

DOI: 10.18372/2310-5461.47.14873

УДК: 681.513; 629.7.05; 681.51(045)

**О. Є. Волков**

Міжнародний науково-навчальний центр  
інформаційних технологій та систем НАН та МОН України  
orcid.org/0000-0002-5418-6723  
e-mail: alexvolk@ukr.net;

**Ю. П. Богачук**, канд. техн. наук

Міжнародний науково-навчальний центр  
інформаційних технологій та систем НАН та МОН України  
orcid.org/0000-0002-3663-350X  
e-mail: dep185@irtc.org.ua;

**М. М. Комар**

Міжнародний науково-навчальний центр  
інформаційних технологій та систем НАН та МОН України  
orcid.org/0000-0002-0119-0964  
e-mail: nickkomar08@gmail.com;

**Д. О. Волошенюк**

Міжнародний науково-навчальний центр  
інформаційних технологій та систем НАН та МОН України  
orcid.org/0000-0003-3793-7801  
e-mail: P-h-o-e-n-i-x@ukr.net

## **ДВОРІВНЕВА ТЕХНОЛОГІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ЗАСТОСУВАННЯ БОРТОВОЇ ВІДЕОКАМЕРИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ**

### **Вступ**

Одним із найбільш інноваційних засобів для геопросторового моніторингу природних та техногенних надзвичайних ситуацій є застосування систем і комплексів безпілотних літальних апаратів (БпЛА). Моніторинг стану навколишнього середовища при цьому базується на застосуванні бортових відеокамер різного спектру або тепловізорів для видобування геопросторових відеоданих. Проте, вітрові збурення та зміна положення БпЛА в просторі при маневруванні значно погіршують якість зображень у потоці даних бортової відеокамери.

Механічна стабілізація бортової відеокамери потребує встановлення додаткових пристроїв, що усувають коливання відеокамери, таких як демпферні майданчики, що зменшують резонанс в місцях, де встановлена відеокамера, спеціальні системи автоматичної стабілізації обладнання в польоті — гіростабілізовані платформи тощо. Вони забезпечують усунення вібрації, пов'язаної з роботою двигунів, утримання горизонтального або фіксованого положення камери в просторі, незалежно від положення літального апарату під впливом вітрових збурень [1]. Але такі пристрої не задовольняють вимогам масогабаритних

характеристик щодо розміщення їх на борту більшості малих та середніх БпЛА.

### **Постановка завдання**

У зв'язку з цим актуальним є розробка методів та алгоритмів зменшення впливу дії вітрових збурень на траєкторію польоту БпЛА, а також створення методів, що усувають в реальному часі зображення низької якості з потоку даних бортової відеокамери й залишають у цьому потоці тільки різкі та стабільні зображення, придатні для цілей геопросторового моніторингу.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Для зниження дії поривів вітру на траєкторію польоту БпЛА найчастіше застосовують принцип зворотного зв'язку, за яким визначають кути відхилення керуючих поверхонь БпЛА в залежності від параметрів руху.

Такий підхід не потребує складних розрахунків, проте у цьому випадку система управління реагує тільки після того, коли характеристики польоту БпЛА за рахунок дії вітрових збурень зазнали досить вагомих змін, що можуть значно погіршити якість геопросторового моніторингу [2].

Тому більш перспективним та розвиненим методом стабілізації польоту БпЛА під час потрапляння в зону турбулентності для геопросторового моніторингу є застосування активних методів керування вектором повної аеродинамічної сили за допомогою відхилення відповідних керуючих поверхонь механізації крила [3].

Швидкість протікання перехідних процесів для органів керування механізацією крила БпЛА значно більша, ніж швидкість подібних перехідних процесів у пілотованих літальних апаратів. Це дає змогу застосовувати всі переваги активних систем безпосереднього керування повною аеродинамічною силою.

Як органи керування повною аеродинамічною силою на БпЛА можуть застосовуватися будь-які елементи механізації крила (у першу чергу його задньої кромки) спільно з рулем висоти та рулем напрямку. Також можливе застосування і інших способів (спільне і диференціальне відхилення секцій спойлерів, інтерцепторів, елеронів-закрилків тощо) [4; 5].

**Метою статті** є розроблення дворівневої технології інтелектуального застосування бортової відеокамери БпЛА для моніторингу геопросторових даних:

– перший рівень цієї технології забезпечує зменшення впливу вітрових збурень на траєкторію польоту БпЛА;

– другий рівень виконує категоризацію потоку зображень бортової відеокамери для геопросторового моніторингу за допомогою застосування швидкодіючого інтегрального критерію стабільності, який усуває в реальному часі зображення низької якості з потоку даних бортової відеокамери й залишає в цьому потоці тільки різкі та стабільні зображення, придатні для цілей моніторингу стану навколишнього середовища.

### Алгоритм зменшення впливу вітрових збурень на траєкторію безпілотного літального апарату

У загальному випадку рух БпЛА відбувається під дією повної аеродинамічної сили, гравітаційної сили і сили тяги двигунів. Надалі для опису балансу сил БпЛА використовується швидкісна і зв'язана системи координат [6].

Початок зв'язаної системи координат  $OXYZ$  розташовано в центрі мас БпЛА. Вісь  $OX$  лежить у площині симетрії і спрямована вздовж лінії хорди крила до носової частини БпЛА. Вісь  $OY$  лежить у площині симетрії БпЛА і спрямована вгору (при горизонтальному польоті), вісь  $OZ$  доповнює систему до правої.

Початок швидкісної системи координат  $Ox_aY_aZ_a$  співпадає з центром мас БпЛА.

Вісь  $Ox_a$  спрямована вздовж повітряної швидкості польоту  $\bar{V}$ . Вісь  $Oy_a$  лежить у площині симетрії БпЛА і спрямована до верхньої частини БпЛА. Вісь  $Oz_a$  доповнює систему координат до правої.

Відносно швидкісної системи координат  $Ox_aY_aZ_a$  зв'язана система координат  $OXYZ$  повернена на кути атаки  $\alpha$  і ковзання  $\beta$ .

Кут атаки  $\alpha$  — це кут між подовжною віссю БпЛА  $Ox$  і проекцією повітряної швидкості  $V$  на площину  $OXY$ . Кут ковзання  $\beta$  — це кут між повітряною швидкістю  $V$  і площиною  $OXY$  зв'язаної системи координат.

Матриця направляючих косинусів  $aas$ , яка використовується для переходу від зв'язаної системи координат  $OXYZ$  до швидкісної системи координат  $Ox_aY_aZ_a$ , має вигляд:

$$aas = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ -\cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Під час польоту в неспокійній атмосфері пориви вітру змінюють повітряну швидкість  $V$  БпЛА, а також його кути атаки  $\alpha$  і ковзання  $\beta$ , що, у свою чергу, викликає зміну вектору повної аеродинамічної сили  $\bar{R}$  і вектору перевантаження  $\bar{n}$ , який визначається як відношення суми вектору повної аеродинамічної сили  $\bar{R}$  і вектору тяги  $\bar{P}$  до величини сили тяжіння  $mg$ :

$$\bar{n} = \frac{\bar{R} + \bar{P}}{mg}, \quad (2)$$

де  $m$  — маса БпЛА;  $g$  — прискорення вільного падіння.

На борту БпЛА для визначення вектору перевантаження  $\bar{n}$ , як правило, використовують сенсори MEMS (Microelectromechanical systems), які вимірюють проекції перевантаження ( $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_z$ ) на осі  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  зв'язаної системи координат.

Припустим, що вектор тяги  $\bar{P}$  БпЛА за рахунок конструкції має, наприклад, такі проекції тяги  $(P \cos \phi_p, P \sin \phi_p, 0)$  на осі  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  зв'язаної системи координат, де  $P$  — тяга двигуна;  $\phi_p$  — кут установки двигуна відносно зв'язаної системи координат  $OXYZ$ . Використання матриці направляючих косинусів  $aas$  (1) до вектору перевантаження  $\bar{n}$  ( $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_z$ ) та вектору тяги  $\bar{P}(P \cos \phi_p, P \sin \phi_p, 0)$  дає змогу записати скалярний вид рівняння (1) в проекціях на осі швидкісної системи координат  $Ox_aY_aZ_a$ :

$$\begin{aligned} n_x \cos \alpha \cos \beta - n_y \sin \alpha \cos \beta + n_z \sin \beta &= \frac{P \cos(\alpha + \phi_p) \cos \beta - R_{xa}}{mg}; \\ n_x \sin \alpha + n_y \cos \alpha &= \frac{P \sin(\alpha + \phi_p) + R_{ya}}{mg}; \\ -n_x \cos \alpha \sin \beta + n_y \sin \alpha \sin \beta + n_z \cos \beta &= \frac{-P \cos(\alpha + \phi_p) \sin \beta + R_{za}}{mg}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $R_{xa}$ ,  $R_{ya}$ ,  $R_{za}$  — проєкції вектору аеродинамічних сил  $\bar{R}$  на осі  $OX_a$ ,  $OY_a$ ,  $OZ_a$  швидкісної системи координат відповідно.

Проєкції вектору аеродинамічних сил  $R_{xa}$ ,  $R_{ya}$ ,  $R_{za}$  на осі швидкісної системи координат  $OX_a Y_a Z_a$  визначаються таким чином:

$$\begin{aligned} R_{xa} &= qSC_{xa}(\alpha, \omega_z, \delta_b, \delta_{e-3}, \delta_1, \delta_3); \\ R_{ya} &= qSC_{ya}(\alpha, \omega_z, \delta_b, \delta_{e-3}, \delta_1, \delta_3); \\ R_{za} &= qSC_{za}(\alpha, \omega_z, \delta_b, \delta_{e-3}, \delta_1, \delta_3), \end{aligned} \quad (4)$$

де  $q$  — динамічний швидкісний напір;  $S$  — площа крила;  $C_{xa}$ ,  $C_{ya}$ ,  $C_{za}$  — коефіцієнти проєкцій аеродинамічної сили на осі швидкісної системи координат  $OX_a Y_a Z_a$ ;  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  — проєкції вектору кутової швидкості БПЛА  $\bar{\omega}$  на осі  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  зв'язаної системи координат;  $\delta_b, \delta_e, \delta_n$  — кути відхилення відповідно руля висоти, елеронів та руля напрямку.

Окрім того, для безпосереднього керування аеродинамічною силою конструкція БПЛА повинна мати наявні керуючі поверхні, наприклад, елерони-закрилки, інтерцептори, закрилки з кутами відхилення  $\delta_{e-3}, \delta_1, \delta_3$  відповідно.

Систему рівнянь руху БПЛА відносно центру мас у зв'язаній системі координат БПЛА із урахуванням наявності у цього БПЛА площини симетрії (тобто  $I_{xz} = I_{yz} = 0$ ) можна записати так:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_x I_x &= M_x + I_{xy}(\dot{\omega}_y - \omega_x \omega_z) - (I_z - I_y)\omega_y \omega_z; \\ \dot{\omega}_y I_y &= M_y + I_{xy}(\dot{\omega}_x - \omega_y \omega_z) - (I_x - I_z)\omega_x \omega_z; \\ \dot{\omega}_z I_z &= M_z + I_{xy}(\dot{\omega}_x^2 - \dot{\omega}_y^2) - (I_y - I_x)\omega_x \omega_y, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $I_x, I_y, I_z$  — моменти інерції БПЛА відносно осей  $OX, OY, OZ$ ;  $I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}$  — відцентрові моменти інерції БПЛА відносно відповідних пар осей;  $M_x, M_y, M_z$  — проєкції аеродинамічного моменту зовнішніх сил  $\bar{M}$  на осі зв'язаної системи координат  $WXYZ$ .

Проєкції аеродинамічного моменту зовнішніх сил  $M_x, M_y, M_z$  на осі зв'язаної системи координат БПЛА  $WXYZ$  визначаються так:

$$\begin{aligned} M_x &= m_x qSl(\beta, \omega_x, \omega_y, \delta_e, \delta_n, \delta_1, \delta_3); \\ M_y &= m_y qSl(\beta, \omega_x, \omega_y, \delta_e, \delta_n, \delta_1, \delta_3); \\ M_z &= m_z qSlb_A(\beta, \omega_z, \delta_b, \delta_{e-3}, \delta_1, \delta_3), \end{aligned} \quad (6)$$

де  $m_x, m_y, m_z$  — безрозмірні коефіцієнти аеродинамічних моментів;  $l$  — розмах крила;  $b_A$  — довжина середньої аеродинамічної хорди.

Коефіцієнти аеродинамічних сил  $C_{xa}, C_{ya}, C_{za}$  (4) та аеродинамічних моментів  $m_x, m_y, m_z$  (6) у загальному випадку виражаються у вигляді функціональних співвідношень, що залежать від параметрів руху та режимів польоту БПЛА. У виразах (4) та (6) зазначено відповідно залежність коефіцієнтів аеродинамічних сил  $C_{xa}, C_{ya}, C_{za}$  та аеродинамічних моментів  $m_x, m_y, m_z$  від найбільш впливових та типових параметрів руху БПЛА. Слід зазначити, що для різних БПЛА перелік параметрів у виразах (4) та (6) може бути іншим залежно від особливостей конструкції БПЛА.

При обчисленнях коефіцієнти аеродинамічних сил  $C_{xa}, C_{ya}, C_{za}$  (4) і моментів  $m_x, m_y, m_z$  (6) можуть бути визначені, наприклад, шляхом інтерполяції відповідних таблиць аеродинамічних даних, отриманих у результаті експериментальних досліджень аеродинаміки БПЛА.

Системи рівнянь (3)–(4) та (5)–(6) є істотно нелінійними з великою кількістю параметрів і складними перехресними зв'язками. При польоті БПЛА вітрові збурення значно змінюють параметри його руху, що робить неприпустимим спрощення або лінеаризацію цих систем рівнянь при синтезі ефективної системи компенсації вітрових збурень для вирішення завдань з моніторингу геопросторових даних.

На першому етапі обчислень параметрів системної компенсації вітрових збурень на основі нелінійної системи рівнянь (3)–(4) здійснюється непряме вираховування значень кута атаки  $\hat{\alpha}$ , кута ковзання  $\hat{\beta}$  та тяги двигуна  $\hat{P}$ . Для досягнення цього систему рівнянь (3)–(4) вирішують відносно кута атаки, кута ковзання та тяги двигуна, використовуючи будь-який із відомих методів обчислення системи нелінійних рівнянь, наприклад, методи Ньютона–Рафсона, Зейделя, Бройдена тощо.

Варто зазначити, що розраховане таким чином значення кута атаки  $\hat{\alpha}$ , кута ковзання  $\hat{\beta}$  та тяги двигуна  $\hat{P}$  містять результат впливу вітрових збурень і можуть бути використані при розробці автоматів безпеки літальних апаратів усіх типів для запобігання аварійних режимів виходу на критичні кути атаки та ковзання, запобігання виниканню ефекту від'ємної тяги гвинта та зменшення впливу турбулентності.

Найліпші умови для моніторингу геопросторових даних із застосуванням бортової відеокамери забезпечуються в режимі сталого горизонтального польоту БпЛА з дотриманням наступних вимог балансу проєкцій вектору перевантаження  $\bar{n}$  на осі швидкісної системи координат  $OX_aY_aZ_a$ :

$$\begin{aligned} n_{xa} &= 0; \\ n_{ya} &= 1; \\ n_{za} &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Якщо під час сталого горизонтального польоту на БпЛА діють вітрові збурення, то рівняння балансу (7) не виконуються. Оцінка величини дисбалансу рівнянь (7) з урахуванням співвідношень (3) має такий вигляд:

$$\begin{aligned} |n_x \sin \hat{\alpha} + n_y \cos \hat{\alpha}| &< \xi; \\ |n_x \sin \hat{\alpha} + n_y \cos \hat{\alpha} - 1| &< \xi; \\ |-n_x \cos \hat{\alpha} \sin \hat{\beta} + n_y \sin \hat{\alpha} \sin \hat{\beta} + n_z \cos \hat{\beta}| &< \xi, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $\xi$  — припустимий рівень перевантаження внаслідок дії вітрових збурень.

У випадку, коли хоч одна нерівність із (8) не виконуються, вітрові збурення є такими, що можуть призвести до значного порушення рівноваги БпЛА та вагової зміни його кутового положення зі значним погіршенням якості моніторингу геопросторових даних. Компенсація впливу дії вітрових збурень на кутове положення БпЛА в цьому випадку може бути забезпечена на основі дотримання вимог, які формуються на основі системи рівнянь (6) з урахуванням збурених кутів атаки  $\hat{\alpha}$  та ковзання  $\hat{\beta}$ , та мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} m_x qSI(\hat{\beta}, \omega_x, \omega_y, \delta_e + \hat{\delta}_{eW}, \delta_n + \hat{\delta}_{nW}, \delta_i, \delta_3) &= 0; \\ m_y qSI(\hat{\beta}, \omega_x, \omega_y, \delta_e + \hat{\delta}_{eW}, \delta_n + \hat{\delta}_{nW}, \delta_i, \delta_3) &= 0; \\ m_z qSb_A(\hat{\alpha}, \omega_z, \delta_b + \hat{\delta}_{bW}, \delta_{e-3}, \delta_i, \delta_3) &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $\hat{\delta}_{bW}, \hat{\delta}_{eW}, \hat{\delta}_{nW}$  — відповідні значення додаткових кутів відхилення руля висоти, елеронів, руля напрямку, що компенсують дію збурених кутів атаки  $\hat{\alpha}$  та ковзання  $\hat{\beta}$  на кутове положення БпЛА.

На другому етапі обчислень параметрів системної компенсації вітрових збурень нелінійну систему рівнянь (9) вирішують відносно значень додаткових кутів відхилення руля висоти  $\hat{\delta}_{bW}$ , елеронів  $\hat{\delta}_{eW}$  та руля напрямку  $\hat{\delta}_{nW}$ , що компенсують дію збурених кутів атаки  $\hat{\alpha}$  та ковзання  $\hat{\beta}$  на кутове положення БпЛА. З урахуванням вимог щодо проєкцій вектору перевантаження  $\bar{n}$  (7) та значень кута атаки  $\hat{\alpha}$  та ковзання  $\hat{\beta}$ , додаткових кутів відхилення руля висоти  $\hat{\delta}_{bW}$ , елеронів  $\hat{\delta}_{eW}$  та руля напрямку  $\hat{\delta}_{nW}$ , тяги двигуна  $\hat{P}$  система рівнянь (3–4) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{P \cos(\hat{\alpha} + \phi_p) \cos \hat{\beta} - R_{xa}}{mg} &= 0; \\ \frac{P \sin(\hat{\alpha} + \phi_p) + R_{ya}}{mg} &= 1; \\ \frac{-P \cos(\hat{\alpha} + \phi_p) \sin \hat{\beta} + R_{za}}{mg} &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

та

$$\begin{aligned} R_{xa} &= qSC_{xa}(\hat{\alpha}, \omega_z, \delta_b + \hat{\delta}_{bW}, \delta_{e-3}, \delta_i, \delta_3); \\ R_{ya} &= qSC_{ya}(\hat{\alpha}, \omega_z, \delta_b + \hat{\delta}_{bW}, \delta_{e-3}, \delta_i, \delta_3); \\ R_{za} &= qSC_{za}(\hat{\beta}, \omega_x, \delta_e + \hat{\delta}_{eW}, \delta_n + \hat{\delta}_{nW}, \delta_i, \delta_3). \end{aligned} \quad (11)$$

На третьому етапі обчислень параметрів системної компенсації вітрових збурень застосовується принцип безпосереднього керування аеродинамічною силою  $\bar{R}$  з використанням усіх наявних засобів механізації крила для забезпечення виконання умов (7). Виконання умов (7) забезпечується за рахунок зміни величини підйомної сили крила для зменшення дії вітрових збурень на політ БпЛА. Для досягнення цього нелінійну систему рівнянь (10)–(11) вирішують відносно кутів відхилення елеронів-закрилків  $\hat{\delta}_{e-3}$ , інтерцепторів  $\hat{\delta}_i$ , закрилків  $\hat{\delta}_3$  відповідно. Спільне відхилення поверхонь безпосереднього керування аеродинамічною силою  $\bar{R}$  на розраховані кути  $\hat{\delta}_{e-3}$ ,  $\hat{\delta}_i$ ,  $\hat{\delta}_3$  дає змогу сформувати аеродинамічну силу, яка компенсує дію вітрових збурень, але, у свою чергу, призведе до порушення рівноваги та зміни кутового положення БпЛА, що також може погіршити умови якісного моніторингу геопросторових даних. Вплив безпосередньої зміни величини підйомної сили крила на кутове положення БпЛА в цьому випадку може бути компенсований за рахунок виконання вимог, що формуються на основі системи рівнянь (9) з додатковим урахуванням кутів відхилення елеронів—закрилків  $\hat{\delta}_{e-3}$ , інтерцепторів  $\hat{\delta}_i$ , закрилків  $\hat{\delta}_3$ , що має вигляд:

$$\begin{aligned}
 m_x qSl(\hat{\beta}, \omega_x, \omega_y, \delta_e + \hat{\delta}_{eW} + \hat{\delta}_{eR}, \delta_n + \hat{\delta}_{nW} + \hat{\delta}_{nR}, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_3) &= 0; \\
 m_y qSl(\hat{\beta}, \omega_x, \omega_y, \delta_e + \hat{\delta}_{eW} + \hat{\delta}_{eR}, \delta_n + \hat{\delta}_{nW} + \hat{\delta}_{nR}, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_3) &= 0; \\
 m_z qSb_A(\hat{\alpha}, \omega_z, \delta_b + \hat{\delta}_{bW} + \hat{\delta}_{bR}, \hat{\delta}_{e-3}, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_3) &= 0,
 \end{aligned} \tag{12}$$

де  $\hat{\delta}_{bR}, \hat{\delta}_{eR}, \hat{\delta}_{nR}$  — відповідні значення додаткових кутів відхилення руля висоти, елеронів, руля напрямку, що компенсують дію безпосередньої зміни величини підйомної сили крила на кутове положення БПЛА.

На четвертому етапі обчислень параметрів системної компенсації вітрових збурень нелінійну систему рівнянь (12) вирішують відносно значень додаткових кутів відхилення руля висоти  $\hat{\delta}_{bR}$ , елеронів  $\hat{\delta}_{eR}$  та руля напрямку  $\hat{\delta}_{nR}$ , що компенсують дію безпосередньої зміни величини підйомної сили крила на кутове положення БПЛА.

У разі діагностування значних вітрових збурень, тобто при порушенні умов (8), генеруються команди системної компенсації, які передаються до системи керування БПЛА, де вони реалізують необхідну реконфігурацію її структури з метою відпрацювання згенерованих команд компенсації вітрових збурень, таких як:

- додаткових кутів відхилення руля висоти  $\hat{\delta}_{bW}$ , елеронів,  $\hat{\delta}_{eW}$ , руля напрямку  $\hat{\delta}_{nW}$  для компенсації дії збурених кутів атаки  $\hat{\alpha}$  та ковзання  $\hat{\beta}$  на кутове положення БПЛА;

- кутів відхилення елеронів-закрилків  $\hat{\delta}_{e-3}$ , інтерцепторів  $\hat{\delta}_1$ , закрилків  $\hat{\delta}_3$  для безпосереднього керування аеродинамічною силою компенсації вітрових збурень;

- додаткових кутів відхилення руля висоти  $\hat{\delta}_{bR}$ , елеронів  $\hat{\delta}_{eR}$  та руля напрямку  $\hat{\delta}_{nR}$ , що компенсують вплив безпосередньої зміни величини підйомної сили крила на кутове положення БПЛА.

Відпрацювання системою керування БПЛА вищевказаних команд компенсації вітрових збурень забезпечує необхідні умови застосування бортової відеокамери для моніторингу геопросторових даних. Задача моніторингу стану навколишнього середовища відноситься до класу інтелектуальних завдань, саме тому розроблені процедури протидії вітровим збуренням реалізують у собі інтелектуальні складові інформаційної технології застосування бортової відеокамери БПЛА для моніторингу геопросторових даних, а саме — забезпечення діагностики стану турбулентності атмосфери, прийняття рішень щодо реконфігурації структур істотно

нелінійних систем керування, швидка та якісна адаптація команд керування до зовнішніх збурень [7; 8].

Слід зауважити, що чим точніше співвідношення (4) та (6) описують реальні параметри руху БПЛА, тим більш ефективним буде процес обчислення параметрів системної компенсації вітрових збурень. Висока продуктивність сучасних комплексів інтегрованої авіоніки дає змогу виконувати безпосередньо на борту БПЛА всі необхідні обчислення та необхідну реконфігурацію структури системи керування в реальному масштабі часу, тим самим підвищуючи якість і стійкість процесу керування під час дій вітрових збурень.

Однак, незважаючи на те, що перший рівень технології інтелектуального застосування бортової відеокамери БПЛА для моніторингу геопросторових даних значно зменшує вплив вітрових збурень на траєкторію польоту БПЛА та поліпшує умови зйомки, в потоці даних бортової відеокамери все ж таки залишається доволі значна кількість зображень низької якості. Ці зображення низької якості значно ускладнюють або навіть унеможливають їх використання для задач моніторингу стану навколишнього середовища. Таким чином, для виконання поставлених задач необхідним є розробка другого рівня технології, який здійснює категоризацію потоку зображень бортової відеокамери й залишає в цьому потоці тільки різкі та стабільні зображення, придатні для цілей моніторингу стану навколишнього середовища.

Проблема розробки методів, алгоритмів та процедур категоризації потоку зображень за різкістю та стабільністю в значній мірі подібна до тієї, з якою може стикатися людина—експерт при вирішенні інтелектуальних завдань обробки та фільтрації відеоінформації. Для вирішення цих завдань для другого рівня технології розроблені та вдосконалені методи комп'ютерного зору, такі як інтелектуальна категоризація потоку зображень, когнітивне виявлення та знаходження характерних ознак різких та стабільних зображень.

Звичайні комп'ютеризовані технології (наприклад, методи цифрової обробки зображень) для вимірювання стабільності зображення у відео визначають положення окремих об'єктів на декількох відеокадрах та ідентифікують зміни положення цих об'єктів на

послідовності відеокадрів. Стабільність зображення при цьому характеризується за зміною напрямку руху та зміною положення ідентифікованих об'єктів [9; 10].

Але такий підхід має відносно низькі функціональні і технічні характеристики за умови його використання для виявлення нестабільних кадрів у потоці даних бортової відеокамери для задач моніторингу стану навколишнього середовища.

Це зумовлено наявністю на зображеннях з бортової відеокамери при зйомках місцевості великої кількості дрібних об'єктів з низькою деталізацією, ідентифікація яких може призвести до значних помилок при обчисленні стабільності зображень, що робить неефективним застосування цих методів в задачах геопросторового моніторингу.

### Алгоритм кольорового аналізу та селекції послідовності зображень

З метою усунення зображень низької якості в відеопотоці даних з борту БПЛА, що зумовлено дією різних видів збурень, був розроблений алгоритм кольорового аналізу та селекції послідовності зображень отриманих за допомогою БПЛА для відбору якісних зображень, придатних для подальшої обробки.

Об'єкт, що має колір, може випромінювати світло або поглинати його.

У першому і в другому випадках колір об'єкта описується по-різному, тобто для його опису застосовуються різні моделі кольору. Параметри кольору можуть бути виражені за допомогою різноманіття кольорових моделей.

Найчастіше в графічних пакетах використовується кольорова модель RGB (аббревіатура англійських слів *red*, *green*, *blue* — червоний, зелений, блакитний відповідно) — кольорова модель, що описує спосіб кодування для відтворення кольору за допомогою трьох кольорів, які прийнято називати *основними*.

На вхід алгоритму кольорового аналізу та селекції послідовності зображень надходять кольорові зображення, отримані в результаті розкадрування відеоряду, знятого за допомогою відеокамери, розташованої на борту БПЛА.

Для попереднього аналізу на основі даних відеоряду формуються BGR — зображення в природних кольорах: R — 3 канал (червоний), G — 2 канал (зелений), B — 1 канал (блакитний).

Точки на зображенні характеризуються парами координат  $y$  і  $x$ . Координати  $x$  збільшуються праворуч, а координати  $y$  збільшуються згори донизу. Початок координат в точці  $(0,0)$  (рис. 1).

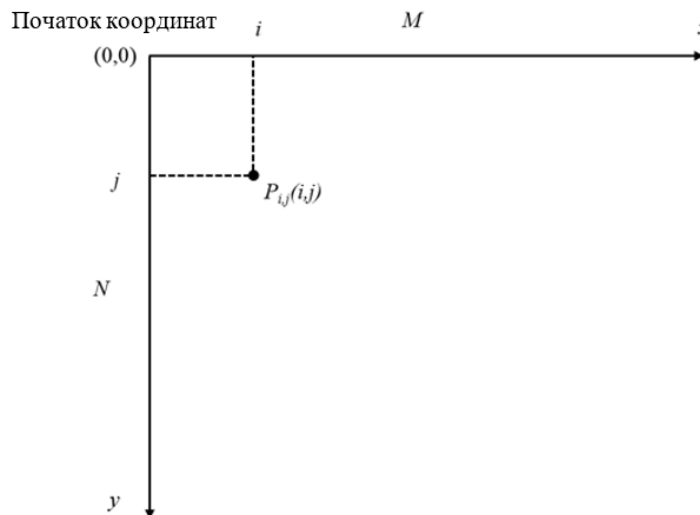


Рис. 1. Система координат зображення

Алгоритм знаходить кольоровий момент для кожного пікселя. При цьому, для посилення кольорових особливостей зображення на обчислення накладається обмеження по мінімальній яскравості пікселя. На площині  $Oxy$  зображення характеризується системою піксельних точок  $P_{0,0}(0,0)$ ,  $P_{0,1}(0,1)$ ,  $P_{i,j}(i,j)$ ,  $P_{M,N}(M,N)$ .

Кожен піксель зображення  $P_{i,j}(i,j)$  має три складові:  $B_{ij}$ ,  $G_{ij}$ ,  $R_{ij}$  — інтенсивність блакит-

ного, зеленого і червоного кольору в пікселі відповідно;  $M$ ,  $N$  — ширина і висота зображення відповідно;  $i$ ,  $j$  — піксельні координати точки зображення по осях  $x$  та  $y$  при цьому:  $i = 1, 2, \dots, M$ ;  $j = 1, 2, \dots, N$ .

Добуток  $B_{ij} \cdot i$  та  $B_{ij} \cdot j$  визначає моменти кольору інтенсивності блакитного кольору щодо осей  $Ox$  та  $Oy$  для пікселя  $P_{i,j}(i,j)$ .

Добуток  $G_{ij} \cdot i$  та  $G_{ij} \cdot j$  визначає моменти кольору інтенсивності зеленого кольору відносно осей  $Ox$  та  $Oy$  для пікселя  $P_{ij}(i, j)$ .

Добуток  $R_{ij} \cdot i$  та  $R_{ij} \cdot j$  визначає моменти кольору інтенсивності червоного кольору відносно осей  $Ox$  та  $Oy$  для пікселя  $P_{ij}(i, j)$ .

Сума моментів кольору по осях  $x$  та  $y$  зображення визначається за формулами:

$$mB_x = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N B_{ij}i; \quad mG_x = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N G_{ij}i;$$

$$mB_y = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N B_{ij}j; \quad mG_y = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N G_{ij}j;$$

$$mR_x = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N R_{ij}i;$$

$$mR_y = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N R_{ij}j;$$

де  $mB_x, mB_y$  — сума моментів блакитного кольору по осях  $Ox$  і  $Oy$ ;  $mG_x, mG_y$  — сума моментів зеленого кольору по осях  $Ox$  і  $Oy$ ;  $mR_x, mR_y$  — сума моментів червоного кольору по осях  $Ox$  і  $Oy$ .

Термін момент кольору не має механічного значення. По суті, моменти кольору є характеристичними ознаками зображення, для обчислення яких використовуються математичні вирази, аналогічні обчислення моментів інерції матеріального тіла, де замість значень мас окремих точок тіла підставлені значення кольорових інтенсивностей пікселів зображення.

Наступний крок алгоритму розраховує сумарну інтенсивність кожного кольору зображення за формулами:

$$massB = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N B_{ij}; \quad massG = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N G_{ij};$$

$$massR = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N R_{ij},$$

де  $massB$  — сумарна інтенсивність блакитного кольору;  $massG$  — сумарна інтенсивність зеленого кольору;  $massR$  — сумарна інтенсивність червоного кольору.

Далі, алгоритм розраховує центр для кожного кольору зображення за формулами:

$$cenB_x = \frac{mB_x}{massB}; \quad cenG_x = \frac{mG_x}{massG}; \quad cenR_x = \frac{mR_x}{massR};$$

$$cenB_y = \frac{mB_y}{massB}; \quad cenG_y = \frac{mG_y}{massG}; \quad cenR_y = \frac{mR_y}{massR},$$

де  $cenB_x, cenB_y$  — відповідно координата  $x$  та  $y$  центру блакитного кольору зображення;  $cenG_x, cenG_y$  — відповідно координата  $x$  та  $y$  центру зеленого кольору зображення;  $cenR_x, cenR_y$  — відповідно координата  $x$  та  $y$  центру червоного кольору зображення.

Алгоритм формує кольорову зірку, вершинами якої є центри з набору кольорів RGB моделі (рис. 2).

Кольорова зірка характеризується центром  $cc$  (спільним кольоровим центром) і трьома променями.

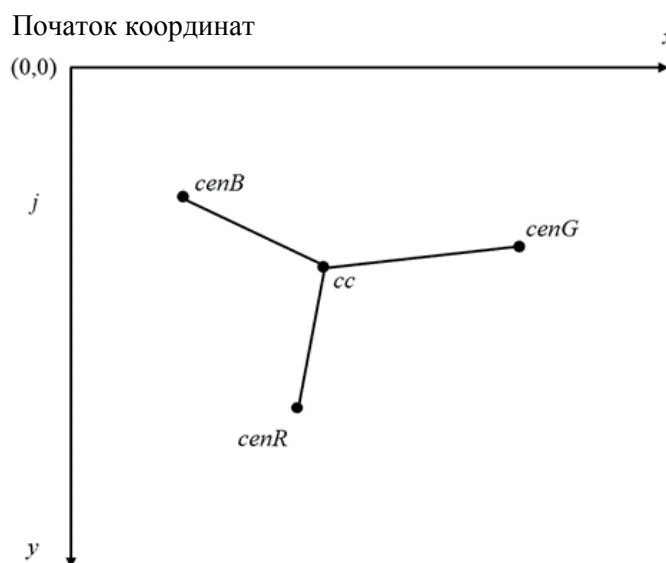


Рис. 2. Кольорова зірка зображення

Алгоритм розраховує спільний кольоровий центр за формулами:

$$cc_x = \frac{cenB_x + cenG_x + cenR_x}{3};$$

$$cc_y = \frac{cenB_y + cenG_y + cenR_y}{3};$$

де  $cc_x$ ,  $cc_y$  — відповідно координата  $x$  та  $y$  спільного кольорового центру.

Променями кольорової зірки є вектори, які йдуть від центру зірки до кожної з точок, які її утворюють (центр для кожного кольору:  $cenB$ ,  $cenG$ ,  $cenR$ ).

Наступний етап роботи алгоритму полягає в знаходженні таких кольорових зірок.

Робота алгоритму циклічна, отже, знаходження подібних кольорових зірок відбувається шляхом порівняння поточного і попереднього зображення.

На кожному кроці роботи алгоритму поточне зображення після обробки стає попереднім і порівнюється з поточним зображенням (рис. 3). Надалі цикл триває поки не відбудеться повний перебір відеоряду після розкадрування.

Індекси  $s$  та  $p$  належать відповідно до поточного та попереднього зображення.

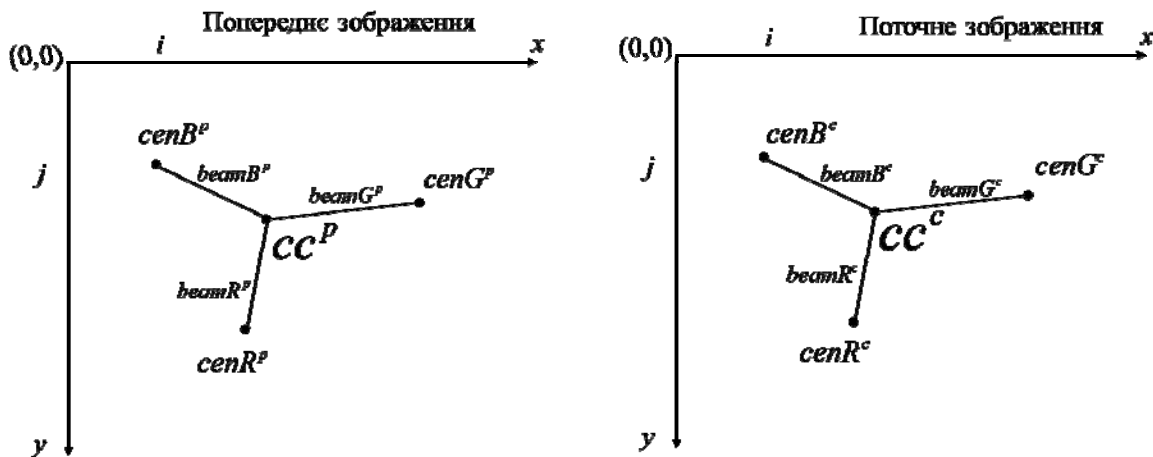


Рис. 3. Попереднє та поточне зображення з відеоряду

Для знаходження подібних кольорових зірок на попередньому та поточному зображенні алгоритм розраховує довжину кожного променя кольорової зірки для поточного та попереднього зображення за формулами. Для поточного зображення:

$$beamB^c = \sqrt{(cenB_x^c - cc_x^c)^2 + (cenB_y^c - cc_y^c)^2};$$

$$beamG^c = \sqrt{(cenG_x^c - cc_x^c)^2 + (cenG_y^c - cc_y^c)^2};$$

$$beamR^c = \sqrt{(cenR_x^c - cc_x^c)^2 + (cenR_y^c - cc_y^c)^2};$$

де  $beamB^c$  — довжина променя від центру зірки  $cc^c$  до точки  $cenB^c$  (рис. 3);  $beamG^c$  — довжина променя від центру зірки  $cc^c$  до точки  $cenG^c$  (рис. 3);  $beamR^c$  — довжина променя від центру зірки  $cc^c$  до точки  $cenR^c$  (рис. 3).

Для попереднього зображення:

$$beamB^p = \sqrt{(cenB_x^p - cc_x^p)^2 + (cenB_y^p - cc_y^p)^2};$$

$$beamG^p = \sqrt{(cenG_x^p - cc_x^p)^2 + (cenG_y^p - cc_y^p)^2};$$

$$beamR^p = \sqrt{(cenR_x^p - cc_x^p)^2 + (cenR_y^p - cc_y^p)^2};$$

де  $beamB^p$  — довжина променя від центру зірки  $cc^p$  до точки  $cenB^p$  (рис. 3);  $beamG^p$  — довжина променя від центру зірки  $cc^p$  до точки  $cenG^p$  (рис. 3);  $beamR^p$  — довжина променя від центру зірки  $cc^p$  до точки  $cenR^p$  (рис. 3).

Далі, алгоритм розраховує азимут кожного променя зірки для поточного та попереднього зображення за формулами. Для поточного зображення:

$$AzB^c = \arctan(cenB_x^c - cc_x^c; cenB_y^c - cc_y^c);$$

$$AzG^c = \arctan(cenG_x^c - cc_x^c; cenG_y^c - cc_y^c);$$

$$AzR^c = \arctan(cenR_x^c - cc_x^c; cenR_y^c - cc_y^c);$$

де  $AzB^c$  — азимут променя  $beamB^c$ ;  $AzG^c$  — азимут променя  $beamG^c$ ;  $AzR^c$  — азимут променя  $beamR^c$ .

Для попереднього зображення:

$$AzB^p = \arctan(cenB_x^p - cc_x^p; cenB_y^p - cc_y^p);$$

$$AzG^p = \arctan(cenG_x^p - cc_x^p; cenG_y^p - cc_y^p);$$

$$AzR^p = \arctan(cenR_x^p - cc_x^p; cenR_y^p - cc_y^p);$$



де  $AzB^p$  — азимут променя  $beamB^p$ ;  $AzG^p$  — азимут променя  $beamG^p$ ;  $AzR^p$  — азимут променя  $beamR^p$ .

Наступним кроком алгоритму є вибір найдовшого променя кольорової зірки на поточному та попередньому зображеннях. Для рис. 3 — це промені  $beamG^c$  та  $beamG^p$  для поточного та попереднього зображень відповідно. Надалі алгоритм знаходить різницю азимутів  $Az_\Delta$  обраних на минулому кроці променів поточного та попереднього зображень:

$$Az_\Delta = AzG^c - AzG^p.$$

Алгоритм знаходить коефіцієнт  $R$ , який визначається як відношення масштабів обраних променів. Для рис. 3 — це промені  $beamG^c$  та  $beamG^p$  для поточного та попереднього зображень відповідно.

$$R = \frac{beamG^c}{beamG^p}.$$

Промені зірки поточного зображення масштабуються з урахуванням масштабного коефіцієнту  $R$ . Після чого кольорові зірки поточного і попереднього зображення поєднуються таким чином, що збігаються центри кольорових зірок. При цьому також відбувається поворот зірки поточного зображення на кут  $Az_\Delta$ :

$$\overline{R_{cc^c cenG^c}} = M(Az_\Delta)(\overline{cc^c cenG^c} R);$$

$$\overline{R_{cc^c cenR^c}} = M(Az_\Delta)(\overline{cc^c cenR^c} R);$$

$$\overline{R_{cc^c cenB^c}} = M(Az_\Delta)(\overline{cc^c cenB^c} R),$$

де  $\overline{R_{cc^c cenG^c}}$ ,  $\overline{R_{cc^c cenR^c}}$ ,  $\overline{R_{cc^c cenB^c}}$  — промені масштабованої і повернутої поточної кольорової зірки;  $M$  — матриця повороту на кут  $Az_\Delta$ .

Оцінку подібності кольорових зірок формують за модулем різниці для кожної зіставленої пари векторів променів кольорової зірки попереднього зображення і векторів променів кольорової зірки поточного зображення співвіднесеної з довжиною відповідного променя попереднього зображення за формулами:

$$Er_1 = \frac{\overline{cc^p cenG^p} - \overline{R_{cc^c cenG^c}}}{|\overline{cc^p cenG^p}|};$$

$$Er_2 = \frac{\overline{cc^p cenR^p} - \overline{R_{cc^c cenR^c}}}{|\overline{cc^p cenR^p}|};$$

$$Er_3 = \frac{\overline{cc^p cenB^p} - \overline{R_{cc^c cenB^c}}}{|\overline{cc^p cenB^p}|},$$

де  $Er_1$ ,  $Er_2$ ,  $Er_3$  — оцінка подібності першої, другої і третьої пар променів кольорових зірок, які зіставляються.

Наступним кроком алгоритм виконує перевірку умови:

$$Er_1 < Er;$$

$$Er_2 < Er;$$

$$Er_3 < Er,$$

де  $Er$  — задане значення припустимої помилки подібності кольорових зірок.

Якщо умова виконується, то алгоритм визначає кольорові зірки, які порівнюються, як подібні та пропускає зображення для подальшої обробки.

Нижче на рис. 4 наведено приклад селекції якісних кадрів за кольором.

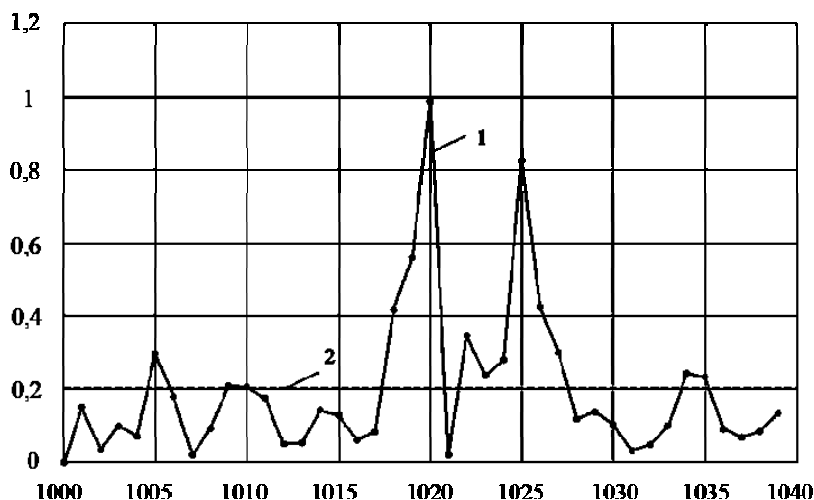


Рис. 4. Величина помилки для послідовності знімків

На рис. 4: крива  $I$  — це величина помилки для послідовності кадрів з номерами від 1000 до 1040, які були отримані внаслідок розкадрування відеоряду з камери БПЛА.

Крива  $2$  — це задане порогове значення допустимої помилки подібності кольорових зірок:  $Er = 0,2$ . У випадку, якщо значення помилки менше порогового значення, алгоритм обирає кадр, який задовольняє вимогам до кольорової селекції для його подальшої перевірки за різкістю та топографічною кластеризацією.

Для прикладу, зображеного на рис. 4, зображення 1020 має значення помилки близько 1, отже, цей кадр не проходить перевірку за кольором, у свою чергу зображення під номером 1015 має допустиму величину помилки і класифікується алгоритмом, як якісне зображення за кольором.

Наступний етап роботи алгоритму полягає в перевірці зображення на різкість.

Різкість зображення — це один з обов'язкових показників його якості, за яким можна судити про придатність зображення до подальшої обробки.

$$\begin{aligned} SB_x &= (B_{i-1,j+1} + 2B_{i,j+1} + B_{i+1,j+1}) - (B_{i-1,j-1} + 2B_{i,j-1} + B_{i+1,j-1}); \\ SB_y &= (B_{i+1,j-1} + 2B_{i+1,j} + B_{i+1,j+1}) - (B_{i-1,j-1} + 2B_{i-1,j} + B_{i-1,j+1}); \\ SG_x &= (G_{i-1,j+1} + 2G_{i,j+1} + G_{i+1,j+1}) - (G_{i-1,j-1} + 2G_{i,j-1} + G_{i+1,j-1}); \\ SG_y &= (G_{i+1,j-1} + 2G_{i+1,j} + G_{i+1,j+1}) - (G_{i-1,j-1} + 2G_{i-1,j} + G_{i-1,j+1}); \\ SR_x &= (R_{i-1,j+1} + 2R_{i,j+1} + R_{i+1,j+1}) - (R_{i-1,j-1} + 2R_{i,j-1} + R_{i+1,j-1}); \\ SR_y &= (R_{i+1,j-1} + 2R_{i+1,j} + B_{i+1,j+1}) - (R_{i-1,j-1} + 2R_{i-1,j} + R_{i-1,j+1}), \end{aligned}$$

де  $B_{ij}$ ,  $G_{ij}$ ,  $R_{ij}$  — інтенсивність блакитного, зеленого та червоного кольорів у пікселі з координатами  $i, j$ ;  $SB_x$  та  $SB_y$  — градієнти Собеля для блакитного кольору пікселя  $P_{ij}(i,j)$  відносно осей  $Ox$  та  $Oy$ ;  $SG_x$  та  $SG_y$  — градієнти Собеля для зеленого кольору пікселя  $P_{ij}(i,j)$  відносно осей  $Ox$  та  $Oy$ ;  $SR_x$  та  $SR_y$  — градієнти Собеля для червоного кольору пікселя  $P_{ij}(i,j)$  відносно осей  $Ox$  та  $Oy$ .

Сумарне значення складових градієнтів Собеля  $G$  за кожним кольором RGB для зображення по осях  $Ox$  та  $Oy$  знаходиться за формулами:

$$\begin{aligned} GB_x &= \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} SB_x; & GG_x &= \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} SG_x; \\ GB_y &= \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} SB_y; & GG_y &= \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} SG_y; \end{aligned}$$

Різкість описує ступінь розрізнення деталей на фотографії. Різкість також можна визначити, як ступінь розмитості кордону між двома сусідніми ділянками зображення з різною яскравістю.

На практиці для оцінки різкості зображень найчастіше застосовуються фільтри, засновані на використанні операторів диференціювання, наприклад, Робертса, Превітта, Собеля, Канні тощо.

Як метрики для оцінки різкості послідовності кольорових зображень, отриманих за допомогою БПЛА, був застосований трьохканальний оператор Собеля, який використовує для кожного каналу кольорів RGB [11].

Процес отримання складових градієнту інтенсивності кольорів RGB відносно осей  $Ox$  та  $Oy$  базується на переміщенні масок операторів Собеля по точкам зображення  $(x, y)$ .

Для оцінки різкості послідовності зображень, отриманих за допомогою БПЛА, спочатку визначають складові градієнту  $S$  для кожного кольору із набору кольорів RGB для кожного пікселю  $P_{ij}(i,j)$  відносно осей  $Ox$  та  $Oy$  у відповідності з оператором Собеля  $3 \times 3$  за формулами:

$$\begin{aligned} GR_x &= \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} SR_x; \\ GR_y &= \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} SR_y, \end{aligned}$$

де  $GB_x$  та  $GB_y$  — сумарне значення складових блакитного кольору градієнтів Собеля для зображення по осях  $Ox$  і  $Oy$ ;  $GG_x$  та  $GG_y$  — сумарне значення складових зеленого кольору градієнтів Собеля для зображення по осях  $Ox$  і  $Oy$ ;  $GR_x$  та  $GR_y$  — сумарне значення складових червоного кольору градієнтів Собеля для зображення по осях  $Ox$  і  $Oy$ .

Інтегральна оцінка різкості  $G_{\text{int}}$  за кожним кольором RGB для зображення розраховується за формулою:

$$G_{\text{int}} = \frac{\sqrt{GB_x^2 + GB_y^2} + \sqrt{GG_x^2 + GG_y^2} + \sqrt{GR_x^2 + GR_y^2}}{(N-1)(M-1)},$$

де  $M$ ,  $N$  — ширина і висота зображення у пікселях відповідно.

Значення  $G_{\text{int}}$ , як інтегральна оцінка, використовується для оцінки різкості зображення. Якщо  $G_{\text{int}}$  перевищує задане значення, зображення вважається таким, яке задовольняє умову за різкістю.

Таким чином, з відеопотоку виділяються якісні зображення, які відповідають критеріям кольорової селекції і селекції по різкості. Отримані зображення характеризуються як якісні і використовуються для подальшої обробки, тобто, якщо зображення пройшло кольорову селекцію і селекцію по різкості.

### Висновки

Отже, основними причинами погіршення якості знімків, отриманих з борту БПЛА, є вітрові збурення, а також зміна положення БПЛА в просторі при маневруванні. Традиційні методи стабілізації траєкторії, що застосовуються в робототехніці, для БПЛА працюють недостатньо добре.

У зв'язку з цим є актуальною задача розроблення алгоритмів зменшення впливу дії вітрових збурень та стабілізації траєкторії польоту БПЛА, а також створення методів усунення зображень низької якості, вже отриманих унаслідок дії різних видів збурень.

Запропонована дворівнева технологія, яка визначає критичні параметри руху безпілотних літальних апаратів, здійснює за цими параметрами просторову компенсацію впливу вітрових збурень як у вертикальній так і у горизонтальній площині та забезпечує покращення якості потоку даних бортової відеокамери шляхом відбору якісних зображень, придатних для подальшої обробки.

Такий підхід має такі суттєві переваги:

- застосовування формалізованих інтелектуальних знань експертів з аеродинаміки та експериментальних досліджень конструкції БПЛА для формування істотно нелінійних аеродинамічних моделей й використання їх в процесі генерації команд просторової компенсації вітрових збурень;

- визначення на основі нелінійних аеродинамічних моделей критичних параметрів руху безпілотного літального апарату кута атаки, кута ковзання та тяги двигуна;

- виконання реконфігурації структури істотно нелінійної системи керування залежно від стану навколишнього середовища;

- забезпечення просторової компенсації впливу вітрових збурень як у вертикальній, так і

у горизонтальній площині та здійснення тим самим покращення якості потоку даних бортової відеокамери.

- аналіз і селекція послідовності зображень з метою усунення зображень низької якості, отриманих внаслідок дії вітрових збурень;

- розширення функціональних можливостей БПЛА внаслідок видобування і цілеспрямованого використання знань про навколишнє середовище;

- створення елементів штучного інтелекту та інтелектуалізації процесів прийняття рішень.

Розроблені система інтелектуального управління БПЛА та процедури селекції зображень за кольором та різкістю дозволяють успішно вирішувати проблеми, значною мірою подібні до тих, з якими може стикатися людина-експерт при вирішенні інтелектуальних завдань обробки та фільтрації відеоінформації.

Тому дані методи, алгоритми та процедури можуть бути імплементовані в перспективні системи інтелектуального керування у галузі моделювання свідомої поведінки людини по виділенню даних, необхідних для сприйняття особливостей зовнішнього середовища.

### ЛІТЕРАТУРА

1. **Козуб А. М.** Аналіз засобів збору інформації для географічних інформаційних систем. *Системи озброєння і військова техніка*. 2011. № 3. С. 42–47.
2. **Березина С. И.** Автоматизация процесса отбраковки данных, полученных с беспилотных летательных аппаратов. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2014. № 1(14). С. 82–89.
3. **O'Connell R. F.** Design, Development and Implementation of an Active Control System for Load Alleviation for a Commercial Airplane. *AGARD Report No. 683*. 1980. URL: [apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a082959.pdf](https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a082959.pdf) (дата звернення: 06.08.2020).
4. **Rollwagen G.** Ellgoth, H., Beuck, G. Identification of Dynamic Response, Simulation and Design of a Highly Nonlinear Digital Load Alleviation System for a Modern Transport Aircraft. *Proceedings of 17th ICAS Congress*. 1990. Pp. 427–433.
5. **Hahn K. U.** Method for reducing the turbulence and gust influences on the flying characteristics of aircraft, and a control device for this purpose. U.S. Patent No. 7,757,993. 2010. URL: [patentimages.storage.googleapis.com/4a/d4/43/23cf6b7b0e81df/US7757993.pdf](https://patentimages.storage.googleapis.com/4a/d4/43/23cf6b7b0e81df/US7757993.pdf) (дата звернення: 06.08.2020).
6. **Beard R. W., McLain T. W.** *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton: Princeton Univ. Press, 2012. 320 p.

7. **Schubert J.**, Brynielsson, J., Nilsson, M., Svenmarck, P. Artificial Intelligence for Decision Support in Command and Control Systems. *Proceedings of the 23rd International Command and Control Research & Technology Symposium «Multi-Domain C2»*. 2018.

8. **Gritsenko V.**, Volkov O., Komar M., Voloshenyuk, D. Integral Adaptive Autopilot for an Unmanned Aerial Vehicle. *Aviation*. 2018. № 22. P. 129–195.

9. **Dhawan A.** Methods and apparatus for measuring image stability in a video. U.S. Patent No.

8,254,629. 2012. URL: [patentimages.storage.googleapis.com/55/b9/ac/92a09d9df4b14e/US8254629.pdf](https://patentimages.storage.googleapis.com/55/b9/ac/92a09d9df4b14e/US8254629.pdf) (дата звернення: 06.08.2020).

10. **Lee S. H.**, Yeh C. H., Kuo C. J. Home-video content analysis for MTV—style video generation. *Storage and Retrieval Methods and Applications for Multimedia*. 2005. Vol. 5682. Pp. 296–307.

11. **Roushdy M.** Comparative study of edge detection algorithms applying on the grayscale noisy image using morphological Filter. *GVIP Journal*. 2006. Vol. 6. №3. Pp. 17–23.

**Волков О. Є., Богачук Ю. П., Комар М. М., Волошенко Д. О.**  
**ДВОРІВНЕВА ТЕХНОЛОГІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ЗАСТОСУВАННЯ БОРТОВОЇ**  
**ВІДЕОКАМЕРИ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ**  
**ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ**

*Основними причинами погіршення якості знімків, отриманих з борту безпілотного літального апарату (БпЛА), є вітрові збурення, а також зміна положення БпЛА в просторі при маневруванні. Традиційні методи стабілізації траєкторії, що застосовуються в робототехніці, для БпЛА працюють недостатньо добре. У зв'язку з цим є актуальною задача розроблення алгоритмів зменшення впливу дії вітрових збурень та стабілізації траєкторії польоту БпЛА, а також створення методів усунення зображень низької якості, вже отриманих внаслідок дії різних видів збурень.*

*В даній роботі запропоновано дворівневу технологію, яка визначає критичні параметри руху безпілотних літальних апаратів, здійснює за цими параметрами просторову компенсацію впливу вітрових збурень як у вертикальній так і у горизонтальній площині та забезпечує покращення якості потоку даних бортової відеокамери шляхом відбору якісних зображень, придатних для подальшої обробки.*

*Перший рівень запропонованої технології забезпечує зменшення впливу вітрових збурень на траєкторію польоту БпЛА, другий рівень виконує категоризацію потоку зображень бортової відеокамери для геопросторового моніторингу за допомогою застосування швидкодійного інтегрального критерію стабільності, який усуває в реальному часі зображення низької якості з потоку даних бортової відеокамери.*

*Розроблені система інтелектуального управління БпЛА та процедури селекції зображень за кольором та різкістю дозволяють успішно вирішувати проблеми, в значній мірі подібні до тих, з якими може стикатися людина-експерт при вирішенні інтелектуальних завдань обробки та фільтрації відеоінформації. Тому дані методи, алгоритми та процедури можуть бути імplementовані в перспективні системи інтелектуального керування у галузі моделювання свідомої поведінки людини по виділенню даних, необхідних для сприйняття особливостей зовнішнього середовища.*

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат; стабілізація; збурення; відеодані; система керування; відбір зображень.

**Volkov O., Bogachuk Yu., Komar M., Voloshenyuk D.**  
**TWO-LEVEL TECHNOLOGY OF INTELLIGENT APPLICATION OF ON-BOARD VIDEO**  
**CAMERA OF UNMANNED AERIAL VEHICLE FOR MONITORING OF GEOSPATIAL DATA**

*The main reasons for the deterioration in the quality of images obtained from an unmanned aerial vehicle (UAV) are wind disturbances, as well as a change of the position of the UAV during maneuvering. Traditional methods of trajectory stabilization used in robotics do not work well enough for UAVs. In this regard, there is an urgent task of developing algorithms for reducing the effect of wind disturbances and stabilizing the flight trajectory of UAVs, as well as creating methods for eliminating low quality images already obtained as a result of various types of disturbances.*

*In this paper, a two-level technology is proposed. This technology determines the critical parameters of the movement of unmanned aerial vehicles, performs spatial compensation of the influence of wind disturbances in both the vertical and horizontal planes for these parameters, and improves the quality of the data stream of the on-board video camera by selecting high-quality images suitable for further processing.*

*The first level of the proposed technology provides a decrease in the effect of wind disturbances on the UAV flight trajectory. The second level categorizes the flow of images of an onboard video camera for geospatial monitoring as a result of using a high-speed integral stability criterion, which eliminates in real time low quality images from the data flow from the onboard video camera.*

*The developed system for intelligent control of UAVs and procedures for selecting images by color and sharpness make it possible to successfully solve problems that are largely similar to those that a human expert can face when*

*solving intellectual problems of processing and filtering video information. Therefore, these methods, algorithms and procedures can be implemented in advanced systems of intelligent control in the field of modeling the conscious behavior of a person for the selection of data necessary to perceive the characteristics of the external environment.*

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; stabilization; disturbances; video data; control system; image selection.

**Волков А. Е., Богачук Ю. П., Комар Н. Н., Волошенюк Д. А.**  
**ДВУХУРОВНЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ БОРТОВОЙ ВИДЕОКАМЕРЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ**

*Основными причинами ухудшения качества снимков, полученных с борта беспилотного летательного аппарата (БпЛА), являются ветровые возмущения, а также изменение положения БпЛА в пространстве при маневрировании. Традиционные методы стабилизации траектории, применяемые в робототехнике, для БпЛА работают недостаточно хорошо. В связи с этим стоит актуальна задача разработки алгоритмов уменьшения влияния действия ветровых возмущений и стабилизации траектории полета БпЛА, а также создания методов устранения изображений низкого качества, уже полученных в результате действия различных видов возмущений.*

*В данной работе предложено двухуровневую технологию, которая определяет критические параметры движения беспилотных летательных аппаратов, осуществляет по этим параметрам пространственную компенсацию влияния ветровых возмущений как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости и обеспечивает улучшение качества потока данных бортовой видеокамеры путем отбора качественных изображений, пригодных для дальнейшей обработки.*

*Первый уровень предлагаемой технологии обеспечивает уменьшение воздействия ветровых возмущений на траекторию полета БпЛА, второй уровень выполняет категоризацию потока изображений бортовой видеокамеры для геопространственного мониторинга в результате использования быстродействующего интегрального критерия стабильности, который устраняет в реальном времени изображения низкого качества из потока данных бортовой видеокамеры.*

*Разработанная система интеллектуального управления БпЛА и процедуры селекции изображений по цвету и резкости позволяют успешно решать проблемы, в значительной степени сходны с теми, с которыми может сталкиваться человек-эксперт при решении интеллектуальных задач обработки и фильтрации видеoinформации. Поэтому данные методы, алгоритмы и процедуры могут быть реализованы в перспективных системах интеллектуального управления в области моделирования сознательного поведения человека по выделению данных, необходимых для восприятия особенностей внешней среды.*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат; стабилизация; возмущения; видеоданные; система управления; отбор изображений.

Стаття надійшла до редакції 07.08.2020 р.

Прийнято до друку 30.09.2020 р.