

ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ ФАЗОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ТА ЙОГО РОЗШИРЕННЯ В ОПТИЧНОМУ СТАБІЛІЗАТОРІ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

В статті розглядається застосування алгоритму фазової кореляції як основи математичного апарата оптичного стабілізатора безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для визначення зміщення корпусу відносно поверхні. Також розглянуто можливість застосування розширених варіантів алгоритму фазової кореляції з метою збільшення точності визначення зміщення та зменшення обчислювальних затрат. Подано код реалізації алгоритму мовою MATLAB та експериментальне дослідження можливості застосування реалізації алгоритму на мові С.

Ключові слова: БПЛА, оптична стабілізація, обробка зображень, фазова кореляція, субпіксельна реєстрація зображень

Вступ

З розвитком науково-технічного прогресу БПЛА набули широкої популярності у різноманітному класі задач. Застосування БПЛА для задач, що вимагають підвищеної точності позиціонування корпусу апарата та забезпечення його стабільного положення у просторі-часі вимагає комбінованого підходу до проблеми стабілізації, що передбачає застосування у комплексі інерційної навігаційної системи, магнітометричного обладнання, супутникових навігаційних систем – GPS, ГЛОНАСС та ін. [1].

Головним недоліком використання інерційної навігаційної системи (ІНС) як основної є неможливість компенсації руху БПЛА з постійною швидкістю, оскільки складові компоненти інерційної навігаційної — гіроскоп та акселерометр системи чутливі лише до зміни значення швидкості (прискорення). За умов ідеальної моделі (похибка інтегрування строго дорівнює 0, початкова швидкість БПЛА у просторі нульова) ІНС забезпечуватиме ідеальну стабілізацію положення апарата у просторі в будь-який момент часу. В реальних умовах при перетворенні «прискорення → швидкість» з часом збільшуватиметься значення усталеної похибки за швидкістю у просторі [2].

Класична модель керування БПЛА передбачає наявність оператора, в задачі якого входить корекція усталеної похибки інерційної системи, що накладає певні

обмеження як на можливу область застосування БПЛА, так і на автономність системи в цілому. Задачі, в яких наявні вимоги до такого режиму експлуатації БПЛА, як автоматичне підтримання заданого положення/курсу у просторі без участі оператора протягом тривалого часу (наприклад, оператор в цей час керує підвісом видової телекамери, озброєнням БПЛА, або іншим обладнанням), ІНС виявляється недостатньо.

Логічним наслідком постановки задачі автономного керування БПЛА і найбільш широко розповсюдженим підходом до вирішення зазначеної проблеми є додаткове використання навігаційних систем – сигнал позиціонування з відповідного модуля використовується для компенсації дрейфу нуля головної інерційної навігаційної системи. Однак, використання глобальних супутникових навігаційних систем як додаткових систем стабілізації зазвичай обмежується допоміжною роллю за причиною їх низької точності. Створення автономної системи з використанням глобальних супутникових навігаційних систем можливе при наявності певних обмежень, таких як порівняно велика висота польоту БПЛА та відсутність перешкод, що дозволить фактично нівелювати проблему низької точності абсолютного позиціонування.

Застосування систем глобального позиціонування може додатково накладати

певні обмеження на використання апаратів у незахищеному оточенні, оскільки існують засоби для глушіння або підробки сигналів GPS/ГЛОНАСС та інших супутникових навігаційних систем, приклади наведено у роботі [3].

Оптичний стабілізатор

Для вирішення описаної у попередньому розділі проблеми забезпечення стабільного положення БПЛА з високою точністю відносно поверхні в ситуації, що унеможлиблює точне отримання поточних координат у глобальній системі відліку, пропонується використати якісно інший підхід. Для отримання допоміжного зворотного зв'язку для стабілізації усталеного положення БПЛА пропонується застосування системи оптичної стабілізації, деталі конструкції якої описано у [4]. Спрощену схему показано на рис. 1. На підставі аналізу низки послідовних знімків відеокамери, цифровий процесор обробки сигналів оптичного стабілізатора вираховує підсумкові показники, що свідчать про напрямлення переміщення БПЛА у просторі, і передає результати своєї роботи у модуль ІНС, де вони використовуються для корекції показників швидкості та кутової швидкості (у випадку відсутності модуля магнітометрії).

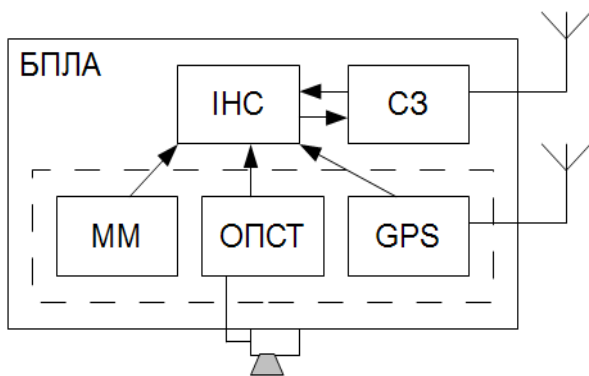


Рис. 1. Модифікована схема стабілізаційного апарату БПЛА

Задача, визначення зсуву зображення у даній системі є технологічно близькою до задачі визначення переміщення комп'ютерного оптичного маніпулятора «миша», де використовується схожий

принцип роботи – після аналізу послідовності знімків поверхні (що представляють собою квадратну матрицю з пікселів різної яскравості), вираховуються підсумкові показники, що свідчать про напрямлення переміщення миші уздовж осей X і Y.

Аналогічний принцип використовується при обробці відео для програмної стабілізації небажаних рухів зображення, що виникають при здійсненні відеозапису з рухомого об'єкта.

Застосування алгоритму крос-кореляції

Показано, що для роботи оптичного стабілізатора необхідним є визначення зміщення зображення вздовж осей X та Y відносно попереднього зображення, необхідне застосування відповідного алгоритму. Швидким та широко розповсюдженим методом, що дозволяє виконати це завдання є фазова кореляція (запропоновано у [5]), що використовує перехід у частотну область для визначення взаємного паралельного зсуву двох однакових зображень. Математичний опис алгоритму знаходження фазової кореляції виглядає наступним чином.

Вихідні дані – зображення \hat{g}_a , \hat{g}_b , що отримані у попередній та поточній ітераціях відповідно, представлені у вигляді квадратних матриць розмірності $N \times N$.

На першому кроці до зображень застосовується віконна функція (наприклад, Вікно Геммінга, вікно Ханна, вікно Гаусса та ін.) на обох зображеннях, щоб зменшити вплив крайових ефектів [6].

Вибір віконної функції визначається з характеру вихідного зображення та обчислювальних можливостей цільового устаткування.

Для прикладу, коефіцієнти вікна Ханна обраховуються за наступною формулою:

$$w(n) = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) \right), \quad (1)$$

де N – розмір матриці зображення.

Для застосування віконної функції до двовимірної матриці необхідно над

результатом (1) виконати перетворення [7]:

$$w_{2D} = w \times w^T. \quad (2)$$

Застосовуючи результат (2) на вихідні зображення, маємо:

$$\begin{aligned} \hat{g}_a &= g_a \circ w_{2D}, \\ \hat{g}_b &= g_b \circ w_{2D}, \end{aligned} \quad (3)$$

де \circ – покомпонентний добуток (добуток Адамара).

На другому кроці до зображень \hat{g}_a , \hat{g}_b застосовується дискретне двовимірне перетворення Фур'є:

$$\begin{aligned} G_a &= F\{\hat{g}_a\}, \\ G_b &= F\{\hat{g}_b\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Беручи спряжені числа з (4), перемножуючи перетворення Фур'є один з одним поелементно, і нормалізуючи цей добуток поелементно розраховується взаємна спектральна щільність:

$$R = \frac{G_a \circ G_b^*}{|G_a \circ G_b^*|}. \quad (5)$$

Нормалізована крос-кореляція отримана застосовуючи зворотне перетворення Фур'є до (5):

$$r = F^{-1}\{R\}. \quad (6)$$

Для визначення зміщення вихідного зображення необхідно знайти положення піку нормалізованої крос-кореляції:

$$(\Delta x, \Delta y) = \arg \max_{(x,y)} \{r\}. \quad (7)$$

Результатом (7) є значення зміщення у дискретних елементах зображення (пікселі) g_b відносно g_a . Знаючи висоту та характер місцевості, неважко представити Δx , Δy у вигляді зміщення на іншу величину (наприклад, метри). У загальному випадку в цьому перетворенні немає потреби, оскільки для здійснення корекції ІНС БПЛА непотрібні точні абсолютні значення зміщення – необхідно звести рух об'єкта до нуля, що свідчитиме про на-

буття ним сталого положення.

Вищеописаний математичний алгоритм описується наступним кодом на мові MATLAB:

```

wf = 'hann';
g_aw = wfn(g_a, wf);
g_bw = wfn(g_b, wf);
[x1, y1] = size(g_aw);
[x2, y2] = size(g_bw);
G_a = fft2(g_aw);
G_b = fft2(g_bw);
G_b_ = conj(G_b);
R=(G_a .* G_b_) ./ abs(G_a .* G_b_);
r=abs(iff2(R)).
    
```

До отриманого результату r застосовується алгоритм пошуку пікового значення, що може бути описаний, наприклад, за допомогою наступного коду:

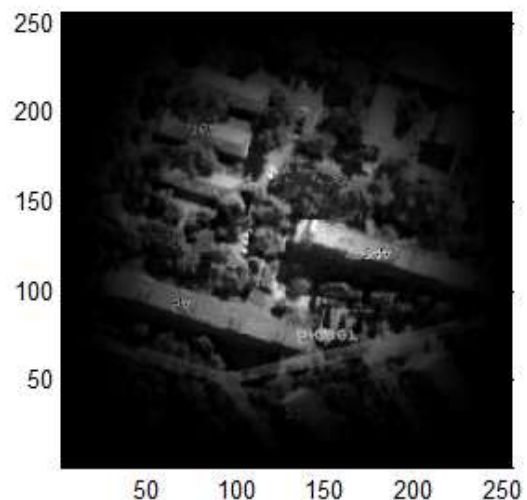
```

[~, I] = max(r(:));
[dx, dy] = ind2sub(size(r), I).
    
```

Отримаємо значення зміщення у пікселях зображення g_b відносно g_a .

На рис. 2 показано вихідні зображення та результат роботи алгоритму крос-кореляції – зверху вниз: зображення g_{aw} , g_{bw} (після застосування віконної функції, для даного прикладу — вікно Ханна), результат роботи алгоритму r . Після пошуку пікового значення визначено його положення:

$$dx = 14; dy = 13.$$



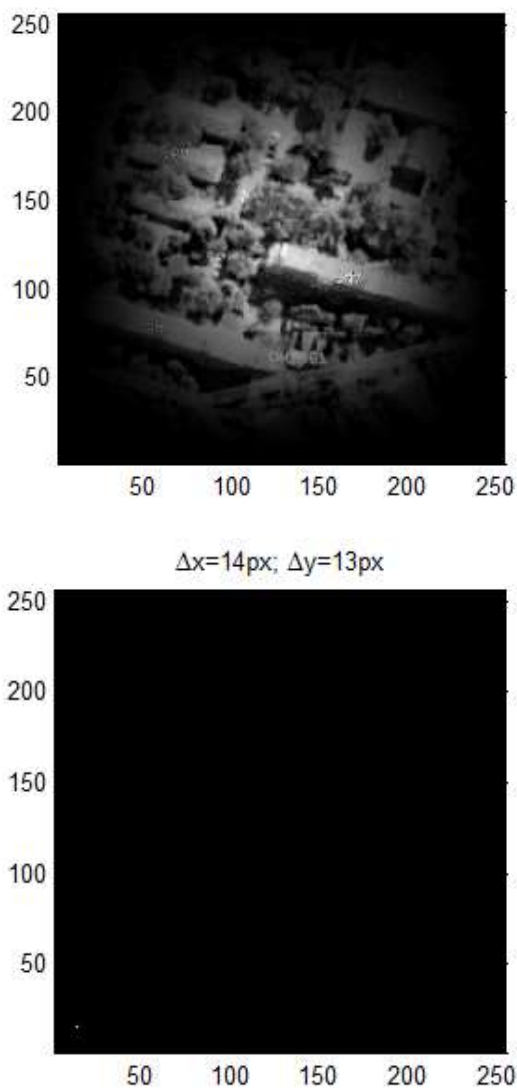


Рис. 2. Результат роботи алгоритму

Розширення алгоритму крос-кореляції для субпіксельної реєстрації зсуву

У роботі [8] показано можливість застосування алгоритму фазової кореляції для знаходження зсуву цифрових зображень з точністю кілька сотих пікселя.

Авторами пропонується наступна послідовність кроків, що заміщує кінець алгоритму, описаний у попередньому розділі.

Після обрахування зворотного дискретного перетворення Фур'є до результату r застосовуються дві маски – вилучаються спектральні компоненти, які лежать поза радіусом R від центрального піку, вилучаються спектральні компоненти, для яких нормована величина G_a або G_b менша за заданий поріг α . Оптимальне зна-

чення R , запропоноване у [8] знаходять з виразу:

$$R = \frac{0,6 \cdot N}{2},$$

де N – мінімальна кількість семплів вихідного цифрового зображення g_a .

Поріг α визначається з огляду на необхідність вилучення частотних компонент, величини яких менші за $\alpha \cdot p_{RMS}$, де p_{RMS} – середнє квадратичне спектральних величин, що лежать у області 5×5 пікселів від центрального піку крос-кореляції R .

Вибір розширеного алгоритму дозволяє збільшити точність знаходження зміщення до субпіксельної, проте при виборі має прийматися до уваги баланс між роздільною здатністю оптичного сенсора, швидкодією обладнання та частотою обробки кадрів.

Автори роботи [8] пропонують застосовувати до вихідних зображень віконну функцію Блекмана – Харріса з метою мінімізації бічних пелюсток спектра.

Дослідження алгоритму на однокристальному мікроконтролері

Для дослідження можливості застосування алгоритму фазової кореляції у польотному комп'ютері БПЛА, проведено дослідження швидкодії роботи запропонованого алгоритму на мікросхемі STM32F407. До складу STM32F407 входить апаратна підсистема обчислень з плаваючою комою одинарної точності (single-precision FPU), що дозволяє збільшити швидкість проведення обчислень та використовувати представлення із плаваючою комою, не обмежуючись арифметикою з фіксованою позицією коми.

При розробці програмного коду використана CMSIS DSP бібліотека, що містить оптимізовані засоби роботи з матрицями комплексних та дійсних значень.

Початкове та зміщене зображення задані статично, у комплексному представленні. Для вимірювання швидкодії використано апаратний лічильник циклів процесора, що входить до блоку Data Watchpoint

and Trace Unit (DWT).

Вихідний код та виміри швидкодії його роботи приведені у таблиці.

Тактова частота роботи процесора 144МГц, компілятор IAR7.80.3, рівень оптимізації -O3 -oSize.

З результатів, приведених у таблиці видно, що найбільш ресурсомісткими операціями є перетворення Фур'є та зворотне перетворення Фур'є, що займають 77 % загального часу виконання алгоритму. Другим за часом виконання є алгоритм ділення, що займає 6.5 % часу виконання – через особливості використаного FPU операція ділення займає у 14 разів більше часу за операцію множення. Застосування віконної функції не потребує великих затрат часу, оскільки віконна функція описана у вигляді матричної константи спільного

розміру з зображенням, при такому способі подання застосування віконної функції зводиться до поелементного множення двох матриць. Функція-генератор для подібних віконних функцій може бути описана за допомогою MATLAB:

$w = \text{blackmanharris}(1);$

$w2 = w*w.';$

де l – розмір зображення (висота або ширина), $w2$ – матриця, що містить згенеровану віконну функцію для відповідного розміру зображення.

Загальний час виконання алгоритму становить близько 5мкс для зображення 32x32пкс. та 21мкс для зображення 64x64пкс., що експериментально підтверджує лінійну складність алгоритму.

Таблиця

Результат роботи алгоритму

Операція	Код C	Час виконання, цикли	
		32x32	64x64
/* a = wnd(a) */	arm_cmplx_mult_real_f32(a->vec, (float*)window, a->vec, IMG_SZ*IMG_SZ);	13 088	52 250
/* b = wnd(b) */	arm_cmplx_mult_real_f32(b->vec, (float*)window, b->vec, IMG_SZ*IMG_SZ);	13 069	52 241
/* a = F(a) */	fft2_32(&cfft_instance, a->cplx32, 0);	187 172	752 283
/* b = F(b) */	fft2_32(&cfft_instance, b->cplx32, 0);	187 292	752 245
/* b = conj(b) */	arm_cmplx_conj_f32(b->vec, b->vec, IMG_SZ*IMG_SZ);	7 966	31 782
/* a = a.*b */	arm_cmplx_mult_cmplx_f32(a->vec, b->vec, a->vec, IMG_SZ*IMG_SZ);	18 460	73 751
/* b = abs(a) */	arm_cmplx_mag_f32(a->vec, b->vec, IMG_SZ*IMG_SZ);	32 327	129 100
/* a = a./b */	for(uint32_t i=0; i<IMG_SZ*IMG_SZ; i++){ a->vec[2*i] = a->vec[2*i]/b->vec[i]; a->vec[2*i+1] = a->vec[2*i+1]/b->vec[i]; }	51 217	204 887
/* a = ~F(a) */	fft2_32(&cfft_instance, a->cplx32, 1);	228 124	913 070
/* a = conj(a) */	arm_cmplx_mag_f32(a->vec, a->vec, IMG_SZ*IMG_SZ);	32 285	129 096
/* find peak */	arm_max_f32(a->vec, IMG_SZ*IMG_SZ, &m, &i); uint32_t dx = i % IMG_SZ; uint32_t dy = i / IMG_SZ;	8 498	33 842
	Загалом	779 511	3 124 566

Особливості та обмеження застосування алгоритму крос-кореляції

Запропонований алгоритм, що дозволяє визначити зміщення зображення, у контексті БПЛА може бути використаний не тільки в основі допоміжної стабілізуючої системи, але і як розширення навігаційної системи. Для цього необхідно додати інтегруючу ланку, яка буде сумувати моментальні значення зміщення за весь час роботи апарата, що дозволить отримати абсолютні значення координат. Знайдені результати можуть слугувати для отримання абсолютного зміщення апарата, проте увага має приділятися випадкам зміни висоти БПЛА над поверхнею рельєфу – при цьому коефіцієнти перетворення зміщення зображення (пікс.) у абсолютне переміщення (м/см/мм і т.п.) мають бути змінені або скинуто лічильник інтегратора.

На рис. 3 показано модель запропонованої системи визначення абсолютних координат. Модуль висотоміра (ВМ) керує коефіцієнтами перетворення величин (k), що перетворюють зсув зображення у дискретних елементах у фізичну величину. Інтегрована величина надходить

до модуля ІНС, де використовується для розрахунків.

Також модуль висотоміра може здійснювати скидання (встановлення в початкове положення) інтеграторів за координатами у випадку істотної зміни висоти (в залежності від специфіки польоту БПЛА).

Існує можливість використання описаного алгоритму як основу слідкуючої системи на базі БПЛА. Однак має прийматися до уваги те, що при такому застосуванні розміри цільового об'єкта мають бути істотними (у контексті кута охоплення оптичного сенсора), а також контрастність зображення об'єкта має забезпечувати його чітке виділення серед елементів рельєфу.

Основними недоліками запропонованого підходу є чутливість до змін спостережуваної поверхні (якщо поверхня не є стійкою, наприклад, потік води, то можливості оптичної стабілізації значно скорочуються, оскільки в такому випадку на результат обчислень буде впливати власний рух поверхні), відсутність стабілізації по вертикальній осі, чутливість до змін кута нахилу апарата (при значних кутах нахилу БПЛА зображення істотно спотворюється і зміщення визначається неправильно).

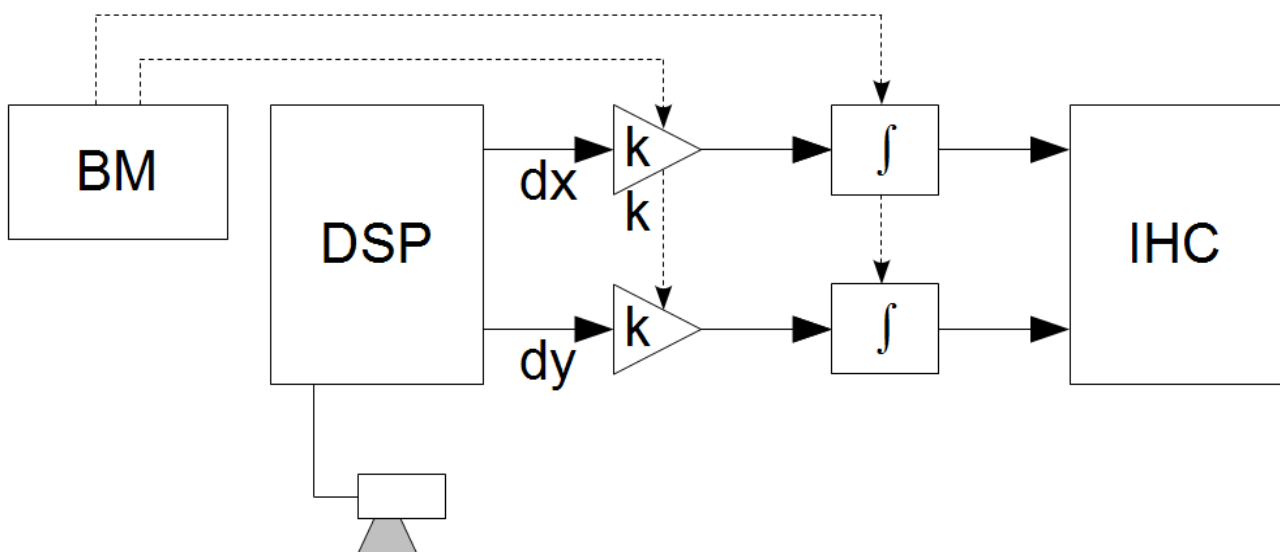


Рис. 3. Використання оптичного стабілізатора разом з висотоміром для отримання абсолютних координат

У разі відсутності достатньої кількості розрізняваних елементів рельєфу, недостатнього освітлення або виходу з ладу відеоапаратури, результат алгоритму крос-кореляції не є інформативним. Для прикладу, на рис. 4 показано результат роботи алгоритму у випадку однорідної поверхні зі слабким рівнем освітлення.

Зміна кута нахилу створює спотворення, що розцінюється алгоритмом фазової кореляції як зміна координат об'єкта.

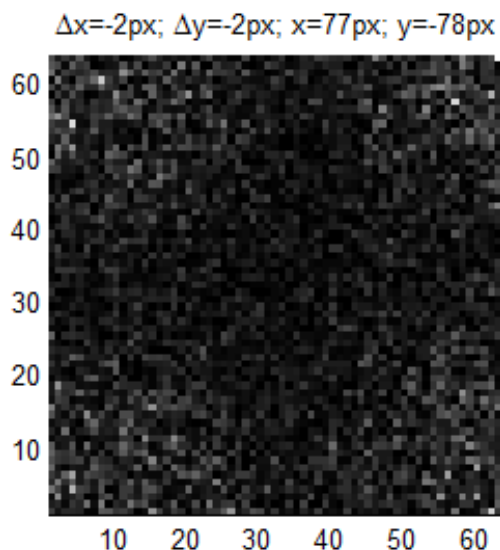


Рис. 4. Результат роботи алгоритму для поверхні з слабо вираженим рельєфом

На рис. 5 показано ідеальний випадок, при якому кут відхилення апарата від нормалі становить 0° .

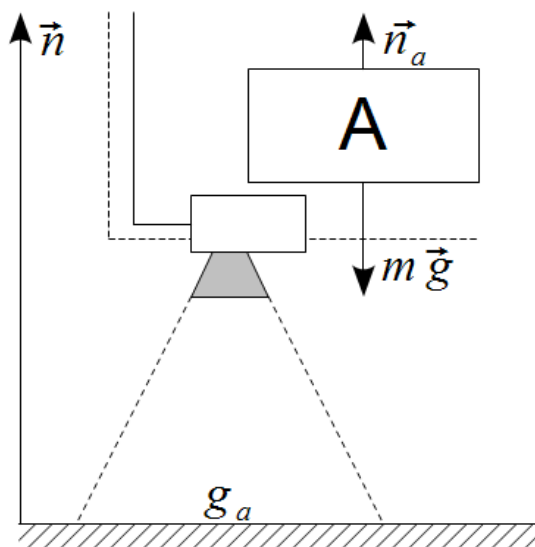


Рис. 5. Ідеальний випадок положення

При цьому кут нахилу апарата (визначається бортовим акселерометром) нульовий, нижня поверхня БПЛА розташована паралельно до поверхні рельєфу. Зображення g_a у цьому випадку поступає до DSP без спотворень, що відповідає випадку розрахунків, показаному на рис. 2.

Одним з підходів до вирішення даної проблеми є застосування акселерометра, як допоміжного пристрою, що блокує обробку спотворених зображень g_a процесором, якщо кут нахилу апарату α до нормалі перевищує певну величину (рис. 6).

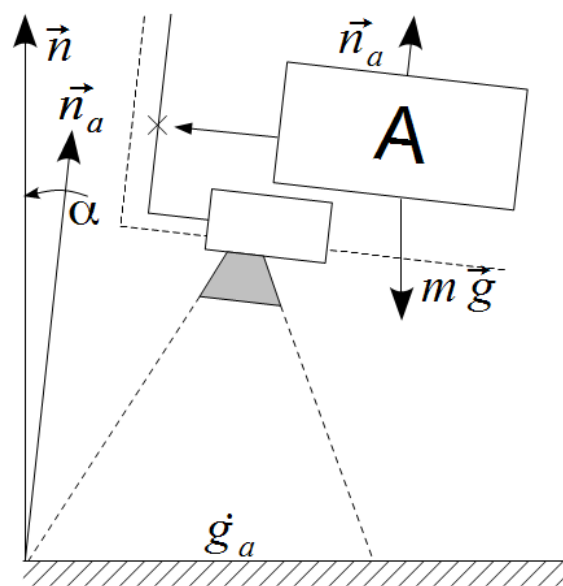


Рис. 6. Перевищення допустимого нахилу

При цьому втрачається певна кількість кадрів, що були зроблені при кутах нахилу апарата, що визначені бортовим обладнанням як недопустимі, що у свою чергу призводить до зменшення реакції положення апарата у просторі.

Допустимі значення кута нахилу визначаються експериментально в залежності від відстані апарата до поверхні рельєфу (за збільшенням відстані, спричинені зміною кута нахилу камери також збільшуються), характеру рельєфу та необхідної точності стабілізації.

Вказану особливість роботи алгоритму можна застосувати також для визначення кута нахилу БПЛА, однак ця можливість потребує додаткового дослідження та

модифікацій програми DSP та алгоритму стабілізації.

З урахуванням вищевказаних особливостей, найбільш ефективним є застосування оптичного стабілізатора для стабілізації положення БПЛА на невисокій висоті польоту, що співрозмірна з лінійними розмірами корпусу апарата.

Висновки

Запропонований алгоритм та його розширення, що, згідно результатів описаного експериментального дослідження, має невеликі вимоги до обчислювальної системи, може бути використано для збільшення точності встановлення стійкого положення мультироторних БПЛА здатних утримувати позицію у просторі (наприклад, три-, quadro-, мультикоптери) на низькій висоті польоту як за участі оператора так і без неї.

Можливе використання модифікації алгоритму для визначення абсолютних координат БПЛА. Перспективною областю застосування оптичної стабілізації є повністю автономні системи, що керуються штучним інтелектом для автономного виконання точних робіт на малій висоті польоту [9].

1. *Глотов В., Гуніна А.* Аналіз можливостей застосування безпілотних літальних апаратів для аерознімальних процесів. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. 2014. № 28. С. 65–70.
2. *Пельпор Д.С.* Гироскопические системы ориентации и навигации. Москва: Машиностроение, 1982. 165 с.
3. *Seo S.H., Lee B.H., Im S.H., Jee G.I.* Effect of Spoofing on Unmanned Aerial Vehicle using Counterfeited GPS Signal. Journal of Positioning, Navigation, and Timing. 2015. N 4. С. 57–65.
4. *Древаль О.Л., Дорошенко А.Ю.* Використання алгоритму фазової кореляції для допоміжної системи оптичної стабілізації літальних апаратів. Вісник НТУ України "КПІ": Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – 2017. (у друку).
5. *Kuglin C.D., Hines D.C.* The phase correlation image alignment method. Proc. Int. Conf. Cybernetics Society. 1975. С. 163–165.

6. *Попов В.С.* Исследование влияния боковых лепестков спектра окон на погрешности обработки и передачи сигнала [Електронний ресурс]. Информационные системы и телекоммуникации. – 2010. – Режим доступа до ресурсу: windowing-matlab.narod.ru.
7. *Harris F.J.* On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. Proceedings of the IEEE. 1978. N 66. С. 51–83.
8. *Harold S.S.* A Fast Direct Fourier-Based Algorithm for Subpixel Registration of Images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. N 39. С. 10.
9. *Ростопчин В.В., Дмитриев М.Л.* Применение цифровых оптических систем для беспилотных летательных аппаратов [Електронний ресурс]. Режим доступа до ресурсу: www.uav.ru/articles/opteq_uav.pdf.

References

1. *Glotov V., Gunina A.* Analysis of the literature. Possibilities of for UAVsfor aerophotographic processes. Modern achievements of geodetic science and industry. 2014. N 28. P. 65–70.
2. *Pelpor D.S.* Gyroscopic orientation and navigation system. Moscow: Mashinostroenie, 1982. 165 p.
3. *Seo S.H., Lee B.H., Im S.H., Jee G.I.* Effect of Spoofing on Unmanned Aerial Vehicle using Counterfeited GPS Signal. Journal of Positioning, Navigation, and Timing. 2015. N 4. С. 57–65.
4. *Dreval O.L., Doroshenko A.Yu.* Application of the phase correlation algorithm for use in the UAV stabilization. Visnyk NTUU "KPI" Informatics, operation and computer science. 2017. (not yet released)
5. *Kuglin C.D., Hines D.C.* The phase correlation image alignment method. Proc. Int. Conf. Cybernetics Society. – 1975. – P. 163–165.
6. *Popov V. S.* Investigation of the effect of the side windows of the spectrum petals on the error signal processing and transmission [Electronic resource]. Information systems and telecommunications. 2010. Access: windowing-matlab.narod.ru.
7. *Harris F.J.* On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier

- transform. Proceedings of the IEEE. 1978. N 66. P. 51–83.
8. Harold S.S. A Fast Direct Fourier-Based Algorithm for Subpixel Registration of Images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. N 39. P. 10.
 9. Rostopchin V.V., Dmitriev M.L. The use of digital optical systems for unmanned aerial vehicles [Electronic resource]. Access: www.uav.ru/articles/opteq_uav.pdf.

Одержано 30.01.2017

Про авторів:

Древаль Олег Леонідович,
бакалавр системної інженерії,
студент кафедри Автоматики
і управління в технічних системах
факультету Інформатики та
обчислювальної техніки
НТУ України «КПІ».
Кількість наукових публікації
в українських виданнях – 5.
<http://orcid.org/0000-0002-8944-9837>.

Дорошенко Анатолій Юхимович,
доктор фізико-математичних наук,
професор, завідувач відділу
Теорії комп'ютерних обчислень
Інституту програмних систем
НАН України,
професор кафедри Автоматики та
управління в технічних системах
НТУ України "КПІ".
Кількість наукових публікацій в
українських виданнях – понад 200.
Кількість наукових публікацій у
зарубіжних виданнях – понад 50.
Індекс Хірша – 5.
<http://orcid.org/0000-0002-8435-1451>.

Місце роботи авторів:

ТОВ «Сі Пі Ай – Київ»,
проспект Перемоги, 68/1, оф. 68,
м. Київ, 03113.
Тел.: (044) 207 3392, вн.: 4457.
E-mail: swinemaker@gmail.com

Інститут програмних систем
НАН України.
03187, Київ,
проспект Академіка Глушкова, 40.
Тел.: (044) 526 3559.
E-mail: doroshenkoanatoliy2@gmail.com,
oayat@ukr.net