

УДК 621.396.96

О.М. Сотніков<sup>1</sup>, В.А. Таршин<sup>1</sup>, Н.С. Єрємін<sup>2</sup><sup>1</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків<sup>2</sup> Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## БАГАТОПОРОВОГОВИЙ АЛГОРИТМ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ПРИВ'ЯЗКИ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

Розроблено алгоритм локалізації об'єкта прив'язки кореляційно-екстремальної системи навігації безпілотного літального апарата на поточних зображеннях поверхні візування з високою (надлишковою) об'єктовою насиченістю. На відміну від відомих, розроблений алгоритм забезпечує визначення максимуму вирішальної функції як команди на корекцію траєкторії польоту безпілотного літального апарата в умовах, коли на поточному зображенні поверхні візування присутні схожі на цільовий хибні об'єкти, що обумовлено розвинутою інфраструктурою району прив'язки, або навмисним створенням хибних об'єктів для зниження ефективності функціонування систем навігації.

**Ключові слова:** кореляційно-екстремальна система навігації, об'єктова насиченість, поверхня візування, унімодальна вирішальна функція.

### Вступ

Застосування кореляційно-екстремальних систем навігації (КЕСН) на безпілотних літальних апаратах (БПЛА) забезпечує можливість виконання ними задач цивільного та військового призначення в умовах автономного польоту. До таких задач відносяться аеророзвідка, картографування місцевості, виявлення та високоточне визначення координат об'єктів на поверхні візування (ПВ), а також моніторинг змін, що відбуваються на ній. Місцевизначення КЕСН здійснюється по об'єктам прив'язки (ОП). У той же час складність рішення задачі локалізації об'єктів прив'язки на ПЗ поверхні візування з високою об'єктовою насиченістю виникає через можливу схожість інших об'єктів зображення ПВ з ОП, у результаті чого вирішальна функція (ВФ) КЕСН як команда на корекцію траєкторії БПЛА може мати багатопіковий характер.

**Постановка проблеми** Для формування КЕСН команди на корекцію траєкторії БПЛА необхідно здійснити локалізацію обраного заздалегідь при формуванні еталонного зображення (ЕЗ) об'єкта прив'язки на поточному зображенні на фоні інших заважаючих об'єктів, наявність яких призводить до виникнення неоднозначності вирішальної функції. Така задача виникає в умовах, коли ділянка поверхні візування має високу об'єктову насиченість, більшість об'єктів якої характеризуються високим ступенем схожості з об'єктом прив'язки (хибні об'єкти (ХО)). Виходячи з цього необхідно розробити алгоритм локалізації об'єкта прив'язки на поточних зображеннях ПВ з високою об'єктовою насиченістю.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У доступних для аналізу роботах задача локалізації ОП на ПЗ з високою об'єктовою насиченістю не розглядається.

Перспективи розвитку систем навігації керованих БПЛА та необхідність рішення задачі місцевизначення КЕСН на ПВ з різною об'єктовою насиченістю викладено у роботах [4–5].

У роботах [1–2] розглядається задача локалізації ОП на етапі формування ЕЗ. Розроблені методи та алгоритми завчасного [1] та оперативного [2] синтезу дозволяють обирати ОП виходячи з найбільших відмін інформативних параметрів об'єктів від фонових складових. Разом з тим рішення задачі локалізації об'єктів на ПЗ має ряд особливостей, обумовлених умовами застосування БПЛА, спостереження ПВ та наявності заважаючого впливу.

Основні досягнення щодо розробки методів формування ВФ як результату порівняння ПЗ та ЕЗ у КЕСН наведено у роботах [5–6], однак не розглядається ситуація високої об'єктової насиченості ПВ. У той же час для навмисного спотворення ПВ, зменшення об'єктової помітності та ХО можуть бути використані спеціальні покриття, виготовлені за технологією, сутність якої розкрита у роботі [7].

Задача локалізації ОП КЕСН на поточному зображенні з високою об'єктовою насиченістю обумовлює необхідність розробки алгоритму формування ВФ, що забезпечує усунення впливу об'єктової неоднозначності та локалізації максимуму вирішальної функції, який відповідає зображеному на ЕЗ об'єкту прив'язки.

**Метою статті** є розробка алгоритму локалізації об'єкта прив'язки КЕСН на ПЗ поверхні візування в умовах високої об'єктової невизначеності.

### Основний матеріал

Для досягнення поставленої мети необхідно здійснити опис моделей ПЗ та ЕЗ, вирішити задачу виявлення об'єкта прив'язки КЕСН на ПЗ та його

локалізацію на фоні ХО характеристики яких порівняні з характеристиками ОП.

**Постановка задачі.** Для опису ПВ приймемо модель ПЗ  $\bar{S}_{Cl}$ , у якій неспотворене вихідне зображення  $\bar{S}_{O1}$  (ВЗ) описується значеннями яскравості відповідних об'єктів і фонів ПВ в елементах розділення:

$$\bar{S}_{Cl} = \bar{S}_{O1} = \|S(i, j)\|, \quad (1)$$

$$\text{де } S(i, j) = \begin{cases} S_v(i, j), & \text{при } S(i, j) \in \bar{S}_v; \\ S_w(i, j), & \text{при } S(i, j) \in \bar{S}_w; \end{cases} \quad (2)$$

$S_v(i, j)$  – яскравість елемента зображення  $v$ -го об'єкта  $\bar{S}_v$ ;  $S_w(i, j)$  – яскравість елемента зображення  $w$ -го фону  $\bar{S}_w$ ;  $V$  и  $W$  – кількість об'єктів і фонів різної яскравості та форми на вихідному зображенні ВЗ, відповідно.

Стосовно моделі (1) ПЗ поверхні візування зробимо наступні припущення:

- ПЗ та ЕЗ мають однаковий розмір  $N_1 \times N_2$ ;
- об'єкти ПВ мають значну порівняно з фоном яскравість, причому ОП, відповідно до [1–2], властиві найбільші значення яскравості;
- об'єкт прив'язки і фон у межах елемента розділення є однорідними по яскравості;

– кожен  $(i, j)$  елемент ПЗ являє собою нормально розподілену величину з дисперсією  $\sigma_{ij}^2$  і середнім значенням яскравості  $S(i, j)$ . У випадку відсутності перешкод  $S(i, j)$  відповідно до (2) може приймати одне з двох значень. При цьому контраст ОП відносно навколишнього фону визначається як  $\Delta S(i, j) = S_v(i, j) - S_w(i, j)$ ;

– дисперсія шумів на елементах ПЗ, тобто  $\sigma_{ij}^2 = \sigma^2$ ,  $i \in \overline{1, N_1}$ ,  $j \in \overline{1, N_2}$ ;

– для елементів фону, що відносяться до множини  $\bar{S}_w$  і об'єктів, що відносяться до множини  $\bar{S}_v$ , справедливе співвідношення  $V \ll W$ .

**Локалізація об'єкта прив'язки умовах високої об'єктової насиченості.** Задачу розробки алгоритму локалізації об'єктів прив'язки КЕСН будемо розглядати стосовно класичного кореляційного алгоритму, процедури формування ВФ відповідно до якого викладені у [1–3, 5]

$$\bar{R}(\bar{r}) = \bar{F}_{SDP}(\bar{S}_{Cl}, \bar{S}_{R1}), \quad (3)$$

де  $\bar{R}$  – вирішальна функція-матриця, яка формується КЕСН;  $\bar{r}$  – вектор параметрів взаємного зсуву представлених у матричному вигляді ПЗ та ЕЗ ( $\bar{S}_{R1}$ ) у картинній площині;  $\bar{F}_{SDP}$  – оператор вторинної обробки.

Результатом локалізації ОП на ПЗ з хибними об'єктами є визначення оцінки вектора зміщення ПЗ відносно ЕЗ  $\hat{\bar{r}} = \|\hat{x} \ \hat{y}\|$ . Відповідно до [9] максимально правдоподібна оцінка визначається як

$$\hat{\bar{r}} = \arg \max_{\bar{r}} (\bar{R}(\bar{r})). \quad (4)$$

При наявності на ПЗ хибних об'єктів, отримана відповідно до виразу (4) ВФ є багатопіковою. Відповідно до такої ВФ результат локалізації ОП є неоднозначним та може мати  $n$  значень  $\hat{\bar{r}}_1, \hat{\bar{r}}_2, \dots, \hat{\bar{r}}_n$ . Кількість цих значень визначається властивостями ПЗ та кількістю ХО на ПЗ. Приклад ПЗ з високою об'єктовою насиченістю та обчислена шляхом математичного моделювання ВФ наведені на рис. 1–2.



Рис. 1. Зображення району прив'язки КЕСН з високою об'єктовою насиченістю

Однозначна локалізація ОП обумовлює необхідність застосування алгоритму локалізації, в основу якого покладено ітеративний процес формування ВФ та порівняння її з відповідним порогом. Оскільки у процесі вирішення задачі однозначної локалізації ОП формується сукупність порогових рівнів, то розроблений алгоритм є багатопороговим.

Сутність одного з можливих варіантів реалізації багатопорогового алгоритму з послідовною у часі процедурою формування порогових рівнів полягає у наступному. Після формування КЕСН поточного зображення здійснюється оцінка середнього значення яскравості фонових складових на ПЗ  $\hat{S}_w$ . На основі отриманого значення  $\hat{S}_w$  задається початкове значення порогу  $L_0 = \gamma \sigma$ . Згідно з отриманими результатами досліджень значення  $\gamma$  слід обирати у межах від 1.8 до 2.2. При порівнянні з порогом ПЗ перетворюється у бінарне зображення, елементи якого визначаються співвідношенням

$$\bar{S}_{Cl} = \begin{cases} 1, & \text{при } S(i, j) \geq L_0 \\ 0, & \text{при } S(i, j) < L_0 \end{cases}. \quad (5)$$

Аналогічним чином формується ЕЗ

$$\bar{S}_{R1} = \begin{cases} 1, & \text{при } S_{R1}(i, j) \geq L_0 \\ 0, & \text{при } S_{R1}(i, j) < L_0 \end{cases}. \quad (6)$$

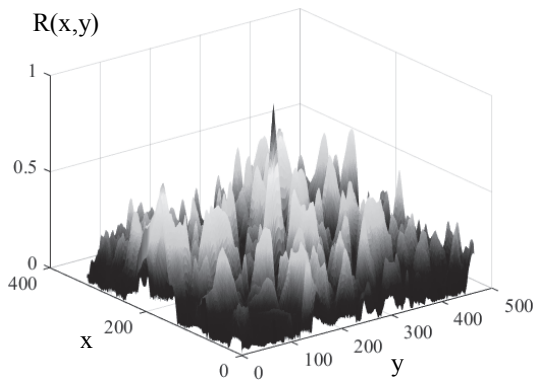


Рис. 2. Результат обчислення ВФ при наявності хибних об'єктів

Шляхом порівняння  $\bar{S}_{Cl}$  з  $\bar{S}_{Rl}$  відповідно до (3) формується матриця ВФ. Задача локалізації ОП на ПЗ вважається вирішеною тоді, коли ВФ має один максимум. Якщо ВФ при зсуві ПЗ відносно ЕЗ складається з одного ненульового елемента

$$\bar{R}(\bar{r}) = \begin{cases} R_{\max}, & \text{при } \bar{r} = \hat{\bar{r}} \\ 0, & \text{при } \bar{r} \neq \hat{\bar{r}} \end{cases}, \quad (7)$$

то ухвалюється рішення про правильну локалізацію ОП та визначаються його координати на ПЗ  $(\hat{x}, \hat{y})$ . У протилежному випадку організується ітераційний процес, що складається з трьох етапів:

- зміна значення порогу з  $L_0$  на  $L_1$ .
- формування нових бінарних ПЗ та ЕЗ стосовно порогу  $L_1$
- формування ВФ для бінарних зображень.

Для організації ітераційного процесу необхідно визначити крок та знак зміни порогового рівня. Вибір кроку ітерації  $\Delta L = L_1 - L_0$  повинен здійснюватися таким чином, щоб утворювані бінарні ПЗ не відрізнялися одне від одного занадто сильно.

Структурна схема багатопорогового алгоритму локалізації ОП наведена на рис. 3.

**Оцінка ефективності застосування розробленого алгоритма локалізації ОП.** Ефективність застосування багатопорогового алгоритму локалізації ОП на зображеннях ПВ з високою об'єктовою насиченістю оцінювалася за результатами формування ВФ, а також визначення імовірності правильної локалізації ОП  $P_{cl}$  згідно з виразом

$$P_{cl} = \sum_{v=1}^{F_v} C_{F_v}^v (1-\alpha)^v \alpha^{F_v-v} \left[ \sum_{m=0}^{v-1} C_{F_v}^m \beta^m (1-\beta)^{F_v-m} \right]^M,$$

де  $\alpha, \beta$  – імовірності появи помилок першого та другого роду, відповідно;  $F_v$  – кількість елементів фрагмента ПЗ, зайняті ОП;  $v$  – номер елемента фрагмента ПЗ, зайнятого ОП;  $m$  – номер порогового рівня та  $M$  – кількість порогових рівнів, що використані при рішенні задачі локалізації ОП.

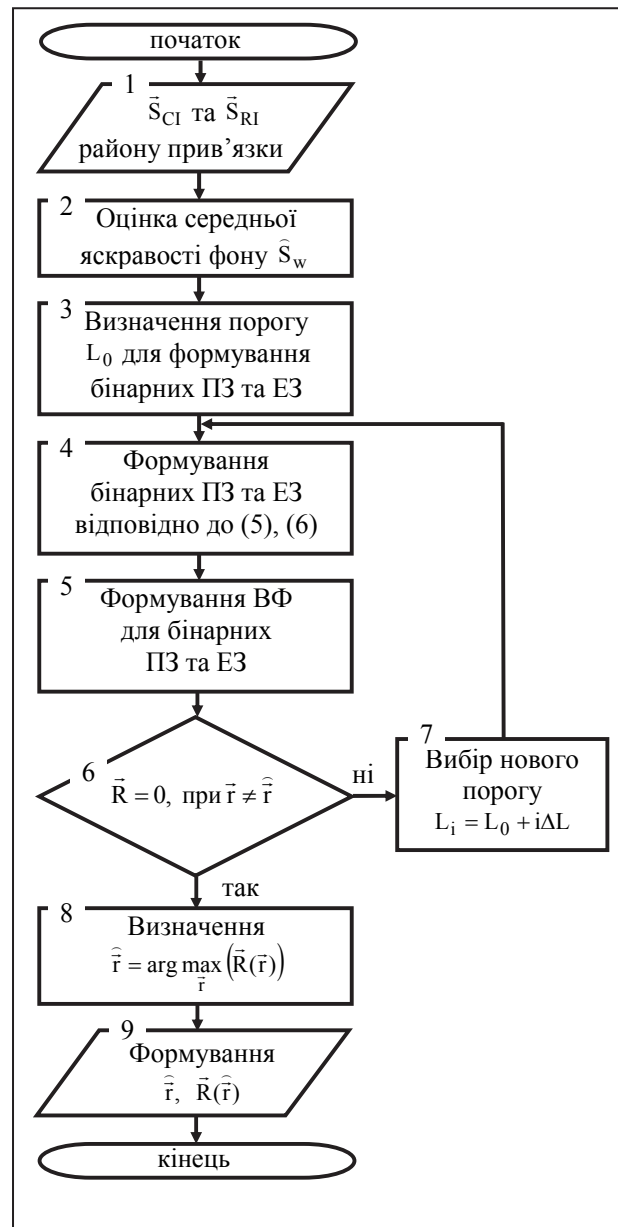


Рис. 3. Структурна схема багатопорогового алгоритму локалізації об'єкта прив'язки на ПЗ

Результати локалізації ОП для зображення ПВ (рис. 1) згідно з розробленим алгоритмом наведені на рис. 4.

На рис. 4 зображена ВФ, отримана за результатами моделювання роботи багатопорогового алгоритму локалізації ОП на зображенні ПВ з ХО.

### Висновки

Таким чином, розроблено алгоритм локалізації ОП та здійснено оцінку ефективності його застосування на поточних зображеннях поверхні візування з високою об'єктовою насиченістю.

Ітераційна структура багатопорогового алгоритму забезпечує формування унімодальної вирішальної функції КЕСН на ПЗ, що мають один або декілька хибних об'єктів, за параметрами схожих на ОП.

Адаптація алгоритму до фоново-об'єктового складу ПЗ забезпечується шляхом вибору відповідних порогових рівнів.

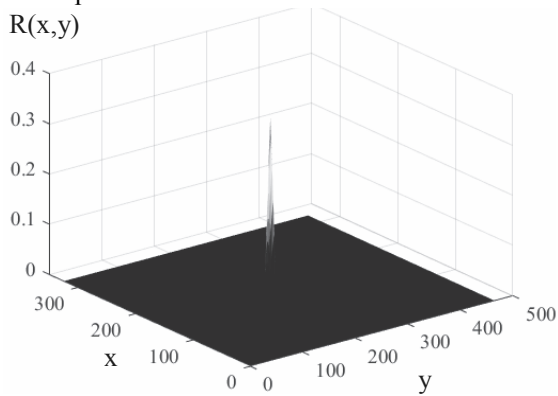


Рис. 4. Результат локалізації об'єкта прив'язки

Подальші дослідження розробленого багатопорогового алгоритму пов'язані з оптимізацією процедури визначення власне порогових рівнів та забезпечення потрібної імовірності правильної локалізації за меншу кількість ітерацій.

### Список літератури

1. Таршин В.А. Подготовка эталонных изображений для высокоточных корреляционно-экстремальных систем навигации на основе использования прямого корреляционного анализа / В.А. Таршин, А.М. Сотников, Р.Г. Сидоренко // Наука і техніка ПС ЗСУ. – 2015. – № 2(19). – С. 69-73.
2. Таршин В.А. Метод оперативной подготовки эталонов на основе фрактальной обработки изображений с высокой объектовой насыщенностью [Электронный ресурс] / В.А. Таршин, А.М. Сотников, Р.Э. Пащенко // Техническое зрение. – М., 2014. – Вып. 1(5). – С. 2-8. – Режим

доступу до журн.: <http://magazine.technicalvision.ru/archive/issue-1-5>.

3. Таршин В.А. Принципы описания фоново-объектовой обстановки для корреляционно-экстремальных систем навигации / В.А. Таршин, А.М. Сотников // Техническое зрение в системах управления: материалы шестой науч.-техн. конф., Москва 17-19 марта 2015 г. – С. 75-76.
4. Сотников А.М. Проблемы и перспективы развития навигационного обеспечения летательных аппаратов / А.М. Сотников, В.А. Таршин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – X., 2013. – Вып. 3(36). – С. 57-63.
5. Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения / В.К. Баклицкий. – Тверь: ТО «Книжный клуб», 2009. – 360 с.
6. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных летательных аппаратов / под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Серебрякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 556 с.
7. Vorobiov O. Development of radioisotopic-plasma technology for the protection of radio electronic means from powerful electromagnetic radiation [Text] / O. Vorobiov, V. Savchenko, A. Sotnikov, V. Tarshin, T. Kurtseitov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 1, № 5 (85). – P. 16-22.
8. Сотников А.М. Обоснование принципов построения и разработка модели корреляционно-экстремальной системы наведения комбинированного типа [Текст] / А.М. Сотников, В.А. Таршин // Системы управления навигации та зв'язку. – К., 2012. – № 4(24). – С. 7-11.
9. Куликов Е.И. Оценка параметров сигналов на фоне помех [Текст] / Е.И. Куликов, А.П. Трифонов. – М.: Сов. радио, 1978. – 296 с.

Надійшла до редколегії 4.01.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук ст. наук. співробітник Г.С. Залевський, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## МНОГОПороГОВЫЙ АлГОРИТМ ЛоКАЛИЗАЦИИ Об'ЄКТОВ ПРИВ'ЯЗКИ КОРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А.М. Сотников, В.А. Таршин, Н.С. Еремина

Разработан алгоритм локализации объекта привязки корреляционно-экстремальной системы навигации (КЭСН) беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на текущих изображениях поверхности визирования с высокой объектовой насыщенностью. В отличие от известных, разработанный алгоритм обеспечивает формирование унимодальной решающей функции, как команды на коррекцию траектории БПЛА в условиях, когда на текущем изображении поверхности визирования может быть несколько похожих на объект привязки мешающих объектов, что обусловлено высокой объектовой насыщенностью района привязки, или преднамеренным созданием таких объектов для снижения эффективности функционирования КЭСН.

**Ключевые слова:** корреляционно-экстремальная система навигации, объектовая насыщенность, поверхность визирования, унимодальная решающая функция.

## MULTITHRESHOLD ALGORITHM OF LOCALIZING THE REFERENCE OBJECTS CORRELATION-EXTREME NAVIGATION SYSTEMS OF UNMANNED AIRCRAFT

A. Sotnikov, V. Tarshyn, N. Eremina

The algorithm of localization of the binding object correlation-extreme navigation system (CANS) unmanned aircraft (UA) on current images of the surface of sight high object structure. In contrast to the known, the algorithm provides for the formation of unimodal decisive functions as a decisive command for correction of the trajectory of the UA in conditions where the current image of the sight can be somewhat similar to the binding object of interfering objects, due to the high saturation of the object area of the bindings, or the deliberate creation of such objects to reduce the effective functioning of CANS.

**Keywords:** correlation-extreme navigation system, high object structure, the surface of sight, unimodal decisive function.