

**АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО ОЧИЩЕННЯ ВІД ШУМУ
ЗАХИЩЕНОГО ЗОБРАЖЕННЯ З КАМЕР ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ**

А. В. Садченко, О. А. Кушніренко, М. М. Іжак, В. В. Громов, В. О. Назаров

Національний університет «Одеська політехніка»
1, Шевченка пр., м.Одеса, 65044, Україна
Email: koa@op.edu.ua

Використання водяних знаків сумісно з відео-потокком з камер відеоспостереження дозволяє не тільки вирішити стандартні задачі такі як, наприклад, підтвердження справжності зображення, захист авторських прав но і додають додаткову інформацію, яку зручно використовувати при автоматичному формування реєстрів та баз даних. В якості додаткової інформації можуть бути персональні дані водіїв, номери та час паркування транспортних засобів, якщо камера встановлена на паркінгу чи час ДТП, якщо камера призначена для фіксації саме таких подій. Враховуючі нестабільні умови в яких може відбуватися відео-фіксація подій, та недосконалість технічної складової електронних схем камер з'являється необхідність зменшення рівня шумів на захищеному зображенні. Мета роботи полягає в розробці адаптивного та з низькою обчислювальною складністю алгоритму очищення від шуму як вихідного зображення контейнеру так і зображення ЦВЗ. Зазвичай зображення контейнеру володіє значно більшою ентропією чим ЦВЗ, що призводить до парадоксу сутність якого в тому, що оптимальний алгоритм фільтрації щодо зображення контейнеру може виявиться таким, що спотворить зображення ЦВЗ і навпаки. Тому пошук алгоритму, що може в однакової мірі поліпшити обидва компоненти захищеного зображення є актуальним завданням, що і було вирішено у даної роботі. В якості основного критерію для оцінки якості зображень після усунення шуму було обрано величину коефіцієнту кореляції між зображенням, що не містить шуму – еталонним та зображенням після фільтрації. З метою зниження обчислювальної складності алгоритму було обрано принцип медіанної фільтрації з апертурою, розмір якої залежить від дисперсії шуму. З метою знаходження оптимальних значень розміру апертури медіанного фільтру було побудовано залежності коефіцієнтів кореляції вихідного і обробленого зображень від дисперсії шуму. Дане дослідження дозволило виявити екстремуми, що є крапками оптимальних значень розмірів вікна медіанного фільтру. Було запропоновано адаптивний алгоритм медіанної фільтрації, що спочатку здійснює обробку захищеного зображення з фіксованим розміром вікна (3x3), а далі, після вилучення ЦВЗ використовуються ще два медіанних фільтра зі змінними значеннями вікна окремо для зображення контейнеру та ЦВЗ. Такій підхід дозволив досягнути значення коефіцієнтів кореляції більш ніж 0.9 при дисперсії шуму 0.3. Так як медіанний фільтр не містить ні операцій множення ні операцій підсумовування то запропонований алгоритм може бути реалізований на дешевій елементній базі, наприклад, мікроконтролерах AVR чи ARM архітектури, що коштують значно менше ніж спеціалізовані сигнальні процесори чи швидкодіюча програмована логіка.

Ключові слова: цифровий водяний знак, захищене зображення, очищення від шуму, камера відеоспостереження, рівень спотворення інформації, найменш значущий біт.

Вступ. В умовах зростаючих загроз та потреб у захисті інформації, відеоспостереження стає невід'ємною частиною стратегій безпеки як для бізнесу, так і для державних установ. При цьому, водяні знаки можуть бути додатковим рівнем захисту даних. В подальшому зображення із доданим цифровим водяним знаком будемо називати захищене зображення [1]. Використання цифрових водяних знаків (ЦВЗ, англійською DWM — Digital watermark) сумісно з зображеннями, що отримані з камер відеоспостереження [2,3] зазвичай має наступні цілі:

- **Захист авторських прав:** водяні знаки допомагають запобігти несанкціонованому використанню та розповсюдженню відеоматеріалів.

- Ідентифікація джерела: вони дозволяють швидко визначити, звідки було отримано відеопотік, що важливо задля забезпечення цілісності даних.
- Аудит та контроль: водяні знаки можуть використовуватись для відстеження та документування змін у відеопотоці.
- Збільшення довіри: наявність водяних знаків підвищує довіру користувачів до автентичності та безпеки відеоінформації.

Однак розробники алгоритмів обробки захищених зображень натикаються на деякі складнощі, основної серед яких є вплив зовнішніх та внутрішніх шумів.

Розглянемо можливу схему додавання (вбудовування) ЦВЗ до відео-потіку (див. рис.1).

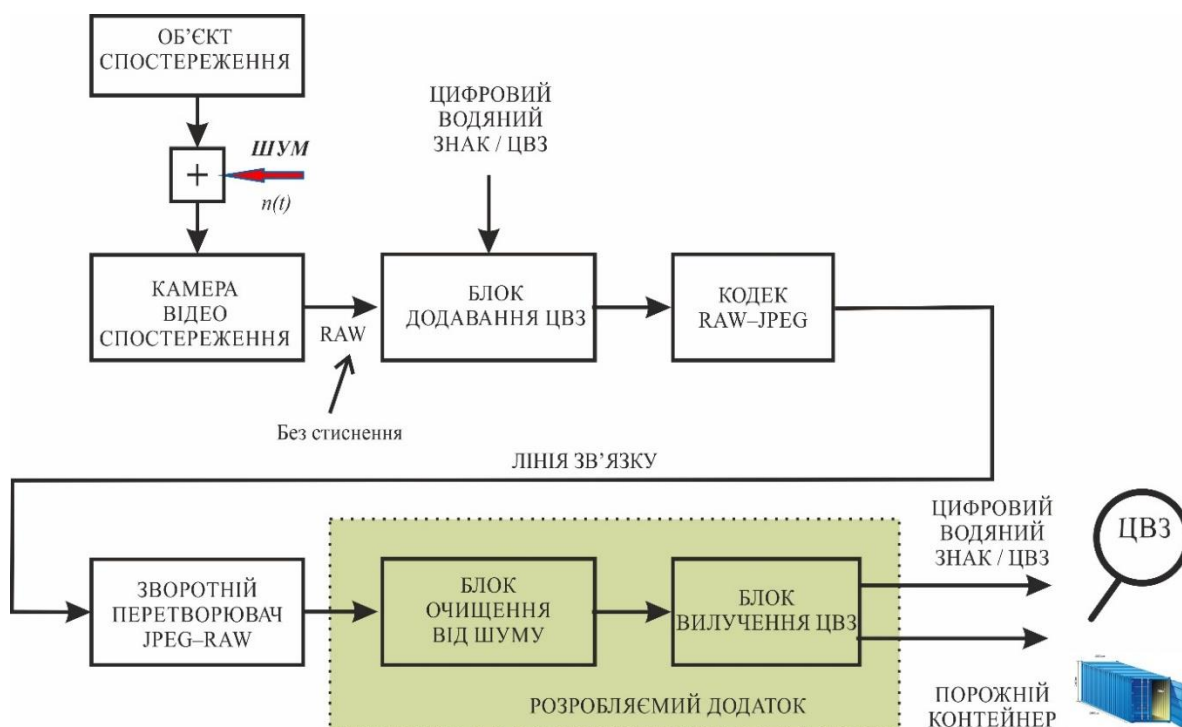


Рис. 1. Схема додавання ЦВЗ до відеопотоку з камери відеоспостереження

Із даного рисунку можна побачити, що на вхід камери спостереження поступає не тільки зображення цільового об'єкта но і шуми, що додаються до цього зображення. Цей процес на схемі зображений у блоці підсумовування, де шум позначений як $n(t)$.

Серед типів шумів можна виділити зовнішні:

- гаусов шум – випадкові зміни яскравості пікселів, що розподілені за нормальним законом,
- шум Спарс (імпульсний шум) – різкі зміни значень пікселів, як, наприклад, "сіль та перець", що виявляються як чорні та білі точки на зображенні,
- та внутрішні:
- флуктуаційні шуми через недосконалість сенсорів, що мають прояв як "зернистість" зображення.

Для коректного додавання ЦВЗ, особливо адитивними методами, вихідний сигнал камери повинен бути у форматі без стиснення, чи у RAW форматі.

RAW формат (Raw — «сирий») [4] – це нестиснений або слабо стислий формат файлів, який використовується для зберігання зображень, отриманих із цифрових камер. Він зберігає дані, отримані з сенсора камери, без значних змін та втрат. Саме до зображення у форматі RAW здійснюється додавання ЦВЗ за адитивним алгоритмом, наприклад, LSB [5]. Далі відбувається стиснення відеопотоку чи окремих, вже захищених, зображень в формат jpg[4] щодо подальшого розповсюдження по каналу

зв'язку убик отримувача повідомлення. Вже на цьому етапі можливі пошкодження ЦВЗ, так як формат jpg – це стиснення із втратами. В подальшому, на боці отримувача повідомлень, здійснюється зворотне перетворення стисненого відеопотоку чи окремих зображень до нестисненого вигляду з ціллю зниження рівня шумів у блоці «очищення від шуму» та вилучення ЦВЗ у відповідному модулі. При декодування формату jpg та обробці захищеного зображення у блоці «очищення від шуму» можливе додаткове спотворення ЦВЗ яке унеможливить його ідентифікацію.

В такому сенсі вибір правильного підходу для очищення захищеного зображення від шумів таким чином, щоб вилучений ЦВЗ мав припустимий рівень спотворень є актуальним завданням.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає в підвищенні рівня розбірливості вилученого ЦВЗ одночасно зі зниженням рівня шуму щодо зображення графічного контейнера.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступні задачі.

1. Провести аналіз типів шумів, що оказують найбільший вплив на якість захищених зображень на виході камери відеоспостереження.
2. Вивчити найбільш відомі підходи до фільтрації шумів на цифрових зображеннях.
3. Дослідити ефективність та придатність ти чи інших алгоритмів зниження шуму щодо вихідного сигналу камери відеоспостереження.
4. Розробити удосконалений алгоритм зниження шуму щодо захищеного зображення та дослідити його ефективність за критерієм максимуму коефіцієнта кореляції між вихідними та обробленими зображеннями ЦВЗ та контейнеру.

Виконання цих задач дозволить досягти поставленої мети підвищення рівня розбірливості ЦВЗ та одночасного поліпшення якості зображення контейнера.

Основна частина. Застосування фільтрів для видалення шуму має враховувати тип шуму та його розподіл, щоб мінімізувати втрату важливої інформації.

1. Лінійні фільтри: наприклад, фільтри Гауса, які зменшують шум, але можуть розмивати контури.
2. Нелінійні фільтри: наприклад, медіани, які добре працюють при видаленні імпульсного шуму, зберігаючи контури, однак додатково виникає проблема втрати дрібних деталей.
3. Вейвлет-фільтри: дозволяють виділяти різні частотні компоненти зображення та усувати шум на певних рівнях.
4. Адаптивні фільтри: такі як фільтри, які використовують інформацію про статистику локального контексту, можуть враховувати зміни у зображенні для покращення результатів.

Додаткові проблеми в задачах фільтрації:

1. Збереження деталей зображення.

Один із основних викликів очищення зображень від шуму – це необхідність балансувати між видаленням шуму та збереженням деталей зображення. Занадто агресивне зменшення шуму може призвести до розмиття або втрати важливих структур, таких як межі об'єктів, текстури або дрібні деталі. Це особливо важливо для завдань, де точність та збереження дрібних деталей критичні, наприклад, у медичній візуалізації чи розпізнаванні об'єктів.

2. Артефакти.

Деякі методи фільтрації можуть призвести до появи артефактів, таких як "втрати текстури", коли алгоритми намагаються покращити зображення, але починають помилково інтерпретувати текстури чи структури. Артефакти можуть виникнути при використанні низькоякісних моделей або алгоритмів, які не враховують контекст зображення.

3. Обчислювальна складність.

Часто методи очищення зображень потребують значних обчислювальних ресурсів, особливо якщо вони ґрунтуються на складних алгоритмах, таких як нейромережні підходи або фільтри, що використовують адаптивні методи. Це може бути проблемою для реального часу обробки зображень або в умовах обмежених обчислювальних потужностей.

Сучасні методи очищення зображень все частіше використовують штучний інтелект та машинне навчання, такі як нейронні мережі (наприклад, автоенкодера, GAN–мережі та інші методи глибокого навчання), які навчаються на великій кількості даних та можуть ефективно відокремлювати шум від корисної інформації; методи на основі статистики (наприклад, алгоритми, що базуються на Байєсівських підходах), які оцінюють ймовірність того, що кожен піксель зображення є шумом або корисною інформацією.

Таким чином можна зробити висновок, що очищення зображень від шуму – це багатозадачна проблема, що включає вибір відповідного методу фільтрації, налаштування параметрів для мінімізації втрат якості та обчислювальні витрати. З кожним роком з'являються все ефективніші підходи, в тому числі на основі штучного інтелекту, але завдання залишається актуальним, особливо для додатків у областях, де якість зображення критична.

Розглянемо наступний алгоритм щодо аналізу спотворень зображення контейнеру та ЦВЗ на тлі імпульсного шуму, що згідно попередньому аналізу оказує найбільший вплив на якість відновлених зображень.

Крок 1. Отримуємо вихідне зображення J , наприклад таке як показано на рис.2а.



а) вихідне зображення



б) ЦВЗ



в) вихідне зображення з доданим ЦВЗ

Рис. 2. Зображення з камери відеоспостереження та ЦВЗ

Крок 2. Визначаємо розмір вихідного зображення J по рядкам *lines* та стопчиком *columns*:

$$[lines, columns] = size(J);$$

Крок 3. Змінюємо масштаб ЦВЗ (DWM) у відповідності до розміру вихідного зображення, що знайдений на кроці 2:

$$DWM = imresize(DWM, [lines columns]);$$

Отримаємо зображення ЦВЗ, як показано на рис 2 б).

Крок 4. Біналізуємо ЦВЗ:

$$DWM = gray2bin(DWM).$$

Крок 5. Зменшуємо максимальне значення яскравості вихідного зображення на 5% з метою додавання ЦВЗ:

$$J = 0.95 \cdot J.$$

Крок 6. Додаємо ЦВЗ:

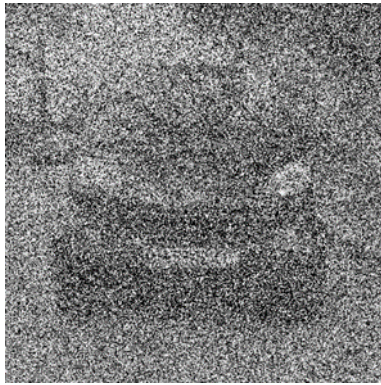
$$J_{mix} = J + DWM.$$

Отримаємо захищене зображення.

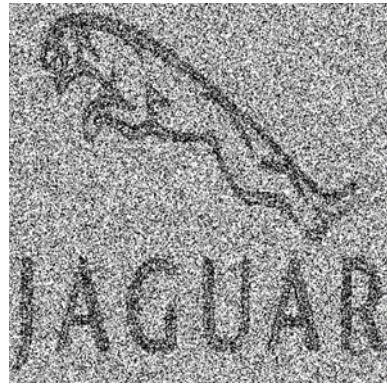
Крок 7. Імітуємо наявність шуму з дисперсією $\sigma^2 = 0.5$:

$$J_{mix_noise} = J_{mix} + n(\sigma).$$

Вигляд захищеного зображення з шумом показаний на рис.3а.



а) захищене зображення з шумом



б) вилучене ЦВЗ з шумом

Рис. 3. Зображення з камери відеоспостереження при наявності шуму з дисперсією $\sigma^2 = 0.5$

Крок 8. Витягуємо зображення ЦВЗ:

$$DWM_extraction = J_{mix_noise} - J.$$

Вигляд вилученого ЦВЗ з шумом показаний на рис.3б.

Як можна побачити з рисунка 3, якість зображень не дозволяє визначити навіть марку автомобіля не кажучи вже про його номер.

Крім суб'єктивного (візуального) критерію оцінки якості відтвореного зображення зручно використовувати критерій максимуму коефіцієнта кореляції між відтвореними та вихідними зображеннями.

Для розглянутих зображень коефіцієнти кореляції складають:

- для зображення контейнеру $R=0.32$,
- для зображення ЦВЗ $R=0.11$.

Для зниження рівня шуму будемо використовувати медіанний алгоритм фільтрації зображень. Опишемо алгоритм медіанної фільтрації.

Крок 1. Визначення вікна.

Встановлюється розмір вікна (зазвичай непарний), наприклад, 3×3 або 5×5 . Це вікно переміщатиметься за зображенням.

Крок 2. Пробіг по пікселям.

Для кожного пікселя зображення:

- визначається розташування вікна, центрованого на поточному пікселі;
- у вікні вибираються всі пікселі, включаючи поточний.

Крок 3. Сортування значень.

Значення яскравості (інтенсивності) пікселів у вікні сортуються у порядку зростання інтенсивності.

Крок 4. Знаходження медіани.

Знаходиться медіана із відсортованих значень:

- Якщо кількість значень непарна, медіаною буде середнє значення.
- Якщо кількість значень парна, медіаною може бути обрано одне з двох середніх значень.

Крок 5. Заміна значення.

Значення поточного пікселя замінюється на знайдену медіану.

Крок 6. Повторення.

Процес повторюється для кожного пікселя у зображенні, крім меж (де вікно виходить за межі).

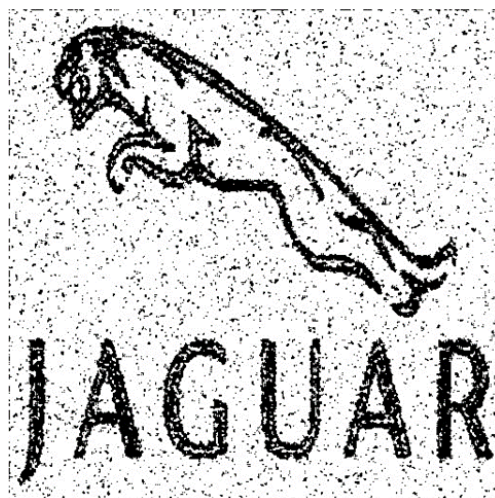
Крок 7. Обробка меж.

Для обробки пікселів на краях зображення можна використовувати різні стратегії, наприклад копіювати значення крайових пікселів або використовувати зменшені розміри вікон.

Результати щодо використання даного алгоритму з вікном [3x3] показані на рисунку 4.



а) зображення контейнеру



б) ЦВЗ

Рис. 4. Зображення контейнеру та ЦВЗ на виході медіаного фільтру з вікном [3x3] при наявності шуму з дисперсією $\sigma^2 = 0.5$

Для розглянутих зображень коефіцієнти кореляції після виконання алгоритму медіанної фільтрації складають:

- для зображення контейнеру $R=0.76$,
- для зображення ЦВЗ $R=0.51$,

що значно краще ніж до застосування алгоритму фільтрації.

Збільшимо вікно (апертуру) медіанного фільтру до [5x5] та виконаємо процедуру оброблення зображень.



а) зображення контейнеру



б) ЦВЗ

Рис. 5. Зображення контейнеру та ЦВЗ на виході медіаного фільтру з вікном [5x5] при наявності шуму з дисперсією $\sigma^2 = 0.5$

Коефіцієнти кореляції після виконання алгоритму медіанної фільтрації з вікном [5x5] складають: для зображення контейнеру $R=0.92$; для зображення ЦВЗ $R=0.78$, що вище ніж для випадка фільтрації з вікном [3x3].

Отриману процедуру очищення зображення контейнеру та ЦВЗ від імпульсного шуму можна представити у вигляді наступної блок-схеми, рис. 6.

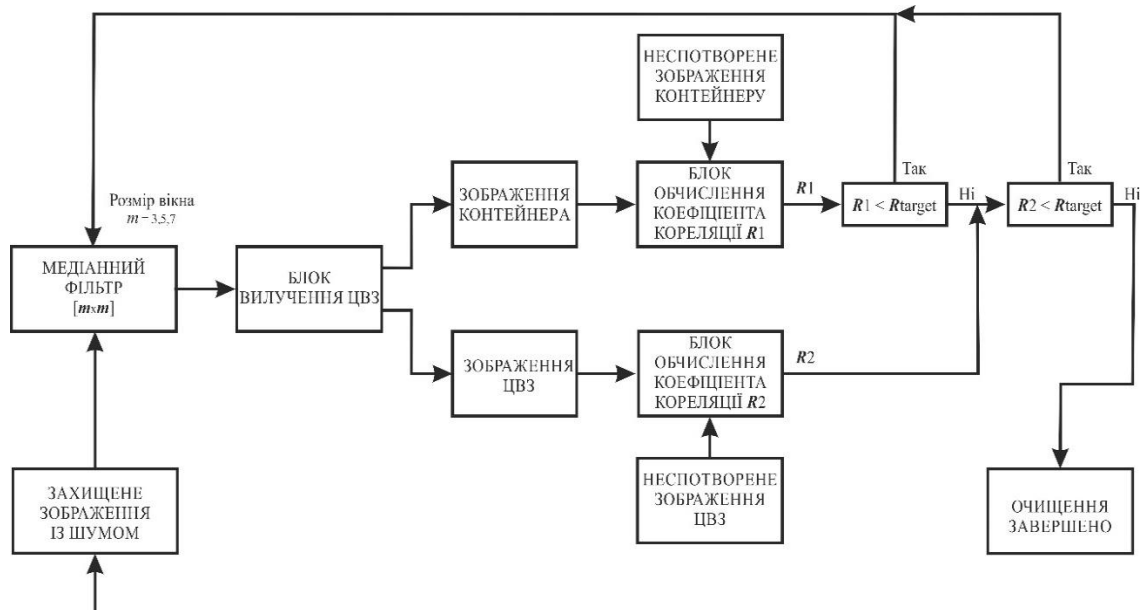


Рис. 6. Процедура очищення зображення контейнеру та ЦВЗ від імпульсного шуму

В даній процедурі захищене зображення спочатку піддається медіанній фільтрації з мінімальним вікном $[3 \times 3]$, а далі, після вилучення ЦВЗ, відбувається обчислення коефіцієнтів кореляції ($R1$ та $R2$) між вихідними та відновленими зображеннями з метою встановлення факту чи є очищення від шуму достатнім для подальшого використання зображень. Якщо хоч один з обчислених коефіцієнтів кореляції менший за цільове значення, то потрібно збільшити розмір вікна медіанного фільтра до значення $[5 \times 5]$ і повторити аналіз якості знов. Максимальне значення вікна медіанного фільтра не може перевищувати $[Integer(0.02lines), Integer(0.02columns)]$, де *lines* – кількість рядків, а *columns* – кількість стовпчиків вихідного зображення. $Integer(k)$ – ціла частина числа k . Також слід зауважити, що розмір вікна медіанного фільтра повинен бути непарним числом.

Як можна побачити із аналізу роботи алгоритму медіанної фільтрації щодо захищеного зображення поліпшення коефіцієнтів кореляції для зображення контейнеру та для зображення ЦВЗ відбувається за різними законами та з різною швидкістю. Це відбувається завдяки різній кількості інформації, що міститься в зображенні контейнеру та в зображенні ЦВЗ, не дивлячись на їхнє однакове розрізнення по рядкам та стовпчикам. Тому основний недолік запропонованої процедури очищення захищеного зображення від шуму – це відсутність можливості одночасно забезпечити рівний рівень якості оброблених зображень.

Для пошуку оптимального значення розміру вікна медіанного фільтра побудуємо графіки залежності коефіцієнту кореляції R від розміру вікна $[N \times M]$ при фіксованому значенні дисперсії шуму, рис. 7.

З рисунку 7 можна побачити, що оптимальні значення розміру вікна медіанного фільтра щодо зображення контейнеру та щодо зображення ЦВЗ відрізняються. Так, наприклад, при дисперсії шуму $\sigma^2 = 0.1$, оптимальний розмір вікна для зображення контейнера буде $[3 \times 3]$, а для зображення ЦВЗ - $[5 \times 5]$, при дисперсії шуму $\sigma^2 = 0.3$ – оптимальні розміри вікна співпадають для обох зображень - $[5 \times 5]$, при дисперсії шуму $\sigma^2 = 0.5$ оптимальні значення вікна $[5 \times 5]$ та $[7 \times 7]$ відповідно.

Модифікуємо процедуру очищення захищеного зображення від шуму, як показано на рисунку 8.

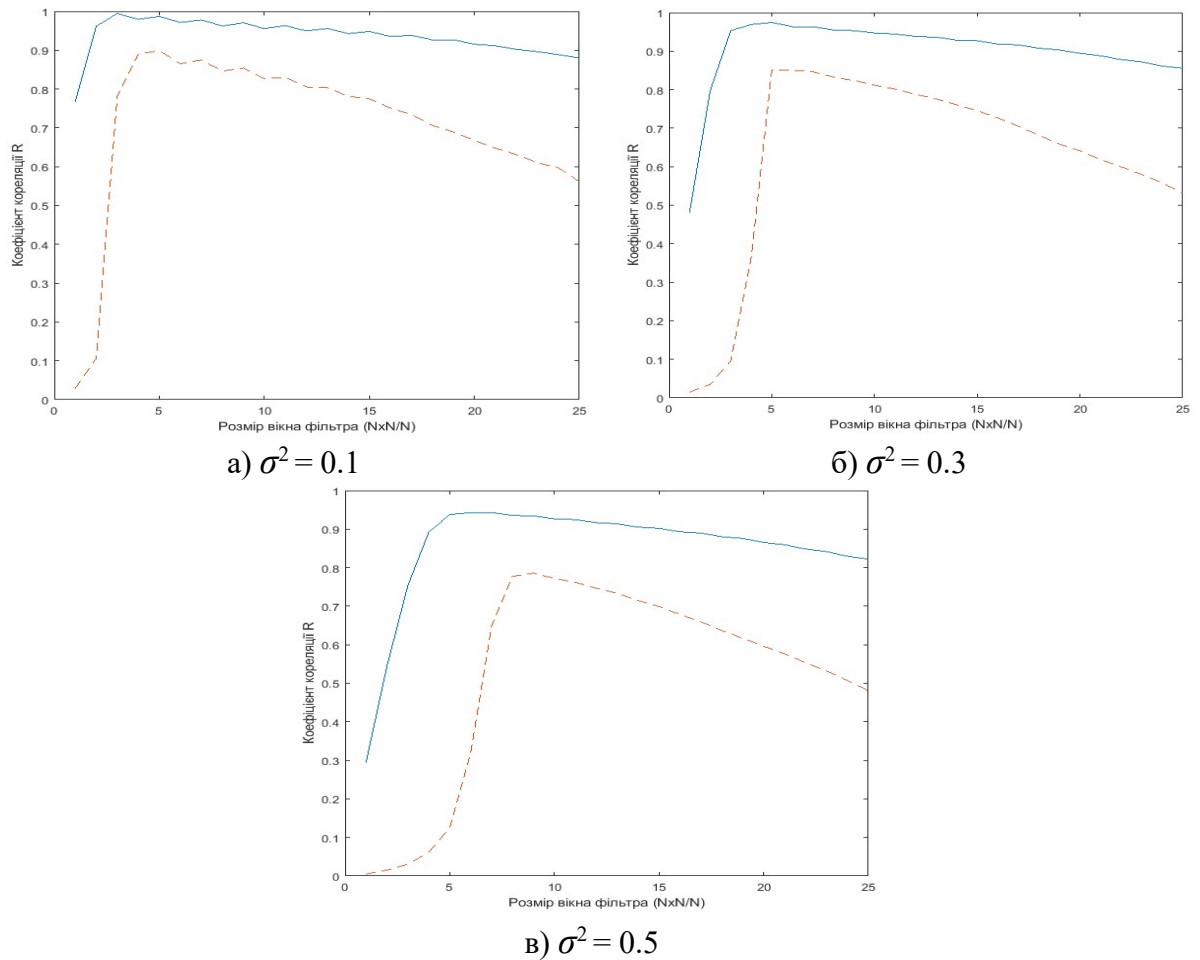


Рис. 7. Графіки залежності коефіцієнту кореляції R від розміру вікна $[N \times N]$ медіанного фільтра при фіксованому значенні дисперсії шуму σ^2 , де на графіке позначається зображення контейнеру як «—», а зображення ЦВЗ «---»

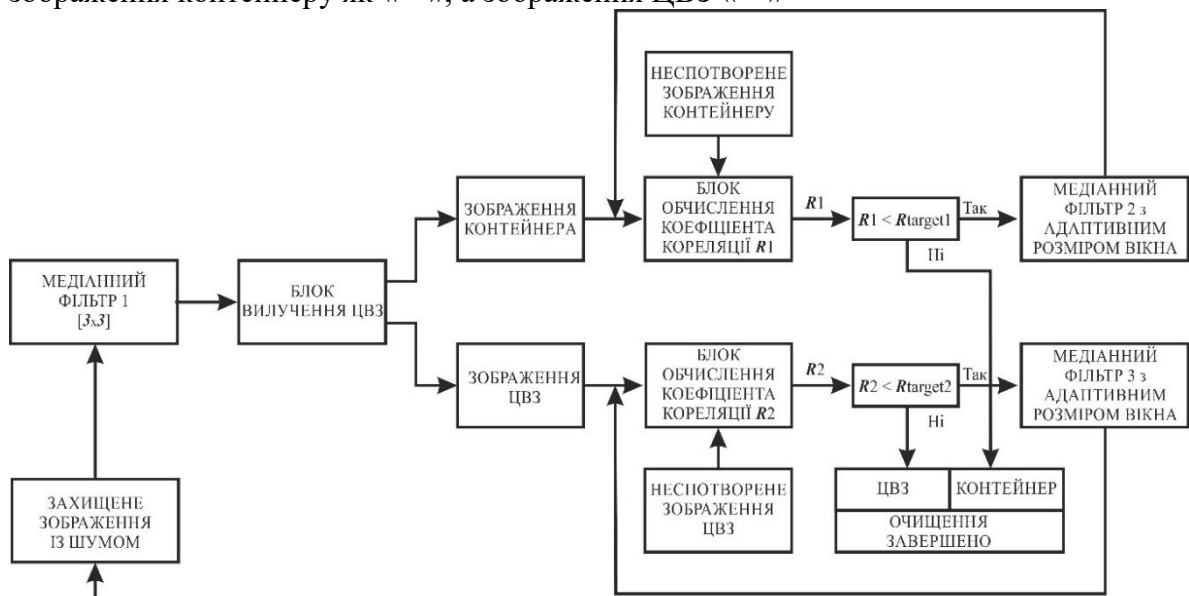
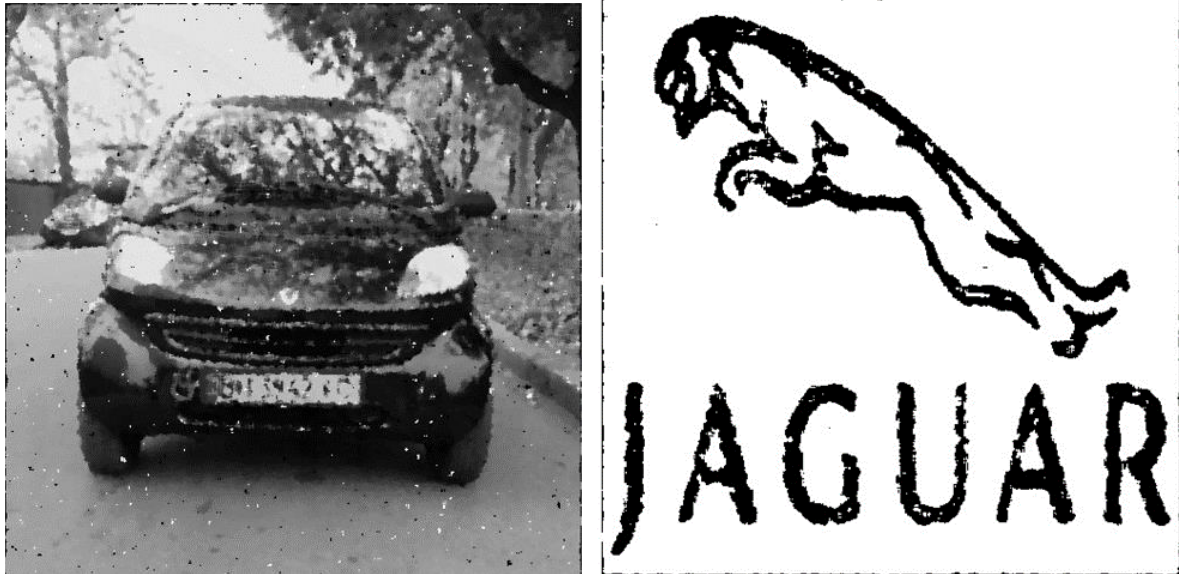


Рис. 8. Модифікована процедура очищення зображення контейнеру та ЦВЗ від імпульсного шуму з трьома медіанними фільтрами

Особливості модифікованої процедури очищення захищеного зображення від шуму полягають у наступному. Спочатку захищене зображення проходить скрізь медіанний фільтр з мінімальним вікном $[3 \times 3]$, далі відбувається вилучення ЦВЗ у

відповідному блоці і кожне зображення окремо піддається медіанній фільтрації з адаптивним розміром вікна, що вибирається виходячи з максимально досяжного значення коефіцієнту кореляції.

Результат роботи модифікованої процедури очищення захищеного зображення від шуму для дисперсії $\sigma^2 = 0.5$ приведений на рисунку 9.



а) зображення контейнеру,
 $\max\{R1\}=0.94$

б) ЦВЗ, $\max\{R2\}=0.82$

Рис. 9. Зображення контейнеру на виході медіаного фільтру з вікном $[5 \times 5]$, та ЦВЗ на виході медіаного фільтру з вікном $[7 \times 7]$ при наявності шуму з дисперсією $\sigma^2 = 0.5$

Висновки. Таким чином, запропонований адаптивний алгоритм очищення від шуму захищеного зображення з камери відеоспостереження дозволяє обрати найкращі параметри медіанних фільтрів окремо для зображення ЦВЗ і зображення контейнеру за критерієм максимумів коефіцієнтів кореляції. Даний алгоритм може бути використаний при наявності у камери відеоспостереження режиму видачі зображення у нестисненому вигляді, чи RAW-форматі.

Список літератури

1. Термінологія в галузі захисту інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу. НД ТЗІ 1.1-003-99. URL: https://tzi.ua/assets/files/1.1_003_99.pdf
2. Садченко А. В., Кушніренко О. А., Троянський А. В., Савчук Ю. А. Адаптивний алгоритм зниження рівня імпульсного шуму на зображеннях с камер видеонаблюдения. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2021. № 1 – 2. С. 21 – 27. URL: <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2021.1-2.21>
3. Яремчук Ю. Є., Карпинець В. В., Зоря І. С., Козак Д. О. Підвищення стійкості цифрових водяних знаків у потокових відеозаписах на основі диференціального вбудовування енергії (DEW). *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2023. № 1. С. 55 – 64. URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-166-1-55-64>
4. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*. New York: Pearson, 2017. 1192 p.
5. Садченко А. В., Кушніренко О. А., Кушніренко Н. П. Модифікований адитивний метод вбудови цифрового водяного знаку. *Труди XXI МНПК «Сучасні інформаційні та електронні технології»*, Одеса. 2020. С. 21 – 23.

A. B. Садченко, О. А. Кушніренко, М. М. Іжак, В. В. Громов, В. О. Назаров

**ALGORITHM OF ADAPTIVE CLEANING FROM NOISE OF PROTECTED
IMAGES FROM VIDEO SURVEILLANCE CAMERAS**

A. V. Sadchenko, O. A. Kushnirenko, V. V. Gromov, M. M. Izhak,
V. O. Nazarov

National Odesa Polytechnic University
1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine
Email: koa@op.edu.ua

The use of watermarks compatible with the video stream from video surveillance cameras allows not only to solve standard tasks such as, for example, confirming the authenticity of the image, copyright protection, but also adds additional information that is convenient to use in the automatic formation of registers and databases. As additional information, there may be personal data of drivers, numbers and parking time of vehicles, if the camera is installed in the parking lot, or the time of the road accident, if the camera is designed to record such events. Taking into account the unstable conditions in which video recording of events can take place, and the imperfection of the technical component of the electronic circuits of the cameras, there is a need to reduce the noise level on the protected image. The purpose of the work is to develop an adaptive and low-computational algorithm for denoising both the original image of the container and the image of the DWM. Usually, the image of the container has a much higher entropy than the DWM, which leads to a paradox, the essence of which is that the optimal filtering algorithm for the image of the container may turn out to distort the image of the DWM and vice versa. Therefore, the search for an algorithm that can equally improve both components of a protected image is an urgent task, which was solved in this work. The value of the correlation coefficient between the noise-free reference image and the image after filtering was chosen as the main criterion for evaluating the quality of images after noise removal. In order to reduce the computational complexity of the algorithm, the principle of median filtering with an aperture, the size of which depends on the noise dispersion, was chosen. In order to find the optimal values of the aperture size of the median filter, the dependence of the correlation coefficients of the original and processed images on the noise dispersion was constructed. This study made it possible to identify extrema, which are the points of optimal values of the window sizes of the median filter. An adaptive median filtering algorithm was proposed, which first processes the protected image with a fixed window size (3x3), and then, after extracting the DWM, two more median filters with variable window values are used separately for the image of the container and the DWM. This approach made it possible to achieve a correlation coefficient value of more than 0.9 with a noise variance of 0.3. Due to the fact that the median filter contains neither multiplication operations nor summation operations, the proposed algorithm can be implemented on a cheap element base, for example, microcontrollers of AVR or ARM architecture, which cost much less than specialized signal processors or high-speed programmable logic.

Keywords: digital watermark, protected image, noise removal, video surveillance camera, information distortion level, least significant bit.