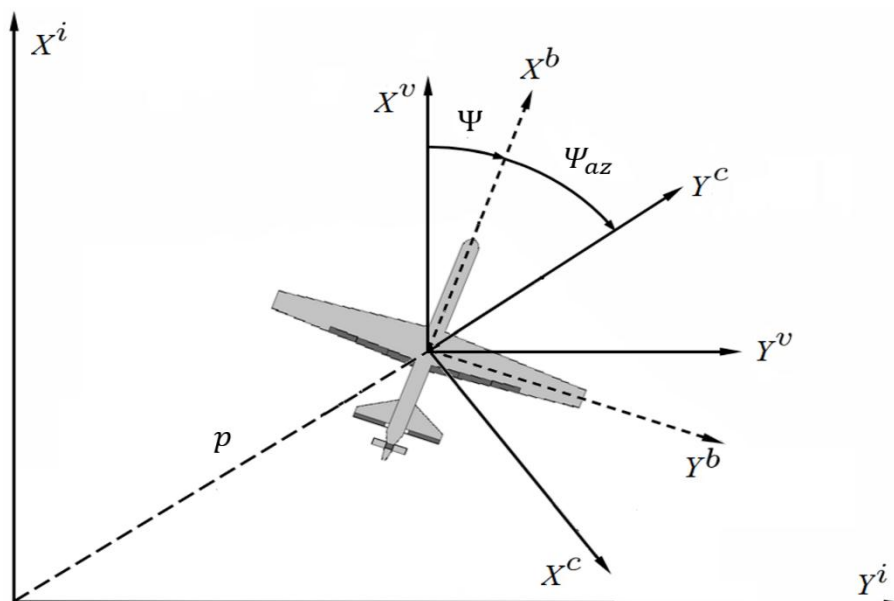


Рис. 1. Графічне представлення зв'язку між системами координат (вид зверху)

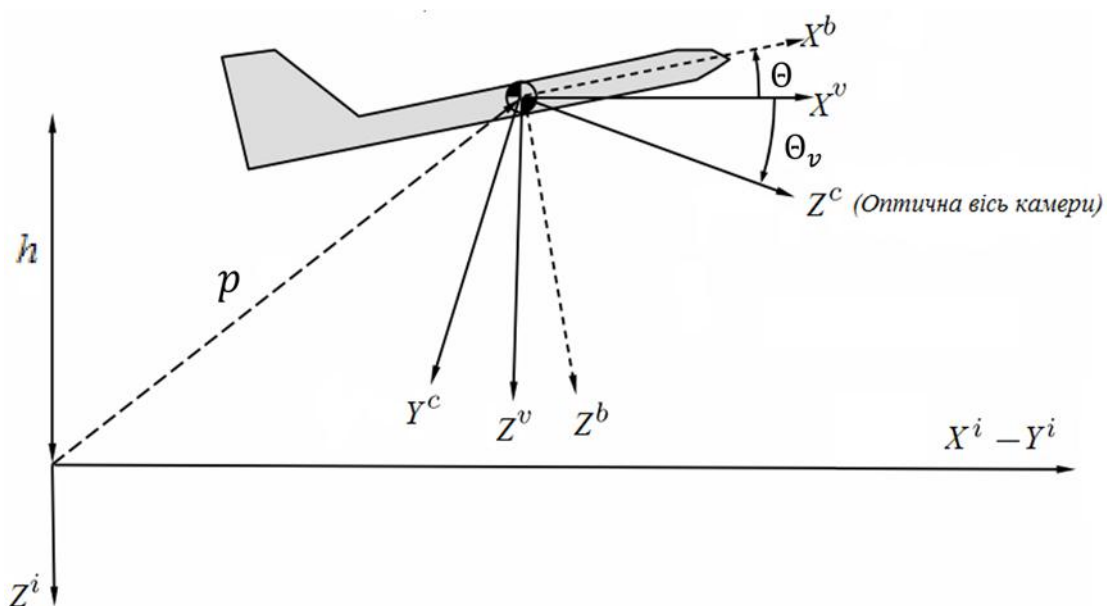


Рис. 2. Графічне представлення зв'язку між системами координат (вид з боку)

Отже, можемо сформуванати матриці напрямних косинусів  $R_{\psi_{az}}$ ,  $R_{\Theta_v}$  кутів

$$\psi_{az} \text{ і } \Theta_v: R_{\psi_{az}} = \begin{bmatrix} \cos \psi_{az} & 0 & -\sin \psi_{az} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi_{az} & 0 & \cos \psi_{az} \end{bmatrix} \text{ – матриця поворотів азимуту;}$$

$$R_{\Theta_v} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_v & \sin \Theta_v & 0 \\ -\sin \Theta_v & \cos \Theta_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \text{матриця поворотів вертикального наведення.}$$

Результатом добутку буде матриця для наведення на ведучий БПС:

$$R_b^g = R_{\Theta_v} R_{\Psi_{az}} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_v \cos \Psi_{az} & \sin \Theta_v \cos \Psi_{az} & -\sin \Psi_{az} \\ -\sin \Theta_v & \cos \Theta_v & 0 \\ \sin \Psi_{az} \cos \Theta_v & \sin \Theta_v \sin \Psi_{az} & \cos \Psi_{az} \end{bmatrix}.$$

### Математична модель камери

Для спрощення припустимо, що пікселі і масиви пікселів є квадратними. Якщо ширина квадратної матриці пікселів в одиницях пікселів  $M$ ,  $\nu$  – зона обзору камери,  $f$  – фокусна відстань камери в одиницях пікселів, то можна визначити скільки  $P$  метрів в одному пікселі. Отже можемо записати:

$$f = \frac{M}{2 \operatorname{tg} \left( \frac{\nu}{2} \right)}.$$

Положення проєкції об'єкта виражається у кадрі камери, як  $(P_{\varepsilon_x}, P_{\varepsilon_y}, P_f)$ , де  $P_{\varepsilon_x}$  і  $P_{\varepsilon_y}$  визначають положення об'єкта в пікселях відносно геометричного центру матриці камери. Відстань від початку системи координат камери (геометричного центру матриці камери) до об'єкта, може бути визначена, як його положення у пікселях  $F = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + f^2}$  (рис. 3).

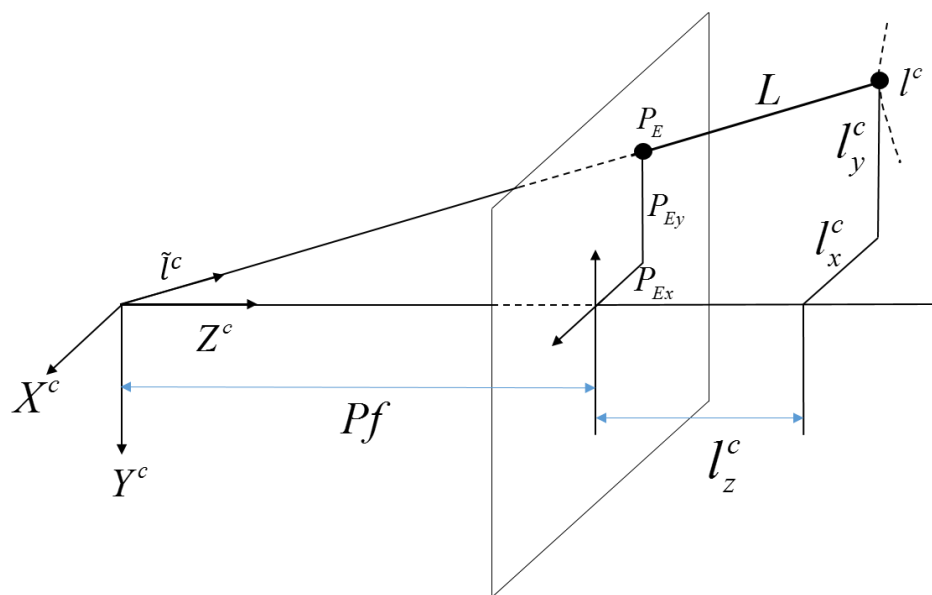


Рис. 3. Система координат камери

Для визначення орту (одичного вектора) за допомогою якого надалі задаватимемо напрямок польоту від веденого до ведучого БПС будемо використовувати наступне співвідношення:

$$\frac{l^c}{L} = \frac{1}{F} \begin{bmatrix} P\varepsilon_x \\ P\varepsilon_y \\ f \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{P\varepsilon_x^2 + P\varepsilon_y^2 + f^2}} \begin{bmatrix} P\varepsilon_x \\ P\varepsilon_y \\ f \end{bmatrix} = \bar{l} = \begin{bmatrix} \bar{l}_x \\ \bar{l}_y \\ \bar{l}_z \end{bmatrix}.$$

*Алгоритм наведення*

Опишемо простий алгоритм керування та наведення літального апарату для реалізації польоту у формації [5].

Рівняння оптичної осі системи наведення має вигляд:

$$l = \frac{1}{\sqrt{P\varepsilon_x^2 + P\varepsilon_y^2 + f^2}} \begin{bmatrix} P\varepsilon_x & P\varepsilon_y & f \end{bmatrix}^T.$$

Необхідне положення оптичної осі системи наведення визначається у відповідності до наступного співвідношення:  $l_r = R_b^g l$ .

Наступним кроком є отримання необхідних кутів азимуту і вертикального наведення для вирівнювання (націлювання) оптичних осей, які між собою узгоджені наступним співвідношенням.

$$l_r = \begin{bmatrix} l_{xr} \\ l_{yr} \\ l_{zr} \end{bmatrix} = R_b^{gT} \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix};$$

$$l_r = \begin{bmatrix} l_{xr} \\ l_{yr} \\ l_{zr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_v \cos \Psi_{az} & \sin \Theta_v \cos \Psi_{az} & -\sin \Psi_{az} \\ -\sin \Theta_v & \cos \Theta_v & 0 \\ \sin \Psi_{az} \cos \Theta_v & \sin \Theta_v \sin \Psi_{az} & \cos \Psi_{az} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix}.$$

Отже, рішення цього рівняння відносно кута азимута і кута вертикального наведення на ведучий БПС дають нам наступні вирази для командних кутів:

$$\Theta_{vc} = \text{tg}^{-1} \left( \frac{l_y}{l_x} \right); \quad \Psi_{azc} = \sin^{-1}(-l_z).$$

Таким чином сформовані команди для сервоприводів є рівняння:

$$\delta_e = K_e (\Theta_{vc} - \Theta_v) = K_e \left[ \text{tg}^{-1} \left( \frac{l_y}{l_x} \right) - \Theta_v \right];$$

$$\delta_r = K_r (\Psi_{azc} - \Psi_{az}) = K_r \left[ \sin^{-1}(-l_z) - \Psi_{az} \right].$$

В даній роботі розглядається модель поведінки групи ведучий-ведених, така модель поведінки групи пов'язана із роботою блоку системи технічного зору. Блок розпізнавання образів відслідковує геометричний

центр ведучого БПС та одночасно ідентифікує та детектує наземні навігаційні сигнали (знаходить їх точні географічні координати по еталонам дескрипторів в навігаційній базі). Припускаючи, існування репера (навігаційного орієнтира) до якого ведучий БПС може слідувати, задача ведених БПС у групі полягає у слідуванні за ним. Ведені БПС відстежуючи ведучий БПС у кадрі зберігають відносні відстані і кути між членами групи із метою збереження польотної формації. Еталонна траєкторна інформація жорстко з'єднана із опорними реперними точками (навігаційними сигналами) у пам'яті навігаційного блока. На рис. 4 зображений політ групи по ідеальній траєкторії, яка складається із ключових реперних точок. Таким чином, можна отримати положення всіх БПС у групі:

$$\begin{bmatrix} x_i^d(k) \\ y_i^d(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r(k) \\ y_r(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \Psi(k) & \sin \Psi(k) \\ -\sin \Psi(k) & \cos \Psi(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i^{dr}(k) \\ y_i^{dr}(k) \end{bmatrix}.$$

де  $x_i^d(k)$ ,  $y_i^d(k)$  – реальне положення ведучого БПС,  $x_i^{dr}(k)$ ,  $y_i^{dr}(k)$  – відносна відстані між бажаною позицією та  $x_r(k)$ ,  $y_r(k)$  ідеальною траєкторією, яка складається із реперних точок (дескрипторів навігаційних сигналів),  $\Psi_{az}$  – азимутальний кут наведення на ведучий БПС,  $\Psi$  – курсовий кут траєкторії польоту,  $V_1, V_2, V_3$  – повітряна швидкість членів групи.

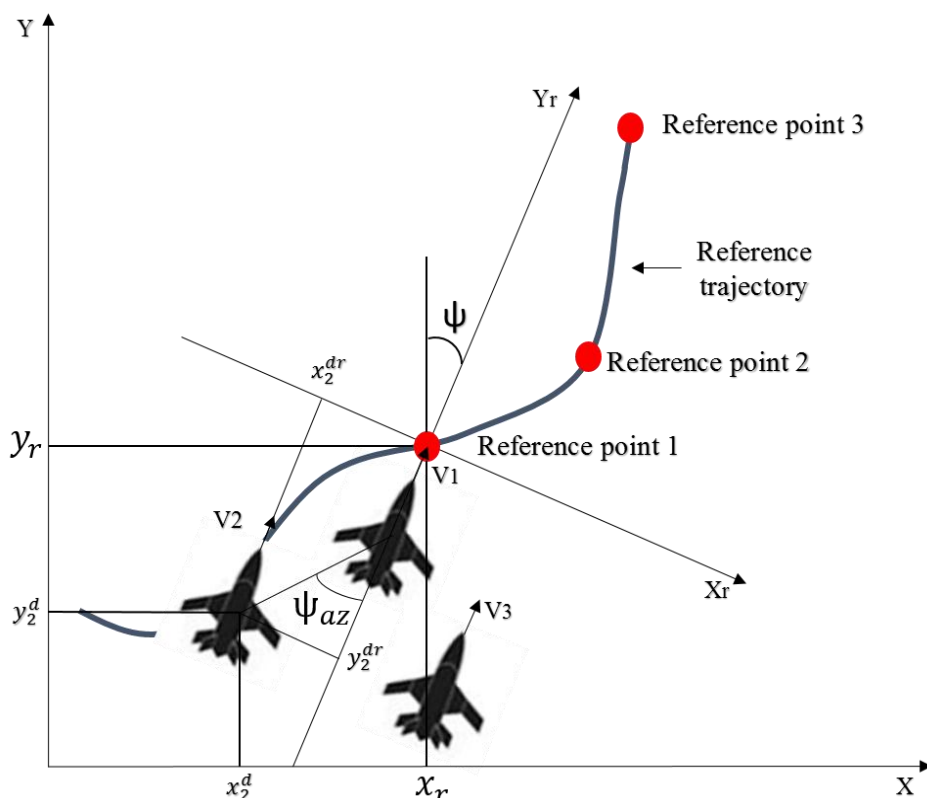


Рис. 4. Еталонна траєкторія польоту

Для побудови траєкторії польоту групи у пам'ять навігаційного блока заносяться образи ключових або основних реперів (дескрипторів навіга-

ційних сигналів). На рис. 5 зображена підстилаюча земна поверхня (аеропорт) на якій нанесені комплексні дескриптори навігаційних сигналів із реальними георафічними координатами, за допомогою яких будується траєкторія польоту ведучого БПС. Репери, або навігаційні сигнали представляють собою образи, або форми наземних стаціонарних орієнтирів, які будуються із дескрипторів особливих точок алгоритма *SURF* [8].

На основі вище сказаного процес польоту групи по траєкторії із використанням системи технічного зору включає тематичну класифікацію потокового відео із використанням методів теорії розпізнавання образів та порівняння отриманого дескриптора навігаційного сигналу із загального кадру із навігаційною базою еталонів у пам'яті системи технічного зору для побудови кривої польоту групи.

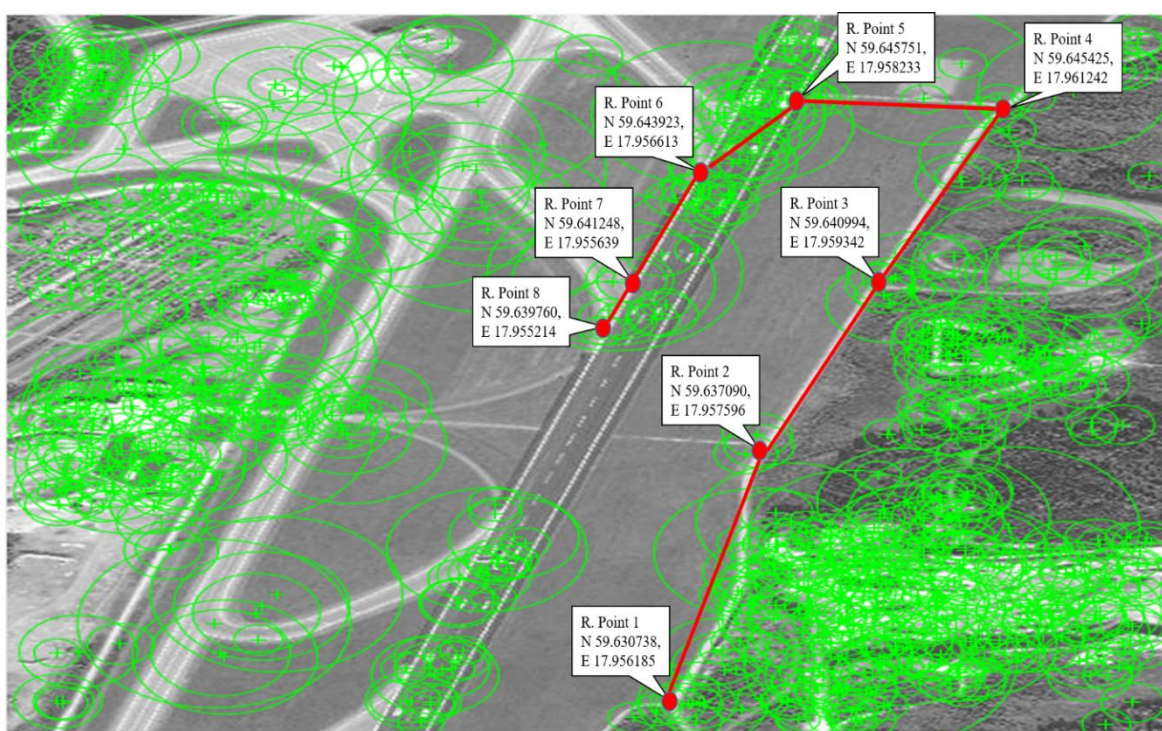


Рис. 5. Траєкторія польоту групи

Повноцінне математичне моделювання запропонованого підходу та алгоритмічно-реалізованої системи здійснене із використанням даних польотної телеметрії та реальної інформації про характеристики БПС і його бортового навігаційного комплексу. Проведене моделювання роботи МБНС показало її працездатність, ефективність та точність при витримванні програмно заданого польотного порядку БПС у формації.

## Висновок

В даній роботі була представлена та реалізована методика керування кількома БСП за використання методу ведучий-ведений БСП.



Для створення зв'язку та синхронізації між двома сусідніми БСП у разі їх польоту у формації був запропонований та реалізований алгоритм, який використовує засоби технічного зору й алгоритми розпізнавання образів. Крім того, наведено підхід щодо реалізації такої системи керування, а також алгоритм і принцип роботи системи на основі відповідних отриманих математичних моделей.

### Список використаної літератури

1. *Soleymani T.* Behavior-Based Acceleration Commanded Formation Flight Control / T. Soleymani, F. Saghafi. // International Conference on Control, Automation and Systems 2010 Oct. 27-30, in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea. – 2010. – P. 6.
2. Vision-Based Formation Control Framework / [A. K. Das, R. Fierro, V. Kumar // IEEE Transaction on Robotics and Automation. Vol. 18, No. 5 – 2002. – P. 813–825.
3. Investigating Virtual Structure Based Control Strategies for Spacecraft Formation Maneuvers / J. Hammer, G. Piper, O. Thorp, J. Watkins. // Navigation, and Control Conference and Exhibit, Providence, Rhode Island. – 2004. – P. 10.
4. *Marynoshenko O. P.* Algorithm for formation flight of unmanned aerial vehicles / O. P. Marynoshenko, R. Głębocki. // POLSKIE TOWARZYSTWO MECHANIKI TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ, MECHANIKA WLOTNICTWIE. TOM 1, ML-XVII – 2016. – PP. 103-111. ISBN 978-83-932107-8-7.
5. *Пікенін О. О.* Реалізація польоту групи безпілотних літальних апаратів / О. О. Пікенін, О. П. Мариношенко, О. В. Прохорчук. // Механіка гіроскопічних систем. – 2016. – №31. – С. 12–14. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-380414201671998>
6. *Пікенін О. О.* Алгоритм пошуку та ідентифікації опорних точок повітряних суден / О. О. Пікенін, О. П. Мариношенко, О. В. Прохорчук. // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2016. – №14. – С. 120-130. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-377131201680075>
7. *Пікенін О. О.* Цифрова фільтрація багатоспетральних зображень для пошуку та визначення опорних точок навігаційних орієнтирів / О. О. Пікенін, О. П. Мариношенко, О. В. Прохорчук. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка": наук. зб. / Держ. вищ. навч. закл. "Донецький національний технічний університет": Донецьк: ДонНТУ, 1998.. – 2015. – №2(21). – С. 24–32.
8. *Bay H.* Speeded-Up Robust Features (SURF) / H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, L. V. Gool // Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision. Springer LNCS. – 2006. - №3951 Pt. 1. PP.404-417.