

В.С. Фустій<sup>1</sup>, О.І. Тимочко<sup>1</sup>, Ю.Б. Ситник<sup>2</sup>, В.В. Афанасьєв<sup>1</sup>, О.Б. Титаренко<sup>3</sup>, Г.С. Степанов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

<sup>2</sup>Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький

<sup>3</sup>Національний університет оборони України ім. І. Черняхівського, Київ

## МЕТОД МІЖОБ'ЄКТОВОЇ НАВІГАЦІЇ БПЛА НА ОСНОВІ КОМПЛЕКСНОЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ ВІД КЛАСИЧНИХ ТА АЛЬТЕРНАТИВНИХ СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ

У статті розроблено метод міжоб'єктової навігації БПЛА у групі. Запропонований підхід дозволяє підвищити точність міжоб'єктової навігації. Сутність підходу полягає у поєднанні двох методів навігації, що дозволяють визначити різні навігаційні характеристики. Метод симетричного двостороннього двонаправленого вимірювання відстані дозволяє вимірювати відстань між БПЛА у групі на основі виміру часу поширення сигналу між ними. Відсутність синхронізації та робота в двонаправленому режимі знижує собівартість пристроїв та підвищує точність виміру відстані. Для визначення напрямку на джерело сигналу запропоновано використання методу фазової пеленгації сигналу. За рахунок об'єднання інформації, отриманої з використанням запропонованих методів, отримано повну інформацію про положення БПЛА один відносно іншого – відстань та напрямок на сусідній БПЛА. Після виконання виміру відстані та напрямку до усіх учасників групи та переведення отриманих даних зі сферичної до прямокутної системи координат, отримуємо інформацію про взаємне розташування всіх БПЛА у групі в зв'язаній системі координат головного БПЛА. Запропоновано інтеграцію розробленого методу навігації в існуючу навігаційну систему БПЛА.

**Ключові слова:** БПЛА, група БПЛА, міжоб'єктова навігація.

### Вступ

**Постановка проблеми.** В даний час групове використання різних типів БПЛА є перспективною і актуальною сферою їх використання при вирішенні широкого спектру військових і цивільних завдань. Застосування буде ефективним у таких сферах [1–3]:

- проведення розвідки (моніторингу) районів наземної і надводної території за мінімальний час;
- здійснення польотів хибних авіаційних цілей для забезпечення максимального рівня розкриття та виснаження засобів ППО противника;
- створення завад і придушення засобів зв'язку й управління противника на значних територіях;
- підвищення якості навчання і бойової кваліфікації розрахунків засобів ППО і льотчиків-винищувачів шляхом імітації групових нальотів засобів повітряно-космічного нападу;
- підвищення бойової ефективності ударів бойових БПЛА по наземних і надводних цілях;
- мінімізація часу виконання бойових завдань допоміжними БПЛА (установка димових і аерозольних завіс, мінування і розмінування місцевості, доставка вантажів і т.п.).

Вибір джерел інформації для систем групового польоту БПЛА є одним з першорядних і актуальних завдань, що стоять перед розробниками. Це пояснюється тим, що сучасні бортові навігаційні системи не володіють достатньою точністю і не можуть бути використані для забезпечення групових польотів у

зімкнутих бойових порядках [4–5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У теперішній час проводяться інтенсивні дослідження щодо застосування різних фізичних принципів для створення вимірювачів положення БПЛА в строю. В якості вимірників навігаційних параметрів БПЛА пропонуються акустичні, ультразвукові, лазерні, радіоактивні, радіотехнічні та інші системи.

Перевагою акустичних і ультразвукових систем відзначається можливість забезпечення поширення сигналів тільки у межах максимально можливої дальності між БПЛА, що забезпечує високу стійкість і прихованість. Однак, властиві їм недоліки – мала швидкість, великі габарити апаратури і вплив неоднорідності атмосфери на розповсюдження звукових хвиль, не дозволяють створювати на їх основі досить ефективну систему управління [6].

Лазерні вимірювальні системи також можуть забезпечити необхідну точність визначення положення БПЛА у групі. Крім того, до складу бортового обладнання багатьох типів БПЛА для виявлення і розпізнавання цілей, вирішення прицільних завдань входить оптико-телевізійна система, яку доцільно використовувати додатково і в якості вимірювача параметрів строю. При цьому, так як промінь оптичного когерентного генератора вузький, то значні труднощі представляє організація збору БПЛА в групи, до того ж туман, дощ і дим сильно послаблює промінь лазера [7, с. 114].

Вимірювальні системи, що використовують рентгенівські промені, вимірюють відстань в діапазоні від 25 м до 700 м з точністю 2%. При цьому вимірюється азимут в межах від 0° до 360° з точністю 2° і кут місця до 45° з точністю 1°. Забезпечується вимір відносного перевищення до 150 м з точністю 20%. Висока точність вимірювання відстаней забезпечується застосуванням дуже коротких імпульсів тривалістю 10–100 нс.

Недолік застосування даних систем [7, с. 109] пов'язаний з обмеженням на кількість літальних апаратів в строю.

Існуючі в даний час радіотехнічні системи для вимірювання взаємних положень ЛА в повітрі використовують принцип “запит-відповідь” і “частота-час” і призначені для транспортних літаків і вертольотів. Так, в системі AN/APN-169 використаний частотно-часовий метод вимірювання відстаней і метод вимірювання напрямку на інший літак за допомогою обертової прийомної антени з вузькою діаграмою спрямованості. Забезпечує даними про взаємне положення 12 літаків або вертольотів. Максимальна дальність дії системи – 18,5 км, мінімальна – 60 м, точність вимірювання дальності  $\pm 5\%$  від вимірюваної дальності, точність визначення напрямку  $\pm 2^\circ$ . Система забезпечує виконання спільного польоту з мінімальною відстанню між літаками до 300 м [8, с. 26].

Бортові системи попередження зіткнень (СПС), засновані на методі “ЗАПИТ-ВІДПОВІДЬ” (SECANT, YG -1054, YG-1081, AVOID) призначені для використання на літаках з різними льотно-технічними характеристиками і на вертольотах [8, с. 41]. Система YG -1054, YG-1081 – діапазон дальності дії систем дорівнює 300–3600 м.

AVOID – дальність дії системи – 40 км, мінімальна допустима відстань між літаками для прийняття рішення про наявність загрози зіткнення 900 м.

SECANT – сигнал тривоги формується при входженні літака, що проникає в сферу радіусом 0,38 ... 6,5 км. Точність вимірювання пеленга дорівнює  $5^\circ$  в секторі  $\pm 15^\circ$ , первинне вимірювання дальності здійснюється з похибкою 150 м. В результаті статистичного усереднення середньоквадратична помилка (СКП) вимірювання дальності складає 5 м. Пропускна здатність не менш як 2000 літаків в радіусі приблизно 84 км.

Істотним недоліком вже розроблених систем є те, що вони дозволяють визначити параметри строю тільки в розосереджених бойових порядках (інтервали і дистанції в діапазоні 2–30 км).

**Мета статті** полягає в підвищенні точності міжоб'єктової навігації безпілотних літальних апаратів у групі при сумісному виконанні завдань за рахунок використання інформації від альтернативних систем навігації.

## Виклад основного матеріалу

У даній роботі пропонується використання методу позиціонування у режимі реального часу для визначення відстаней між БПЛА у групі при сумісному виконанні завдань. Даний метод передбачає цілу множину методів вимірювання відстані, але за показниками точності пропонується використання за основу методу симетричного двостороннього двонаправленого вимірювання відстані, який дозволяє забезпечити необхідну точність, не вдаючись до дорогої синхронізації. Метод регламентується стандартами ISO/IEC 24730-5 та IEEE 802.15.4-2011 [9].

У даному методі відстань вимірюється між двома бездротовими пристроями, що не синхронізовані між собою. Вимірювання здійснюється у процесі обміну пакетами: запит-відповідь. Послідовність обміну пакетами при вимірюванні показана на рис. 1. Ця технологія використовує два періоди часу, які природним чином присутні при передачі сигналу для визначення відстані між двома БПЛА. Це *time of flight* – час поширення сигналу між двома бездротовими пристроями і відомий, програмно встановлюваний час відклику ( $T_{\text{ВІДКЛИКУ}}$ ) – затримка відправлення підтвердження в бездротовому пристрої. Час (затримка) відклику визначається необхідністю обробки пакета запиту, довжина якого може складати декілька мілісекунд. Затримка відклик завжди набагато більша, ніж час поширення сигналу ( $T_{\text{ВІДКЛИКУ}} \gg T_{\text{ПС}}$ ), зазвичай становить кілька (до п'яти) мілісекунд і є основним джерелом похибки, пов'язаної з відхиленнями частоти тактових генераторів пристроїв. Інтервали часу вимірюються двома пристроями, які беруть участь у процесі вимірювання незалежно один від одного (пристрої не синхронізовані). Процес двостороннього двонаправленого вимірювання відстані ілюструється рис. 1. На рисунку кожен з пристроїв, що бере участь у процесі вимірювання – БПЛА № 1 і БПЛА № 2, має свою вісь часу. Для першого циклу вимірювання відзначені моменти відправлення запиту БПЛА № 1 ( $t_{\text{ВД1}}$ ), прийому запиту БПЛА № 2 ( $t_{\text{ОТР2}}$ ), відправлення підтвердження БПЛА № 2 ( $t_{\text{ВД2}}$ ) і прийому підтвердження БПЛА № 1 ( $t_{\text{ОТР1}}$ ). БПЛА № 1 починає цикл вимірювання відправкою запиту БПЛА № 2 у момент  $t_{\text{ВД1}}$ . БПЛА № 2 фіксує момент отримання пакета ( $t_{\text{ОТР2}}$ ), однак не може визначити час поширення сигналу  $T_{\text{ПС}}$ , так як не знає час його відправлення. Замість цього БПЛА № 2, зачекавши час затримки  $T_{\text{ВІДКЛИКУ2}}$ , у момент  $t_{\text{ВД2}}$  відправляє БПЛА № 1 підтвердження.

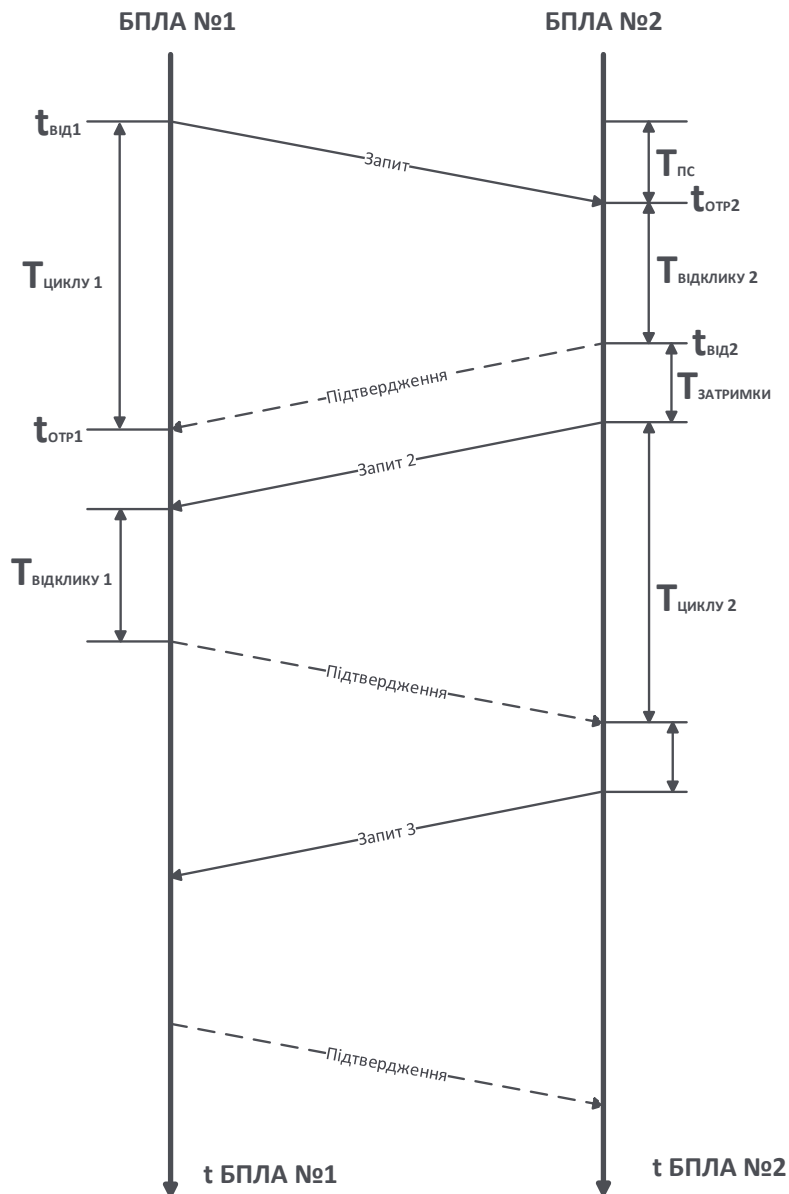


Рис. 1. Обмін пакетами в процесі виміру відстані методом SDS-TWR  
Джерело: розроблено авторами за даними [9, с. 41].

Після цього БПЛА № 1, отримавши в момент ( $t_{отр1}$ ) підтвердження, може визначити час циклу вимірювання:

$$T_{циклу1} = t_{отр1} - t_{від1}. \quad (1)$$

Тепер, знаючи час циклу і час відклику, здавалося б, легко визначити подвійний час поширення сигналу між БПЛА № 1 і БПЛА № 2:

$$2T_{пс} = T_{циклу1} - T_{відклик2}. \quad (2)$$

Але проблема у тому, що  $T_{циклу1}$  і  $T_{відклик2}$  виміряні різними пристроями, кожний з яких має свою похибку опорного генератора  $E_{БПЛА1}$  і  $E_{БПЛА2}$ .

Відповідно до ISO 24730-5 похибка опорного генератора пристрою не повинна перевищувати 80

ppm (часток на мільйон).

Тому, з урахуванням похибок опорних генераторів, вираз можна переписати так:

$$2\hat{T}_{пс} = T_{циклу1} \times (1 + E_{БПЛА1}) - T_{відклик2} \times (1 + E_{БПЛА2}), \quad (3)$$

де  $\hat{T}_{пс}$  – фактичний час поширення сигналу.

Легко визначити, що різниця між виміряним і фактичним часом поширення сигналу складе:

$$\hat{T}_{пс} - T_{пс} = (T_{відклик2} \times E_{БПЛА1} - T_{відклик2} \times E_{БПЛА2} + 2T_{пс} \times E_{БПЛА2}) / 2, \quad (4)$$

або, враховуючи, що ( $T_{відклик2} \gg T_{пс}$ ):

$$\hat{T}_{пс} - T_{пс} = T_{відклик2} \times (E_{БПЛА1} - E_{БПЛА2}) / 2. \quad (5)$$

Якщо врахувати, що затримка відклику складає 5 мс і величина різниці похибок опорних генераторів дорівнює 20 ppm, то різниця між виміряним і фактичним часом поширення сигналу досягне 50 нс. У табл. 1 наведені типові величини помилок двонаправленого виміру відстані при різних величинах різниці похибок опорних генераторів і затримки відклику.

Враховуючи, що за одну наносекунду радіосигнал поширюється на 30 см, то точності одного циклу виміру відстані буде недостатньо навіть для виміру відстані з точністю до метра.

Таблиця 1

Залежність похибки виміру часу  $\hat{T}_{ПС}$  від  $T_{ВІДКЛИКУ}$  та різниці похибок опорних генераторів

$T_{відклику}$	$E_{БПЛА1} - E_{БПЛА2}$			
	2 ppm	20 ppm	40 ppm	80 ppm
100 мкс	0.1 нс	1 нс	2 нс	4 нс
5 мс	5 нс	50 нс	100 нс	200 нс

Джерело: розроблено авторами.

Як згадувалося вище, вимірювання відстані між БПЛА № 1 і БПЛА № 2 здійснюється у процесі обміну парами пакетів запит-підтвердження. Тобто пристрій, що ініціює зв'язок, направляє запит, а у відповідь отримує підтвердження.

Безпосередній процес вимірювання методом симетричного двостороннього двонаправленого вимірювання відстані складається з двох симетричних зустрічно спрямованих (дзеркальних) циклів.

У першому циклі БПЛА № 1 направляє БПЛА № 2 пакет-запит. БПЛА № 2, отримавши запит, обробляє його і відправляє БПЛА № 1 пакет-підтвердження. При цьому БПЛА № 2 відправляє підтвердження з затримкою  $T_{ВІДКЛИКУ2}$ . БПЛА № 1, отримавши підтвердження, визначає час циклу вимірювання ( $T_{ЦИКЛУ1}$ ).

Цей час дорівнює подвоєному часу поширення сигналу ( $T_{ПС}$ ) плюс  $T_{ВІДКЛИКУ2}$ .

На цьому перший цикл вимірювання завершується.

Другий цикл вимірювання починається з того, що вже БПЛА № 2, почекавши після відправки підтвердження час, необхідний для завершення першого циклу ( $T_{ЗАТРИМКИ}$ ), спрямовує до БПЛА № 1 пакет-запит, включивши до нього в якості корисного навантаження значення  $T_{ВІДКЛИКУ2}$ . БПЛА № 1, отримавши запит, так само, як БПЛА № 2 в першому циклі, обробляє запит і повертає підтвердження БПЛА № 2, запам'ятовуючи  $T_{ВІДКЛИКУ2}$ .

БПЛА № 2, отримавши підтвердження від

БПЛА № 1, визначає значення  $T_{ЦИКЛУ2}$  і відправляє це значення БПЛА № 1 з подальшим запитом.

У результаті БПЛА № 1 отримує всю необхідну для визначення часу поширення сигналу інформацію, яку згодом використовує для визначення відносної відстані між членами групи БПЛА. З рис. 1 видно, що:

$$T_{ПС} = (T_{ЦИКЛУ1} + T_{ЦИКЛУ2} - T_{ВІДКЛИКУ1} - T_{ВІДКЛИКУ2}) / 4. \quad (6)$$

З урахуванням похибок опорних генераторів виміряний час поширення сигналу складе:

$$\hat{T}_{ПС} = (T_{ЦИКЛУ1} - T_{ВІДКЛИКУ1}) \times (1 + E_{БПЛА1}) / 4 + (T_{ЦИКЛУ2} - T_{ВІДКЛИКУ2}) \times (1 + E_{БПЛА2}) / 4. \quad (7)$$

Якщо тепер  $T_{ВІДКЛИКУ1}$  і  $T_{ВІДКЛИКУ2}$  замінити на

$$T_{ВІДКЛИКУ1} = T_{ВІДКЛИКУ}; \quad (8)$$

$$T_{ВІДКЛИКУ2} = T_{ВІДКЛИКУ} + \Delta_{ВІДКЛИКУ},$$

а модуль максимальної похибки  $E_{БПЛА1}$  і  $E_{БПЛА2}$  позначити  $E_{макс}$ , то після нескладних перетворень отримаємо такий вираз для модуля похибки:

$$|\hat{T}_{ПС} - T_{ПС}| = |\Delta_{ВІДКЛИКУ}| \times E_{макс} / 2. \quad (9)$$

Оскільки  $\Delta_{ВІДКЛИКУ}$  при дотриманні вимог стандарту ISO24730-5 не перевищує однієї мкс (табл. 2), очевидно, що похибка вимірювання часу поширення сигналу, пов'язана з відсутністю синхронізації, в разі використання методу симетричного двостороннього двонаправленого вимірювання відстані є знехтовно малою.

Таблиця 2

Залежність похибки виміру часу  $\hat{T}_{ПС}$  від різниці похибок опорних генераторів

$\Delta_{відклику}$ $T_{відклику}$	$E_{макс}$			
	2 ppm	20 ppm	40 ppm	80 ppm
1 мкс	1 пс	10 пс	20 пс	40 пс

Джерело: розроблено авторами.

### Пошук напрямку за допомогою фазового пеленгування

Пропонується за основу визначення кута прибуття сигналу використання методу визначення кута прибуття сигналу, одна із реалізацій якого описана в стандарті ядра Bluetooth версії 5.1.

Загальна схема роботи методу зображена на рис. 2.

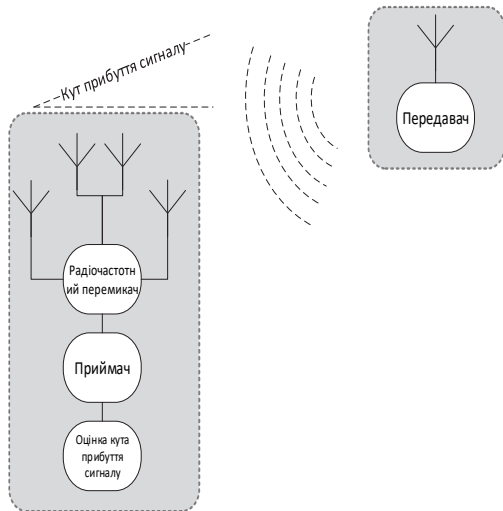


Рис. 2. Метод визначення кута прибуття сигналу  
Джерело: розроблено авторами за даними [10, с. 3830].

Пристрій може зробити напрямок на себе доступним для однорангового пристрою шляхом передачі параметрів пошуку, що знаходяться у режимі очікування за допомогою однієї антени. Пристрій-отримувач, що складається з радіочастотного перемикача та антени, вимикає антени під час отримання частини цих пакетів та захоплює сигнал. Зразки отриманого сигналу можуть бути використані для розрахунку різниці фаз у радіосигналі, отриманому з використанням різних елементів набору антен, який, у свою чергу, може бути використаний для оцінки кута прибуття.

Розглянемо пристрій приймача з антеною, що складається з набору антен, розділених відстанню  $d$  (рис. 3). Пристрій передавача використовує одну антену для передачі сигналу. Може бути побудована перпендикулярна до фронту поширення сигналу лінія, спрямована на приймальну антену. Ця лінія називається лінія візування антен.

Сусідня сторона цього прямокутного трикутника являє собою відмінність шляху відносно кута падіння цього хвильового фронту між двома антенами. Різниця фаз  $\varphi$  сигналу, отриманого на двох антенах, визначається за формулою:

$$\varphi = (2\pi d \cos(\alpha)) / \lambda, \quad (10)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі сигналу;

$\alpha$  – кут прибуття сигналу.

З формули (10) можна визначити кут прибуття сигналу:

$$\alpha = \arccos((\varphi\lambda)/(2\pi d)). \quad (11)$$

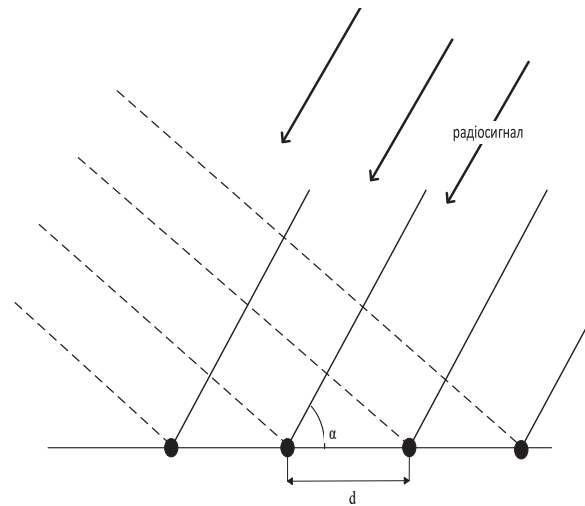


Рис. 3. Вимір кута прибуття сигналу  
Джерело: розроблено авторами за даними [9, с. 3831].

Використовуючи інформацію про відстань до БПЛА у групі, отриману за допомогою методу SDS-TWR, та інформацію про кут приходу сигналу виміру та після переведення з сферичної системи координат в прямокутну систему координат отримаємо вектор положення БПЛА в зв'язаній системі координат головного БПЛА [11, с. 34].

### Переведення координат у зв'язану систему координат для забезпечення об'єднання різномірної навігаційної інформації

Користуватися декількома різними системами координат необхідно з таких причин:

– рівняння руху Ньютона виведені відносно нерухокої інерціальної системи відліку.

Однак рух найпростіше описується в системі відліку нерухокого тіла або зв'язаній системі;

– аеродинамічні сили й моменти, що діють на корпус літака, також найпростіше описуються в зв'язаній системі відліку;

– бортові датчики, такі як акселерометри і датчики кутової швидкості, отримують інформацію відносно зв'язаної системи координат.

Альтернативно цьому GPS визначає положення, швидкість відносно Землі і курсовий кут відносно інерційної системи координат.

Одна система координат перетворюється в іншу за допомогою двох базових операцій: повороту і зсуву [12, с. 3].

Розглянемо дві системи координат, представлені на рис. 4.

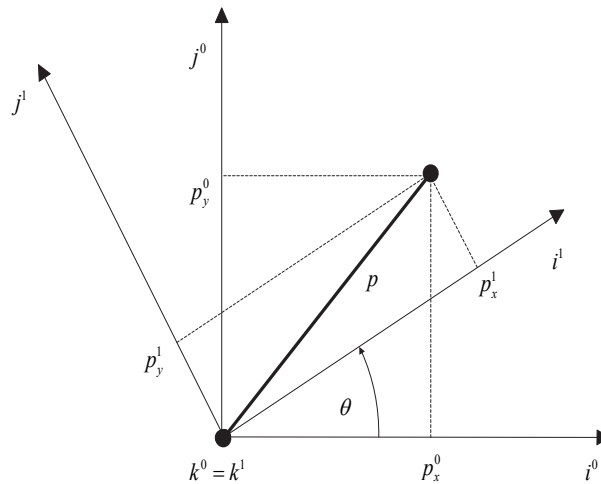


Рис. 4. Поворот в двовимірному просторі  
Джерело: розроблено авторами за даними [12, с. 4].

Вектор  $\mathbf{p}$  може бути виражений в системі координат  $F^0$  (заданій  $(i^0, j^0, k^0)$ ) і в системі координат  $F^1$  (заданій  $(i^1, j^1, k^1)$ ). В системі координат  $F^0$  маємо:

$$\mathbf{p} = p_x^0 i^0 + p_y^0 j^0 + p_z^0 k^0. \quad (12)$$

Альтернативно цьому в системі відліку  $F^1$  маємо:

$$\mathbf{p} = p_x^1 i^1 + p_y^1 j^1 + p_z^1 k^1. \quad (13)$$

Системи векторів  $(i^0, j^0, k^0)$  і  $(i^1, j^1, k^1)$  окремо взаємно перпендикулярні системі одиничних базисних векторів. Прирівнюючи обидва ці вирази один одному, отримаємо:

$$p_x^1 i^1 + p_y^1 j^1 + p_z^1 k^1 = p_x^0 i^0 + p_y^0 j^0 + p_z^0 k^0. \quad (14)$$

Взявши скалярний добуток обох сторін з  $i^1, j^1, k^1$  відповідно і сформувавши отримані результати в матричному вигляді, отримаємо:

$$p_x^1 i^1 + p_y^1 j^1 + p_z^1 k^1 = p_x^0 i^0 + p_y^0 j^0 + p_z^0 k^0. \quad (15)$$

З геометрії на рис. 3 отримаємо:

$$p^1 = R_0^1 p^0, \quad (16)$$

де

$$R_0^1 = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Символ  $R_0^1$  використовується для позначення повороту з системи координат  $F^0$  в систему координат  $F^1$ . Введемо інерційну систему координат. Інерціальна система координат пов'язана з Землею з початком відліку в заданому вихідному положенні. Одиничний вектор  $i^i$  спрямований на північ,  $j^i$

спрямований на схід, а  $k^i$  направлений до центру Землі або вниз. Цю систему координат іноді називають системою відліку північ-схід-вниз по вертикалі (ПСВ).

Зазвичай напрямок на північ позначають інерціальним  $x$ , на схід – інерціальним  $y$ , а напрямок вниз – інерціальним  $z$ .

Шляхом паралельного переносу з інерційної системи координат в центр мас головного БПЛА в групі отримаємо групову систему координат  $F^g$ . Початок відліку цієї системи координат знаходиться в центрі мас головного БПЛА. Однак осі системи  $F^g$  збігаються з осями інерційної системи координат  $F^i$ . Іншими словами, одиничний вектор  $i^g$  спрямований на північ,  $j^g$  спрямований на схід, а вісь  $k^g$  направлена в центр Землі. Перетворення системи координат  $F^i$  в систему координат  $F^g$  дається виразом:

$$\mathbf{p}^g = M_i^g (x^g, y^g, z^g) \mathbf{p}^i, \quad (18)$$

де

$$M_i^g = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x^g \\ 0 & 1 & 0 & y^g \\ 0 & 0 & 1 & z^g \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

де  $x^g, y^g, z^g$  – координати БПЛА в інерційній системі координат.

Система координат літального апарата  $F^u$ . Початок відліку цієї системи координат знаходиться в центрі мас БПЛА. Однак осі системи  $F^u$  збігаються з осями інерційної системи координат  $F^i$ . Проте, значення вимірів акселерометра, магнетометра, гіроскопа та приладів, що визначають відносну

відстань та кут приходу сигналу згідно описаних методів, отримуються в зв'язаній системі координат  $F^b$ .

Вона може бути отримана шляхом повороту системи координат літального апарату навколо осі  $k^u$  на кут ристання  $\psi$ , за годинниковою стрілкою навколо осі  $j^u$  на кут тангажу  $\theta$  та за годинниковою стрілкою навколо осі  $i^u$  на кут крену  $\phi$ .

Матриця повороту в даному випадку прийме вигляд:

$$R_u^b = \begin{pmatrix} c\theta c\psi & c\theta s\psi & -s\theta \\ s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi c\theta \\ c\phi s\theta c\psi - s\phi s\psi & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi & c\phi c\theta \end{pmatrix}, \quad (20)$$

де  $c\phi = \cos \phi, s\phi = \sin \phi$ .

Пропонується інтеграція розробленого методу міжоб'єктової навігації БПЛА в існуючу навігаційну систему БПЛА (рис. 5).

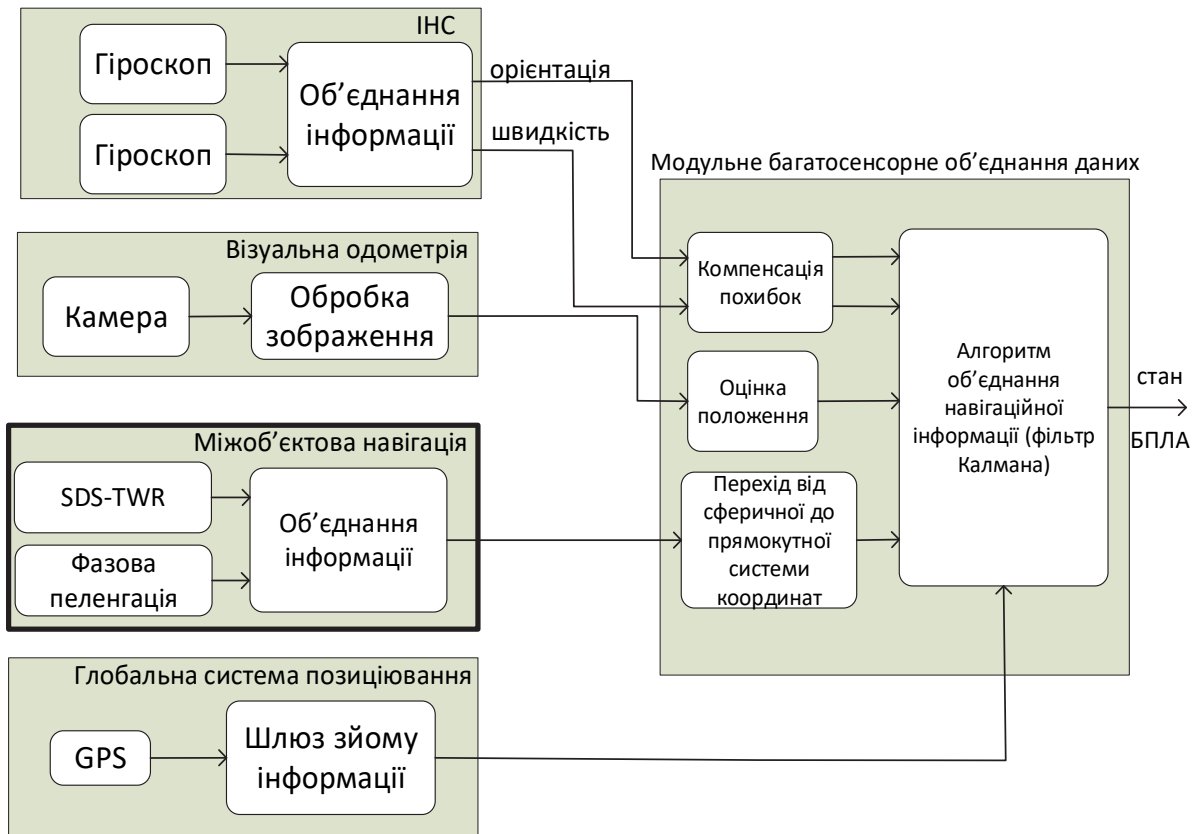


Рис. 5. Функціональна схема навігаційної системи БПЛА

Джерело: розроблено авторами.

Отримавши групову прямокутну систему координат, у нас з'являється можливість обробки інформації, отриманої за допомогою систем супутникової навігації, в єдиному координатному просторі.

Загальна схема роботи розробленого методу зображена на рис. 6.

Поставлене завдання з підвищення точності міжоб'єктової навігації БПЛА у групі при сумісному виконанні завдань вирішено.

У подальшому планується проведення імітаційного моделювання, що дозволить визначити основні показники точності розробленої модифікації навігаційної системи БПЛА.

## Висновки

Проведений аналіз сфер групового застосування БПЛА. Визначено, що вибір джерел навігаційної інформації є актуальним завданням для систем групового польоту БПЛА. Обґрунтовано, що існуючі навігаційні системи не дозволяють забезпечити політ групи БПЛА у зімкнутих бойових порядках. Запропоновано використання симетричного двохстороннього двонаправленого вимірювання відстані та метод фазової пеленгації сигналу, описаний в стандарті. У статті обґрунтовано необхідність використання різних систем координат для визначення положення групи БПЛА у просторі.

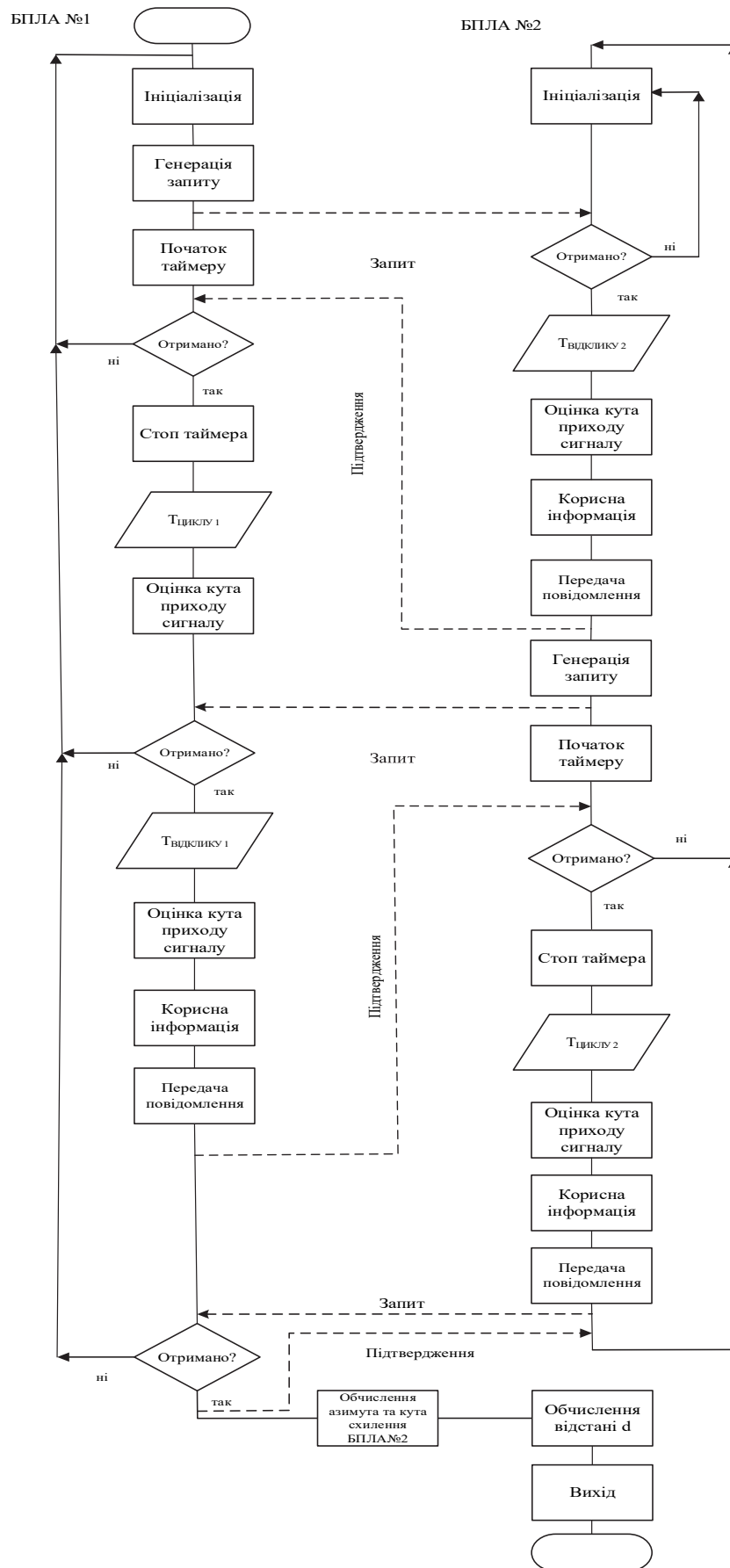


Рис. 6. Алгоритм роботи запропонованого методу навігації  
Джерело: розроблено авторами.



Запропоновано спосіб переходу між системами координат за допомогою матриць повороту. Наведено алгоритм роботи розробленого методу навігації. Запропоновано інтеграцію розробленого методу

навігації в існуючу навігаційну систему БПЛА. В подальших дослідженнях планується виконання імітаційного моделювання для визначення основних показників точності розробленого методу.

## Список літератури

1. Павлушенко М. И., Ефстафьев Г. М., Макаренко И. К. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития. Москва : Изд-во ПИАР-центра, 2005. 610 с.
2. Milov O., Yevseiev S., Ivanchenko Y., Milevskiy S., Nesterov O., Puchkov O., Salii A., Timochko O., Tiurin V., Yarovy A. Development of the model of the antagonistic agents behavior under a cyber conflict. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. No. 4(100). P. 6-19.
3. Тимочко О. І., Тристан А. В., Чернавина О. С., Бережний А. О. Метод планування маршруту ведення повітряної розвідки динамічних об'єктів з використанням безпілотних літальних апаратів в лісостеповій місцевості. *Системи обробки інформації*. 2020. № 3(162). С. 95-110. <https://doi.org/10.30748/soi.2020.162.10>.
4. Tymochko O., Timochko O., Trystan A., Matiushchenko O., Berezhnyi A. Method of Automated Flight Route Planning for Unmanned Aerial Vehicles to Search for Stationary Objects. *2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, 2020. P. 242-246.
5. Моисеев В. С. Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов : монография. Казань : РИЦ "Школа", 2015. 444 с.
6. Kapoor R., Ramasamy S., Gardi A., Schyndel R. V., Sabatini R. Acoustic Sensors for Air and Surface Navigation Applications. *Sensors (Basel)*. 2018. No. 18(2). P. 499.
7. Цупин А. А., Слободян С. М. Лазерные средства навигационного оборудования для ориентирования подвижных объектов. Москва : Мэйлер, 2013. 166 с.
8. Reed C. OGC CDB Radar Cross Section (RCS) Models (Best Practice). *OGC Public Document Repository - Open Geospatial Consortium*. URL: <https://docs.ogc.org/bp/16-004r5.html> (accessed 01.10.2021).
9. ISO/IEC JTC 1/SC 31. Information technology – Real-time locating systems (RTLS) – Part 5: Chirp spread spectrum (CSS) at 2,4 GHz air interface. 2010. URL: <https://www.iso.org/standard/46534.html> (accessed 01.10.2021).
10. Ngoc Hung N., Kutluyil D. Closed-Form Algebraic Solutions for Angle-of-Arrival Source Localization With Bayesian Priors. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2019. Vol. 18. No. 8. P. 3827-3842.
11. State Estimation of Multiagent Systems Under Impulsive Noise and Disturbances / L. R. G. Carrillo et al. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2015. Vol. 23. No. 1. P. 13-26. <https://doi.org/10.1109/tcst.2014.2309911>.
12. Curtright T. L., Fairlie D. B., Zachos C. K. Compact Formula for Rotations as Spin Matrix Polynomials. *Symmetry, Integrability and Geometry: Methods and Applications*. 2014. No. 10. P. 1-15.

Надійшла до редколегії 20.09.2021

Схвалена до друку 16.11.2021

### Відомості про авторів:

#### Фустій Вадим Сергійович

ад'юнкт  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-4763-533X>

#### Тимочко Олександр Іванович

доктор технічних наук професор  
професор кафедри Харківського  
національного університету  
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-4154-7876>

#### Ситник Юрій Борисович

кандидат технічних наук  
завідувач кафедри Льотної академії  
Національного авіаційного університету,  
Кропивницький, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-0966-691X>

### Information about the authors:

#### Vadym Fusti

Post-Graduate  
of Ivan Kozhedub Kharkiv  
National Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-4763-533X>

#### Alexander Tymochko

Doctor of Engineering Science Professor  
Professor of Department  
of Ivan Kozhedub Kharkiv National  
Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-4154-7876>

#### Yuriy Sytnyk

PhD in Engineering  
Head of Department  
of Flight Academy of National Aviation University,  
Kropyvnytsky, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-0966-691X>

**Афанасьєв Володимир Володимирович**  
докторант  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-2978-0023>

**Volodymyr Afanasiev**  
Doctoral Candidate  
of Ivan Kozhedub Kharkiv  
National Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-2978-0023>

**Титаренко Олександр Борисович**  
кандидат військових наук  
доцент Національного університету  
оборони України ім. І. Черняхівського,  
Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-3992-9314>

**Oleksandr Tytarenko**  
PhD in Military Science  
Associate Professor of the National Defence University  
of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy,  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3992-9314>

**Степанов Григорій Сергійович**  
кандидат військових наук доцент  
доцент Національного університету  
оборони України ім. І. Черняхівського,  
Київ, Україна  
<http://orcid.org/0000-0002-9190-2821>

**Hrygorii Stepanov**  
PhD in Military Science Associate Professor  
Associate Professor of the National Defence University  
of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy,  
Kyiv, Ukraine  
<http://orcid.org/0000-0002-9190-2821>

## МЕТОД МЕЖОБЪЕКТНОЙ НАВИГАЦИИ БПЛА НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ОТ КЛАССИЧЕСКИХ И АЛЬТЕРНАТИВНЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ

В.С. Фустий, А.И. Тимочко, Ю.Б. Ситник, В.В. Афанасьев, А.Б. Титаренко, Г.С. Степанов

*В статье разработан метод межобъектной навигации БПЛА в группе. Предложенный подход позволяет повысить точность межобъектной навигации. Сущность подхода заключается в сочетании двух методов навигации, позволяющих определить различные навигационные характеристики. Метод симметричного двустороннего двунаправленного измерения расстояния позволяет измерять расстояние между БПЛА в группе на основе измерения времени распространения сигнала между ними. Отсутствие синхронизации и работа в двунаправленном режиме снижает себестоимость устройств и повышает точность измерения расстояния. Для определения направления на источник сигнала предложено использование метода фазовой пеленгации сигнала. За счет объединения информации, полученной с использованием предложенных методов, получена полная информация о положении БПЛА относительно друг друга - расстояние и направление на соседний БПЛА. После выполнения измерения расстояния и направления ко всем участникам группы и перевода полученных данных со сферической в прямоугольную систему координат получим информацию о взаимном расположении всех БПЛА в группе в связанной системе координат главного БПЛА. Предложена интеграция разработанного метода навигации в существующую навигационную систему БПЛА.*

**Ключевые слова:** БПЛА, группа БПЛА, межобъектная навигация.

## METHOD OF INTER NAVIGATION OF UAV BASED ON INTEGRATED INFORMATION PROCESSING FROM CLASSICAL AND ALTERNATIVE NAVIGATION SYSTEMS

V. Fustii, A. Tymochko, Yu. Sytnyk, V. Afanasiev, O. Tytarenko, H. Stepanov

*Currently, group use of various types of UAVs is a promising and up-to-date area of use in solving a wide range of military and civil tasks. The choice of sources of information for systems of the UAV group is one of the primary and up-to-date tasks facing developers, since modern onboard navigation systems do not have sufficient accuracy and can not be used to provide group flights to closed combat orders. In this cause, the main goal of this article is to increase the accuracy of the intergovernmental navigation of unmanned aerial vehicles in a group with a compatible execution of tasks by using information from alternative navigation systems. The article has developed a method of inter-object navigation of UAV in group. The proposed approach makes it possible to increase the accuracy of the intersective navigation. The entity of the approach is to combine two navigation methods, allow you to identify various navigation characteristics. The method of symmetric bilateral bidirectional distance measurement allows you to measure the distance between the UAV in the group based on measuring the time of the signal of the signal between them. The lack of synchronization and operation in the dynamic mode reduces the generation of devices and improves the accuracy of measuring the distance. To determine the direction to the source of the signal proposed the use of the signal phase delaying method. By combining information obtained with the use of the proposed methods, complete information was obtained on the position of the UAV relative to each other - the distance and direction on the neighboring UAV. After performing the measurement of the distance and the directions to all the groups of the group and the transfer of the obtained data from the spherical to the rectangular coordinate system, we obtain information about the mutual location of all the UAVs in the group in the associated coordinate system of the main UAV. The integration of the developed method of navigation to the existing Navigation system of the UAV has been proposed.*

**Keywords:** UAV, UAV swarm, inter-object navigation.