УДК 519.23: 004.932.4
DOI

БАГАТОСТАДІЙНИЙ КОНВЕЄР ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ КОРОТКОХВИЛЬОВОГО ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ

Бондар Є.[1][0009-0001-5309-0084], Кутвицький М.[1][0009-0005-7098-3908], Нетребін Ю.[1][0009-0001-8778-3241], Dr. Sci., Саваневич В.[1][0000-0001-8840-8278], Ph.D., Хламов С.[1][0000-0001-9434-1081], Dr. Sci., Зеленський С.[2][0000-0001-8545-6784], Ph.D., Хорошевська І.[3][0000-0001-8990-9891], Ph.D., Табакова І.[1][0000-0001-6629-4927]

[1] Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна,
[2] Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна,
[3] Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, Україна

EMAIL: sergii.khlamov@gmail.com

Анотація. *Виявлення малорозмірних рухомих об'єктів у послідовностях зображень короткохвильового інфрачервоного діапазону (SWIR) потребує узгодження якості виявлення, координатної точності та швидкодії за неоднорідного й часозмінного фону. Розроблено багатостадійний конвеєр обробки від підготовки даних до формування вимірювань. На натурних і модельних даних досліджено вплив програмного бінування, способів та порядку обробки фону і масштабу ядра узгодженої фільтрації. Встановлено, що підвищення швидкодії завдяки бінуванню може супроводжуватися погіршенням координатної точності та якості виявлення. Ефективність обробки фону залежить від умов спостереження й порядку процедур, а раціональний масштаб фільтра залежить від розміру зображення об'єкта після бінування. Парето-аналіз виконано окремо для кожного з 12 наборів даних. Урахування практичної нечутливості до малих змін координатної похибки скоротило загальну кількість недомінованих конфігурацій із 40 до 25 раціональних альтернатив. Універсальної оптимальної конфігурації не встановлено. Результати забезпечують вибір параметрів конвеєра відповідно до умов спостереження та вимог до виявлення, точності й швидкодії.*

Ключові слова: *SWIR-зображення, багатостадійна обробка, програмне бінування, узгоджена фільтрація, Парето-оптимальність, критерій виявлення, координатна точність.*

Вступ

Виявлення малорозмірних слабкоконтрастних рухомих об'єктів ускладнюють шуми, неоднорідність і часова мінливість фону, особливо за значної дальності [1]. Їхні зображення можуть займати лише кілька пікселів, тому потрібне узгодження якості виявлення, координатної точності та швидкодії обробки. У короткохвильовому інфрачервоному діапазоні (SWIR) більша, ніж у видимому діапазоні, довжина хвилі створює передумови для меншого атмосферного розсіювання [2], однак пропускання залежить від спектральних вікон і поглинання водяною парою [3]. За денного пасивного спостереження переважає відбите сонячне випромінювання [4], а спектральні відмінності матеріалів можуть підвищувати контраст об'єкта відносно фону [5, 6]. Це обґрунтовує дослідження SWIR-систем виявлення [7] для оптико-електронного спостереження. Метою роботи є розробка багатостадійного конвеєра обробки послідовностей SWIR-зображень малорозмірних рухомих об'єктів, дослідження впливу програмного бінування, обробки фону та узгодженої фільтрації на якість виявлення, координатну точність і швидкодію та визначення раціональних конфігурацій за сукупністю цих показників.

Аналіз літературних даних

Підходи до виявлення об’єктів відрізняються ступенем декомпозиції обробки. Класифікація [8] розділяє перетворення зображення та критерій виявлення; огляди інфрачервоних методів охоплюють різні варіанти такої побудови [9, 10]. Для складного фону застосовують трансформери, орієнтовані на його структуру [11], гібридні мережі з просторовим і частотним аналізом [12] та пірамідальне об’єднання ознак із механізмами уваги [13]. Модульну обробку використовують і в системах комп’ютерного бачення для великих масивів кадрів [14]. Узгоджена фільтрація є перетворенням зображення, після якого застосовують окремий критерій виявлення [15]. Згортка з профілем очікуваного об’єкта підсилює його відносно фону та шуму. У задачах виявлення слабких джерел використовують послідовність оцінювання або віднімання фону, фільтрації на основі функції відгуку точки (PRF) та порогової обробки [16]. Послідовну декомпозицію ілюструє метод [17]: поділ на підобласті, перетворення зображення, адаптивне пригнічення шуму, пошарове виявлення та розділення злитих об’єктів. В інфрачервоних методах також виокремлюють пригнічення фонового шуму й усунення завад [18], зокрема поєднують віднімання фону методом змінних напрямків множників, удосконалене морфологічне top-hat-перетворення та адаптивну порогову сегментацію [19]. Подібні принципи послідовної обробки й розпізнавання рухомих об’єктів застосовано до великих масивів астрономічних даних [20]. Кінцевий результат залежить від параметрів бінування [21], способів вирівнювання яскравості та параметрів узгодженої фільтрації [22]. Міжкадрове й внутрішньокадрове вирівнювання фону можуть застосовуватися окремо або послідовно, тому значення має також порядок процедур. Для SWIR-спостереження актуальною є задача спільного оцінювання впливу цих рішень на якість виявлення, координатну точність і швидкодію. У роботі її вирішено шляхом експериментального дослідження багатостадійного конвеєра та багатокритеріального вибору його конфігурацій за процедурою оцінювання.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження виконано на натурних SWIR-послідовностях, отриманих на стенді (рис. 1), та модельних даних. Варіювали програмне бінування, обробку фону й масштаб узгодженої фільтрації для оцінювання якості виявлення, координатної точності та швидкодії конвеєра. Стенд містить камеру MER3-138-136G3M-P-SWIR F02 (Китай) із сенсором Sony IMX990 (Японія): роздільна здатність 1280 × 1024 пікселів, розмір пікселя 5 × 5 мкм, діапазон чутливості приблизно 0,4–1,65 мкм [24]. Об’єктив VA-LCM-1.3MP-12MM-F1.8-020-SWIR (Китай) має фокусну відстань 12 мм, відносний отвір до 1,8 та поле зору близько 30° по горизонталі й 24° по вертикалі [25]. Фон задавали на білому матовому екрані 4 з окремим освітлювачем 6, змінюючи розподіл освітленості або проєктуючи ландшафт. Темні або світлі кульки із зображеннями діаметром 2–5 пікселів переміщували електромеханічним приводом у площині 3 по близькій до прямолінійної траєкторії. Швидкість узгоджували з міжкадровим інтервалом для зміщення зображення щонайменше на два пікселі за кадр. Об’єктив фокусували на площині руху, де 1 мм відповідав двом пікселям сенсора, а поле зору становило приблизно 65 × 52 см.

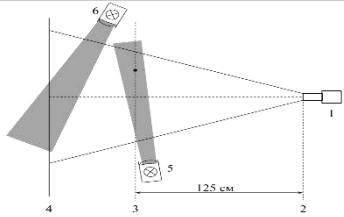


Рисунок 1. Принципова схема випробувального стенда: 1 – камера відеоспостереження; 2 – передня головна площина об'єктива камери; 3 – площина руху об'єкта; 4 – площина фону; 5 – освітлювач об'єкта; 6 – освітлювач фону

Експериментальні фактори охоплювали Етапи 0, 2 та 4 внутрішньокадрової обробки (ВКО). На Етапі 0 застосовували усереднювальне бінування з фактором $k \in \{1,2,4\}$: k = 1 – без бінування; k = 2 – бінування 2 × 2; k = 4 – бінування 4 × 4. На Етапі 2 порівнювали корекцію нерівномірності фону гаусовим згладжуванням і діленням (Gaussian Division, GD), міжкадровий інверсний медіанний фільтр (МКМФ), внутрішньокадровий просторовий інверсний медіанний фільтр (Median), послідовності GD→МКМФ, МКМФ→GD, Median→МКМФ, МКМФ→Median та контрольний варіант без Етапу 2. На Етапі 4 варіювали K – очікуваний лінійний розмір зображення об'єкта в пікселях, що задає масштаб ядра узгодженого фільтра. Досліджені значення наведено разом із результатами. Для порівняння відібрано натурні датасети D1–D3 з визначеними умовами знімання. Модельні датасети охоплювали: D4 – об'єкти та шум без структурованих завад; D5 – синусоїдальну просторову неоднорідність фону; D6 – плавну великомасштабну градієнтну неоднорідність; D7 – фіксовану просторову неоднорідність матриці (FPN) та гарячі пікселі; D8 – нерухоме локальне засвічення; D9 – засвічення з міжкадровим зміщенням; D10 – засвічення зі змінною в часі інтенсивністю; D11 – інтенсивну засвітку з насиченням частини зображення; D12 – поєднання синусоїдальної й градієнтної неоднорідностей, FPN і декількох типів засвічення. Сукупно досліджено близько 1000 конфігурацій для 12 датасетів. Парето-аналіз виконували окремо для кожного датасету. Відкидали конфігурації з NFD/Fr > 0,5, після чого залишали рішення з PD у межах 3 % від максимального значення; якщо їх було менше трьох, допуск розширювали до 8 %. Серед відібраних рішень визначали недоміновані за критеріями СКВху → min та ВКО FPS → max: для них не існує іншої конфігурації, не гіршої за обома критеріями та кращої хоча б за одним. Для практичної Парето-множини рішення з відмінністю СКВху не більше ніж на 10 % вважали рівноцінними за точністю й надавали перевагу конфігурації з більшим FPS.

Багатостадійний конвеєр обробки зображень короткохвильового інфрачервоного діапазону

Конвеєр обробляє серію SWIR-кадрів і формує вимірювання параметрів об'єктів для подальшої міжкадрової обробки. Етапи 0–8 поєднують просторові операції з часовим оцінюванням фону; послідовність етапів і передавання даних наведено на рис. 2.

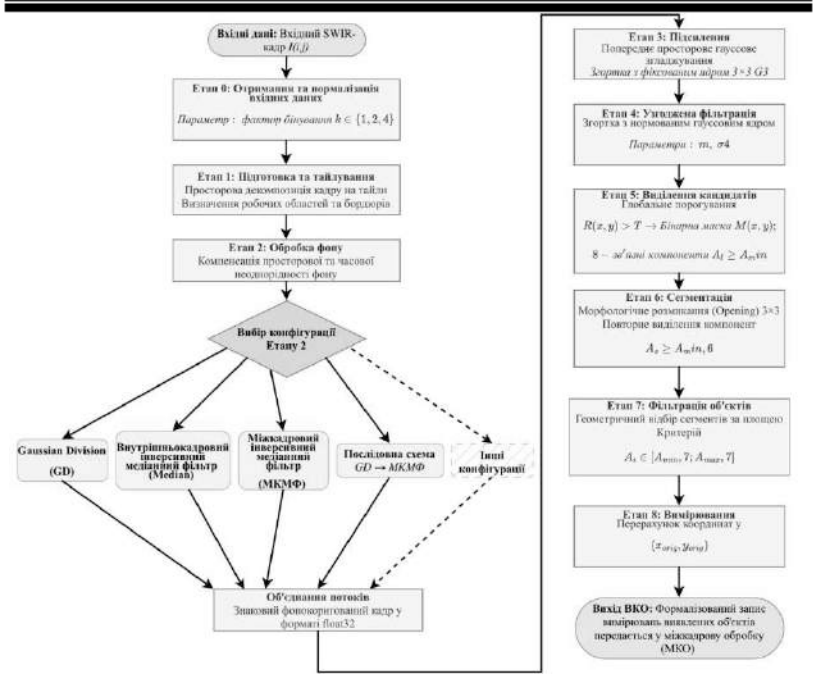


Рисунок 2. Блок-схема багатостадійного конвеєра внутрішньокадрової обробки SWIR-зображень

Штриховим контуром на схемі позначено додаткові комбіновані конфігурації для адаптації конвеєра до специфічних умов зйомки різних датасетів. На Етапі 0 застосовують усереднювальне бінування з фактором $k \in N, k \geq 1$. Для кадру шириною W і висотою H використовують лише повні блоки k × k; розміри робочої області становлять:

$$W_k = k\left\lfloor \frac{W}{k} \right\rfloor, \quad H_k = k\lfloor H / k \rfloor. \tag{1}$$

$$W_b = \frac{W_k}{k}, \quad H_b = \frac{H_k}{k}. \tag{2}$$

Яскравість бінованого пікселя з індексами (p, q) обчислюють усередненням блока k × k з округленням до найближчого цілого:

$$B(p,q) = round\left(\frac{1}{k^2} \sum_{s=0}^{k-1} \sum_{r=0}^{k-1} I(pk + r, qk + s) \right), \tag{3}$$

де $I(i, j)$ – значення яскравості пікселя вихідного зображення, а $B(p,q)$ – значення відповідного пікселя після бінування.

Координати центра блока, що відповідає бінованому пікселю (p,q), у вихідному кадрі дорівнюють:

$$x^{(0)}_{\{pq\}} = pk + \frac{k}{2}, \quad y^{(0)}_{\{pq\}} = qk + \frac{k}{2}. \tag{4}$$

Якщо координати бінованого кадру задають центрами пікселів, тобто $x^{(b)} = p + 1/2$ та $y^{(b)} = q + 1/2$, перерахунок має вигляд:

$$x^{(0)} = k\, x^{(b)}, \quad y^{(0)} = k\, y^{(b)}, \tag{5}$$

де $x^{(o)}$, $y^{(0)}$ – координати у вихідному кадрі.

Відкидання неповних правих і нижніх блоків не змінює початку робочої області, тому додаткового координатного зсуву не вводять.

На Етапі 1 кадр поділяють на тайли з бордюрами із сусідніх пікселів для локальних операцій біля меж. Обчислення використовують розширену область, а результати формуються лише для внутрішньої робочої області тайла. На Етапі 2 МКМФ обчислює часову медіану просторово відповідних пікселів каузальної послідовності кадрів. Нехай t – номер поточного кадру, K – кількість відібраних кадрів, $s \geq 1$ – крок відбору. Кадр включають до історії за умовою:

$$t \bmod s = 0, s \geq 1. \tag{6}$$

Після накопичення K кадрів попіксельна часова медіана для q-го відібраного кадру визначається як:

$$M_{tq}(x, y) = median\left\{ I_{(q-j)s}(x, y) : j = 0, \ldots, K-1 \right\}. \tag{7}$$

У реалізації $K \in \{3,5\}$. Після накопичення K кадрів медіану оновлюють на відібраних кадрах, а на проміжних використовують останню обчислену оцінку. Номер останнього відібраного кадру визначається як:

$$\tau(t) = s\lfloor t / s \rfloor. \tag{8}$$

$$M_t(x, y) = M_{\tau(t)}(x, y), \quad t \geq (K-1)s. \tag{9}$$

Після початкового накопичення фонокоригований залишок кожного вхідного кадру визначається відніманням медіанної оцінки:

$$R_t(x, y) = I_t(x, y) - M_t(x, y), \ t \geq (K-1)s. \tag{10}$$

Залишок зберігається у знаковому форматі float32. Якщо МКМФ завершує Етап 2, результат передається далі без обмеження діапазону, масштабування та додатного зміщення. Параметри K і s задають часовий розмах вікна:

$$\Delta t_{window} = (K-1)s. \tag{11}$$

ВКМФ компенсує крупноструктурні просторові неоднорідності фону. Передбачено два конфігураційні варіанти: просторовий інверсний медіанний фільтр і ділення на гауссово згладжене зображення.

Для внутрішньокадрового інверсного медіанного фільтра нехай $X_t(x, y)$ – поточне зображення, а L × L – квадратне вікно непарного розміру. Його радіус r та множина значень локального околу задаються співвідношеннями:

$$L = 2r + 1; \tag{12}$$

$$W_{x,y} = \left\{ X_t(x+u, y+v) : -r \leq u \leq r, -r \leq v \leq r \right\}. \tag{13}$$

Локальну медіанну оцінку крупноструктурного фону віднімають від поточного зображення:

$$M_t(x,y) = median\left(W_{x,y}\right); \tag{14}$$

$$R_t(x,y) = X_t(x,y) - M_t(x,y). \tag{15}$$

Результат зберігається у знаковому float32-поданні. Розмір вікна L пов'язується з характерним очікуваним просторовим розміром зображення об'єкта d_{obj} через емпіричний масштабний коефіцієнт C_L:

$$L \approx c_L d_{obj}. \tag{16}$$

Для GD фон оцінюють гауссовим згладжуванням. За коефіцієнта зменшення роздільності $d > 1$ використовують зменшену копію з подальшим поверненням карти фону до робочої роздільності:

$$B_G = Upsample\left[G_{\sigma d} * Downsample(I,d)\right], \tag{17}$$

де G – нормоване двовимірне гауссівське ядро, σ – його масштаб у пікселях початкового зображення, $B_G(x, y)$ – карта оціненого фону.

Середній рівень цієї карти C визначається по всій робочій області:

$$C = \frac{\sum_{y=0}^{H-1}\sum_{x=0}^{W-1} B_G(x,y)}{WH}. \tag{18}$$

Для захисту від малого знаменника та обмеження локального підсилення формується величина $D(x,y)$, де $\varepsilon > 0$ є захисним додатком, а $g_{max} \geq 1$ – верхньою межею локального коефіцієнта підсилення:

$$D(x,y) = max\left(B_G(x,y) + \varepsilon, \frac{C}{g_{max}}\right). \tag{19}$$

Знаковий фонокоригований результат GD визначається виразом:

$$R_G(x,y) = \left[I(x,y) - B_G(x,y)\right]\frac{C}{D(x,y)}. \tag{20}$$

Множник $C/D(x,y)$ масштабує різницю між зображенням і фоном без зміни її знака. Результат зберігається у форматі float32.

На Етапі 3 фонокориговане зображення $I_C(\underline{x,y})$ згладжують фіксованим гауссовим ядром 3 × 3. Параметр σ_3 визначає його ваги; результат $R_3(x,y)$ обчислюється згорткою:

$$R_3(x,y) = \sum_{i=-1}^{1}\sum_{j=-1}^{1} G_3(i,j)\, I_c(x-i, y-j), \tag{21}$$

де $G_3(i, j)$ – нормовані коефіцієнти гауссового ядра 3 × 3.

На Етапі 4 зображення Етапу 3 фільтрують ядром, що моделює очікуваний просторовий профіль об'єкта, формуючи неперервну карту відгуку $R(x,y)$.

Очікуваний просторовий профіль апроксимується двовимірною ізотропною гауссовою функцією. Для координат u і v відносно центра зображення об'єкта та параметра ширини профілю σ_4 модель має вигляд:

$$g(u,v) = exp\left[-\frac{u^2+v^2}{2\sigma_4^{\,2}}\right]. \tag{22}$$

Ширина профілю σ_4 і непарний розмір ядра m задаються окремо:

$$m = 2r + 1, \tag{23}$$

де r – радіус ядра.

Дискретна область його координат визначається як:

$$u, v \in \{-r, -r+1, \ldots, 0, \ldots, r-1, r\}. \tag{24}$$

За заданих m і σ_4 ненормовані коефіцієнти ядра дорівнюють значенням гауссової моделі:

$$\tilde{H}(u,v) = exp\left[-\frac{u^2+v^2}{2\sigma_4^2}\right], \; u, v = -r, \ldots, r. \tag{25}$$

Сума ненормованих коефіцієнтів дорівнює:

$$C = \sum_{u=-r}^{r}\sum_{v=-r}^{r}\tilde{H}(u,v). \tag{26}$$

А нормоване ядро визначається співвідношенням:

$$H(u,v) = \frac{\tilde{H}(u,v)}{C}. \tag{27}$$

Нормування зберігає гауссову форму ядра й забезпечує одиничну суму коефіцієнтів. Центральна симетрія робить кореляційний і згортковий записи еквівалентними. Для вхідного зображення $E(x,y)$:

$$R(x,y) = \sum_{u=-r}^{r}\sum_{v=-r}^{r}H(u,v)E(x+u, y+v). \tag{28}$$

За незмінних m і σ_4 ядро $H(u,v)$ формують один раз для серії, а карту $R(x,y)$ обчислюють для кожного тайла.

На Етапі 5 глобальний поріг T перетворює карту відгуку $R(x,y)$ на бінарну маску:

$$M(x,y) = \begin{cases} 255, & R(x,y) > T, \\ 0, & R(x,y) \le T. \end{cases} \tag{29}$$

У бінарній масці формують 8-зв'язні компоненти та відбирають їх за площею A_l з мінімально допустимим значенням A_{min}:

$$A_l \ge A_{min}. \tag{30}$$

Прийняті компоненти утворюють множину первинних кандидатів.

На Етапі 6 бінарну маску уточнюють без повторного порогування. У реалізованій конфігурації застосовують морфологічне розмикання множини пікселів переднього плану F прямокутним структурним елементом B розміру 3 × 3:

$$F \circ B = (F \ominus B) \oplus B. \tag{31}$$

Після морфологічної зміни областей 8-зв'язні компоненти формують повторно. До нових компонент із площею A_s застосовують окремий критерій мінімальної площі Етапу 6:

$$A_s \ge A_{min}, 6. \tag{32}$$

Прийняті компоненти перетворюються на сегменти гіпотетичних об'єктів для подальшого геометричного відбору. На Етапі 7 сегменти фільтрують виключно за площею. Для піксельної області Ω_i і-го сегмента площа дорівнює:

$$A_i = |\Omega_i|. \tag{33}$$

Сегмент приймається, якщо його площа задовольняє умову:

$$A_i \geq A_{\min,7} \wedge \left(A_{\max,7} = 0 \vee A_i \leq A_{\max,7}\right), \tag{34}$$

де $A_{min,7}$ і $A_{max,7}$ – нижня та верхня межі площі відповідно; $A_{max,7} = 0$ означає відсутність верхньої межі.

На Етапі 8 для відібраних сегментів обчислюють сигнально-фонові характеристики, виконують фінальну внутрішньокадрову перевірку й формують вимірювання. Інтенсивності визначають за фонокоригованим зображенням $I_c(x,y)$ з Етапу 2. Для оцінювання локального фону використовується реальна піксельна область сегмента Ω_s. Нехай B_r – прямокутний структурний елемент розміру $(2r+1)\times(2r+1)$, де r задає ширину локального фонового околу, а F – множина пікселів переднього плану поточної маски. Спочатку область сегмента дилатується:

$$D_s = \Omega_s \oplus B_r. \tag{35}$$

Після цього з дилатованої області вилучаються всі пікселі переднього плану, і локальна фонова область визначається як:

$$B_s = D_s \cap F^c. \tag{36}$$

Отже, $B_s \cap \Omega_s = \varnothing$. Обмежувальний прямокутник задає лише технічну область обчислень. Середнє значення сигналу в локальній фоновій області дорівнює:

$$I_{bg,s} = \frac{1}{|B_s|} \sum_{(x,y)\in B_s} I_c(x,y). \tag{37}$$

Стандартне відхилення локального фонового сигналу становить:

$$\sigma_{bg,s} = \sqrt{\frac{1}{|B_s|} \sum_{(x,y)\in B_s} \left(I_c(x,y) - I_{bg,s}\right)^2}. \tag{38}$$

Середню інтенсивність сегмента визначають за його реальною піксельною областю:

$$I_s = \frac{1}{A_s} \sum_{(x,y)\in\Omega_s} I_c(x,y),\ A_s = |\Omega_s|. \tag{39}$$

Додатковою характеристикою сегмента може бути максимальна інтенсивність:

$$I_{\max,s} = \max_{(x,y)\in\Omega_s} I_c(x,y). \tag{40}$$

Інтегральний надлишковий сигнал характеризує сумарне перевищення над локальним фоном:

$$S_{exc,s} = \sum_{(x,y)\in\Omega_s} \left[I_c(x,y) - I_{bg,s}\right] = A_s\left(I_s - I_{bg,s}\right). \tag{41}$$

Для фінальної внутрішньокадрової перевірки формується безрозмірна SNR-подібна статистика:

$$q_s = \frac{I_s - I_{bg,s}}{\sigma_{bg,s}}. \tag{42}$$

Гіпотеза про наявність зображення об'єкта в межах ВКО приймається за критерієм:

$$q_s \geq q_{cr}, \tag{43}$$

де порогове значення q_{cr} є окремим порогом Етапу 8. Запис прийнятого вимірювання містить ідентифікатор кадру, оцінку положення, обмежувальний прямокутник, площу, сигнальні й фонові характеристики та q_s. Для локальної оцінки положення $(\hat{x}_s, \hat{y}_s)$ та зміщення j-го тайла $(x_{0,j}, y_{0,j})$ перехід до координат повного поточного кадру визначається як:

$$\hat{x}_{s,fr} = \hat{x}_s + x_{0,j},\ \hat{y}_{s,fr} = \hat{y}_s + y_{0,j}. \tag{44}$$

Після врахування зміщення тайла координати бінованого кадру з фактором k перераховують до системи вихідного небінованого кадру:

$$x_{orig} = kx_{bin},\ y_{orig} = ky_{bin}. \tag{45}$$

Внутрішньокадрове виявлення ще не підтверджує наявності реального рухомого об'єкта. Вимірювання передаються до міжкадрової обробки (МКО), основною складовою якої є трекінг.

Результати

Закономірності оцінювали за повним масивом експериментальних даних. У табл. 1–3 наведено вибрані результати D1, у табл. 4 – D3, D11 і D12.

Таблиця 1

Показники точності оцінювання координат положення об'єкта

№	Конфігурація	$\overline{\Delta x}$, px	$\overline{\lvert\Delta x\rvert}$, px	$\overline{\Delta y}$, px	$\overline{\lvert\Delta y\rvert}$, px	σ_x, px	σ_y, px	σ_{xy}, px
	№датасету = 1; $\overline{\mathrm{SNR}} = 645.09 - 673.39$, $N_{exp1} = 86$							
1	GD→МКМФ, ББ, К10	0.06	0.91	-0.04	0.74	1.0960	0.8910	1.4100
2	GD→МКМФ, ББ, К3	0.05	0.91	-0.05	0.74	1.0970	0.8870	1.4100
3	МКМФ→GD, ББ, К10	0.05	0.91	-0.03	0.74	1.0960	0.8870	1.4100
4	МКМФ→GD, ББ, К3	0.05	0.91	-0.05	0.74	1.0970	0.8870	1.4100
5	Median, ББ, К10	0.22	0.92	-0.17	0.76	1.1000	0.8840	1.4100
6	GD, ББ, К10	0.19	0.92	-0.13	0.75	1.1070	0.8900	1.4200
7	МКМФ, ББ, К10	0.04	0.92	-0.03	0.74	1.1000	0.8910	1.4200
8	МКМФ, ББ, К3	0.04	0.91	-0.04	0.74	1.0980	0.8890	1.4100
9	GD→МКМФ, 2×2, К5	0.01	0.95	-0.01	0.78	1.1490	0.9460	1.4900
10	GD→МКМФ, 2×2, К3	0.01	0.96	-0.01	0.79	1.1590	0.9600	1.5100
11	GD→МКМФ, 2×2, К10	-0.12	0.96	0.10	0.80	1.1610	0.9770	1.5200
12	МКМФ→GD, 2×2, К5	0.01	0.95	0.00	0.77	1.1440	0.9390	1.4800
13	МКМФ→GD, 2×2, К3	0.02	0.95	-0.01	0.78	1.1500	0.9460	1.4900
14	Median→МКМФ, 2×2, К5	0.05	0.94	-0.03	0.77	1.1380	0.9350	1.4700
15	Median→МКМФ, 2×2, К3	0.05	0.95	-0.04	0.79	1.1560	0.9490	1.5000
16	МКМФ, 2×2, К5	0.00	0.95	0.01	0.77	1.1390	0.9420	1.4800
17	МКМФ, 2×2, К3	0.00	0.94	0.00	0.79	1.1400	0.9520	1.4900

№	Конфігурація	$\overline{\Delta x}$, px	$\overline{\lvert\Delta x\rvert}$, px	$\overline{\Delta y}$, px	$\overline{\lvert\Delta y\rvert}$, px	σ_x, px	σ_y, px	σ_{xy}, px
18	GD→МКМФ, 4×4, К3	-0.59	1.19	0.50	1.04	1.3320	1.2040	1.8000
19	МКМФ→GD, 4×4, К3	-0.62	1.22	0.50	1.02	1.3550	1.1920	1.8000
20	Median→МКМФ, 4×4, К3	-0.61	1.23	0.43	1.02	1.3740	1.1940	1.8200

Таблиця 2

Показники якості виявлення об'єктів спостереження

№	Конфігурація	PD	PFA	$\overline{N_{FD/Fr}}$
	№датасету = 1; $\overline{\text{SNR}} = 645.09 - 673.39$, $N_{exp1} = 86$			
1	GD→МКМФ, ББ, К10	1.00	8e-08	0.0044
2	GD→МКМФ, ББ, К3	1.00	8e-08	0.0044
3	МКМФ→GD, ББ, К10	1.00	6e-08	0.0033
4	МКМФ→GD, ББ, К3	1.00	8e-08	0.0044
5	Median, ББ, К10	1.00	2.68e-06	7.0256
6	GD, ББ, К10	0.99	2.81e-06	5.8500
7	МКМФ, ББ, К10	1.00	6e-08	0.0033
8	МКМФ, ББ, К3	1.00	8e-08	0.0044
9	GD→МКМФ, 2×2, К5	1.00	4e-08	0.0022
10	GD→МКМФ, 2×2, К3	1.00	4e-08	0.0022
11	GD→МКМФ, 2×2, К10	0.92	2e-08	0.0011
12	МКМФ→GD, 2×2, К5	1.00	2e-08	0.0011
13	МКМФ→GD, 2×2, К3	1.00	2e-08	0.0011
14	Median→МКМФ, 2×2, К5	1.00	2e-08	0.0011
15	Median→МКМФ, 2×2, К3	1.00	2e-08	0.0011
16	МКМФ, 2×2, К5	1.00	2e-08	0.0011
17	МКМФ, 2×2, К3	1.00	4e-08	0.0022
18	GD→МКМФ, 4×4, К3	0.99	4e-08	0.0022
19	МКМФ→GD, 4×4, К3	0.98	2e-08	0.0011
20	Median→МКМФ, 4×4, К3	0.98	2e-08	0.0011

Таблиця 3

Часові характеристики обробки

№	Конфігурація	Кадрів	Час, с	FPS	Читання, с	ВКО, с	ВКО FPS
	№датасету = 1; $\overline{\text{SNR}} = 645.09 - 673.39$, $N_{exp1} = 86$						
1	GD→МКМФ, ББ, К10	910	20.48	44.43	10.29	6.94	131.13
2	GD→МКМФ, ББ, К3	910	60.10	15.14	39.79	12.58	72.33
3	МКМФ→GD, ББ, К10	910	26.67	34.13	10.85	10.44	87.16
4	МКМФ→GD, ББ, К3	910	60.10	15.14	35.87	16.80	54.16
5	Median, ББ, К10	910	61.85	14.71	27.67	25.84	35.21
6	GD, ББ, К10	910	41.63	21.86	13.43	6.44	141.20
7	МКМФ, ББ, К10	910	61.83	14.72	46.13	8.26	110.22
8	МКМФ, ББ, К3	910	43.72	20.82	11.52	7.88	115.55
9	GD→МКМФ, 2×2, К5	910	37.88	24.02	16.58	2.13	427.90
10	GD→МКМФ, 2×2, К3	910	32.56	27.95	9.41	2.09	435.92

№	Конфігурація	Кадрів	Час, с	FPS	Читання, с	ВКО, с	ВКО FPS
11	GD→МКМФ, 2×2, K10	910	34.08	26.70	9.51	2.15	422.83
12	МКМФ→GD, 2×2, K5	910	32.59	27.92	10.64	2.77	328.95
13	МКМФ→GD, 2×2, K3	910	30.27	30.07	10.02	2.54	357.91
14	Median→МКМФ, 2×2, K5	910	33.28	27.34	14.32	7.40	122.97
15	Median→МКМФ, 2×2, K3	910	32.16	28.30	10.62	7.29	124.86
16	МКМФ, 2×2, K5	910	61.83	14.72	53.42	1.96	464.25
17	МКМФ, 2×2, K3	910	25.07	36.30	8.99	1.89	480.54
18	GD→МКМФ, 4×4, K3	910	17.81	51.09	10.41	0.82	1114.83
19	МКМФ→GD, 4×4, K3	910	21.71	41.92	10.12	0.83	1095.29
20	Median→МКМФ, 4×4, K3	910	31.25	29.12	12.91	2.11	431.97

Таблиця 4

Узагальнені показники для датасетів D3, D11 та D12

№	Конфігурація	σ_{xy}, px	PD	$\overline{N_{FD/Fr}}$	ВКО FPS
	№датасету = 3; $\overline{\mathrm{SNR}} = 499.84 - 535.91$, $N_{exp3} = 86$				
1	GD→МКМФ, ББ, K10	1.1100	0.99	0.0035	124.04
2	GD→МКМФ, ББ, K3	1.1200	1.00	0.1132	87.94
3	МКМФ→GD, ББ, K10	1.1300	1.00	0.0035	83.10
4	МКМФ→GD, ББ, K3	1.1100	1.00	0.1225	72.30
5	МКМФ, ББ, K3	1.1200	1.00	0.0922	114.26
6	МКМФ, ББ, K10	1.1200	0.99	0.0035	109.09
7	Median, ББ, K10	1.1500	1.00	7.0665	33.90
8	GD, ББ, K10	1.1400	1.00	1.0653	135.37
9	МКМФ→Median, ББ, K10	1.1200	0.99	0.0023	3.96
	№датасету = 11; $\overline{\mathrm{SNR}} = 8,2 - 19,7$, $N_{exp11} = 24$				
21	GD→МКМФ, ББ	1.4400	0.82	0.1200	42.46
22	МКМФ→GD, ББ	1.5600	0.93	1.2200	40.44
23	МКМФ, ББ	1.6500	0.94	0.2200	83.24
24	GD, ББ	1.2200	0.93	0.4000	54.99
25	Без S2, ББ	1.2900	0.76	1.1800	76.67
26	МКМФ→Median, ББ	2.2300	0.83	0.2800	2.67
31	Без S2, 2×2	1.3900	0.74	0.5600	370.64
37	Без S2, 4×4	1.6000	0.51	0.0400	1170.96
	№датасету = 12; $\overline{\mathrm{SNR}} = 180,2 - 280,3$, $N_{exp12} = 24$				
41	GD→МКМФ, ББ	0.6600	0.87	1.3800	32.77
42	МКМФ→GD, ББ	0.6500	0.88	0.2600	39.01
43	МКМФ, ББ	0.6700	0.81	0.3800	79.56
44	GD, ББ	0.6900	0.91	6.7600	57.70
45	Без S2, ББ	0.7300	0.52	0.0200	70.63
50	Без S2, 2×2	0.8300	0.52	0.0000	231.21
51	МКМФ→Median, ББ	0.8500	0.84	2.0800	2.66
57	Без S2, 4×4	1.1900	0.48	0.0200	812.35

Високе PD не гарантує малої кількості хибних виявлень. Для D1 без бінування при K10 методи Median, GD і МКМФ забезпечують PD = 0,99–1,00, але NFD/Fr становить відповідно 7,0256, 5,8500 і 0,0033 (табл. 2). Подібна відмінність спостерігається для D3 (табл. 4). Відносна ефективність методів Етапу 2 залежить від фонових умов.

За повним масивом даних порядок Median→МКМФ на D3 при бінуванні 2 × 2 і K5 забезпечує вищу швидкодію, ніж МКМФ→Median, за близької якості. На D11 при 4 × 4 швидший порядок Median→МКМФ супроводжується нижчим PD. Виграш у швидкодії може супроводжуватися зниженням якості виявлення. Вимкнення Етапу 2 часто зменшує обчислювальні витрати, але не гарантує найбільшої швидкодії.

Для D11 при 4 × 4 воно забезпечує 1170,96 ВКО FPS за PD = 0,51, а для D12 у трьох режимах бінування PD становить 0,48–0,52 (табл. 4). Бінування також створює компроміс: для GD→МКМФ на D1 при K3 перехід від обробки без бінування до 4 × 4 підвищує ВКО FPS із 72,33 до 1114,83, але збільшує СКВху з 1,41 до 1,80 рх і знижує PD з 1,00 до 0,99 (табл. 1–3). Для дослідження K Етапу 4 спосіб обробки фону фіксували як МКМФ. Варіювали K і бінування (без бінування, 2 × 2, 4 × 4) для D1 із зображенням об'єкта приблизно 8–10 рх та D4 із розміром 36 × 36 рх.

Таблиця 5

D1 (натурний): СКВху залежно від розміру ядра узгодженого фільтру *K*, рх

Конфігурація	3	5	7	9	10	13	16	19	24	37	45	55	70
МКМФ, ББ	1.41	3.47	3.44	3.44	1.42	3.43	2.94	2.96	2.63	2.14	3.04	–	–
МКМФ, 2×2	1.49	1.48	3.35	3.20	1.55	2.34	3.07	2.99	0.00	–	–	–	–
МКМФ, 4×4	1.79	0.00	5.25	2.22	1.95	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблиця 6

D1 (натурний): PD залежно від розміру ядра узгодженого фільтру *K*, рх

Конфігурація	3	5	7	9	10	13	16	19	24	37	45	55	70
МКМФ, ББ	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.95	0.44	–	–
МКМФ, 2×2	1.00	1.00	1.00	1.00	0.64	1.00	0.79	0.53	0.01	–	–	–	–
МКМФ, 4×4	0.93	0.02	0.01	0.01	0.63	–	–	–	–	–	–	–	–

На D1 залежності СКВху(K) і PD(K) немонотонні (табл. 5, 6). Без бінування PD = 1,00 зберігається при *K* = 3–24, а при *K* = 45 знижується до 0,44. За бінування погіршення виявлення проявляється при менших K. Причини локальних покращень СКВху поблизу *K* = 3 та *K* = 10 не встановлено. Для модельного датасету D4 найкраща координатна точність без бінування спостерігається при *K* = 24, у режимі 2 × 2 – при *K* = 9, а за 4 × 4 зміщується в область малих *K* (табл. 7).

Таблиця 7

D4 (модельний): СКВху залежно від розміру ядра узгодженого фільтру *K*, рх

Конфігурація	3	5	7	9	10	13	16	19	24	37	45	55	70
МКМФ,ББ	2.47	2.30	2.13	1.88	1.95	1.89	1.66	1.61	1.42	1.63	1.88	1.94	2.44
МКМФ, 2×2	1.79	1.69	1.51	1.46	1.75	1.71	1.66	1.68	1.97	2.40	2.58	3.21	3.43
МКМФ, 4×4	1.91	1.90	2.12	2.08	2.08	2.58	2.58	2.57	2.84	3.51	3.64	–	–

Таблиця 8

D4 (модельний): PD залежно від розміру ядра узгодженого фільтру *K*, px

Конфігурація	3	5	7	9	10	13	16	19	24	37	45	55	70
МКМФ, ББ	0.49	0.48	0.43	0.37	0.94	0.93	0.87	0.85	0.73	0.95	0.96	0.91	0.90
МКМФ, 2×2	0.83	0.82	0.78	0.72	0.96	0.96	0.93	0.91	0.91	0.81	0.59	0.47	0.15
МКМФ, 4×4	0.90	0.89	0.93	0.90	0.81	0.92	0.78	0.67	0.34	0.10	0.03	–	–

Ймовірність виявлення PD для D4 також чутлива до масштабу: за бінування 2 × 2 значення PD = 0,96 при $K = 10$ і 13 знижується до 0,15 при $K = 70$, а за 4 × 4 спад відбувається раніше: PD = 0,34 при $K = 24$ і 0,03 при $K = 45$ (табл. 8). Раціональна область K залежить від масштабу зображення об'єкта після бінування; універсального оптимуму для різних класів фону не встановлено.

Обговорення результатів

За процедурою для кожного датасету сформовано формальну Парето-оптимальну множину (ПОМФ) і практичну множину (ПОМУН), що враховує нечутливість до малих змін $\text{СКВ}_{xy} \pm 10\%$. У табл. 9 наведено елементи ПОМУН.

Таблиця 9

Практично раціональні конфігурації конвеєра (ПОМУН)

№	Конфігурація	σ_{xy}, px	PD	$\overline{N_{FD/Fr}}$	ВКО FPS	ПОМУН
	№датасету = 1; $\overline{\text{SNR}} = 645.09 - 673.39$, $N_{exp1} = 86$					
17	МКМФ, 2×2, КЗ	1.4900	1.00	0.0022	480.54	✓
18	GD→МКМФ, 4×4, КЗ	1.8000	0.99	0.0022	1114.83	✓
	№датасету = 2; $\overline{\text{SNR}} = 407.71 - 524.87$, $N_{exp2} = 86$					
33	МКМФ→GD, 2×2, КЗ	1.4200	1.00	0.0451	356.13	✓
	№датасету = 3; $\overline{\text{SNR}} = 499.84 - 535.91$, $N_{exp3} = 86$					
55	МКМФ, 2×2, КЗ	1.2000	1.00	0.0117	466.42	✓
	№датасету = 4; $\overline{\text{SNR}} = 7,8 - 17,2$, $N_{exp4} = 24$					
65	Без S2, ББ	1.3300	0.98	0.0400	101.20	✓
70	GD, 2×2	1.5000	0.99	0.1400	283.21	✓
76	GD, 4×4	1.9100	0.98	0.2400	904.98	✓
	№датасету = 5; $\overline{\text{SNR}} = 7,7 - 17,9$, $N_{exp5} = 24$					
89	МКМФ, 2×2	1.7500	0.89	0.1000	352.98	✓
95	МКМФ, 4×4	2.0700	0.87	0.2600	974.66	✓
	№датасету = 6; $\overline{\text{SNR}} = 7,7 - 18,5$, $N_{exp6} = 24$					
104	GD, ББ	1.2100	0.99	0.3000	53.19	✓
	№датасету = 7; $\overline{\text{SNR}} = 8,1 - 20,0$, $N_{exp7} = 24$					
131	Без S2, 2×2	1.5800	0.98	0.3200	386.25	✓
136	GD, 4×4	1.9500	0.94	0.2400	974.66	✓

№	Конфігурація	σ_{xy}, px	PD	$\overline{N_{FD/Fr}}$	ВКО FPS	ПОМУН
	№датасету = 8; $\overline{\text{SNR}} = 7,8 - 18,8$, $N_{exp8} = 24$					
149	МКМФ, 2×2	1.6700	0.91	0.0600	366.57	✓
155	МКМФ, 4×4	2.0600	0.89	0.0200	892.86	✓
	№датасету = 9; $\overline{\text{SNR}} = 14,0 - 20,4$, $N_{exp9} = 24$					
164	GD, ББ	0.8100	0.98	0.0400	58.40	✓
167	GD→МКМФ, 2×2	1.2200	0.97	0.2000	236.41	✓
173	GD→МКМФ, 4×4	1.6300	0.96	0.2400	725.69	✓
	№датасету = 10; $\overline{\text{SNR}} = 75,8 - 240,3$, $N_{exp10} = 24$					
182	МКМФ→GD, ББ	0.3400	0.96	0.2200	37.66	✓
187	GD→МКМФ, 2×2	0.4500	0.97	0.2400	212.18	✓
194	МКМФ→GD, 4×4	0.7600	0.94	0.2600	675.22	✓
	№датасету = 11; $\overline{\text{SNR}} = 8,2 - 19,7$, $N_{exp11} = 24$					
204	GD, ББ	1.2200	0.93	0.4000	54.99	✓
209	МКМФ, 2×2	1.6600	0.90	0.0400	361.27	✓
215	МКМФ, 4×4	2.0300	0.90	0.1400	877.19	✓
	№датасету = 12; $\overline{\text{SNR}} = 180,2 - 280,3$, $N_{exp12} = 24$					
226	GD→МКМФ, 2×2	0.6700	0.87	0.4400	167.95	✓
229	GD, 2×2	0.7400	0.87	0.3200	376.51	✓

Сумарно для 12 датасетів отримано 40 конфігурацій ПОМФ і 25 ПОМУН. Відсіяно рішення, для яких малий виграш у точності не компенсує втрату швидкодії. Наприклад, на D1 GD→МКМФ без бінування з 1,41 px і 131,13 ВКО FPS поступається за практичним вибором МКМФ, 2 × 2, К3 з 1,49 px і 480,54 ВКО FPS. Багатокритеріальний підхід застосовують також до розподілу обмежених ресурсів сенсорних мереж [27].

У ПОМУН зберігаються всі режими бінування: 12 конфігурацій із 2 × 2, вісім із 4 × 4 і п'ять без бінування. Для D4 представлені всі три режими, що відображає компроміс між точністю та швидкодією за прийнятної якості виявлення. Універсального способу обробки фону не виявлено. Для D5 ПОМУН містить лише МКМФ із бінуванням 2 × 2 і 4 × 4, для D6 – GD без бінування, для D10 – послідовності GD→МКМФ і МКМФ→GD. Конкретний вибір залежить від датасету. Окремий Median і послідовності Median→МКМФ та МКМФ→Median не увійшли до жодної ПОМФ. Практичні альтернативи утворюють МКМФ, GD та їх послідовності; для двох датасетів зберігся варіант без Етапу 2. Конфігурацію з ПОМУН обирають відповідно до вимог точності й швидкодії конкретної системи.

Висновки

Розроблено багатостадійний конвеєр обробки послідовностей SWIR-зображень малорозмірних рухомих об'єктів, що охоплює Етапи 0–8 – від

отримання й нормалізації кадру до формування вимірювань. Конвеєр поєднує просторову обробку кадрів із часовим контекстом оцінювання фону та визначає узгоджену послідовність підготовки даних, компенсації фону, фільтрації, сегментації й оцінювання параметрів об'єктів. Експериментальне дослідження програмного бінування, способів і порядку обробки фону та масштабу ядра узгодженої фільтрації виявило компроміси між якістю виявлення, координатною точністю та швидкодією. Підвищення швидкодії внаслідок бінування може супроводжуватися втратою точності й погіршенням виявлення. Ефективність обробки фону залежить від характеру завад і порядку процедур. Вплив розміру ядра є немонотонним, а його раціональна область залежить від масштабу зображення об'єкта після бінування. Багатокритеріальний аналіз виконано окремо для кожного з 12 наборів даних. Після відбору за показниками виявлення конфігурації порівнювали за координатною похибкою та швидкодією. Урахування практичної нечутливості до малих відмінностей координатного показника (до 10 %) скоротило загальну кількість альтернатив із 40 конфігурацій формальної Парето-множини до 25 практично раціональних. Універсальної оптимальної конфігурації не встановлено; вибір залежить від умов спостереження та пріоритетів конкретної системи. Отримані закономірності стосуються досліджених натурних і модельних даних, режимів обробки та реалізації конвеєра. Для інших сенсорів, масштабів об'єктів і фонових умов склад раціональних конфігурацій потребує повторного оцінювання. Практичними обмеженнями є ручне налаштування глобального порогу та граничного SNR-показника, а також обчислювальні витрати послідовної просторово-часової обробки фону, які можуть ускладнювати застосування конвеєра на малопотужних системах.

Подальша робота передбачає автоматизацію вибору конфігурацій із практичної Парето-множини на основі класифікації фонової обстановки. Адаптацію до динамічних змін завад та освітленості планується реалізувати через інтеграцію компактних моделей машинного навчання, що потребує окремої експериментальної перевірки.

Література

[1] Vlasenko, V., Khlamov, S., & Savanevych, V. (2024). Devising a procedure for the brightness alignment of astronomical frames background by a high frequency filtration to improve accuracy of the brightness estimation of objects. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(2 (128)), 31-38. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.301327.

[2] Sorensen, C. M. (2022). Light Scattering and Absorption by Particles. IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/978-0-7503-5157-7.

[3] Peroni, R., Penide, G., Cornet, C., Pujol, O., & Pierangelo, C. (2025). Water vapor content retrieval under cloudy sky conditions from SWIR satellite measurements in the context of C3IEL space mission project. Atmospheric Measurement Techniques, 18, 7369-7385. https://doi.org/10.5194/amt-18-7369-2025.

[4] Wiley, L., Cavanaugh, R., Follansbee, J., Burrell, D., Grimming, R., Pimpinella, R., Voss, J., Furxhi, O., & Driggers, R. (2023). Comparison of reflective band (Vis, NIR, SWIR, eSWIR) performance in daytime reduced illumination conditions. Applied Optics, 62(31), 8316-8326. https://doi.org/10.1364/AO.495832.

[5] Chen, Q., Liu, X., Du, L., Song, B., Sun, X., & Shen, Z. (2026). Three-band SWIR imaging for Pix2Pix-based colorization. Applied Optics, 65(11), 3798-3814. https://doi.org/10.1364/AO.590489.

[6] Leslie, P., Cavanaugh, R. C., Jordan, S., Wiley, L., Jacobs, E., Driggers, R., & Conroy, J. (2024). Visible, NIR, SWIR, and eSWIR urban and rural scene contrast comparison. Applied Optics, 63(7), 1839-1846. https://doi.org/10.1364/AO.510226.

[7] Khlamov, S., Savanevych, V., Tabakova, I., & Trunova, T. (2022). The astronomical object recognition and its near-zero motion detection in series of images by in situ modeling. In 2022 International Conference on Systems, Signals, and Image Processing (IWSSIP). (pp. 1-4). IEEE. https://doi.org/10.1109/IWSSIP55020.2022.9854475.

[8] Masias, M., Freixenet, J., Lladó, X., & Peracaula, M. (2012). A review of source detection approaches in astronomical images. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 422(2), 1674-1689. https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20742.x.

[9] Zhao, M., Li, W., Li, L., Hu, J., Ma, P., & Tao, R. (2022). Single-frame infrared small-target detection: A survey. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 10(2), 87-119. https://doi.org/10.1109/MGRS.2022.3145502.

[10] Kou, R., Wang, C., Peng, Z., Zhao, Z., Chen, Y., Han, J., Huang, F., Yu, Y., & Fu, Q. (2023). Infrared small target segmentation networks: A survey. Pattern Recognition, 143, 109788. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2023.109788.

[11] Yang, H., Mu, T., Dong, Z., Zhang, Z., Wang, B., Ke, W., Yang, Q., & He, Z. (2024). PBT: Progressive background-aware transformer for infrared small target detection. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 62, 1-13. https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3415080.

[12] Xu, M., Yu, C., Li, Z., Tang, H., Hu, Y., & Nie, L. (2025). HDNet: A hybrid domain network with multiscale high-frequency information enhancement for infrared small-target detection. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 63, 1-15. https://doi.org/10.1109/TGRS.2025.3574962.

[13] Zhang, J., Yang, H., & Sun, J. (2024). Infrared Small Target Detection Based on Transformer-Based Multi-scale Fusion Attention. Academic Journal of Computing & Information Science, 7(10), 97-104. https://doi.org/10.25236/AJCIS.2024.071014.

[14] Khlamov, S., Savanevych, V., Tabakova, I., Kartashov, V., Trunova, T., & Kolendovska, M. (2024). Machine Vision for Astronomical Images using The Modern Image Processing Algorithms Implemented in the CoLiTec Software. In Measurements and Instrumentation for Machine Vision. (pp. 269-310). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003343783-12.

[15] Khlamov, S., Savanevych, V., Vlasenko, V., Briukhovetskyi, O., Trunova, T., Levykin, I., Shvedun, V., & Tabakova, I. (2023). Development of the matched filtration of a blurred digital image using its typical form. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(9 (121)), 62-71. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273674.

[16] Lang, D., & Hogg, D. W. (2026). Principled point-source detection in collections of astronomical images. The Astronomical Journal, 171(4), 231. https://doi.org/10.3847/1538-3881/ae4505.

[17] Zheng, C., Pulido, J., Thorman, P., & Hamann, B. (2015). An improved method for object detection in astronomical images. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 451(4), 4445-4459. https://doi.org/10.1093/mnras/stv1237.

[18] Xi, T., Yuan, L., & Sun, Q. (2022). A combined approach to infrared small-target detection with the alternating direction method of multipliers and an improved top-hat transformation. Sensors, 22(19), 7327. https://doi.org/10.3390/s22197327.

[19] Minaee, S., Boykov, Y. Y., Porikli, F., Plaza, A. J., Kehtarnavaz, N., & Terzopoulos, D. (2021). Image Segmentation Using Deep Learning: A Survey. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 44(7), 3523-3542. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2021.3059968.

[20] Khlamov, S., Savanevych, V., Briukhovetskyi, O., & Trunova, T. (2023). Big data analysis in astronomy by the Lemur software. In Proceedings of the IEEE 6th International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo 2023). (pp. 5-8). IEEE. https://doi.org/10.1109/UkrMiCo61577.2023.10380398.
[21] Bellanger, M. (2024). Digital Signal Processing: Theory and Practice. Wiley.
[22] Burger, W., & Burge, M. (2022). Digital Image Processing: An Algorithmic Introduction. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05744-1.
[23] Khlamov, S., Savanevych, V., Briukhovetskyi, O., Tabakova, I., & Trunova, T. (2022). Astronomical knowledge discovery in databases by the CoLiTec software. In Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT 2022). (pp. 583-586). IEEE. https://doi.org/10.1109/ACIT54803.2022.9913188.
[24] DAHENG IMAGING. (2026). MER3-138-136G3M-P-SWIR F02. https://en.daheng-imaging.com/show-957-3243-1.html.
[25] VA Imaging. (2026). VA-LCM-1.3MP-12MM-F1.8-020-SWIR Lens SWIR. https://va-imaging.com/products/lens-swir-c-mount-1-3mp-12mm-f1-8-1-2-lcm-swir-1-3mp-12mm-f1-8-020.
[26] Li, Q., Zhang, W., Lu, W., & Wang, Q. (2025). Multibranch mutual-guiding learning for infrared small target detection. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 63, 1-10. https://doi.org/10.1109/TGRS.2025.3526754.
[27] Yu, Y., Tang, X., & Xie, G. (2026). Optimal Resource Allocation via Unified Closed-Form Solutions for SWIPT Multi-Hop DF Relay Networks. Sensors, 26(2), 512. https://doi.org/10.3390/s26020512.

MULTISTAGE SHORT-WAVE INFRARED IMAGE PROCESSING PIPELINE

Bondar Y.[1], Kutvytskyi M.[1],
Netrebin Y.[1], Dr. Sci., Savanevych V.[1], Ph.D., Khlamov S.[1],
Dr.Sci., Zelensky S.[2], Ph.D., Khoroshevska I.[3], Ph.D., Tabakova I.[1]
[1] Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine,
[2] Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine,
[3] Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Ukraine

Abstract. *Detecting small moving objects in short-wave infrared (SWIR) image sequences requires balancing detection quality, localization accuracy, and processing speed under spatially nonuniform and time-varying backgrounds. A multistage pipeline was developed from data preparation to measurement generation. Experiments on real and simulated data examined software binning, background-processing methods and their order, and matched-filter kernel scale. Faster processing through binning can reduce localization accuracy and detection quality. Background-processing effectiveness depends on observation conditions and procedure order, while suitable filter scale depends on object image size after binning. Pareto analysis was performed separately for each of 12 datasets. Accounting for practical insensitivity to small localization-error differences reduced the total number of nondominated configurations from 40 to 25 practical alternatives. No universally optimal configuration was identified. The results support pipeline parameter selection according to observation conditions and requirements for detection, accuracy, and processing speed.*

Keywords: *SWIR images, multistage processing, software binning, matched filtering, Pareto optimality, detection criterion, localization accuracy.*