

**С. В. Вишневий<sup>1</sup>**  
**А. В. Журба<sup>1</sup>**  
**П. Ю. Катін<sup>1</sup>**  
**М. В. Черкас<sup>1</sup>**  
**І. А. Грубась<sup>1</sup>**

## **ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ МІЖКАДРОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ВІДЕОПОСЛІДОВНОСТЕЙ, СПОТВОРЕНИХ АДИТИВНОЮ ЗАВАДОЮ**

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

*Однією з вимог до функціонування технічних систем цифрової обробки відеопослідовностей є забезпечення зниження негативного впливу завад, які виникають на відеозображеннях в процесі їх реєстрації або передачі через канали зв'язку. Заглушення завад та поліпшення відношення сигнал/шум є актуальним для застосувань, в яких окрім візуального аналізу отриманих спостережень також можуть використовуватися відповідні алгоритми автоматичної обробки даних. Фільтрація зазвичай виступає як базова складова обробки зображень, а вибір конкретних алгоритмів залежить від вимог до їх обчислювальної складності та можливостей заглушення відповідного виду завади.*

*В статті виконано порівняльний аналіз алгоритмів, які застосовуються для розв'язання задачі пригнічення завади, що описується за допомогою моделі адитивного білого гаусівського шуму та спотворює послідовність цифрових зображень. Зазначено особливості реалізації методів фільтрації, які використовують процедуру міжкадрового усереднення. Подано математичні вирази, які дозволяють описати процес знешумлення зображень, надано характеристику розглянутих підходів, зазначено їхні переваги та недоліки. Дослідження проведено шляхом моделювання в програмному середовищі MATLAB з використанням синтезованих даних, побудованих на основі однорідних текстурних зображень, що описуються моделлю гаусівського випадкового поля. Отримано кількісні показники результатів фільтрації синтезованої відеопослідовності із заданими параметрами. Наведено графіки середньоквадратичного відхилення помилки фільтрації, що дозволяє оцінити ступінь пригнічення завади у разі застосування відповідного підходу. Для забезпечення можливості візуального суб'єктивного контролю якості даних, отриманих шляхом застосування реалізованих алгоритмів, представлено приклади знешумлених кадрів модельного відеозображення.*

*Отримані результати демонструють придатність досліджуваних методів для їх застосування в задачах фільтрації відеоданих з метою заглушення завади, та можуть бути використані для розроблення алгоритмічного забезпечення програмних модулів обробки відеопослідовностей, що характеризуються високим рівнем кореляції між сусідніми кадрами, а також в наукових задачах, які охоплюють сферу розробки методів знешумлення відеозображень.*

**Ключові слова:** відеопослідовність, адитивна завада, білий гаусівський шум, фільтрація, міжкадрове усереднення, текстурне зображення, гаусівське випадкове поле, просторово-часова обробка зображень.

### **Вступ**

Радіоелектронні системи різного призначення, які виконують реєстрацію, передачу, обробку та аналіз даних, представлених у вигляді відеопослідовностей, знаходять широке застосування в різноманітних напрямках людської діяльності, забезпечуючи виконання великого переліку як практичних, так і наукових задач [1]. Спостереження у формі послідовності зображень отримуються в

системах моніторингу за навколишніми об'єктами, в системах контролю за виробничими процесами, в медичних діагностичних пристроях, в спеціалізованих телевізійних системах, в системах відеонагляду та ін. Зображення можуть містити завади, що не тільки погіршує візуальне сприйняття доступних спостережень, але також може стати причиною зниження точності результатів, які отримуються у разі застосування спеціалізованих алгоритмів обробки, наприклад, сегментації [2]. Одним із поширених видів завади є адитивний білий гаусівський шум, що дозволяє адекватно описати вплив теплового шуму фотосенсорів, який призводить до спотворень зображень. Отже, доступні до обробки даних спостереження можуть потребувати проведення фільтрації [3], [4].

Методи знешумлення суттєво різняться за характером обробки даних. Фільтрація може відбуватися в частотній області або в просторовій області, коли обробка ведеться безпосередньо над значеннями пікселів [5]. Деякі статистичні оптимальні методи фільтрації можуть вимагати значних обчислювальних та часових витрат. Отже, складність обчислювальних процедур відповідного алгоритму, що реалізує вибраний метод фільтрації, може бути не менш визначальним показником, аніж ступінь придушення завади, що забезпечується в процесі обробки. Локальні методи просторової фільтрації дозволяють проводити обробку за допомогою фільтрів із заданою маскою, вибір розмірів якої може відбуватися з урахуванням необхідності збереження дрібних деталей та границь об'єктів шляхом зниження ступеня згладжування, або ж, навпаки, посилювати згладжування під час обробки протяжних однорідних областей з метою підвищення рівня заглушення завади.

Враховуючи велике різноманіття підходів, які застосовуються для придушення завад, розробка нових чи вибір наявних методів для їх реалізації у відповідній радіоелектронній системі може потребувати врахування низки факторів: складність обчислювальних процедур алгоритму фільтрації; можливість використання технології паралельних обчислень; необхідність попередньої оцінки та аналізу даних для визначення параметрів фільтрації та ін. Важливою задачею є виконання досліджень, спрямованих на проведення порівняльного аналізу підходів, які можуть застосовуватися для фільтрації відеопослідовностей, з метою визначення кількісних показників придушення завади та виявлення особливостей реалізації відповідних алгоритмів знешумлення.

### **Аналіз попередніх досліджень та публікацій**

Відеопослідовність, зазвичай, характеризується суттєвим рівнем схожості між сусідніми кадрами, що може бути кількісно виражено величиною коефіцієнта кореляції, який (в залежності від характеру сцени реєстрації) може наближатися до 1 [6]. В деяких випадках послідовність зображень може містити незмінну сцену зйомки, а певна відмінність значень пікселів на сусідніх кадрах визначається впливом шуму апаратури реєстрації, який адекватно описується адитивним білим гаусівським шумом. Вважаючи, що відліки завади є незалежними та мають нульове математичне сподівання, знешумлення може досягатися шляхом усереднення кадрів відеопослідовності. Збільшення кількості кадрів, які враховуються для обчислення усередненого зображення, дозволяє підвищити ступінь придушення завади [7]. Відеопослідовності можуть характеризуватися наявністю рухомих об'єктів, присутніх на сцені зйомки, тому усереднення по ансамблю спостережень призводить до розмиття границь об'єктів та зниження чіткості окремих деталей, через що цей метод характеризується певними обмеженнями [4], [8]. В роботі [9] пропонується підхід до міжкадрового усереднення, який передбачає визначення кількості кадрів, які враховуються для обробки, і які знаходяться в «минулому» та в «майбутньому» по відношенню до поточного кадру. Таким чином, у разі знешумлення зображень статичних сцен використовується ширший діапазон сусідніх кадрів в ході їх усереднення, що забезпечує збільшення рівня придушення завади, а за наявності динамічних сцен, кількість кадрів, що беруть участь в усередненні, зменшується, тим самим уникаючи суттєвого розмиття рухомих об'єктів і деформації їхніх границь. Як інший підхід для придушення адитивного білого гаусівського шуму застосовується експоненціальне згладжування, що передбачає обчислення суми значень яскравості пікселів поточного зашумленого кадру та відфільтрованого зображення, отриманого на попередньому кроці обробки, причому кожен із доданків множиться на свій коефіцієнт, сума яких дорівнює 1. Вибір значень коефіцієнтів дозволяє визначити внесок поточного спотвореного зображення для формування підсумкового знешумленого кадру. Цей підхід може бути основою для створення адаптивного алгоритму фільтрації відеозображень [10]. В роботі [11] пропонується метод, який окрім використання процедури знешумлення за допомогою міжкадрового усереднення, використовує також внутрішньокадрову фільтрацію, що реалізується в просторовій області, причому розміри маски фільтрації можуть визначатися на основі проведення додаткового

аналізу вхідних даних. Варіюючи розміри маски можна забезпечувати ступінь згладжування зображень та впливати на розмиття границь окремих об'єктів та дрібних деталей, які можуть бути присутні на відеопослідовності. В роботі [12] з метою придушення мультиплікативної завади на послідовності радіолокаційних зображень пропонується метод гомоморфної фільтрації, згідно з яким обробка реалізується в два етапи: спочатку відбувається одновимірна незалежна фільтрація відліків множини зображень вздовж відповідних координат. На наступному кроці проводиться обчислення остаточних оцінок значень пікселів. В такий спосіб відбувається поєднання як міжкадрового накопичення так і внутрішньокадрової фільтрації. Враховуючи незалежність одновимірної обробки по кожній координаті на першому кроці, перевагою такого підходу є можливість розпаралелювання обчислювальних процесів з метою зменшення часових витрат. Така концепція обробки може застосовуватися для знешумлення відеозображень, спотворених адитивною завадою.

Метою роботи є проведення порівняльного аналізу алгоритмів, що застосовуються для розв'язання задачі знешумлення відеопослідовностей, і визначення кількісних показників заглушення завади. Отримані результати можуть бути використані для створення програмних модулів знешумлення даних у відповідних системах комп'ютерного зору та виступати основою для подальшої розробки адаптивних методів фільтрації відеозображень.

### Основна частина дослідження

Схематично послідовність цифрових зображень показана на рис. 1 [13], [14]. Будемо вважати, що значення пікселів відповідають рівню яскравості, тоді кожне окреме зображення представлено в градаціях сірого. В разі переходу до кольорового відеозображення, кожен піксель буде характеризуватися значеннями інтенсивності в червоному, зеленому та синьому каналах.

Позначимо через  $s(x,y,t)$ ,  $x = 1, \dots, N$ ;  $y = 1, \dots, M$ ;  $t = 1, \dots, T$  значення пікселів «ідеального» відеозображення, яке не містить шумової компоненти. Спостереження, що отримується у відповідній технічній системі та спотворено адитивною завадою, позначимо так [7]:

$$v(x, y, t) = s(x, y, t) + \omega(x, y, t), \quad (1)$$

де  $v(x,y,t)$  — спостереження, що містить заваду,  $x = 1, \dots, N$ ;  $y = 1, \dots, M$ ;  $t = 1, \dots, T$ ;  $\omega(x,y,t)$  — відлік адитивної завади, що є некорельованою гаусівською випадковою величиною із заданою дисперсією  $\sigma_\omega^2$  та нульовим математичним сподіванням. Для компактності записів надалі представимо спостереження в такій формі:  $v_t(x, y) = v(x, y, t)$ , де індекс  $t$  — номер зображення (номер кадру) у відеопослідовності.

Зглушення завади та формування оцінки значення пікселів для  $k$ -го кадру шляхом усереднення значень пікселів сусідніх кадрів відеопослідовності може бути виконано згідно з процедурою [9]

$$f_k(x, y) = \frac{v_{a_k}(x, y) + \dots + v_k(x, y) + \dots + v_{b_k}(x, y)}{L}, \quad (2)$$

де  $f_k(x, y)$ ,  $x = 1, \dots, N$ ;  $y = 1, \dots, M$  — значення пікселів відфільтрованого  $k$ -го зображення;  $L = b_k - a_k + 1$ , де вибрані значення параметрів  $a_k$  та  $b_k$  впливають на кількість сусідніх кадрів, які беруть участь в процесі фільтрації для отримання знешумленого поточного  $k$ -го кадру. Параметри  $a_k$  і  $b_k$  можуть вибиратися, за умови  $a_k \leq k \leq b_k$ . Отже, якщо  $b_k = k$ , то в ході обробки використовуються тільки кадри, індекси яких не перевищують індекс поточного  $k$ -го кадру. Такий варіант може бути застосований в умовах, коли знешумлення необхідно проводити в міру надходження окремих зображень, що формують вхідну послідовність; якщо  $b_k > k$ , то в процесі знешумлення пікселів  $k$ -го кадру враховуються також зображення, що знаходяться в «майбутньому» по відношенню до поточного кадру, що адекватно варіанту, коли для знешумлення доступна вся послідовність

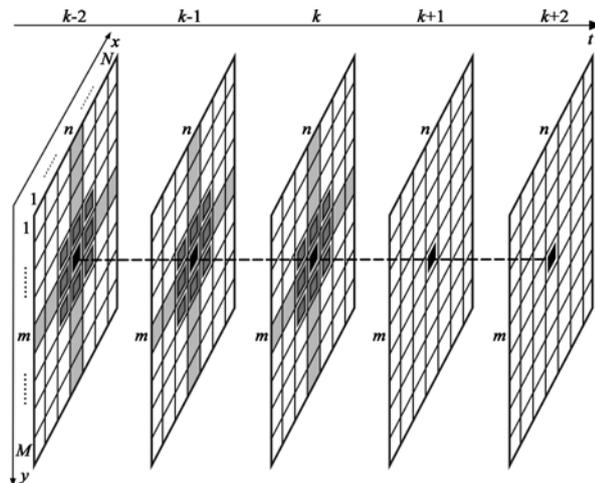


Рис. 1. Представлення в схематичному вигляді відеопослідовності, яка складається із зображень розміром  $N \times M$

повністю, або застосовується буфер, який дозволяє накопичити необхідну кількість зображень, що слідує по порядку після поточного  $k$ -го оброблюваного зображення. Дисперсія помилки фільтрації залежить від кількості зображень, які беруть участь в усередненні, і за умови однаковості оброблених зображень підлягають, зазначений параметр буде становити  $\sigma_{\omega}^2/L$  [7].

Отже, збільшення кількості кадрів у процесі їх усереднення дозволяє збільшити ступінь заглушення завади. У випадку наявності рухомих об'єктів, які змінюють своє положення від кадру до кадру, збільшення кількості кадрів усереднення призводить до розмиття границь та деформації об'єктів на вихідному відеозображенні.

Інший підхід, який дозволяє проводити знешумлення зображень, оснований на виконанні  $\alpha$ -усіченого усереднення [7], [15], [16]. Процедура фільтрації потребує виконання віконної обробки значень пікселів, які розміщуються на відповідних позиціях в сусідніх кадрах, включно з поточним  $k$ -м кадром. Нехай довжина вікна становить  $L$  елементів (вікно може бути представлене у вигляді одновимірного масиву  $B$ ). Для зручності будемо вважати, що  $L$  непарне:  $L = 2c + 1$ , де  $c$  — додатне ціле число. Нехай для кадру з номером  $k$ , для поточного елемента з координатами  $x = n$ ;  $y = m$  (рис. 1) в масив  $B$  потрапляють пікселі:  $B = (v_{k-c}(n, m), \dots, v_{k-1}(n, m), v_k(n, m), v_{k+1}(n, m), \dots, v_{k+c}(n, m))$ . Нехай індексація елементів масиву  $B$  починається з 1, тоді позначимо елементи цього масиву так:  $B = (b_1, b_2, \dots, b_{L-1}, b_L)$ . Наступна операція, яка має бути виконана, — це сортування елементів масиву  $B$  за зростанням (або за спаданням). Елементи відсортованого масиву  $B$  позначимо таким чином:  $B = (b_1^S, b_2^S, \dots, b_{L-1}^S, b_L^S)$ . Фільтр  $\alpha$ -усіченого усереднення передбачає відкидання  $p$  крайніх правих та  $p$  крайніх лівих елементів відсортованого масиву  $B$ . Значення параметра  $p$  обчислюється так:  $p = \alpha L$  (результат множення повинен бути округлений в меншу сторону до цілої величини, а шляхом встановлення відповідного значення для параметра  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha < 0,5$ ) можна впливати на кількість елементів масиву  $B$ , які будуть відсікатися, і не враховуватися під час усереднення). Таким чином, відфільтрований піксель в  $k$ -му кадрі на позиції  $(x, y)$  буде визначатися так:

$$f_k(x, y) = \frac{1}{L - 2p} \sum_{i=1+p}^{L-p} b_i^S. \quad (3)$$

Зі зміною координат  $(x, y)$ ,  $x = 1, \dots, N$ ,  $y = 1, \dots, M$  обчислюються значення всіх пікселів кадру  $f_k$ . З переходом до наступного кроку фільтрації вікно зсувається на одну позицію вперед вздовж координати  $t$ , а варіюючи значення координат  $(x, y)$  кожного разу масив  $B$  наповнюється новими елементами кількістю  $L$ , які зазнають сортування та подальшого усереднення згідно з виразом (3). Шляхом відкидання найменших та найбільших значень в процесі усереднення окрім придушення адитивного білого гаусівського шуму одночасно може фільтруватися імпульсна завада.

В сфері цифрової обробки сигналів та зображень широке застосування знаходить метод експоненціального усереднення (згладжування) [10], [17]—[19]. В контексті знешумлення послідовності цифрових зображень, значення пікселів на вихідному зображенні обчислюються так:

$$f_k(x, y) = \alpha v_k(x, y) + (1 - \alpha) f_{k-1}(x, y), \quad (4)$$

де параметр  $\alpha$  вибирається з діапазону  $0 \dots 1$ . Що більше значення параметра  $\alpha$ , то більший вклад поточного значення пікселя поточного кадру спостереження  $v_k(x, y)$  під час обчислення оцінки  $f_k(x, y)$ ; зменшення значення параметра  $\alpha$  збільшує ступінь згладжування отриманого зображення;  $f_{k-1}(x, y)$  — результат, отриманий на попередньому кроці. Шляхом зміни координат пікселів  $(x, y)$  відбувається визначення величини всіх відліків  $k$ -го кадру. Під час обробки даних в порядку їх надходження, для знешумлення першого кадру послідовності, згідно з виразом (4), необхідно використовувати оцінку  $f_0(x, y)$ , яка може бути відсутня, в такому випадку можна вважати  $f_0(x, y) = v_1(x, y)$  і продовжити обробку наступних зображень в міру їх отримання від джерела інформації, використовуючи для кадрів, починаючи з 2-го, вираз (4).

Розглянуті підходи знешумлення відеозображень для обчислення значення відповідного пікселя в  $k$ -му кадрі враховують тільки відліки, що розміщуються на позиції з такими ж координатами рядка та стовпця, як і поточний піксель, для якого розраховується оцінка яскравості, але в сусідніх кадрах вздовж координати  $t$ . З метою посилення придушення завади процедура міжкадрового усереднення може застосовуватися до результатів внутрішньокадрової фільтрації вибраним методом, який використовується окремо для кожного зображення наявної послідовності [11]

$$f_k(x, y) = \beta \phi_k(x, y) + (1 - \beta) \phi_{k-1}(x, y), \quad (5)$$

де  $\phi_k(x, y)$ ,  $\phi_{k-1}(x, y)$  — відліки відфільтрованого поточного та попереднього кадрів, отримані в ході внутрішньокадрової фільтрації, наприклад, шляхом застосування локального просторового фільтра. В роботі [11] коефіцієнт  $\beta$  обчислюється на кожному кроці обробки відповідно до методики. В спрощеному випадку, вважаючи, що оброблювані зображення послідовності є однорідними з незмінними статистичними характеристиками, то приймаємо, що коефіцієнт  $\beta$  — константа і визначає внесок відфільтрованих попереднього та поточного кадрів у разі обчислення значень пікселів вихідного кадру  $f_k$ . Внутрішньокадрова просторова фільтрація може бути реалізована шляхом застосування локального фільтра, який для визначення оцінки яскравості кожного окремого пікселя передбачає використання елементів зашумленого зображення, що потрапляють в маску розміром  $3 \times 3$  або  $5 \times 5$  тощо [7], [20]. Центр маски збігається з поточним відліком з відповідними координатами. Схематично маска розміром  $3 \times 3$ , у разі обробки відліку з координатами  $(n, m)$  в ході фільтрації кадрів із значеннями координати  $t = (k, k - 1, k - 2)$ , показана на рис. 1. Під час внутрішньокадрової фільтрації з переходом до наступного відліку, маска фільтра зсувається таким чином, щоб центр маски збігався з поточним пікселем, для якого відбувається визначення оцінки яскравості. Процес повторюється поки не буде виконана обробка всього зображення.

Внутрішньокадрова фільтрація за допомогою локального просторового фільтра Вінера може бути виконана таким чином [20]—[23]:

$$\phi_k(x, y) = \mu_{loc}(x, y) + \frac{\sigma_{v,loc}^2(x, y) - \sigma_{\omega}^2}{\sigma_{v,loc}^2(x, y)} (v_k(x, y) - \mu_{loc}(x, y)), \quad (6)$$

де  $\phi_k(x, y)$  — відфільтроване значення поточного пікселя з координатами  $(x, y)$  в  $k$ -му кадрі;  $\mu_{loc}(x, y)$  — локальне середнє значення пікселів, які потрапляють в маску фільтра заданих розмірів;  $\sigma_{v,loc}^2(x, y)$  — локальна дисперсія, що визначається на основі значень пікселів вхідного зашумленого зображення, які потрапляють в маску фільтра;  $\sigma_{\omega}^2$  — дисперсія шуму, що спотворює зображення;  $v_k(x, y)$  — значення поточного пікселя зашумленого зображення, яке піддається внутрішньокадровій фільтрації. Якщо локальна дисперсія  $\sigma_{v,loc}^2(x, y)$  суттєво перевищує дисперсію шуму  $\sigma_{\omega}^2$  (це може свідчити про наявність границь об'єктів або окремих деталей, які в межах маски значно відрізняються за своєю яскравістю від інших пікселів, які потрапляють в маску і відіграють роль фону), тоді множник  $(\sigma_{v,loc}^2(x, y) - \sigma_{\omega}^2) / \sigma_{v,loc}^2(x, y)$  прямує до 1, таким чином  $\phi_k(x, y) \approx v_k(x, y)$ , що дозволяє зберігати дрібні деталі та границі об'єктів, проте тоді вихідний піксель буде містити шумову компоненту. Якщо  $\sigma_{v,loc}^2(x, y) \approx \sigma_{\omega}^2$ , то множник  $(\sigma_{v,loc}^2(x, y) - \sigma_{\omega}^2) / \sigma_{v,loc}^2(x, y)$  прямує до 0, отже,  $\phi_k(x, y) \approx \mu_{loc}(x, y)$  — значення відфільтрованого пікселя дорівнює середньому рівню яскравості зашумлених відліків вхідного зображення, які потрапляють в маску фільтра [23].

З метою подолання недоліків у вигляді суттєвої обчислювальної складності і значних часових витрат, притаманним деяким оптимальним методам фільтрації, наприклад, двовимірному фільтру Калмана, можна застосувати двоетапний підхід для знешумлення відеопослідовностей, що поєднує в собі як внутрішньокадрову так і міжкадрову обробку, та оснований на використанні простої в реалізації одновимірної калманівської фільтрації [24]. Ідея методу ілюструється на рис. 1. Нехай поточний піксель, який обробляється, розміщується на позиції з координатами  $(n, m)$  в  $k$ -му кадрі. Для обчислення значення оцінки яскравості пікселя спочатку на першому кроці відбувається фільтрація елементів зображення, що розміщуються в  $n$ -му стовпці, причому виконується фільтрація з початку  $n$ -го стовпця в напрямку кінця (прямий прохід по стовпцю), а також з кінця  $n$ -го стовпця в напрямку початку (зворотний прохід по стовпцю), таким чином для кожного відліку визначаються відповідні оцінки. Аналогічним чином відбувається обробка вздовж  $m$ -го рядка в ході прямого та зворотного проходів по рядку. Також виконується обробка відліків уздовж координати  $t$ , яка позначає номер зображення (номер кадру), таким чином відбувається фільтрація пікселів, які знаходяться на позиції з координатами  $(n, m)$  в кадрах з 1-го по  $k$ -й. Після цього, на другому кроці, виконується обчислення остаточної оцінки значення пікселя шляхом врахування оцінок, визначених в ході одновимірної калманівської фільтрації уздовж координат  $x$ ,  $y$ ,  $t$ . В такий спосіб поєднується внутрішньокадрова та

міжкадрова обробка відеозображень.

Алгоритм другого (основного) кроку фільтрації реалізується шляхом обчислень за такими виразами:

$$A = \frac{\hat{D}_x^{cf}(y) D_y^{*rf}(x)}{\hat{D}_x^{cf}(y) + D_y^{*rf}(x)}; \quad (7) \quad a = \hat{s}_x^{cf}(y) + A \frac{(s_y^{*rf}(x) - \hat{s}_x^{cf}(y))}{D_y^{*rf}(x)}; \quad (8)$$

$$B = \frac{A \times D_s}{D_s - A}; \quad (9) \quad b = a - B \frac{(\mu_s - a)}{D_s}; \quad (10)$$

$$C = \frac{B \times D_y^{*rb}(x)}{B + D_y^{*rb}(x)}; \quad (11) \quad c = b + C \frac{(s_y^{*rb}(x) - b)}{D_y^{*rb}(x)}; \quad (12)$$

$$E = \frac{C \times D_s}{D_s - C}; \quad (13) \quad e = c - E \frac{(\mu_s - c)}{D_s}; \quad (14)$$

$$F = \frac{E \times D_x^{*cb}(y)}{E + D_x^{*cb}(y)}; \quad (15) \quad f = e + F \frac{(s_x^{*cb}(y) - e)}{D_x^{*cb}(y)}; \quad (16)$$

$$J = \frac{F \times D_s}{D_s - F}; \quad (17) \quad j = f - J \frac{(\mu_s - f)}{D_s}; \quad (18)$$

$$H = \frac{J \times D_{xy}^{*ff}(k)}{J + D_{xy}^{*ff}(k)}; \quad (19) \quad h = j + H \frac{(s_{xy}^{*ff}(k) - j)}{D_{xy}^{*ff}(k)}; \quad (20)$$

$$\hat{D}_t(x, y) = \frac{H \times D_s}{D_s - H}; \quad (21) \quad \hat{s}_t(x, y) = h - \hat{D}_t(x, y) \frac{(\mu_s - h)}{D_s}; \quad (22)$$

де  $\hat{s}_x^{cf}(y)$ ,  $\hat{D}_x^{cf}(y)$ ,  $y = 1, \dots, M$  — апостеріорна оцінка та дисперсія помилки оцінки у разі внутрішньокадрової обробки вздовж окремого стовпця  $x$  ( $x = 1, \dots, N$ ) під час прямого проходження по стовпцю;  $s_y^{*rf}(x)$ ,  $D_y^{*rf}(x)$ ,  $s_y^{*rb}(x)$ ,  $D_y^{*rb}(x)$ ,  $x=N, \dots, 1$ , та  $s_x^{*cb}(y)$ ,  $D_x^{*cb}(y)$ ,  $y = M, \dots, 1$  — екстрапольовані оцінки та дисперсії помилки оцінки, визначені під час прямого та зворотного проходів по рядку  $y$ , та під час зворотного проходження по стовпцю  $x$ ;  $s_{xy}^{*ff}(k)$ ,  $D_{xy}^{*ff}(k)$  — екстрапольована оцінка та дисперсія помилки оцінки, що визначаються у разі міжкадрової фільтрації відліків уздовж координати  $t$ , при цьому відліки, що розміщуються в точці з координатами  $(x, y)$  в кадрах з 1-го до поточного ( $k$ -го кадру) розглядаються як відліки одновимірного випадкового процесу, що піддається фільтрації, а змінюючи координати  $(x, y)$ ,  $x = 1, \dots, N$ ,  $y = 1, \dots, M$  відбувається міжкадрова обробка всіх пікселів вздовж координати  $t$  в міру надходження зображень.  $D_s$ ,  $\mu_s$  — априорно задані значення дисперсії та середнього значення яскравості послідовності зображень;  $\hat{s}_t(x, y)$ ,  $\hat{D}_t(x, y)$  — остаточно оцінка значення пікселя в точці  $(x, y)$  та дисперсія помилки оцінки.

З метою аналізу результатів фільтрації, отриманих за допомогою розглянутих методів, в процесі подальшого моделювання відповідних алгоритмів, розглядається також фільтр Вінера, що дозволяє проводити фільтрацію одиночних зображень в частотній області без врахування міжкадрового накопичення. Фільтр Вінера є оптимальним згідно з критерієм мінімуму середньоквадратичної помилки, і за відсутності додаткового спотворення, наприклад, у вигляді змазування зображення, процедура фільтрації описується за допомогою виразу [7], [20]

$$F(i, j) = \frac{S(i, j)}{S(i, j) + S_\omega(i, j)} V(i, j), \quad (23)$$

де  $S(i, j)$  — спектральна щільність потужності «ідеального» (неспотвореного) зображення, що не містить завади;  $S_\omega(i, j)$  — спектральна щільність потужності завади (у випадку, коли зображення спотворюється завадою, що описується за допомогою моделі адитивного білого гаусівського шуму згідно з виразом (1), приймається що  $S_\omega(i, j) = \sigma_\omega^2$ );  $V(i, j)$  — спектр зашумленого зображення;  $F(i, j)$  — спектр відфільтрованого зображення. Визначення значень пікселів обробленого зображення реалізується із застосуванням до спектру  $F(i, j)$  алгоритму швидкого зворотного перетворення Фур'є.

Дослідження алгоритмів знешумлення проводилося в програмному середовищі MATLAB. Відеопослідовність моделювалася як сукупність однорідних текстурних зображень, де окреме зображення представляється у вигляді реалізації гаусівського випадкового поля. Синтезована відеопослідовність характеризується автокореляційною функцією виду  $R(x, y, t) = D_s r_r^{|x|} r_c^{|y|} r_f^{|t|}$ , де  $D_s$  — дисперсія випадкового поля,  $r_r, r_c, r_f$  — коефіцієнти кореляції пікселів зображень уздовж відповідних координат (рис. 1) [24]. В ході моделювання вважалося, що статистичні властивості кадрів відеозображення залишаються незмінними для всієї оброблюваної послідовності.

На рис. 2а показані графіки середньоквадратичного відхилення (СКВ) помилки фільтрації  $\sigma_\epsilon$  в залежності від номера кадру  $t$ , отримані шляхом застосування розглянутих методів:

*крива 1* — алгоритм експоненціального усереднення, процедура обробки реалізується за допомогою виразу (4), коефіцієнт  $\alpha = 0,4$ ;

*крива 2* — алгоритм міжкадрового усереднення, процедура обробки описується виразом (2). Враховуються всі кадри, доступні до моменту надходження поточного кадру, зокрема, поточне зображення, для аналізу впливу накопичення кадрів на величину СКВ помилки фільтрації;

*крива 3* — алгоритм міжкадрового усереднення, в якому для визначення оцінки значень пікселів поточного кадру враховувалися 5 кадрів (поточний кадр та 4 попередніх), таким чином для першого кадру як результат брався вхідний зашумлений кадр, до якого не застосовувалася процедура міжкадрового усереднення; для визначення результатів фільтрації у разі надходження 2-го кадру враховувався поточний кадр та попередній, і т.д., у разі надходження п'ятого кадру враховувався цей кадр та чотири попередніх кадри, таким чином для п'ятого та всіх наступних кадрів в ході обробки бралися до аналізу п'ять зображень, що демонструється відповідним поведінням кривої 3 на рис. 2а;

*крива 4* — фільтр  $\alpha$ -усіченого усереднення, при цьому параметр  $p = \alpha L$  брався рівним 1, а параметр  $L$  — рівним 7, таким чином для обчислення значень пікселів для поточного  $k$ -го кадру бралися 3 попередні зображення вхідної послідовності, поточне зображення та 3 «майбутні» кадри; для кожного значення пари координат  $(x, y)$  відповідні значення пікселів з координатами  $t = k - 3, k - 2, k - 1, k, k + 1, k + 2, k + 3$  записувалися в окремий масив, який піддавався сортуванню, після цього з кожного краю відсортованого масиву відкидалися по одному кадру (оскільки  $p = 1$ ) і для 5-ти елементів масиву, що залишалися, визначалося середнє значення, отримана величина записувалися на позиції  $(x, y)$  вихідного поточного  $k$ -го зображення;

*крива 5* — алгоритм міжкадрової фільтрації, що реалізується за допомогою виразу (5), при цьому параметр  $\beta$  брався рівним 0,4, а внутрішньокадрова фільтрація окремих зображень вхідної послідовності реалізовувалася за допомогою локально-просторового фільтра Вінера, що описується виразом (6). Вважалося, що значення дисперсії шуму  $\sigma_w^2$  відоме точно. Перше зображення вхідної послідовності оброблялося лише за допомогою локально-просторового фільтра Вінера, починаючи з другого кадру застосовувався вираз (5). Отримані результати дозволяють оцінити вплив міжкадрової обробки на зменшення величини СКВ помилки фільтрації;

*крива 6* — алгоритм міжкадрової фільтрації, що описується виразом (5), при цьому внутрішньокадрова фільтрація окремих зображень здійснювалася за допомогою просторового масочного фільтра [7], [20]. Розміри маски фільтра бралися рівними  $5 \times 5$ , а коефіцієнти фільтра вважалися однаковими і становили  $1/25$ . Для першого зображення ( $t = 1$ ) отримана величина СКВ помилки фільтрації демонструє значення лише для внутрішньокадрової обробки за заданими умовами проведення моделювання; починаючи з другого кадру застосовувалася обробка згідно з виразом (5);

*крива 7* — алгоритм двоетапної фільтрації, що описується виразами (7)—(22); СКВ помилки фільтрації, визначене для першого зображення ( $t = 1$ ), відповідає результату, отриманому лише у внутрішньокадровому знешумленні, а результати для 2-го та наступних зображень демонструють вплив міжкадрової обробки на зменшення величини СКВ помилки фільтрації;

*крива 8* — фільтр Вінера, процедура обробки описується виразом (23) та виконується в частотній області. Обробка за допомогою фільтра Вінера застосовується до кожного зображення окремо, і враховуючи, що цей фільтр є оптимальним, то отримані результати наводяться для порівняння з результатами алгоритмів, які передбачають міжкадрову обробку, з метою оцінки наближеності їхніх СКВ помилки фільтрації до результатів, які забезпечуються оптимальним фільтром.

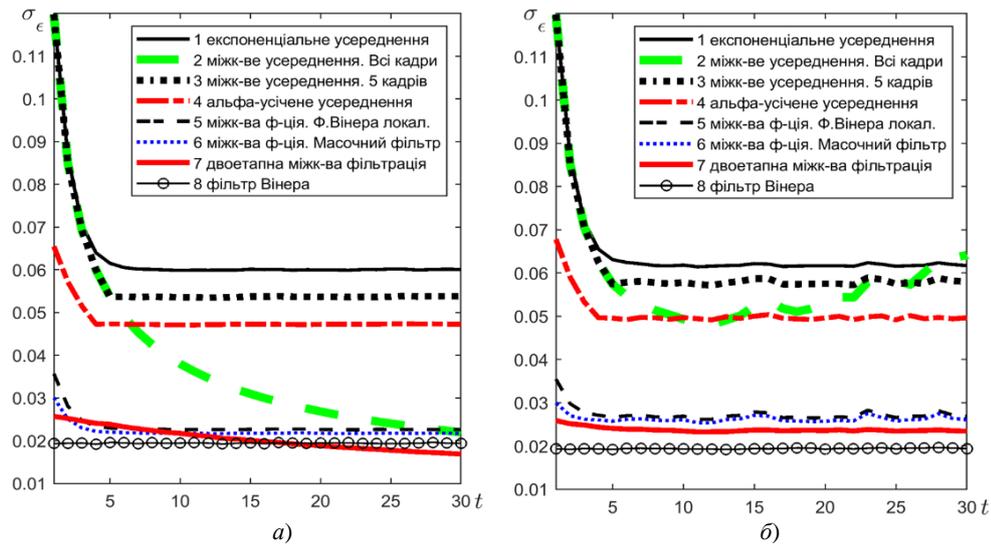


Рис. 2. СКВ помилки фільтрації

Результати, показані на рис. 2а, отримані в ході моделювання для таких параметрів зображень та завади:  $\sigma_s = \sqrt{D_s} = 0,1$ ;  $r_r = 0,98$ ;  $r_c = 0,98$ , середнє значення яскравості 0,5;  $r_f = 1,0$  (всі зображення послідовності, до етапу їх створення завадою бралися однаковими), СКВ завади  $\sigma_\omega = 0,12$ , математичне сподівання завади бралось рівним нулю.

На рис. 2б показані аналогічні результати при умові, що коефіцієнт кореляції значень пікселів уздовж координати  $t$  становить  $r_f = 0,98$ .

Із рис. 2а видно, що для розглянутого модельного прикладу, алгоритм двоетапної фільтрації (крива 7), описаний виразами (7)—(22), досягає значення СКВ помилки фільтрації, що відповідає величині, отриманій із застосуванням фільтра Вінера, у разі обробки 17-го кадру відеопослідовності. Для алгоритму міжкадрового усереднення (крива 2), в ході застосування якого враховуються всі кадри, що надійшли у відповідний момент часу, СКВ помилки фільтрації знижується за законом  $\sigma_\omega / \sqrt{L}$  (де  $L$  — кількість кадрів, які усереднюються), наближаючись до значення СКВ помилки фільтрації, що досягається фільтром Вінера, у разі обробки 37 зображень послідовності. Процедура міжкадрової фільтрації, що описується виразом (5), і використовує в ході обробки попередньо відфільтровані зображення, кожне з яких окремо знешумлюється локально-просторовим фільтром Вінера або просторовим масочним фільтром, за умови що в обох випадках розміри вікна (маски) становили  $5 \times 5$  пікселів (криві 5 та 6), отримані результати є близькими між собою, та дозволяють досягти СКВ помилки фільтрації, які гірші приблизно на 44 % (для  $t = 2$ ); 20 % (для  $t = 5$ ), та 15 % (для  $t = 8$ ) порівняно з результатом оптимальної вінеровської фільтрації, що реалізується згідно з виразом (23). Порівнюючи результати, отримані для 1-го зображення ( $t = 1$ ), коли міжкадрове накопичення відсутнє, для методу вінеровської локально-просторової фільтрації (крива 5) СКВ помилки фільтрації на 84 % більше порівняно з результатом, отриманим для оптимального фільтра Вінера (крива 8); для методу фільтрації, що реалізується із застосуванням масочного фільтра (крива 6), а також для методу двоетапної фільтрації (крива 7), коли застосовується виключно внутрішньокадрова фільтрація (обробка зображення в цьому випадку виконується за допомогою виразів (7)—(18)) СКВ помилки фільтрації більші порівняно з результатом, що досягається оптимальним фільтром Вінера, на 57 % та 33 % відповідно. Для 1-го зображення ( $t = 1$ ) метод двоетапної фільтрації дозволяє зменшити СКВ помилки фільтрації порівняно з СКВ завади на 78 %; метод просторової масочної фільтрації — на 74 %; метод вінеровської локально-просторової фільтрації — на 70 %. У разі застосування оптимального фільтра Вінера (крива 8) СКВ помилки фільтрації менше порівняно з СКВ завади на 83 %.

На рис. 2б для розглянутого модельного прикладу, коли відеопослідовність характеризується коефіцієнтом кореляції вздовж координати  $t$ , меншим ніж 1 ( $r_f = 0,98$ ), для алгоритму міжкадрового усереднення (крива 2), коли враховуються всі кадри, отримані у відповідний момент часу, СКВ помилки фільтрації після зменшення для початкових кадрів послідовності, починає зростати з 10-го кадру. Таким чином, для випадку, коли відповідні «ідеальні» неспотворені пікселі послідовності

зображень вважаються неоднаковими на всьому інтервалі спостереження і характеризуються повільною зміною значень між сусідніми кадрами, кількість попередніх (сусідніх) зображень, які повинні враховуватися в процесі їхнього усереднення, є обмеженою, а враховуючи, що саме кількість кадрів напряму впливає на ефективність придушення завади і величину СКВ помилки фільтрації, то зменшення кількості зображень, що беруть участь в процедурі знешумлення, призводить до зниження потенційного виграшу результату фільтрації, який може бути досягнутим за запропонованим методом. Отже, під час практичної реалізації такого підходу доцільно вибирати величину кількості сусідніх зображень, які беруть участь в знешумленні кадрів відеопослідовності шляхом їх усереднення, враховуючи з статистичні властивості відеоданих сцени зйомки.

Серед результатів, які демонструють найкращий рівень заглушення завади, окрім фільтру Вінера (крива 8), варто відмітити метод двоетапної міжкадрової фільтрації (крива 7) та метод міжкадрової фільтрації (що застосовується до попередньо відфільтрованих зображень локально-просторовим фільтром (крива 5) або масочним фільтром (крива 6)). Зазначені методи дозволяють зменшити СКВ помилки фільтрації порівняно із СКВ завади приблизно на 80 % та 77 % до того ж, СКВ помилки фільтрації більші порівняно з відповідним показником, що досягається фільтром Вінера, приблизно на 20 % та 40 % відповідно. Метод експоненціального усереднення (крива 1), міжкадрового усереднення (коли враховуються 5 зображень в процедурі знешумлення кожного кадру наявної послідовності (крива 3)) та метод  $\alpha$ -усіченого усереднення (крива 4) для заданих умов дозволяють зменшити СКВ помилки фільтрації порівняно із СКВ завади приблизно на 47 %, 51 % та 58 % відповідно.

Враховуючи, що застосування на практиці оптимального фільтра Вінера зіштовхується з складностями, які полягають в необхідності мати в розпорядженні спектр «ідеального» неспотвореного зображення, що часто є недоступним, то виникає необхідність використовувати інші підходи для розв'язання задачі знешумлення доступних для обробки спостережень, що зазнають негативного впливу завади у формі адитивного білого гаусівського шуму. Метод міжкадрової фільтрації (вираз 5) в поєднанні з внутрішньокадровою локально-просторовою обробкою (вираз 6) або просторовою масочною фільтрацією дозволяє ефективно придушувати заваду не надто програючи фільтру Вінера за показником СКВ помилки фільтрації. Метод двоетапної міжкадрової фільтрації (7)—(22), незначно поступаючись фільтру Вінера в обробці змодельованої послідовності зображень, характеризується значно вищою обчислювальною складністю, аніж інші розглянуті підходи, що може стати обмежувальним фактором у практичному впровадженні відповідного алгоритму. До того ж, застосування алгоритму двоетапної фільтрації потребує проведення попередньої оцінки статистичних параметрів відеопослідовності для їх використання у розрахункових виразах, що в деяких випадках може бути віднесеним до недоліків цього підходу.

На рис. 3 показано результати фільтрації синтезованої послідовності зображень, отриманих відповідними методами, СКВ помилки фільтрації у разі застосування яких відображено на рис. 2б. На рис. 3а показано «ідеальні» неспотворені кадри послідовності (зліва направо): 1-й ( $t = 1$ ), 2-й ( $t = 2$ ), 5-й ( $t = 5$ ), 15-й ( $t = 15$ ) та 30-й ( $t = 30$ ) кадри відповідно. На рис. 3б показано відповідні кадри, які зазнали спотворення адитивним білим гаусівським шумом з СКВ, рівним 0,12. На рис. 3в—ж продемонстровано результати обробки, отримані за допомогою зазначених підходів. Показані кадри для розглянутого модельного прикладу дають змогу зробити якісну оцінку можливостям відповідного методу придушення завад, а також демонструють візуальні особливості відфільтрованих зображень, отриманих із застосуванням реалізованих алгоритмів.

Доцільність використання відповідного алгоритму в конкретній технічній системі може бути продиктована вимогами до складності обчислювальних процедур, що реалізують вибраний метод фільтрації, та визначатися потребою в забезпеченні необхідної швидкодії обробки даних.

Знешумлення за допомогою методу експоненціального усереднення, представленого виразом (4), характеризується низькою обчислювальною складністю. Обробка відбувається в міру надходження даних, що дозволяє застосовувати цей підхід для фільтрації відеозображень, які отримуються в темпі, наближеному до реального часу, що є адекватним потоковому відео. Вибір величини параметра  $\alpha$  ( $0 < \alpha \leq 1$ ), який впливає на ступінь згладжування, може виконуватися з урахуванням особливостей сцени. Для динамічних сцен більше значення параметра  $\alpha$  дозволяє забезпечити краще збереження структурних деталей об'єктів, зменшуючи при цьому ступінь приглушення шумової компоненти; для статичних сцен зниження параметра  $\alpha$  дає змогу покращити кількісні показники фільтрації завади.

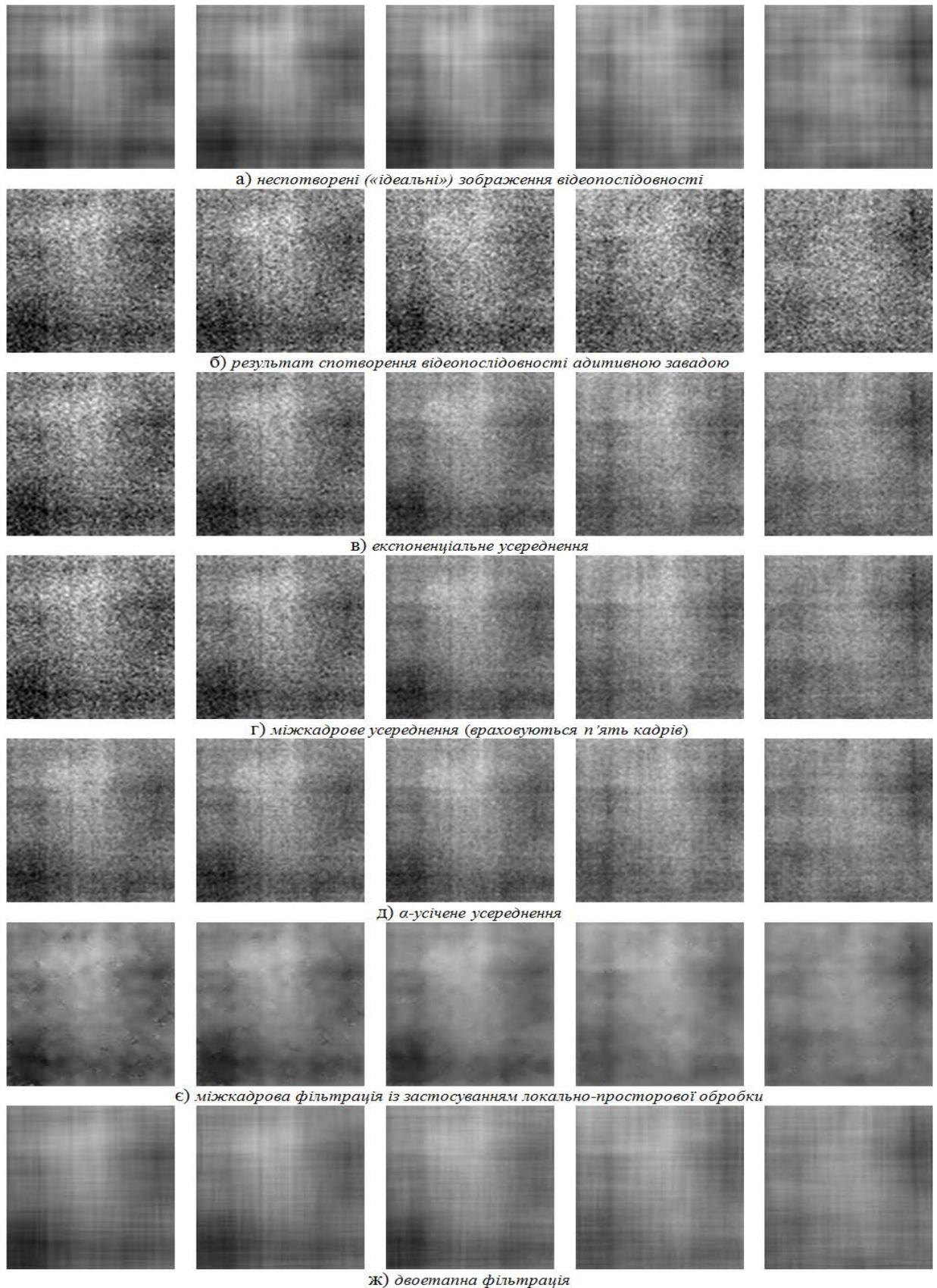


Рис. 3. Результати знешумлення послідовності текстурних зображень

Алгоритм на основі міжкадрового усереднення, описаний виразом (2), доцільно застосовувати для фільтрації відеозображень, що містять низькодинамічні сцени або для обробки послідовності цифрових знімків об'єкта спостереження, які отримуються у відповідній спеціалізованій оптико-електронній системі, де сформований масив даних містить множину зображень, що беруться

незмінними впродовж інтервалу спостереження та піддаються обробці з метою придушення адитивної завади, спричиненої внутрішнім шумом апаратури реєстрації. До того ж, вказаний підхід може бути застосований в системах відеонагляду для приглушення шуму, що особливо проявляється на відеозображеннях в умовах зниженого рівня освітлення, а вибір кількості кадрів, які обробляються на кожному кроці фільтрації, визначається характером сцени та може задаватися з урахуванням особливостей вхідних даних.

Підхід на основі  $\alpha$ -усіченого усереднення (3) розширює можливості з придушення завади порівняно із попереднім методом, та дозволяє відкидати екстремальні значення пікселів, що потрапляють у вікно фільтра заданих розмірів, тим самим забезпечуючи можливість також видаляти імпульсну заваду. Алгоритм, що реалізує зазначений метод, може бути застосований в системах візуалізації та спостереження. Вибір параметра  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha < 0,5$ ) дозволяє коригувати кількість пікселів із найменшими та найбільшими значеннями в межах вікна обробки, які не враховуються в ході визначення яскравості для відповідного відліку на вихідному кадрі відеопослідовності. Цей підхід потребує застосування алгоритму сортування, що може призводити до збільшення часових витрат порівняно із попередніми методами.

Алгоритм знешумлення, що поєднує міжкадрову та внутрішньокадрову фільтрацію і описується виразом (5), дозволяє шляхом ускладнення обчислювальної процедури забезпечити кращі показники придушення шуму порівняно із застосуванням кожного із підходів окремо. Використання локального фільтру Вінера (6) вимагає врахування величини дисперсії шуму, яка може бути оцінена в ході попереднього аналізу доступних спостережень, а розміри апертури фільтру зазвичай вибираються  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$ . Міжкадрова обробка дозволяє, використовуючи значний рівень подібності між сусідніми кадрами, поліпшити результати фільтрації. Цей підхід доцільно застосовувати в системах відеонагляду, а також в інших спеціалізованих системах, в яких дані можуть зазнавати спотворення адитивною завадою з некорельованими відліками.

Обробка двоетапною процедурою міжкадрової фільтрації, основний етап якої описується виразами (7)—(22), характеризується суттєво вищою складністю обчислень порівняно з попередніми методами. Під час застосування алгоритму фільтрації виникає необхідність окрім оцінки дисперсії шуму, виконувати оцінювання коефіцієнтів кореляції вздовж кожної координати відеозображення, а також дисперсії та середнього значення яскравості відліків послідовності зображень, які піддаються обробці. Це потребує проведення попереднього аналізу вхідних даних, що вимагає додаткових часових витрат. Отже, доцільність застосування цього методу обмежується технічними системами, в яких відсутні жорсткі вимоги до необхідності забезпечення обробки спостережень в реальному часі за умов, коли темп їх надходження перевищує темп виконання обчислень.

Подальше вдосконалення розглянутих підходів може бути здійснено шляхом впровадження адаптивних методів обробки, які забезпечують компенсацію руху об'єктів, що можуть бути представлені на відеозображеннях, а також дозволяють коригувати параметри фільтрів відповідно до особливостей сцени, яка міститься на відеопослідовності. Результати, отримані в роботі, можуть стати основою для подальшої розробки адаптивних методів знешумлення, а також знайти своє застосування під час створення програмних засобів для придушення завад на відеозображеннях, що реєструються в радіоелектронних системах різного цільового призначення, та в суміжних сферах які включають цифрову обробку зображень.

### Висновки

Проведено порівняльний аналіз підходів, що можуть використовуватися для придушення адитивної завади з некорельованими відліками, яка спотворює послідовність цифрових зображень. В ході математичного моделювання алгоритмів знешумлення у разі обробки синтезованої відеопослідовності, представленої гаусівським випадковим полем, для генерування якої бралися такі параметри: СКВ значень яскравості пікселів 0,1; коефіцієнти кореляції вздовж кожної із координат 0,98; СКВ завади, представленої адитивним гаусівським білим шумом — 0,12. Отримано такі значення СКВ помилки фільтрації, оцінені за відповідними графіками в зоні стабілізації значень цього показника: для оптимального фільтру Вінера (виступає як опорний метод в процесі аналізу результатів, отриманих за допомогою розглянутих підходів) — 0,020; для двоетапної міжкадрової фільтрації — 0,024; для алгоритму, що реалізується поєднанням внутрішньокадрової обробки локально-просторовим фільтром Вінера та міжкадрової обробки — 0,028; для  $\alpha$ -усіченого усереднення за такими значеннями параметрів:  $L = 7$  та  $\alpha L = 1$  — 0,050; для міжкадрового усереднення, на кожному кроці якого враховувалися 5 кадрів — 0,058; для експоненціального усереднення за значеннями параметра  $\alpha = 0,4 \dots 0,063$ .

Ці показники можуть варіюватися в залежності від вибраних значень параметрів математичної моделі, що використовується для синтезу відеопослідовності та спотворення її завадою, а також від заданих параметрів відповідних фільтрів.

Вибір методу знешумлення для його застосування в конкретній технічній системі може бути обумовлений не тільки показниками придушення завади, але також і обчислювальною складністю процедури знешумлення та необхідністю проведення попереднього аналізу вхідних даних для оцінки їх статистичних параметрів та характеристик, що враховуються під час визначення параметрів відповідних фільтрів.

Отримані результати можуть бути використані для розробки алгоритмічного забезпечення програмних модулів обробки відеопослідовностей, з високим рівнем кореляції між сусідніми кадрами, а також в наукових задачах, які охоплюють сферу цифрової обробки сигналів та зображень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. В. Бараннік, Ф. О. Устименко, В. В. Бараннік, І. О. Мільцин, і О. К. Юдін, «Метод селективної обробки відео сегментів для підвищення якості відеозображень в системах інтелектуального аналізу,» *Наукоємні технології*, т. 66, № 2, с. 214-225, 2025. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.66.20332>.
- [2] Н. В. Головіна, і О. М. Ляшенко, «Дослідження методів відновлення та реконструкції зображень,» *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, т. 33 (72), № 2, с. 80-85, 2022. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/13>.
- [3] D. Patel, D. Bhatt, D. Patel, and H. Patel, "An Analytical Study of Spatial Domain Image Denoising Techniques," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 1134-1139, 2015.
- [4] П. Ю. Костенко, В. В. Слободянюк, Д. В. Карлов, Є. В. Велугін, і В. О. Лебедев, «Метод фільтрації мультиплікативного шуму на зображеннях з використанням технології сурогатних даних,» *Системи обробки інформації*, № 4 (167), с. 45-57, 2021. <https://doi.org/10.30748/soi.2021.167.04>.
- [5] B. Goyal, A. Dogra, S. Agrawal, B. S. Sohi, and A. Sharma, "Image denoising review: From classical to state-of-the-art approaches," *Information Fusion*, vol. 55, pp. 220-244, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.09.003>.
- [6] N. Goran, A. Begovic, and N. Skaljo, "Adjacent Image Correlation for Video Quality Assessment," in *62nd International Symposium ELMAR-2020*, Zadar, Croatia, 2020, pp. 45-48. <https://doi.org/10.1109/ELMAR49956.2020.9219047>.
- [7] R. C. Gonzalez, and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 4th ed. USA: Pearson, 2018, 1022 p.
- [8] Й. Й. Білинський, О. І. Нікольський, і А. Б. Гуральник, «Фільтрація ультразвукових зображень на основі морфологічних операцій,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 71-79, 2019. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-145-4-71-79>.
- [9] V. B. Surya Prasath, "Video denoising with adaptive temporal averaging," *Engineering Review*, vol. 39, no. 3, pp. 243-247, 2019. <https://doi.org/10.30765/er.39.3.05>.
- [10] K. Dang, J. Yang, and J. Yuan, "Adaptive Exponential Smoothing for Online Filtering of Pixel Prediction Maps," in *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2015, pp. 3209-3217. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.367>.
- [11] A. A. Yahya, J. Tan, and L. Li, "Video Noise Reduction Method Using Adaptive Spatial-Temporal Filtering," *Discrete Dynamics in Nature and Society*, vol. 2015, no. 1, pp. 1-10, 2015. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/351763>.
- [12] О. М. Ляшук, «Методи гомоморфної двоетапної багатопоглядової фільтрації зображень радіолокатора з синтезованою апертурою антени.» автореф. дис. канд. техн. наук., Харків. нац. ун-т. радіо-ки. Харків, 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://openarchive.nure.ua/handle/document/10120>. Дата звернення: 16.04.2025.
- [13] H. Benoit, *Digital Television: Satellite, Cable, Terrestrial, IPTV, Mobile TV in the DVB Framework*, 3rd ed. Elsevier, Focal Press, 2008, 289 p.
- [14] D. A. Zaporozhets, and S. V. Vyshnevyyi, "Filtration of image sequences distorted by noise using two-stage processing technique," in *XII intern. scient. and tech. conf. Radioengineering Problems, Signals, Devices and Systems*, Kyiv, 2023, pp. 8-10.
- [15] C. Cai, K. Lam, and Z. Tan, "Adaptive Alpha-Trimmed Average Operator Based on Gaussian Distribution Hypothesis Test for Image Representation," in *Fourth International Conference on Image and Graphics*, 2007, pp. 810-814. <https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/ICIG.2007.133>.
- [16] Є. С. Федоров, і Т. Ю. Уткіна, «Метод очищення від шуму візуальної біометричної інформації,» *Вісник Черкаського державного технологічного університету: Технічні науки*, т. 26, № 4, с. 5-15, 2021. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.247856>.
- [17] M. S. Reis, P. M. Saraiva, and B. R. Bakshi, "Data Quality and Denoising: A Review," in *Comprehensive Chemometrics*, vol. 3, S. Brown, R. Tauler, and B. Walczak, Ed. Elsevier, 2020, pp. 180-204. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.14874-7>.
- [18] M. Trigka, E. Dristas, and K. Moustakas, "Joint Power and Contrast Shrinking in RGB Images with Exponential Smoothing," in *IEEE 14th Image, Video, and Multidimensional Signal Processing Workshop (IVMSP)*, Nafplio, Greece, 2022, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/IVMSP54334.2022.9816299>.
- [19] G. Ou, S. Zou, S. Liu, and J. Tang, "A secondary EWMA-based dictionary learning algorithm for polynomial phase signal denoising," *Nature* [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-16644-y>. Accessed on: May 10, 2025.
- [20] A. McAndrew, *A Computational Introduction to Digital Image Processing*. CRC Press, 2016, 643 p.
- [21] L. Zheng, G. Jin, W. Xu, and H. Qu, "An improved adaptive preprocessing method for TDI CCD images," *Optoelectronics Letters*, vol. 14, no. 1, pp. 76-80, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11801-018-7175-1>.
- [22] C. R. Park, S. Kang, and Y. Lee, "Median modified wiener filter for improving the image quality of gamma camera images," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 52, no. 10, pp. 2328-2333, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.03.022>.
- [23] L. Zheng, and W. Xu, "An Improved Adaptive Spatial Preprocessing Method for Remote Sensing Images," *Sensors*, vol. 21, pp. 1-18, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21175684>.
- [24] О. М. Ляшук, С. В. Вишневий, і С. Я. Жук, «Алгоритм двоетапної фільтрації багатоканальних зображень з внутрішньокadroвою некаузальною обробкою при наявності некорельованої завади,» *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Радіотехніка та телекомунікації»*, № 874, с. 47-56, 2017.

**Вишневий Сергій Валерійович** — канд. техн. наук, старший викладач кафедри радіотехнічних систем, e-mail: s.vyshnevyi@kpi.ua ;

**Журба Артем Віталійович** — студент кафедри радіотехнічних систем; e-mail: zhurba.artem@lll.kpi.ua;

**Катін Павло Юрійович** — канд. техн. наук, доцент кафедри радіотехнічних систем, e-mail: ka72tin@gmail.com ;

**Черкас Максим Віталійович** — студент кафедри радіотехнічних систем, e-mail: cherkas2652@gmail.com ;

**Грубась Іван Андрійович** — магістрант кафедри радіотехнічних систем, e-mail: ihrubas@gmail.com .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

**S. V. Vyshnevyi<sup>1</sup>**

**A. V. Zhurba<sup>1</sup>**

**P. Yu. Katin<sup>1</sup>**

**M. V. Cherkas<sup>1</sup>**

**I. A. Hrubas<sup>1</sup>**

## Comparative Analysis of Interframe Filtering Algorithms for Video Sequences Distorted by Additive Noise

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikosky Kyiv Polytechnic Institute”

*One of the essential requirements for the operation of technical systems for digital video sequence processing is the reduction of the negative impact of interference that arises in video images during their acquisition or transmission through communication channels. Suppression of interference and improvement of the signal-to-noise ratio is relevant for applications in which, in addition to visual analysis of the obtained observations, corresponding algorithms for automatic data processing may also be employed. Filtering typically serves as a fundamental component of image processing, while the choice of specific algorithms depends on the requirements for their computational complexity and their ability to suppress the corresponding type of interference.*

*This paper presents a comparative analysis of the algorithms applied to solve the problem of interference suppression modeled as additive white Gaussian noise that distorts the sequence of digital images. The specific implementation features of denoising methods based on the inter-frame averaging procedure are provided. Mathematical expressions describing the corresponding image denoising procedures are presented, and the selected approaches are characterized with an indication of their advantages and disadvantages. The research is conducted by simulation in the MATLAB software environment using synthesized data based on homogeneous textured images described by a Gaussian random field model. Quantitative indicators of the filtering results for the synthesized video sequence with predefined parameters are obtained. Graphs of the mean square deviation of the filtering error are presented, enabling assessment of the degree of interference suppression achieved by the applied approaches. To ensure the possibility of visual subjective evaluation of the data obtained through the implemented algorithms, examples of denoised frames of the model video image are provided.*

*The obtained results demonstrate the applicability of the investigated methods to video data filtering tasks aimed at interference suppression and may be used in the development of algorithmic support for software modules for processing video sequences characterized by a high level of inter-frame correlation, as well as in scientific tasks related to the development of video denoising methods.*

**Keywords:** video sequence, additive noise, white Gaussian noise, filtering, inter-frame averaging, filter, textured image, Gaussian random field, spatio-temporal image processing.

**Vyshnevyi Serhii V.** — Cand. Sc. (Eng), Senior Lecturer of the Chair of Radio Engineering Systems, e-mail: s.vyshnevyi@kpi.ua ;

**Zhurba Artem V.** — Student of the Chair of Radio Engineering Systems, e-mail: zhurba.artem@lll.kpi.ua ;

**Katin Pavlo Yu.** — Cand. Sc. (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Radio Engineering Systems, e-mail: ka72tin@gmail.com ;

**Cherkas Maksym V.** — Master's Student of the Chair of Radio Engineering Systems, e-mail: cherkas2652@gmail.com ;

**Hrubas Ivan A.** — Master's Student of the Chair of Radio Engineering Systems, e-mail: ihrubas@gmail.com