

О. М. Сотніков, О. Б. Танцюра

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

МЕТОД ВТОРИННОЇ ОБРОБКИ КОМБІНОВАНИХ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Розроблено метод формування еталонного зображення району прив'язки безпілотних літальних апаратів, який забезпечує можливість формування вирішальної функції як для радіометричного, так і оптико-електронного каналів формування поточних зображень. Формування еталонних зображень запропоновано здійснювати шляхом побудови селективних зображень сукупності найбільш яскравих стаціонарних об'єктів поверхні візування, які створюють допоміжні геометричні інваріанти та забезпечують підвищення точності місцевизначення безпілотного літального апарату шляхом їх адаптації як до перспективних, так і до масштабних спотворень зображень об'єктів поверхні візування. Розроблено метод формування унімодальної вирішальної функції комбінованої кореляційно-екстремальної системи навігації, який враховує тримірну форму об'єктів поверхні візування, зміну просторового положення і орієнтації безпілотного літального апарату та похибки, обумовлені визначенням місцеположення безплатформених інерційних навігаційних систем.

Ключові слова: кореляційно-екстремальна система навігації, безпілотний літальний апарат, еталонне зображення, геометричні інваріанти, поточне зображення, селективне зображення, вирішальна функція.

Вступ

Тенденція застосування кореляційно-екстремальних систем навігації (КЕСН) для корекції роботи інерційних навігаційних систем чітко відслідковується на сучасному етапі розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що обумовлено необхідністю забезпечення суперечливих вимог до високої точності навігації (наведення) при одночасній завадозахищеності і прихованості роботи БПЛА [1]. Найчастіше на легких типах БПЛА застосовуються комбіновані КЕСН з датчиками різної фізичної природи у зв'язці з безплатформеними інерційними навігаційними системами (БІНС). Але для прихованого отримання інформації про поверхню візування (ПВ) доцільно використовувати в комбінованих КЕСН телевізійні та радіометричні канали [2, 3].

Еталонні зображення (ЕЗ) для КЕСН формується непрямым шляхом на основі ідентифікації аерофотознімків (АФЗ) району прив'язки з подальшим уточненням результату на основі наповнення об'єктового складу. Ідентифікація АФЗ полягає в побудові в деякій системі координат, пов'язаної з АФС, відображення, що ставить у відповідність кожній точці тип підстилаючої поверхні відповідно до ідентифікації АФЗ. Може виявитися, що різні типи поверхонь мають приблизно однакові випромінювальні здатності, тоді їх необхідно віднести до одного типу. Зазвичай вважається, що в радіометрії впевнено розрізняються 4...5 типів підстильних поверхонь [4].

ЕЗ – це $N_1 \times N_2$ матриця чисел і формується для кожної точки прив'язки розрахункової траєкторії, яка визначається польотним завданням.

Надалі під ЕЗ будемо розуміти зображення, що формується для порівняння з поточним зображенням (ПЗ), отриманим на якомусь одному сеансі прив'язки.

Для синтезу ЕЗ необхідно розрахувати координати точок перетину осей парціальних діаграм

спрямованості антенної системи з поверхнею Землі і визначити тип підстилаючої поверхні для кожної такої точки відповідно до ідентифікації АФЗ.

У відповідності до формалізованої моделі опису процесу функціонування комбінованої КЕСН [5] формування вирішальної функції (ВФ) потребує застосування ЕЗ, в яких, як і у сформованих радіометричних і оптичних (ПЗ), повинні бути враховані наступні фактори:

1) особливості функціонування КЕСН, що обумовлюють формування ПЗ тим, чи іншим каналом в залежності від висоти та умов оперативного-тактичної обстановки (ОТО);

2) форма об'єктів візування;

3) різниця в роздільній здатності окремих каналів КЕСН;

4) різниця в інформаційному наповненні елементів зображень;

5) просторове положення та орієнтація БПЛА.

Відомо [6, 7], що формування ЕЗ для застосування в комбінованих КЕСН можливе за допомогою методів комплексування. Однак існуючі методи комплексування різноспектральних зображень не можуть застосовуватись безпосередньо для формування сукупності ЕЗ, оскільки лише поєднують ряд інформативних ознак різноспектральних зображень і не враховують особливості функціонування та умов застосування різних каналів КЕСН, що може призводити до появи в межах об'єкта нових контурів за рахунок тримірної форми, їх розмиття, або зникнення.

В результаті може виникати невідповідність сформованого заздалегідь ЕЗ поточному зображенню. Це обумовлює необхідність подальшої розробки методів та алгоритмів формування ЕЗ, які будуть забезпечувати відповідність сформованим ПЗ різних каналів КЕСН.

Такий підхід забезпечить формування унімодальної ВФ КЕСН та відповідну точність місцевизначення БПЛА.

Метою статті є розробка методу формування ЕЗ комбінованих КЕСН з використанням геометрично пов'язаних об'єктів в якості інваріантної інформативної ознаки та методу формування унімодалної ВФ, який враховує тримірну форму поверхні об'єктів візування і зміну просторового положення і орієнтації БпЛА.

Виклад основного матеріалу

При обґрунтуванні вибору типу інформативного поля (ІП) будемо вважати, що ПВ описується моделями, наведеними в роботах [8]. Вплив спотворюючих факторів на ПВ відсутній. У відповідності до принципу дії КЕСН в якості параметра, що характеризує ІП будемо використовувати максимальне значення коефіцієнта взаємної кореляції (КВК) – $K_{\max}(i, j)$, як результат порівняння ВЗ ПВ $S_{ПВ}$ з сформованим селективним зображенням, що утворює ЕЗ.

Розмір ВЗ ПВ $M_1 \times M_2$, розмір фрагмента (ковзного вікна $S_{KB} \in S_{ПВ}$) $N_1 \times N_2$ з координатами верхнього кута (i, j) . КВК ВЗ та фрагменту ЕЗ для усіх $i = 1 \dots M_1 - N_1$ та $j = 1 \dots M_2 - N_2$ утворює поле кореляційного аналізу. Сформоване поле кореляційного аналізу характеризує ступінь схожості ІП ділянок зображення ПВ з ІП інших ділянок зображення.

Відповідно до [9] оцінку параметрів ІП можливо здійснювати по полям кореляційного аналізу за яскравістю (ПКАЯ), за контрастом (ПКАК) та їх сукупністю (ПКА).

Розглянемо окремо порядок одержання таких полів.

При використанні ПКАЯ представимо яскравість зображення ПВ, як $S_{ПВ}(k, l)$. Максимальне значення КВК, що відповідає обраним зображенням, обчислюється за класичним кореляційним алгоритмом для кожного (i, j) відповідно до виразів:

$$K_{ij}(k, l) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{m=1}^{N_1} \sum_{n=1}^{N_2} S_{KB_{ij}}(m, n) \times S_{ПВ}(m+k-1, n+l-1), \quad (1)$$

$$\mathbf{K}_{ij} = \left\| K_{ij}(k, l) \right\| \quad (2)$$

при $k = 1 \dots M_1 - N_1$, $l = 1 \dots M_2 - N_2$.

Для кожної одержаної матриці \mathbf{K}_{ij} визначається її максимальне значення, яке забезпечується при повному суміщенні $S_{KB_{ij}}$ та $S_{ПВ}$:

$$K_{\max}(i, j) = \max_{kl} \left\| K_{ij}(k, l) \right\|, \quad (3)$$

де $i = \overline{1, M_1 - N_1}$, $j = \overline{1, M_2 - N_2}$;

$$S_{KB_{ij}}(m, n) \in S_{ПВ};$$

$$S_{ПВ}(m+k-1, n+l-1) \in S_{ПВ};$$

$S_{KB_{ij}}$ та $S_{ПВ}(k, n)$ мають однакові розміри $(N_1 \times N_2)$ та відрізняються положенням на зображенні $S_{ПВ}$ на (k, l) елементів розділення.

У такому випадку утворене ПКАЯ описується виразом:

$$\mathbf{K}_{ПКАЯ} = \left\| K_{\max}(i, j) \right\|. \quad (4)$$

Одержана матриця (2) розміром $(M_1 - N_1) \times (M_2 - N_2)$, яка характеризує розподіл $K_{\max}(i, j)$, являє собою ПКАЯ.

При використанні контрасту в якості інформативного параметру опису ПВ процес формування КВК має аналогічний вигляд [11], а визначення максимального елемента КВК контрастів при послідовному зсуві ковзного вікна визначається відповідно до виразу:

$$\mathbf{K}_{ПКАК} = \left\| K_{\max}(i, j) \right\|. \quad (5)$$

Визначення ділянок ПВ для побудови ЕЗ комбінованої КЕСН передбачає пошук максимальних значень ПКАЯ та ПКАК. У цьому випадку вирішальні правила щодо пошуку координат таких ділянок по ПКАЯ та ПКАК можуть бути записані у вигляді:

$$\hat{r}_y = \arg \max_{i,j} \left(\mathbf{K}_{ПКАЯ_n} \right), \quad (6)$$

$$\hat{r}_k = \arg \max_{i,j} \left(\mathbf{K}_{ПКАК_n} \right), \quad (7)$$

де \hat{r}_y та \hat{r}_k – оцінки координат ділянок прив'язки за полями яскравості та контрасту.

Для оцінки параметрів ІП може використовуватися ПКА, яке утворюється, як результат адамарового (поелементного) множення матриць $\mathbf{K}_{ПКАЯ}$ та $\mathbf{K}_{ПКАК}$, у відповідності з виразом:

$$\mathbf{K}_{ПКА} = \mathbf{K}_{ПКАЯ} \circ \mathbf{K}_{ПКАК} = \left\| K_{ПКАЯ}(i, j) \cdot K_{ПКАК}(i, j) \right\|. \quad (8)$$

Такий підхід дозволяє при проведенні досліджень ІП виділяти об'єкти зображення ПВ, які мають одночасно максимальні унікальні властивості як за яскравістю, так і за контрастом.

Але використання $\mathbf{K}_{ПКА}$ можливе в умовах наявності стійких контрастів на ПВ, які для неспотворених ділянок місцевості можуть мати місце в радіолокаційних КЕСН.

Однак необхідно враховувати, що формування зображень ПВ залежить від просторового положення та орієнтації БпЛА, тримірної форми об'єктів ПВ, а також, що випромінювальні властивості матеріалів та підстилюючих поверхонь схильні до флуктуацій, які залежать від добових, сезонних, погодних змін і мають природний характер.

Окрім того, у залежності від впливу природних та штучних спотворень яскравість об'єктів ПВ може суттєво змінюватися та призводити до вирівнювання радіояскравісних температур окремих зон, зникнення

контрастів та до зміни структури РМ зображення ПВ. Також може відбуватися інверсія контрастів зі збереженням структури ПВ. Ці фактори можуть призводити до того, що сформовані ПКАЯ та ПКАК для однакових ділянок ПВ будуть суттєво відрізнятися за своїми властивостями. Будь-яка ділянка ПВ, яка використовується для місцевизначення комбінованої КЕСН БпЛА, має унікальні властивості за яскравістю, контрастом та структурою, тому для перевірки ефективності підходів до оцінки параметрів ПЗ зображень було проведено моделювання.

При моделюванні формування ЕЗ проводилось відповідно до алгоритму формування сукупності ЕЗ по ПКА, що представлений на рис. 1, а порівняння ЕЗ з вихідним зображенням (ВЗ) проводилось відповідно до класичного кореляційного алгоритму. У якості ВЗ при моделюванні було взято зображення в ТВ та РМ діапазоні отримані з висоти 1000 м при куті візування 60° .

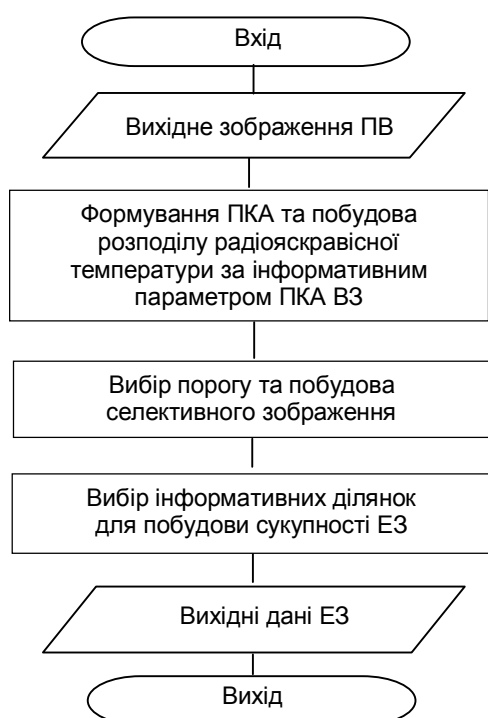


Рис. 1. Алгоритм формування сукупності ЕЗ по ПКА

В результаті моделювання на ВЗ було виявлено ділянки ПВ, які або за показником яскравості, або контрасту можуть бути використанні для побудови сукупності ЕЗ. Відповідні фрагменти ТВ та РМ зображень, які можуть бути використані в якості еталонних для здійснення відповідним каналом комбінованої КЕСН місцевизначення.

Скориставшись класичним кореляційним алгоритмом побудовано ВКФ для РМ та ТВ зображень і відповідних їм селектованим областям ВЗ. Результати порівняння зображень наведені на рис. 2.

Аналіз результатів моделювання ПКА зображень типових ПВ стосовно розвиненої інфраструктури (модель ПВ – сильно об’єктовно насичена), одержаних ТВ та РМ каналами з використанням показників яскравості та контрасту показав, що

стохастичний характер зображень ПВ призводить до формування багатопікової ВФ, що в свою чергу може призводити до зменшення ймовірності місцевизначення комбінованої КЕСН при прив’язці БпЛА. Це означає, що для формування ЕЗ необхідно здійснювати пошук нових інваріантів, які б не мали стохастичний характер, пов’язаний з електрофізичними властивостями ПВ та, відповідно, з яскравістю та контрастом ПВ.

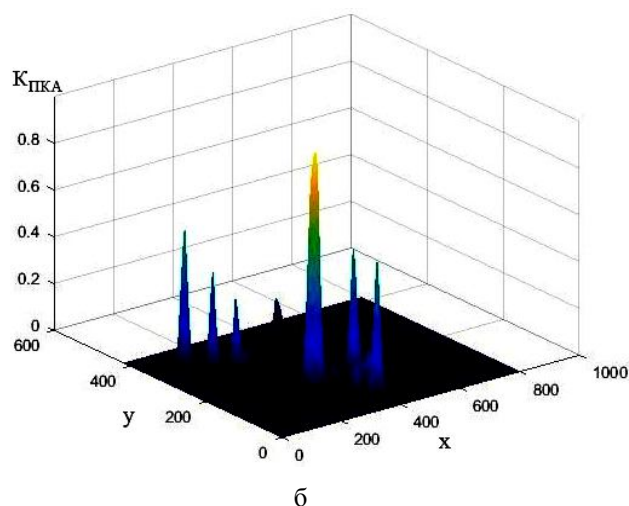
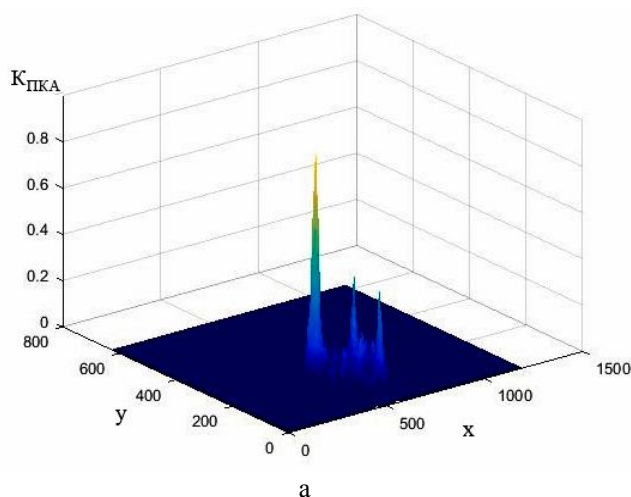


Рис. 2. ВКВ ВЗ з фрагментом селектованої області ВЗ: а – для РМ каналу; б – для ТВ каналу

Таким чином виникає необхідність пошуку додаткової інформативної ознаки для формування ЕЗ ПВ. В якості допоміжної ознаки для формування ЕЗ ПВ з високою об’єктовно насиченістю пропонується використовувати складне ЕЗ, але, у такому випадку сформована ВКФ, яка визначається кількістю фрагментів ЕЗ, не є унімодальною та не визначає, відносно якого її піку потрібно здійснювати місцевизначення.

У такому випадку при розвороті ПЗ відносно ЕЗ у разі використання координат найбільшого значення піку для місцевизначення КЕСН сумарне значення середньоквадратичної похибки (СКП) може бути значним. Це пояснюється не урахуванням двох інших піків ВКФ, що відповідають двом іншим фрагментам ЕЗ.

Виходячи з цього геометричні ознаки (відстані) відносного розміщення фрагментів ЕЗ використовувати не можливо.

З метою використання в якості інваріантів геометричних ознак яскравих стаціонарних об'єктів ПВ для формування ЕЗ та відповідно ВФ комбінованої кореляційно-екстремальної системи навігації пропонується ввести поняття геометрично пов'язаних об'єктів шляхом їх оконтурювання з подальшим визначенням для такого еквівалентного об'єкту його середньої яскравості (радіотеплової температури).

Такий підхід дає змогу не здійснювати перетворення подібності на опорному просторі для безлічі зсунутих та повернутих еталонних зображеннях, щоб при порівнянні з фрагментом ПЗ підібрати екземпляр еталонного зображення, що найбільшою мірою відповідає порівнюваному фрагменту.

В якості інформативної ознаки введеного таким чином ОП будемо використовувати середнє значення яскравості для ТВ каналу та середнє значення радіояскравісної температури для РМ каналу.

ВКФ вихідного зображення та фрагмента ЕЗ з еквівалентним ОП для РМ та ТВ каналів представлені на рис 3.

Таким чином, результати порівняння фрагменту ЕЗ з використанням геометрично пов'язаних об'єктів з ВЗ ПВ підтвердили ефективність запропонованого методу формування ЕЗ для комбінованої кореляційно-екстремальної системи навігації з ТВ та РМ каналами, в якому, на відміну від відомих, формування ЕЗ з додатковою геометричною ознакою досягається побудовою селективних зображень ПВ з використанням стаціонарних об'єктів прив'язки, які створюють допоміжні геометричні інваріанти.

Встановлено, що у разі застосування еквівалентного ОП ВКФ не має багатопіковості. При цьому повне співпадіння фрагмента еталонного зображення з ВЗ забезпечує відсутність впливу масштабних та перспективних спотворень об'єктів ПВ на результат порівняння.

У відповідності до формалізованої моделі опису процесу функціонування комбінованої кореляційно-екстремальної системи навігації [5] та методу формування єдиного еталонного зображення, формування ВФ окремими каналами потребує здійснення попередньої обробки ПЗ з метою приведення останнього до виду, наближеному до еталонного зображення.

Першим етапом такої обробки є урахування спотворення ПЗ, які виникають внаслідок роботи БНС, відповідно до [10].

До етапу підготовки ПЗ РМ каналу можна також віднести процес формування ПЗ, який враховує тримірну форму об'єктів візування, що в загальному випадку призводить до появи нових границь в межах одного об'єкту візування при незначних висотах польоту БпЛА. Врахування тримірної форми об'єктів візування в РМ каналі відбувається відповідно до [5].

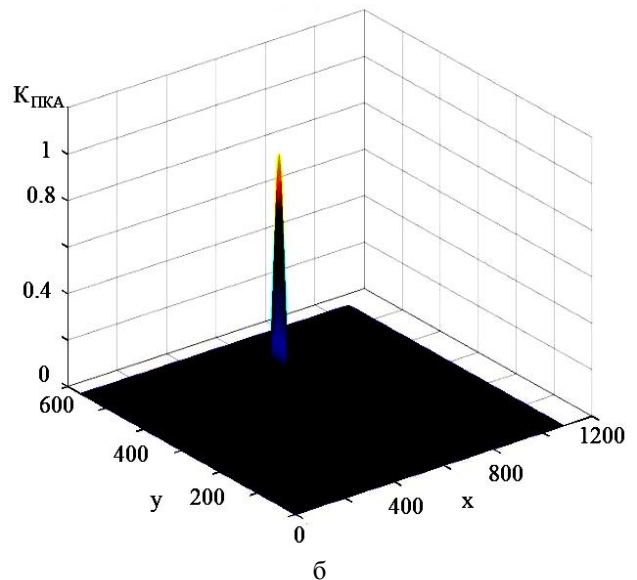
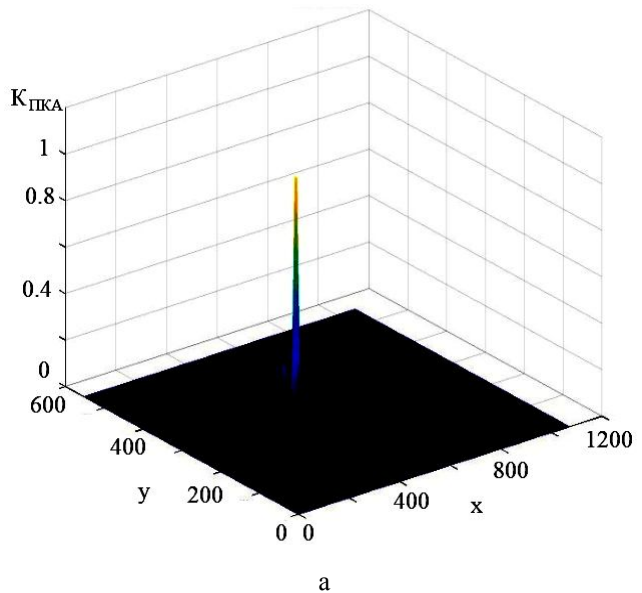


Рис. 3. КВК сформованого еквівалентного ОП та ВЗ: а – для ТВ каналу; б – для РМ каналу

Наступним етапом підготовки ПЗ їх максимальне наближення до виду ЕЗ.

Відповідно до радіометричного ПЗ це означає, що в результаті його обробки на зображенні необхідно визначити необхідну сукупність об'єктів з найбільшим значенням радіояскравісної температури $T_{ЯП}(i, j)_{\max}$, на основі якої в подальшому буде сформований еквівалентний ОП, як показано вище, та відповідно нове ПЗ.

Для цього, з урахуванням чутливості радіометра ΔT та його динамічного діапазону $T_{ЯП}(i, j)_{\max} - T_{ЯП}(i, j)_{\min}$ визначимо середнє значення радіояскравісної температури фонові частини зображення $T_{фсер}$ та здійснимо квантування радіояскравісних температур об'єктів зображення. При здійсненні квантування значення обраних рівнів сірого буде визначатися числом обраних інтервалів k .

Зробимо квантування радіояскравісних температур ПЗ шляхом розбиття температурного діапазону

$$T_{ЯП}(i, j)_{\max} - T_{\phi_{сер}}$$

на рівномірні інтервали $\Delta T_{Я}$:

$$\Delta T_{Я} = \frac{T_{ЯП}(i, j)_{\max} - T_{\phi_{сер}}}{k}, \quad (9)$$

де $k = 10...20$ – кількість рівнів квантування; $\Delta T_{Я} > \Delta T$.

Відповідно до визначених найбільших значень радіояскравісних температур об'єктів сформуємо поточне зображення $S_{PM}(M_1, M_2)$, яке будемо вважати вихідним.

Для сукупності яскравих об'єктів розрахуємо середнє значення радіояскравісної температури та представимо на зображенні геометрично пов'язані об'єкти у вигляді еквівалентного ОП з усередненим значенням яскравості по його площині. На цьому попередня обробка ПЗ завершується.

Далі для заданого порогу l перетворимо вихідне ПЗ $S_{PM}(M_1, M_2)$ у бінарне зображення \mathbf{H} відповідно до правила:

$$H_i = \begin{cases} 1, S_i \leq S_p - l; S_i > S_{\max}; \\ 0, S_{\max} > S_i > S_p - l; \end{cases} \quad i \in \overline{1, F_0}, \quad (10)$$

де i – номер фрагмента ПЗ зайнятий ОП;

p – номер фрагмента ПЗ зайнятий фоном;

F_0 – об'єм вибірки, яка утворює два класи ω_i , що не перетинаються між собою та відповідають сигналам об'єкта прив'язки ω_u та фона ω_p .

Поріг квантування визначає величини ймовірності появи помилок першого α та другого β роду. У свою чергу величини α та β визначають мінімальне значення параметра сигнал/шум $q = q_{\min}$, при якому досягається потрібна величина ймовірності правильної локалізації ОП на зображенні [11]:

$$q_{\min} = \Phi^{-1}(1 - \alpha) + \Phi^{-1}(1 - \beta), \quad (11)$$

де
$$\alpha = \int_{S_{\omega} - l}^{\infty} \omega_u(S) dS;$$

$$\beta = \frac{1}{1 + K} \int_{-\infty}^{S_{\omega} - l} [\omega_p(S) + K \omega_u(S)] dS;$$

$$K = \frac{F_p}{F_u}.$$

По ймовірностях α та β можна визначити ймовірність правильної локалізації ОП, яка може розглядатися функцією порогу l і бути мінімізована вибором відповідного порогу $l = l_{\text{опт}}$.

Використовуючи апріорну інформацію у вигляді бінарного ЕЗ вирішимо задачу селекції ОП на

бінарному ПЗ на фоні менш яскравих об'єктів та сформуємо ВФ.

Для цього здійснимо порівняння визначених відповідно до порогу фрагментів ПЗ $\mathbf{H}^i \subset \mathbf{H}$ з найбільшим значенням яскравостей з ЕЗ, які також повністю складаються з одиниць.

В такому випадку вирішальне правило полягає у тому, що фрагмент $\mathbf{H}^i \subset \mathbf{H}$, для якого:

$$z_j = \sup_{i \in \overline{0, M}} z_i, \quad (12)$$

оголошується співпадаючим з ЕЗ.

Щоб оцінити ймовірність правильної локалізації ОП скористаємось результатами роботи [11]. Відповідно до цієї роботи розіб'ємо матрицю ПЗ на прямокутні матриці меншого розміру $T_1 \times T_2$.

Припустимо, що істинне положення еквівалентного ОП попадає в одну з підматриць, та позначимо через $\mathbf{H}^0 \subset \mathbf{H}$ фрагмент ПЗ, що відповідає ЕЗ, а через \mathbf{H}^i , $i \in \overline{1, M}$ – фрагменти, що розміщені у інших підматрицях.

Нехай ймовірність появи одиниці у \mathbf{H}^i дорівнює γ_i . Тоді числа z_i розподілені по біноміальному закону.

Таким чином ймовірність правильної локалізації ОП P_l при використанні вирішального правила (12) дорівнює ймовірності того, що число одиниць z_0 , що відповідає співпадінню ЕЗ та об'єкта, перевищить решту чисел z_i , $i \in \overline{1, M}$.

$$P_l = \sum_{j=1}^{F_u} C_{F_u}^j (1 - \alpha)^j \alpha^{F_u - j} \times \left[\sum_{m=0}^{j-1} C_{F_u}^m \beta^m (1 - \beta)^{F_u - m} \right]^M. \quad (13)$$

Таким чином, розроблено метод формування ВФ, що на відміну від відомих, полягає в здійсненні попередньої обробки ПЗ, в основу якої покладено його розшарування відповідно до порогу квантування відносно середнього значення радіояскравісної температури фона та побудова селективного зображення групи геометрично пов'язаних об'єктів з подальшим формуванням бінарного ПЗ необхідного для формування ВФ.

Результати оцінки ймовірності правильної локалізації ОП з використанням еквівалентного ОП з усередненням яскравості по сукупності геометрично пов'язаних об'єктів показав, що застосування в якості допоміжної геометричної ознаки на зображенні в умовах нечіткої структури ПЗ дозволяють забезпечити ймовірність правильної локалізації ОП близьку до одиниці при значеннях відношення с/ш від 3 до 4 при умові, що геометрично пов'язаний об'єкт складає не більше 30% від всієї площини ПЗ.

Висновки

1. Розроблено метод формування ЕЗ району прив'язки безпілотного літального апарата, який

забезпечує можливість формування ВФ як для радіометричного, так і телевізійного каналів формування поточного зображення, що досягається побудовою селективних зображень ПВ з використанням стаціонарних об'єктів прив'язки, які створюють допоміжні геометричні інваріанти та забезпечують підвищення точності місцевизначення безпілотного літального апарата шляхом їх адаптації як до перспективних, так і до масштабних спотворень зображень об'єктів поверхні візування.

2. Розроблено метод формування унімодальної ВФ комбінованої КЕСН, який враховує тримірну форму об'єктів ПВ, зміну просторового положення і орієнтації безпілотного літального апарата. Розроблений метод на відміну від відомих базується на здійсненні попередньої обробки ПЗ, яка полягає в його розшаруванні відповідно до порогу квантування відносно середнього значення радіояскравісної

температури фону та побудові сукупності селективних зображень групи геометрично пов'язаних об'єктів з визначенням їх середніх значень радіояскравісних температур в межах введеного еквівалентного ОП та формуванні сукупності бінарних поточних зображень, необхідних для формування вирішальної функції.

3. Чисельні оцінки ймовірності правильної локалізації ОП з використанням еквівалентного ОП з усередненням яскравості по сукупності геометрично пов'язаних об'єктів показали, що застосування в якості допоміжної геометричної ознаки на зображенні в умовах нечіткої структури поточного зображення дозволяють забезпечити ймовірність правильної локалізації ОП близьку до одиниці при значеннях відношення сигнал/шум від 3 до 4 при умові, що геометрично пов'язаний об'єкт складає до 30% від площини ПЗ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Безвесільна О. М. Пошуки шляхів підвищення точності автоматичних кутвимірювальних засобів: Монографія / О. М. Безвесільна. – Житомир, ЖДТУ, 2010. – 225 с.
2. Воздушная разведка наземных целей беспилотными летательными аппаратами / Л. М. Артюшин, Ю. К. Ребрин, В. Б. Толубко, А. Ю. Уваров, Ю. М. Черных. – К.: НАОУ, 2004. – 244 с.
3. Боевое использование разведывательных БПЛА США и других стран НАТО / Иностранная печать об экономическом, научно-техническом и военном потенциале государств-участников СНГ и технических средствах их выявления. Серия: Технические средства разведывательных служб зарубежных государств // ЕИБ ВИНТИ. – 2002. – № 5. – С. 12-15.
4. Аналитический обзор. Некоторые итоги боевых действий авиации НАТО в Югославии. – 2000. – 22 с.
5. Мосалев В. Подразделение БЛА “Феникс” сухопутных войск Великобритании / В. Мосалев // ЗВО. – 2000. – № 8. – С. 18-19.
6. Сотников А. М. Обобщенная модель процесса функционирования матричных радиометрических корреляционно-экстремальных систем навигации миллиметрового диапазона / А. М. Сотников, А. Н. Быков, Я. Н. Кожушко // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ навігації і управління, 2009. – Вип. 13. – С. 13-17.
7. Сотников О. М. Модель опису процесу функціонування комбінованої кореляційно-екстремальної системи навігації безпілотного літального апарату / О. М. Сотников, О. І Тимочко, О.Б. Танцюра, О.В. Федін // Військово-технічний збірник Львівської академії Сухопутних Військ – 2018. – №18. – С. 32-40
8. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М.: Техносфера, – 2006. – 616 с.
9. Танцюра О. Б. Аналіз методів комплексування різноспектральних зображень з використанням універсального показника якості / О. Б. Танцюра // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. — 2016. — № 4. — С. 152-156.
10. Сотников А. М. Обоснование принципов построения и разработка модели корреляционно-экстремальной системы наведения комбинированного типа / А. М. Сотников, В. А. Таршин // Системи управління навігації та зв'язку. – К., 2012. – № 4(24). – С. 7-11.
11. Таршин А. В. Подготовка эталонных изображений для высокоточных корреляционно-экстремальных систем навигации на основе использования прямого корреляционного анализа / А. В. Таршин, А. М. Сотников, Р. Г. Сидоренко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. — 2015. — № 2(19) — С. 69-73.
12. Sotnikov A. M. Calculating method of error calculations of the object coordinating platform free inertial navigation systems of unmanned aerial vehicle / A. M. Sotnikov, A. B. Tantsiura, O. Yu. Lavrov // Сучасні інформаційні системи. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 105-110.
13. Sotnikov A. A method for localizing a reference object in a current image with several bright objects / A. Sotnikov, V. Tarshyn, N. Yeromina, S. Petrov, N. Antonenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, № 9 (87). – P. 68-74.

REFERENCES

1. Bezvesilna O.M. Poshuki shlyakhiv pidvishchennya tochnosti avtomatichnikh kutovimiryuval'nikh zasobiv: Monografiya. - Zhitomir, ZHDUTU, 2010. – 225 p.
2. Vozdushnaya razvedka nazemnykh tseley bespilotnymi letatel'nymi apparatami / L.M. Artyushin, Yu.K. Rebrin, V.B. Tolubko, A.YU. Uvarov, YU.M. Chernykh. – K.: NAOU, 2004. – 244 p.
3. Boyevoye ispol'zovaniye razvedyvatel'nykh BPLA SSHA i drugikh stran NATO / Inostrannaya pechat' ob ekonomicheskome, nauchno-tekhnicheskome i voyennom potentsiale gosudarstv-uchastnikov SNG i tekhnicheskikh sredstvakh ikh vyavleniya. Seriya: Tekhnicheskkiye sredstva razvedyvatel'nykh sluzhb zarubezhnykh gosudarstv // YEIB VINITI. – 2002. – № 5. – P. 12-15.
4. Analiticheskiy obzor. Nekotoryye itogi boyevykh deystviy aviatsii NATO v Yugoslavii. – 2000. – 22 p.

5. Mosalev V. Podrazdeleniye BLA "Feniks" sukhoputnykh voysk Velikobritanii // ZVO. – 2000. – № 8. – P. 18-19.
6. A.M. Sotnikov Obobshchennaya model' protsessu funktsionirovaniya matrichnykh radiometricheskikh korrelyatsionno-ekstremal'nykh sistem navigatsii millimetrovogo diapazona / Sotnikov A.M., Bykov A.N., Kozhushko YA.N./ Sistemi upravlinnya, navigatsii ta z'vyazku. K.: TSNDI navigatsii i upravlinnya, 2009. – Vip.13(11). – P. 13-17.
7. Sotnikov O. M. Model' opisu protsesu funktsionuvannya kombinovanof korelyatsiyno-yekstremal'noof sistemi navigatsii bezpilotnogo lital'nogo aparatu / O. M. Sotnikov, O. I Timochko, O.B. Tantsyura, O.V. Fedin // Viys'kovo-tekhnichnyi zbirnik Lvys'koof akademii Sukhoputnykh V'ys'k – 2018. – №18. – P. 32-40
8. Gonsales R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v srede MATLAB / R. Gonsales, R. Vuds, S. Eddins. – M.: Tekhnosfera, 2006. – 616 p.
9. Tantsyura O. B. Analiz metodiv kompleksuvannya riznospektral'nykh zobrazhen' z vikoristannyam univerval'nogo pokaznika yakosti / O. B. Tantsyura // Nauka i tekhnika Povitryanikh Sil Zbroynikh Sil Ukraini. — 2016. — № 4. — P. 152-156.
10. Sotnikov A. M. Obosnovaniye printsipov postroyeniya i razrabotka modeli korrelyatsionno-ekstremal'noy sistemy nave-deniya kombinirovannogo tipa / A. M. Sotnikov, V. A. Tarshin // Sistemi upravlinnya navigatsii ta z'vyazku. – K., 2012. – № 4(24). – P. 7–11.
11. Tarshin A. V. Podgotovka etalonnykh zobrazheniy dlya vysokotochnykh korrelyatsionno-ekstremal'nykh sistem navigatsii na osnove ispol'zovaniya pryamogo korrelyatsionnogo analiza / A. V. Tarshin, A. M. Sotnikov, R. G. Sidorenko // Nauka i tekhnika Povitryanikh Sil Zbroynikh Sil Ukraini. — 2015. — № 2(19) — P. 69-73.
12. Sotnikov A. M. Calculating method of error calculations of the object coordinating platform free inertial navigation systems of unmanned aerial vehicle / Sotnikov A. M., Tantsiura A. B., Lavrov O. Yu // Advanced Information Systems. – 2018. – Vol. 2, No. 1. – P. 105-110.
13. Sotnikov A. A method for localizing a reference object in a current image with several bright objects / A. Sotnikov, V. Tarshyn, N. Yeromina, S. Petrov, N. Antonenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, № 9 (87). – P. 68-74.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О. В. Козелков,
Державний університет телекомунікацій, Київ

Received (Надійшла) 14.03.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.04.2018

Метод вторичной обработки корреляционно-экстремальных систем навигации беспилотных летательных аппаратов

А. М. Сотников, А. Б. Танцюра

Разработан метод формирования эталонного изображения района привязки беспилотных летательных аппаратов, который обеспечивает возможность формирования решающей функции как для радиометрического, так и для оптико-электронного каналов формирования текущих изображений. Формирование эталонных изображений предложено совершать путем построения селективных изображений совокупности наиболее ярких стационарных объектов поверхности визирования, которые создают дополнительные геометрические инварианты и обеспечивают повышение точности местоопределения беспилотного летательного аппарата путем их адаптации как к перспективным, так и к масштабным искажениям изображений поверхности визирования. Разработано метод формирования унимодальной решающей функции комбинированной корреляционно-экстремальной системы навигации, который учитывает трехмерную форму объектов поверхности визирования, смену пространственного положения и ориентации беспилотного летательного аппарата и ошибки, обусловленные определением местоположения бесплатформенных инерциальных систем навигации.

Ключові слова: корреляционно-экстремальная система навигации, беспилотный летательный аппарат, эталонное изображение, геометрические инварианты, текущее изображение, селективное изображение, решающая функция.

Method of secondary processing in correlation-extremal navigation systems of unmanned aerial vehicle

A. Sotnikov, A. Tantsiura

For the synthesis of reference images to calculate the coordinates of the intersection points of the axes of directional diagrams partial antenna system from the ground and determine the type of underlying surface for each such point identification according to aerial photographs. **The purpose of the article** is to develop a method for the formation of reference images of combined correlation-extreme navigation systems using geometrically related objects as an invariant informative feature and a method for forming a unimodal solving function that takes into account the three-dimensional form of the surface of objects of vision and the change of spatial position and orientation safe little apparatus. **Research results.** A method is developed for the formation of a reference image of the docking area for unmanned aerial vehicles, which provides the possibility of forming a decisive function for both radiometric and optoelectronic channels for the formation of current images. The formation of reference images is suggested to be performed by constructing selective images of the set of the brightest stationary objects of the sighting surface that create additional geometric invariants and provide an increase in the accuracy of the positioning of the unmanned aerial vehicle by adapting them to both perspective and to large-scale distortions of the sighting surface images. A method is developed for the formation of a unimodal decision function of a combined correlation-extreme navigation system that takes into account the three-dimensional shape of the sighting object objects, the change in the spatial position and orientation of the unmanned aircraft, and errors due to the location of the free-of-charge inertial navigation systems.

Keywords: correlation-extreme navigation system, unmanned aerial vehicle, reference image, geometric invariants, current image, selective image, decision function.