

Л. Б. Каневський, В. А. Пашинський, О. С. Колісник, Н. А. Бедрій

МЕТОД ВИДІЛЕННЯ ТОЧОК ПРИВ'ЯЗКИ НА АЕРОФОТОЗНІМКАХ, ОТРИМАНИХ БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ, ДЛЯ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ПІД ЧАС АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЇ

Ретроспективний аналіз застосування безпілотних авіаційних комплексів у зоні проведення бойових дій вказує на постійне підвищення інтенсивності застосування противником засобів радіоелектронної боротьби, що знижує ефективність виконання розвідувальних польотів безпілотних літальних апаратів, а в деяких випадках призводить до їх втрати. У статті розглянуто перспективи створення та вдосконалення високоточних навігаційних систем, що на сьогодні є одним із пріоритетних напрямків розвитку безпілотних авіаційних комплексів та актуальним для забезпечення високої ефективності застосування безпілотних літальних апаратів як цивільного, так і військового призначення.

Для розробки та дослідження методів й алгоритмів для локалізації положення безпілотного літального апарата на основі зображень місцевості, отриманих неідентичними засобами знімання, з урахуванням впливу на нього засобів радіоелектронної боротьби у статті передусім розглянуто підходи до зіставлення зображень земної поверхні як основної інформаційної складової. Наступним етапом проведено оцінювання правильності вибору інформативних параметрів точок прив'язки, де математична модель для їх опису та виділення є основою для розробки методів й алгоритмів формування автономної навігаційної системи безпілотних літальних апаратів. З урахуванням проведених досліджень було запропоновано реалізувати на борту дрона інтелектуальну інформаційно-розрахункову систему автономної навігації, алгоритм роботи якої ґрунтується на логічній основі дескриптора SIFT.

Завдяки програмній реалізації запропонованих у роботі підходів та отриманих на їх основі експериментальних результатів можливим є розвиток та подальше удосконалення методів позиціонування безпілотних літальних апаратів у просторі.

Ключові слова: *безпілотний авіаційний комплекс; автономна навігація безпілотних літальних апаратів; еталонні та поточні зображення; машинний спосіб позиціонування; алгоритм прив'язки на логічній основі дескриптора SIFT.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. Тенденція ведення бойових дій вказує на значущість застосування безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) у системі розвідувально-інформаційного забезпечення своїх військ. Не менш затребуваними такі засоби є й у цивільних галузях. Поряд із цим зростає складність навігаційного забезпечення безпілотних літальних апаратів (БпЛА), що є елементами БпАК, у зв'язку з підвищенням вимог, які висуваються до них в умовах складної перешкодової обстановки, зокрема, створеної засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ) тощо.

Розроблення та вдосконалення високоточних навігаційних систем є одним із пріоритетних напрямків розвитку сучасної навігаційної техніки (технології) та актуальним

© Л. Б. Каневський, В. А. Пашинський, О. С. Колісник, Н. А. Бедрій, 2021

для забезпечення високої ефективності застосування БпЛА як цивільного, так і військового призначення [1–5]. Сучасні високоточні системи навігації БпЛА базуються на використанні інерційних навігаційних систем (ІНС) [4, 6], які можуть бути доповнені як системами супутникової корекції [2, 7], так і системами навігації по геофізичних полях Землі [3, 8, 9].

Переважає більшість вітчизняних систем навігації БпЛА ґрунтується на комплексуванні ІНС із системами супутникової корекції. Використання даного способу є достатньо простим і ефективним в умовах стійкого прийому сигналів супутникової навігації, однак такий спосіб має низку недоліків, які полягають у низькій перешкодостійкості системи корекції та неавтономності функціонування. Ретроспективний аналіз застосування БпЛА у зоні проведення бойових дій [10, 11] вказує на постійне зростання інтенсивності застосування противником засобів РЕБ, що знижує ефективність виконання розвідувальних польотів БпЛА, а в деяких випадках призводить до їх втрати. Усе це вимагає створення та вдосконалення високоточних навігаційних систем БпЛА з високою стійкістю функціонування в умовах інтенсивного застосування засобів РЕБ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Швидкий розвиток технічних (бортових) складових БпЛА зумовлює вдосконалення їх навігаційного забезпечення, зокрема для застосування в умовах поганого прийому сигналів супутникової навігації. З-поміж основних напрямків удосконалення можна виокремити такі:

1) використання багатостационарних локальних радіотехнічних систем ближньої навігації типу VOR/DME (Very high frequency Omni directional radio Range / Distance Measuring Equipment) або систем – імітаторів сигналів супутникової навігації [12, 13]. Станції цих систем можуть бути мобільними, облаштованими на автомобілях, але для їх розгортання необхідно завчасно передбачити розміщення в зоні планованого застосування БпЛА. Аналіз використання подібних систем вказує на те, що відношення сигнал / шум підвищується на 35–50 дБ у зоні подавлення (або поганого прийому) сигналів супутникової навігації (космічного базування), а прийом навігаційних сигналів у разі потужностей активних шумових і доплерівських перешкод у зоні дії локальних радіотехнічних систем забезпечується до 100 Вт [13];

2) використання для навігації електронних карт місцевості, політ за якими здійснюється відповідно до даних радіо- або лазерного висотоміра, радіолокаційних станцій або оптико-електронних систем видимого діапазону за методами кореляційно-екстремальної обробки [8, 14, 15];

3) автономний прямолінійний політ БпЛА в напрямку цілі підсвічується зовнішнім джерелом випромінювання [16];

4) використання для навігації різних автономних систем технічного зору [17], а також технології SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) – технології автоматичної одночасної побудови карти місцевості в невідомому просторі, контролю поточного місця розташування БпЛА і пройденого шляху [18–20].

Запропоновані в роботах [12, 13] підходи доцільно використовувати для цивільних дронів. Для застосування БпЛА у військових цілях (повітряна розвідка противника, його ураження ударними БпЛА тощо), зокрема в зоні ведення бойових дій, такий підхід є менш

реалістичним, бо унеможлиблюється розміщення багатостационарних локальних радіотехнічних систем ближньої навігації на території позиціонування противника, у районі якого необхідно забезпечити планове застосування БпЛА.

Методи, описані в публікаціях [8, 14, 15], є перспективними, але супроводжуються низкою вимог та проблем, пов'язаних зі складністю їх реалізації. Зокрема, одні з них потребують формування високоякісних тривимірних еталонних зображень карт місцевості, де необхідно забезпечити планове застосування БпЛА. В інших методах відсутні підходи до суміщення (використання інформативних параметрів прив'язки) еталонних оптико-електронних зображень місцевості з поточними знімками, отриманими від датчиків неоднакової фізичної природи, також у запропонованих методах не формалізовано порядку вибору початкових еталонних зображень прив'язки з урахуванням довжини та непрямолінійності побудови маршруту польоту БпЛА.

Підходи, розглянуті в [16], передбачають використання групи БпЛА або спільне застосування пілотованих та безпілотних бойових систем, навігаційне забезпечення яких має низку тотожних проблем, описаних вище.

Перспективи реалізації методів, запропонованих у роботах [17–20], свідчать про автономність навігаційної системи БпЛА, але їх застосування на вітчизняних зразках із використанням облаштованої на них цільових та інших бортових приладів, зокрема ІНС, потребує додаткового вивчення. До того ж дані публікації в повній мірі не розкривають особливостей реалізації запропонованих методів на борту БпЛА, а програмні коди для їх інтеграції в БпАК є закритими програмними продуктами, опис яких має лише рекомендаційний характер, без апробації на реальних зразках озброєння.

Формулювання завдання дослідження. Через різні обставини сигнал із навігаційних супутників може бути недоступний або втрачений, а точність інерційних систем не завжди дозволяє ефективно вирішувати цільові завдання, що, як правило, призводить до аварій БпЛА. Тому є необхідність дублювання таких систем навігації шляхом використання системи, що ґрунтується на зіставленні поточного зображення (ПЗ) місцевості, зробленого з борту БпЛА, з її еталонним зображенням (ЕЗ), отриманим з аерофотознімків або супутникових знімків території, над якою буде відбуватися політ. Відповідно, метою статті є розробка та дослідження методів і алгоритмів для локалізації положення БпЛА на основі зображень місцевості, отриманих неідентичними засобами знімання, з урахуванням впливу на нього засобів РЕБ.

Виклад основного матеріалу. Головна ідея створення автономної навігаційної системи для БпЛА полягає в реалізації візуального способу (машинного зору) його позиціонування шляхом зіставлення ЕЗ, завчасно сформованих на весь маршрут польоту БпЛА (наприклад, з аерокосмічних знімків), із ПЗ, що отримуватимуться цільовою бортовою апаратурою БпЛА (оптико-електронними засобами, зокрема, фотоапаратом). Основні труднощі в ході розробки таких методів і алгоритмів полягають в тому, що дані, які використовуються для зіставлення, можуть істотно відрізнитися внаслідок різних сезонних умов отримання ЕЗ земної поверхні та їх роздільної здатності в порівнянні з ПЗ, отриманими БпЛА під час польоту. Крім того, у ПЗ додатково виникають викривлення, зумовлені просторовим положенням самого БпЛА та ракурсом знімання його цільовою бортовою апаратурою. Зазначені питання потребують пошуку оптимальних рішень, але не є

предметом досліджень наведених у цій статті. Паралельно з цим для вироблення прикладних підходів до створення автономної навігаційної системи БПЛА є необхідність пошуку стійких інформативних параметрів зображень геофізичних полів земної поверхні та принципів їх використання (зіставлення) для визначення просторового положення БПЛА під час виконання ним польотного завдання.

Відомі методи [8, 13, 17, 19, 20] для порівняння зображень, ґрунтуються на зіставленні знань про зображення в цілому. У загальному випадку це виглядає таким чином: для кожної точки зображення обчислюється значення певної функції, на підставі цих значень можна надати зображенню певну характеристику. Відповідно, задача порівняння зображень зводиться до задачі порівняння їх характеристик. Такі методи працюють тільки в ідеальних ситуаціях за відсутності: появи нових об'єктів на зображенні; перекриття одних об'єктів іншими; шумів; зміни масштабу зображення, положення об'єкта на ньому, положення камери в тривимірному просторі; освітленості місцевості тощо. Прогресивність подальших підходів полягає в уникненні таких проблем за рахунок пошуку та вибору спеціальних точок прив'язки, інформативні параметри яких мають високий рівень відмінності на загальному фоні земної поверхні. Це дасть змогу проводити зіставлення двох зображень шляхом їх заміни деякою моделлю (набором їх ключових точок). Відповідно, основна ідея полягає у створенні такого детектора та принципів його роботи, що дозволить не лише виділяти подібні точки прив'язки, а й забезпечить інваріантність зіставлення ПЗ із ЕЗ для автономного функціонування ІНС БПЛА тощо.

Формалізовано постановка задачі матиме такий вигляд:

$$\begin{cases} Z = f(x, y, z) + \delta f \\ \delta f = \delta f_1 + \delta f_2 \\ \delta f \rightarrow \min \end{cases}, \quad (1)$$

де Z – m -мірний вектор спостереження, виражений залежністю навігаційного поля $f(x, y, z)$ від координат місця положення x, y – горизонтальних координат руху БПЛА;

z – вертикальна координата рухомого об'єкта;

δf – сума похибок визначення значень поля в точці (x, y, z) , що відповідає значенню δf_1 , і похибок прив'язки δf_2 .

Використовуючи лінійне рівняння контрольованого процесу руху БПЛА, яке можна виразити як

$$X + A(X, t) = \varphi(X, t)u + \xi, \quad (2)$$

де X – n -мірний вектор стану;

u – відомий вектор, іноді називається вектором керівних впливів;

$A(X, t)$, $\varphi(X, t)$ – відомі нелінійні функції вектора стану і часу;

t – безперервний час;

ξ – випадкові збурення, що мають характер білого шуму,

та використовуючи умови спостереження Z із виразу (1), необхідно визначити навігаційне

поле $f(x, y, z)$ із мінімальним відхиленням від достовірних координат перебування БПЛА.

Враховуючи те, що початкові значення вектора стану є випадковими й підпорядковуються нормальному закону з математичним сподіванням m_0 і коваріаційною матрицею G :

$$p(X_0) \in N(m_0, G), \quad (3)$$

а інтенсивність білих шумів ξ задається матрицями спектральних щільностей S_ξ, S_η :

$$M(\xi(t)\xi^T(\tau)) = S_\xi(t)\delta(t-\tau), M(\eta(t)\eta^T(\tau)) = S_\eta(t)\delta(t-\tau), \quad (4)$$

де M – символ операції математичного сподівання;

$\delta(t-\tau)$ – дельта-функція,

то субоптимальна (у сенсі мінімуму дисперсії помилок усіх координат) оцінка вектора стану визначається двома рівняннями:

1) рівнянням оцінок

$$\dot{\hat{X}} + A\hat{X} = \varphi(\hat{X}, t)u + R\left(\frac{\partial h}{\partial \hat{X}}\right)^T S_\eta^{-1}[Z - h(\hat{X}, t)], \hat{X}(0) = m_0; \quad (5)$$

2) рівнянням коваріації

$$\dot{R} + R\left(\frac{\partial A}{\partial \hat{X}}\right)^T + \frac{\partial A}{\partial \hat{X}}R + R\left(\frac{\partial h}{\partial \hat{X}}\right)^T S_\eta^{-1}\left(\frac{\partial h}{\partial \hat{X}}\right)R = S_\xi, R(0) = G, \quad (6)$$

де $\frac{\partial A}{\partial \hat{X}}, \frac{\partial h}{\partial \hat{X}}$ – матриці Якобі, обчислені в точці $X = \hat{X}$.

Крім того, необхідно враховувати, що в ході виконання БПЛА одного польотного завдання ділянки земної поверхні, які спостерігаються, залежно від фоново-об'єктового складу можуть різко відрізнятися одна від одної. Тобто всі ділянки земної поверхні за фоново-об'єктовим складом можна поділити на ділянки з низькою, нормальною та високою об'єктовою насиченістю за обґрунтовано визначеними класифікаційними ознаками (рослинні покриви, антропогенні об'єкти). Враховуючи те, що зображення земної поверхні є основною інформаційною складовою для детектора виділення точок прив'язки, то математична модель для їх опису та виділення є основою для розробки методів й алгоритмів формування автономної навігаційної системи БПЛА. Власне, задача зводиться до правильності вибору інформативних параметрів точок прив'язки. Відповідно, їх математичний опис із заданими показниками якості повинен забезпечувати формування унімодальної функції вибору між ПЗ та ЕЗ і враховувати те, що інформативні параметри опису точок прив'язки – це параметри, які вимірюються бортовою оптико-електронною системою БПЛА та відрізняються від параметрів ЕЗ. Крім того, інформативні параметри точок прив'язки повинні забезпечити виділення особливих відмінностей від інших точок загального фону як на ПЗ, так і на ЕЗ.

З огляду проведених у [17–20] досліджень, які інтенсивно розвиваються в останні роки, було встановлено перелік найбільш відповідних методів і алгоритмів (SIFT, GLON і DAISY) для досягнення зазначеної вище мети. З усієї наявної сукупності відомих методів і алгоритмів для проведення досліджень, описаних у цій роботі, у питаннях локалізації положення БПЛА за основу було прийнято використовувати детектор, побудований на логічній основі дескриптора SIFT. Незважаючи на те, що даний дескриптор є високостійким як до перерахованих вище факторів спостереження, так і до спотворень, викликаних збуреннями під час польоту БПЛА, емпіричним шляхом було встановлено, що збіжність ПЗ (розміри знімка 900 x 600 м) зі всією сценою ЕЗ (розміри знімка 4540 x 2460 м, а довжина маршруту – 4728 м) є досить низькою і в прямому її використанні не забезпечує процесу позиціонування БПЛА, що пояснюється великою розмірністю ЕЗ і значною кількістю збіжних точок інтересу, як показано на рис. 1, та відсутністю принципу розрахунку навігаційних параметрів на основі прив'язки одного знімка до іншого.

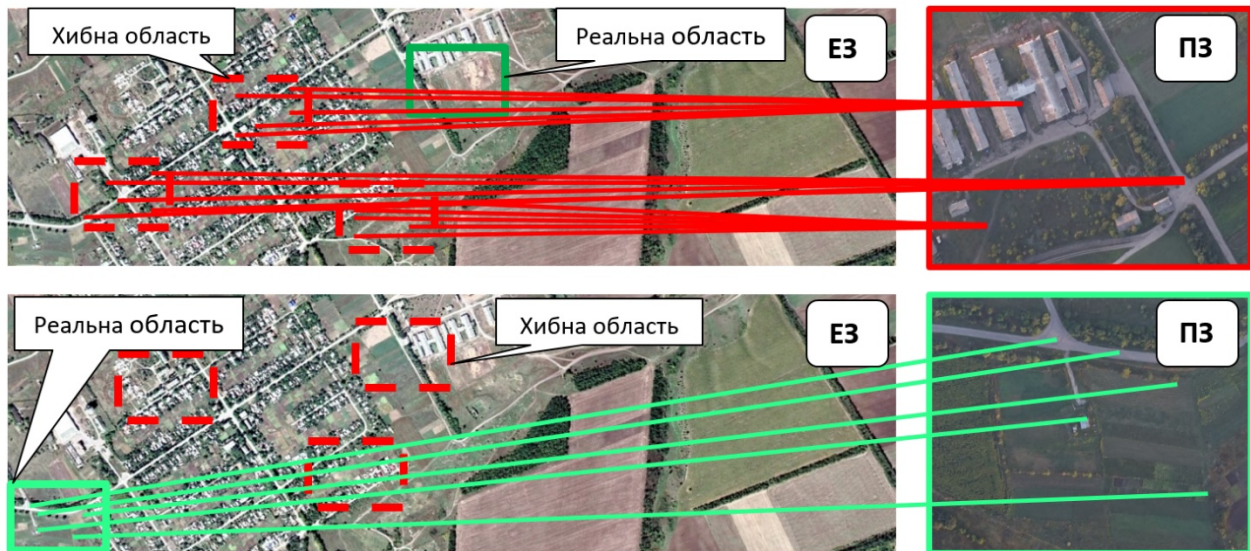


Рис. 1. Експериментальні результати збіжності ПЗ (роздільна здатність 350 dpi) з усією сценою ЕЗ (роздільна здатність 200 dpi) у разі застосування дескриптора SIFT

Враховуючи вирази (2)–(6) для реалізації алгоритму субоптимальної нелінійної фільтрації в задачі навігації БПЛА, необхідним є забезпечення автоматичного розв’язання на борту БПЛА рівнянь такого вигляду:

$$\dot{\hat{X}} + A\hat{X} = bu + R \left(\frac{\partial h}{\partial \hat{X}} \right)^T S_n^{-1} [Z - h(\hat{X})], \hat{X}(0) = m_0; \quad (7)$$

$$\dot{R} + AR + RA^T + R \left(\frac{\partial h}{\partial \hat{X}} \right)^T S_n^{-1} \left(\frac{\partial h}{\partial \hat{X}} \right) R = S_\xi, R(0) = G. \quad (8)$$

Для вирішення поставленого завдання та подолання наявних проблем пропонуємо на борту БПЛА реалізувати інтелектуальну інформаційно-розрахункову систему автономної навігації БПЛА, алгоритм роботи якої схематично наведено на рис. 2.

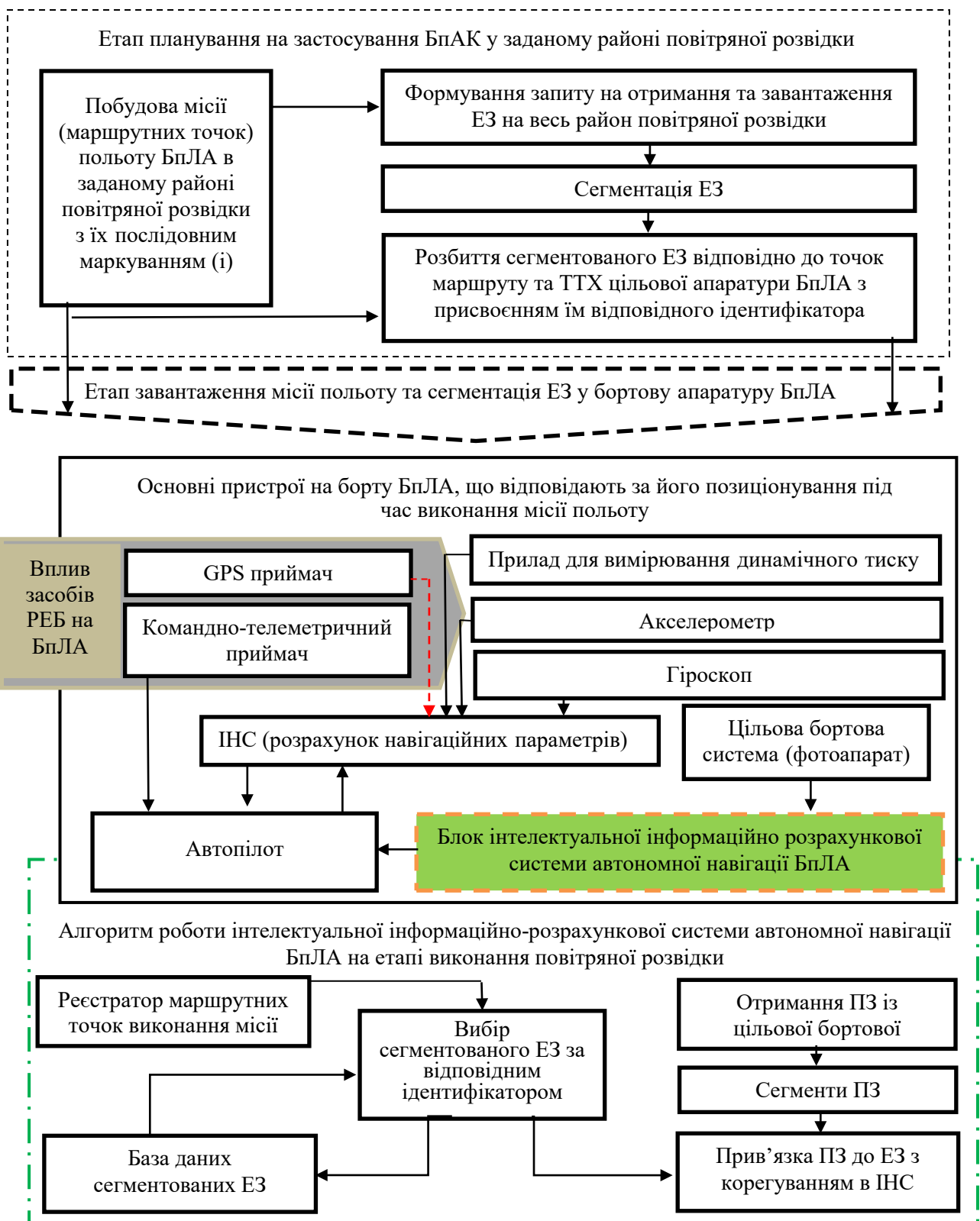


Рис. 2. Блок-схема забезпечення функціонування інтелектуальної інформаційно-розрахункової системи автономної навігації БпЛА під час виконання місії польоту

Реалізація запропонованих на рис.2 підходів полягає в поетапному створенні принципів та основ функціонування самого блоку інтелектуальної інформаційно-розрахункової системи автономної навігації, основним завданням якого є забезпечення автономного (автоматичного) виконання повітряної розвідки БпЛА під впливом засобів

РЕБ як під час подавлення каналу приймання сигналів супутникової навігації, так і в ході подавлення приймачів командно-телеметричних сигналів на борту БпЛА. Відповідно, на етапі планування на застосування БпАК у заданому районі повітряної розвідки окрім звичної процедури побудова місії польоту БпЛА (вибір маршрутних точок, висоти, швидкості та послідовності їх польоту) додатково необхідно проводити: формування запиту на отримання та завантаження геореференційованого ЕЗ на весь район повітряної розвідки, над яким буде відбуватися політ, із завчасно створеної бази аерофотознімків або супутникових знімків території за принципом, як запропоновано в роботі [21].

Після отримання геореференційованого ЕЗ на тому ж етапі необхідно провести сегментацію зображення. Такий процес зазвичай використовують для виділення об'єктів та меж (лінії, криві тощо) на цифрових зображеннях. У результаті маємо множину сегментів, які разом покривають усе ЕЗ, або множину контурів, виділених із нього. Усі пікселі в сегменті схожі за деякою характеристикою або визначеною властивістю, наприклад, за кольором, яскравістю або текстурою. У нашому випадку математична модель сегментації зображення полягає в такому.

Нехай $D(m \times n)$ – растр (область поля зору), на якому задано зображення $B(i, j)$; $D_k \subset D$ – область k -го об'єкта, $k = 1, 2, \dots, s$; $D_\phi \subset D$ – область фону. Вважаємо, що $D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_s \cup D_\phi = D$, $D_i \cap D_j = \emptyset$, $i \neq j$. Розглядаємо дискретне зображення $B(i, j)$, $i = 0, \dots, m$, $j = 0, \dots, n$. Зображення складається з окремих елементів (цифрових значень) фону, відповідно, завдання сегментації зображень полягає в побудові предиката в такому вигляді:

$$\omega(i, j) = \begin{cases} k, & \text{якщо } (i, j) \in D_k \\ 0, & \text{якщо } (i, j) \in D_\phi \end{cases}$$

Це означає, що кожна точка $(i, j) \in D$ зображення $B(i, j)$ отримує зв'язну мітку з номером $p(i, j)$. Отже, точки з одною міткою утворюють область одного окремого об'єкта, міткою 0 назначається область фону. Математична модель передбачає розмітку непересічних об'єктів або видимих їх частин при закритті одного об'єкта іншим. У підсумку декомпозиція загальної задачі перетворюється на такі задачі: сегментація, розпізнавання, поліпшення (фільтрація, усунення шумів, підкреслення меж тощо). Запропонований підхід у подальшій інтерпретації частково затулених об'єктів дозволяє проводити їх розпізнавання та зіставлення з ПЗ. Таким чином, ЕЗ адаптуються до ПЗ, які будуть отримуватися цільовою бортовою системою (фотоапаратом чи відеокамерою), призначеною для збору розвідувальної інформації.

Крім цього, на етапі планування на застосування БпАК у заданому районі повітряної розвідки відповідно до маршрутних точок та тактико-технічних характеристик (ТТХ) цільової апаратури БпЛА попередньо проводиться розбиття ЕЗ на розрахунково визначені (сталі за розмірами) частини із присвоєнням їм відповідного ідентифікатора. Це дозволяє зменшити кількість збіжних точок інтересу на всьому ЕЗ із подальшим порівнянням ПЗ та підвищити оперативність обрахунку координат свого місця перебування під час польоту БпЛА.

На етапі завантаження місії польоту та адаптованих ЕЗ у бортову апаратуру БпЛА, окрім даних для автопілота про маршрут польоту (маршрутні точки, висоти, швидкості та

послідовності їх польоту), необхідно забезпечити завантаження розбитих ЕЗ у блок інтелектуальної інформаційно-розрахункової системи автономної навігації, зокрема безпосередньо в блок-схему «База даних сегментованих ЕЗ» (рис. 2).

Алгоритм роботи інтелектуальної інформаційно-розрахункової системи автономної навігації БпЛА на етапі виконання повітряної розвідки передбачає, що під час виконання ним польотного завдання в штатному режимі без впливу засобів РЕБ противника в блок-схемі «Реєстратор маршрутних точок виконання місії» (рис. 2) відслідковується його місце перебування відносно тієї частини ЕЗ, що відповідає заданому ідентифікатору. У такому режимі польоту блок інтелектуальної інформаційно-розрахункової системи автономної навігації перебуває в стані очікування на перехід в автономний режим польоту, усі інші його блок-схеми не застосовуються до моменту впливу засобів РЕБ противника.

У момент подавлення каналів приймання сигналів супутникової навігації та командно-телеметричних сигналів на борту БпЛА засобами РЕБ алгоритм роботи блоку інтелектуальної інформаційно-розрахункової системи автономної навігації полягає в такому: за відповідним ідентифікатором із «Бази даних сегментованих ЕЗ» вибирається відповідна частина ЕЗ, паралельно з цим у блок-схемі «Отримання ПЗ із цільової бортової апаратури БпЛА» приймається цифрове зображення (ПЗ) місця ділянки або району, який захоплює цільова бортова апаратура БпЛА в ході планового знімання. Після сегментації ПЗ даний знімок разом із частинним зображенням ЕЗ надходять на блок-схему «Прив'язка ПЗ до ЕЗ з корегуванням в ІНС» (рис. 2), де реалізовується процес порівняння ПЗ із частинним ЕЗ за допомогою SIFT алгоритму.

Із використанням алгоритму SIFT у блок-схемі «Прив'язка ПЗ до ЕЗ з корегуванням в ІНС» (рис. 2) спершу знаходяться ключові точки об'єктів на ЕЗ, які зберігаються в окремій (тимчасовій) базі даних. За допомогою індивідуального порівняння кожної ознаки із зазначеної бази даних розпізнають об'єкт на ПЗ та знаходять кандидатів із відповідними характеристиками за допомогою розрахунку Евклідової відстані векторів їхніх ознак. Із повного набору відповідностей визначаються підмножини ключових точок, які узгоджуються з об'єктом і його місцем розташування, масштабом й орієнтацією ПЗ відносно ЕЗ, а також відфільтровуються правдиві відповідності. Швидке визначення послідовних кластерів відбувається за допомогою ефективною реалізації хеш-таблиці узагальненого перетворення Хофа. Кожен кластер із трьох або більше ознак, які узгоджуються з об'єктом і його орієнтацією, є предметом подальшої верифікації детальної моделі, а відхилення згодом відкидаються. Далі розраховується ймовірність того, що конкретний набір ознак вказує на присутність об'єкта, з урахуванням точності й кількості можливих помилкових збіжностей. Відповідності об'єкта, які проходять усі ці тести, можна ідентифікувати як правдиві з високою достовірністю. Додатково в цій блок-схемі геометричним методом проводяться визначення координат центра кадру відносно геореференційованого ЕЗ та розрахунок навігаційних параметрів БпЛА, на основі яких забезпечується безперервна робота автопілота за заданою місією без сигналів GPS приймача.

Адекватність запропонованих підходів перевірялася емпіричним шляхом за рахунок реалізації розробленого алгоритму роботи інтелектуальної інформаційно-розрахункової

системи автономної навігації БПЛА у вигляді спеціального програмного забезпечення на мові програмування Python, результати наведено на рис. 3.



Рис. 3. Експериментальні результати визначення навігаційних параметрів БПЛА із застосуванням блоку інтелектуальної інформаційно-розрахункової системи автономної навігації на основі дескриптора SIFT

Висновки. Отже, отримані експериментальні результати підтверджують достовірність запропонованих теоретичних підходів та прийомів, які за рахунок використання таких інформативних параметрів, як: яскравість об'єктів та фонів, контраст, колір, тощо – із застосуванням детектора, побудованого на логічній основі дескриптора SIFT, дають змогу проводити локалізацію положення БПЛА на основі зображень місцевості, отриманих неідентичними засобами знімання.

Подальші дослідження необхідно спрямувати на вивчення можливостей адаптації ЕЗ до ПЗ шляхом урахування перспективних спотворень останніх, а також на пошук шляхів підвищення точності позиціонування БПЛА із урахуванням перспективних спотворень ПЗ та методів екстраполяції руху БПЛА з високою точністю.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Навігаційне забезпечення військ / А. П. Багмет, О. В. Кравчук, О. Г. Міхно, М. С. Пастушенко та ін. Київ : ЦУВТН ГУОЗ КСП ЗСУ, 2006. 416 с.
2. Яценков В. С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС : Монография. Москва : Издатель “Горячая линия – Телеком”, 2005. 272 с.
3. Белоглазов И. Н. Системы навигации и наведения по геофизическим полям : Монография. Москва : Издатель “Дрофа”, 2005. 734 с.
4. Веремеенко К. К., Кошелев Б. В., Соловьев Ю. А. Анализ состояния разработок интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем // Новости навигации. 2010. № 4. С. 32–41.
5. Семенова Л. Л. Современные методы навигации беспилотных летательных аппаратов // Наука и образование сегодня. 2018. № 4 (27). С. 6–8.
6. Кузовков Н. Т., Салычев О. С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. Москва : Машиностроение, 1982. 225 с.
7. Навигационные спутниковые системы мира. Военное обозрение. 2012. 3 октября. URL: <http://topwar.ru/19529-navigacionnyye-sputnikovyye-sistemy-mira.html>, (дата обращения: 25.12.2020).
8. Щербинин В. В. Построение инвариантных корреляционно-экстремальных систем

навигации и наведения летательных аппаратов. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 230 с.

9. Антюфеев В. И., Биков В. М., Грiчанюк А. М. Принципи побудови високоточної системи управління високошвидкісних літальних апаратів // Системи озброєння і військова техніка. 2006. № 1. С. 7–12.

10. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109–146. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105.

11. Ясечко М. Н., Очкуренко А. В., Ковальчук А. А., Максютя Д. В. Современные радиотехнические средства борьбы с беспилотными летательными аппаратами в зоне проведения АТО // Зб. наук. праць Харків. ун-ту Повітряних Сил. 2015. № 3 (44). С. 54–57.

12. Scherbinin V. V., Sviyazov A. V., Smirnov S. V., Kvetkin G. A. Autonomous navigation complex for ground and flying robotic vehicles // Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2014. № 3 (152). P. 234–243.

13. Filippov A. A., Bazhin D. A., Khlobystov A. N. Improving Drone Aircraft Control Efficiency under Interference // Informatsionno-upravliaiushchie sistemy. 2014. Vol. 73, N. 6. P. 45–50.

14. Югай Е. Б. Способ и система навигации пассажирского дрона в горной местности [Method and system for navigation of a passenger drone in a mountainous area] : патент RU № 219.016.D337; 2681278 C1 ; опубл. 05.03.2019. URL: <https://edrid.ru/rid/219.016.d337.html> (дата обращения: 20.05.2021).

15. Баклицкий В. К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения. Тверь : ТО «Книжный клуб», 2009. 360 с.

16. Війни дронів: використання безпілотників під час бойових дій у Нагірному Карабасі URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/30889212> (дата звернення: 12. 12. 2020).

17. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения : Курс лекций и практических занятий / Ю. В. Визильтер, С. Ю. Желтов, А. В. Бондаренко [и др.]. Москва : Физматкнига, 2010. 672 с.

18. Kahlefendt C. Implementation and Evaluation of Monocular SLAM for an Underwater Robot : Master's Thesis. Hamburg University of Technology, Hamburg, January 2018. 127 p.

19. Mur-Artal R., Montiel J. M. M., Tardos J. D. ORB-SLAM: a Versatile and Accurate Monocular SLAM System. // IEEE Transactions on Robotics. 2015. № 31 (5). P. 147–163. DOI: 10.1109/TRO.2015.2463671

20. Li Y., Xie C., Lu H., Chen X., Xiao J., Zhang H. Scale-aware Monocular SLAM Based on Convolutional Neural Network // IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), August 2018. P. 51–56.

21. Каневський Л. Б., Повх М. С., Шумський С. М. Перспективи комбінованого використання видових засобів повітряно-космічного базування для підвищення інформативності розвідувального забезпечення військ (сил) // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони : наук. журн. Київ : НУО України, 2020. № 1 (37). С. 49–54.

Стаття надійшла до редакції 03.06.2021.

REFERENCES

1. Bahmet, A. P., Kravchuk, O. V., Mikhno, O. H., & Pastushenko, M. S. et al. (2006). *Navihatsiine zabezpechennia viisk [Navigation support of troops]*. Kyiv [in Ukrainian].
2. Iatsenkov, V. S. (2005). *Osnovy sputnikovoi navigatsii. Sistemy GPS NAVSTAR i GLONASS [Basics of satellite navigation. GPS NAVSTAR and GLONASS systems]*. Moscow [in Russian].
3. Beloglazov, I. N. (2005). *Sistemy navigatsii i navedeniia po geofizicheskim poliam [Geophysical field navigation and guidance systems]*. Moscow [in Russian].
4. Veremeenko, K. K., Koshelev, B. V., & Solov'ev, Iu. A. (2010). Analiz sostoianiia razrabotok integrirovannykh inertsiial'no-sputnikovyykh navigatsionnykh system [Analysis of the state of development of integrated inertial-satellite navigation systems]. *Novosti navigatsii [Navigation News]*, 4, 32–41 [in Russian].
5. Semenova, L. L. (2018). Sovremennyye metody navigatsii bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Modern methods of navigation of unmanned aerial vehicles]. *Nauka i obrazovanie segodnia [Science and education today]*, 4 (27), 6–8 [in Russian].
6. Kuzovkov, N. T., & Salychev, O. S. (1982). *Inertsiial'naia navigatsiia i optimal'naia fil'tratsiia [Inertial navigation and optimal filtering]*. Moscow [in Russian].
7. Navigatsionnye sputnikovyye sistemy mira [Navigation satellite systems of the world]. *Voennoe obozrenie [Military review]*. (2012, October 3). Retrieved from <http://topwar.ru/19529-navigacionnye-sputnikovyye-sistemy-mira.html> [in Russian].
8. Shcherbinin, V. V. (2011). *Postroenie invariantnykh korreliatsionno-ekstremal'nykh sistem navigatsii i navedeniia letatel'nykh apparatov [Construction of invariant correlation-extreme systems of navigation and guidance of aircraft]*. Moscow [in Russian].
9. Antiufieiev, V. I., Bykov, V. M., & Hrichaniuk, A. M. (2006). Pryntsypy pobudovy vysokotochnoi systemy upravlinnia vysokoshvydkisnykh litalnykh aparativ [Principles of building a high-precision control system for high-speed aircraft]. *Sistemy ozbroiennia i viiskova tekhnika [Weapons systems and military equipment]*, 1, 7–12 [in Ukrainian].
10. Makarenko, S. I., Timoshenko, A. V., & Vasil'chenko, A. S. (2020). Analiz sredstv i sposobov protivodeistviia bespilotnym letatel'nykh apparatam. Ch 1. Bespilotnyi letatel'nyi apparat kak ob'ekt obnaruzheniia i porazheniia [Analysis of means and methods of counteracting unmanned aerial vehicles. Part 1. Unmanned aerial vehicle as an object of detection and destruction]. *Sistemy upravleniia, sviazi i bezopasnosti [Control, communication and security systems]*, 1, 109–146. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105 [in Russian].
11. Iasechko, M. N., Ochurenko A. V., Koval'chuk A. A., & Maksjuta D. V. (2015). Sovremennyye radiotekhnicheskie sredstva bor'by s bespilotnymi letatel'nykh apparatami v zone provedeniia ATO [Modern radio-technical means of combating unmanned aerial vehicles in the ATO zone]. *Zb. nauk. prats Kharkiv. un-tu Povitrianykh Syl [Coll. Science works Kharkiv University of the Air Force]*, 3 (44), 54–57 [in Russian].
12. Scherbinin, V. V., Sviyazov, A. V., Smirnov, S. V., & Kvetkin, G. A. (2014). Autonomous navigation complex for ground and flying robotic vehicles. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 3 (152), 234–243.
13. Filippov, A. A., Bazhin, D. A., & Khlobystov, A. N. (2014). Improving Drone Aircraft Control Efficiency under Interference. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 73 (6). 45–50.

14. Jugaj, E. B. (05.03.2019). Sposob i sistema navigacii passazhirskogo drona v gornoj mestnosti [Method and system for navigation of a passenger drone in a mountainous area]. Patent RU № 219.016.D337; 2681278 C1. Retrieved from: <https://edrid.ru/rid/219.016.d337.html> [in Russian].
15. Baklitskii, V. K. (2009). *Korrelatsionno-ekstremal'nye metody navigatsii i navedeniia* [Correlation-extreme methods of navigation and guidance]. Tver' [in Russian].
16. Viiny droniv: vykorystannia bezpilotnykiv pid chas boiovykh dii u Nahirnomu Karabasi [Drone wars: the use of drones during the fighting in Nagorno-Karabakh]. (n.d.). Retrieved from: <https://www.radiosvoboda.org/a/30889212> [in Ukrainian].
17. Vizil'ter, Iu. V., Zheltov, S. Iu., & Bondarenko, A. V. et al. (2010). *Obrabotka i analiz izobrazhenii v zadachakh mashinnogo zreniia* [Image processing and analysis in machine vision tasks]. Moscow [in Russian].
18. Kahlefeldt, C. (January 2018). *Implementation and Evaluation of Monocular SLAM for an Underwater Robot*: Master's Thesis. Hamburg University of Technology, Hamburg.
19. Mur-Artal, R., Montiel, J. M. M., & Tardos, J. D. (2015). ORB-SLAM: a Versatile and Accurate Monocular SLAM System. In *IEEE Transactions on Robotics*, 31(5), 147–163. DOI: 10.1109/TRO.2015.2463671
20. Li, Y., Xie, C., Lu, H., Chen, X., Xiao, J., & Zhang, H. (August 2018). Scale-aware Monocular SLAM Based on Convolutional Neural Network. In *IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*. August 2018. (pp. 51–56).
21. Kanevskyi, L. B., Povkh, M. S., & Shumskyi, S. M. (2020). Perspektyvy kombinovanoho vykorystannia vydovyykh zasobiv povitriano-kosmichnoho bazuvannia dlia pidvyshchennia informatyvnosti rozviduvalnoho zabezpechennia viisk (syl) [Prospects for the combined use of species of air and space bases to increase the informativeness of reconnaissance troops (forces)]. *Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony : nauk. zhurn. [Modern information technologies in the field of security and defense: Science magazine]*, 1 (37), 49–54. Kyiv: NUD of Ukraine [in Ukrainian].

L. B. Kanevsky, V. A. Pashinsky, O. S. Kolisnyk, N. A. Bedrii

METHOD OF ALLOCATION OF MOUNTING POINTS ON AEROPHOTOGRAPHS OBTAINED BY UNLIMITED AIRCRAFT FOR USE DURING THE CAR

A retrospective analysis of the use of unmanned aerial vehicles in the combat zone indicates a steady increase in the use of electronic warfare by the enemy, which reduces the effectiveness of reconnaissance flights of unmanned aerial vehicles, and in some cases leads to their loss. The article considers the prospects of creating and improving high-precision navigation systems, which is currently one of the priority areas for the development of unmanned aerial vehicles and relevant for ensuring high efficiency of unmanned aerial vehicles for both civil and military purposes.

To develop and study methods and algorithms for localizing the position of unmanned aerial vehicles based on terrain images obtained by non-identical surveying means, taking into account the influence of electronic warfare on it, the article primarily considers approaches to comparing earth surface images as the main information component. The next step is to assess

the correctness of the choice of informative parameters of the anchor points, where the mathematical model for their description and selection is the basis for the development of methods and algorithms for the formation of an autonomous navigation system for unmanned aerial vehicles.

Taking into account the research conducted in the work, it was proposed to implement on board the drone intelligent information and calculation system of autonomous navigation, the algorithm of which is based on the logical basis of the SIFT descriptor.

Thanks to the software implementation of the approaches proposed in the work and obtained on the basis of their experimental results, it is possible to develop and further improve methods of positioning unmanned aerial vehicles in space.

Keywords: *unmanned aerial vehicle complex; autonomous navigation of unmanned aerial vehicles; reference and current images; machine positioning method; SIFT descriptor-based binding algorithm.*