

**МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ
ОБРОБКИ СИГНАЛІВ**

УДК 681.7.013.8

**ПОРІВНЯННЯ ЯКОСТІ РОБОТИ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ШУМІВ
ЗОБРАЖЕНЬ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО КАНАЛУ ОГЛЯДОВИХ
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ***Балахонova Н. О., Микитенко В. І., Пашков Р. А.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: balakhonova@kpm.kpi.ua*

Оптико-електронні прилади дистанційного спостереження набувають дедалі більшого поширення в різних галузях науки і техніки. В зв'язку із значним здешевленням приймачів випромінювання інфрачервоного діапазону спектру до складу таких систем все частіше вводять тепловізійний канал. Він суттєво підвищує функціональні можливості всієї системи спостереження, дає змогу працювати без зовнішнього освітлення і в диму. Температурні контрасти на об'єкті часто є вищими, ніж контрасти у видимому діапазоні спектру. Але чутливість інфрачервоних приймачів випромінювання є нижчою. Тому тепловізійні зображення мають невелике відношення сигнал/шум. Обов'язковим етапом обробки сигналу в тепловізійному каналі є його знешумлення. Стандартним способом підвищення відношення сигнал/шум є застосування цифрової фільтрації. Очевидним найпростішим шляхом фільтрації є використання стандартних фільтрів, які було розроблено для звичайних зображень видимого діапазону спектру. Але виникає питання ефективності застосування таких фільтрів до тепловізійних зображень. Досліджено можливість застосування стандартних цифрових фільтрів для зменшення шумів тепловізійних зображень. Фільтри реалізуються вбудованими функціями в програмному середовищі Mathcad: *medfilt(M)*, *wiener2d(M)*, *gaussconv(M)*, *orthosmooth(M)*, *orthosmooth5(M)*, *centsmooth(M)*. Для оцінки ефективності використання фільтрів на базі реального тепловізійного зображення розраховані статистичні метрики MSE, PSNR, SSIM, CC. Розглядаються відфільтровані зображення при адитивному, імпульсному та мультиплікативному типах шумів. Дано рекомендації щодо використання розглянутих цифрових фільтрів при різних типах шумів. Жоден з розглянутих фільтрів не рекомендується застосовувати для усунення періодичного шуму. Для усунення імпульсного шуму «сіль та перець» найефективнішим є медіанний фільтр. Для усунення мультиплікативного шуму та шуму, розподіленого за законом Гауса ефективніше використовувати матричний фільтр з ядром згортки 3×3 . Проведене порівняння роботи фільтрів може бути застосовано при проектуванні адаптивних фільтрів на мікроконтролерах для зменшення шумів зображень тепловізійного каналу оглядових оптико-електронних пристроїв.

Ключові слова: тепловізор; цифрова обробка зображення; Mathcad; медіанний фільтр; фільтр Вінера; маска; вейвлет-перетворення Добеші; метрики: MSE, PSNR, SSIM, CC.

Вступ

Формування тепловізійного зображення супроводжується спотворенням сигналу, що є результатом дії зовнішніх і внутрішніх факторів [1-3]. Методи підвищення якості зображень, в тому числі – тепловізійних, діляться на [4, 5]:

1) технічні – покращення просторової роздільної здатності, енергетичної чутливості, розширення динамічного діапазону приладу вдосконаленням та узгодженням матричного приймача випромінювання, оптичної системи, використання малошумних підсилювачів тощо;

2) програмні – застосування різних фільтрів, які можна реалізувати з використанням відповідного апаратного та програмного забезпечення та вбуду-

вати в систему тепловізійного спостереження (наочною є елементна база: аналого-цифрові перетворювачі, мікроконтролери, лінійні інтегральні підсилювачі, оперативна пам'ять).

Обов'язковим етапом створення результуючого зображення в полі зору оператора є зменшення шумової складової в сигналі. Розповсюдженим способом підвищення відношення сигнал/шум в зображенні є застосування цифрової фільтрації. Найпростішими засобами фільтрації є вбудовані фільтри програм та програмних пакетів обробки зображень і сигналів, які було розроблено для зображень видимого діапазону спектру. Найбільш уживаними з цих пакетів є Adobe Photoshop [6], CorelDRAW [7], Matlab [8], LabVIEW [9] і Mathcad

[6, 10]. Використовуючи фільтри графічних редакторів Adobe Photoshop, або CorelDRAW не можливо порівняти якість дії фільтрів безпосередньо за статистичними метриками і обрати найкращі з них. У математичних пакетах, таких як Matlab, LabVIEW та Mathcad, це можливо зробити. На даний час відомі роботи [11-12], в яких порівняння дії зашумленого 2-Д зображення відбувалось лише за 2-ма більш поширеними метриками MSE та PSNR і здійснені в програмних пакетах Matlab і LabVIEW. Крім того, дослідження проводились або на звичайних фотографіях, або на тест-об'єктах [13]. Тому дослідження ефективності застосування фільтрів для зменшення шумів в тепловізійних зображеннях за 4-ма статистичними характеристиками (метрики MSE, PSNR, SSIM, CC) в пакеті Mathcad є актуальним. В якості фільтрів для зменшення шумів зображення були обрані фільтри, які реалізуються вбудованими функціями в програмному середовищі Mathcad: medfilt(M), wiener2d(M), gaussconv(M), orthosmooth(M), orthosmooth5(M), centsmooth(M).

Критерії якості зображення

У сучасних тепловізорах інфрачервоне випромінювання перетворюється в електричний сигнал за допомогою матричних приймачів випромінювання і переводиться в цифрову форму [2]. Отже на виході приймального блоку сигнал можна описати матрицею, що складається з N_x стовбців і N_y рядків. Чутливі елементи матричного приймача – пікселі – є однотипними, а отже електронне «зображення» є «монохромним», тобто значення елементів відповідної матриці є яскравістю (інтенсивністю), а отже, змінюється в межах 1 – 256 (256 – відповідає максимальній яскравості зображення, 1 – відповідає мінімальній яскравості).

Для оцінки якості тепловізійних зображень в полі зору оператора розроблено велику кількість показників і критеріїв якості [14-16]. Але для оцінювання ефективності методів цифрової обробки в електронному тракті доцільно використовувати відповідні стандартні показники. Стандартними метриками [14-17] оцінки якості цифрових зображень є наведені нижче статистичні оцінки, які фактично побудовані на порівнянні матриць інтенсивностей реального $S(x_i, y_j)$ та ідеального $S_0(x_i, y_j)$ 2D зображень.

MSE – середньоквадратична похибка (Mean Square Error):

$$MSE(x_i, y_j) = \frac{1}{N_x \cdot N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (S(x_i, y_j) - S_0(x_i, y_j))^2,$$

де x_i, y_j – пікселі інтенсивності зображення.

Нульове значення середньоквадратичної похибки означає повний збіг матриць $S(x_i, y_j)$ та $S_0(x_i, y_j)$. Чим більше значення має MSE, тим більші відмінності є між ідеальним та реальним зображеннями. В програмному середовищі Mathcad функція MSE є вбудованою – immse(S0,S), де параметрами S_0, S є матриці зображень – ідеального та реального відповідно.

PSNR – пікове співвідношення сигнал/шум (Peak Signal-to-Noise Ratio), що розраховується за формулою

$$PSNR(x_i, y_j) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX(S_{i,j})^2}{MSE} \right),$$

де $MAX(S_{i,j})$ – різниця між максимально можливим і мінімально можливим значеннями пікселів, що для розрядності 8-м біт приймає значення 255

$$PSNR(x_i, y_j) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{255}{\sqrt{MSE}} \right).$$

Метрика PSNR(x_i, y_i) має розмірність – ДБ.

Чим ближче реальне зображення до ідеального, тим більше значення приймає PSNR.

SSIM (Structural Similarity) – індекс структурної збіжності – приймає значення від 0 (незбіжність) до 1 (повна збіжність) [5]

$$SSIM(x_i, y_i) = \frac{(2\mu_x \mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)},$$

де μ_x, μ_y – математичні сподівання – для зображень x та y , які є середніми значеннями інтенсивності зображень

$$\mu_x = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} x_i,$$

де N_x – загальне число пікселів у зображенні; x_i – значення інтенсивності i -го пікселя; σ_x^2, σ_y^2 – дисперсія, що для зображень має сутність контрастності

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N_x - 1} \sum_{i=1}^{N_x} (x_i - \mu_x)^2,$$

σ_{xy} – коваріація x і y :

$$\sigma_{xy}^2 = \frac{1}{N_x - 1} \sum_{i=1}^{N_x} (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y),$$

та $c_1 = (L \cdot k_1)^2, c_2 = (L \cdot k_2)^2$ – динамічний діапазон значень пікселів, де константи $k_1 = 0.01$ та

$k_2 = 0.01$, а $L = 2^p$, де p – кількість біт на піксель (в даному випадку $p = 8$). Здебільшого метрика SSIM розраховується на вікно зображення розміром 8×8 пікселів і значення +1 має тільки при повній автентичності зображень – ідеального та реального. Для аналізу даної метрики всього зображення, як цілого, будемо застосовувати метрику, позначену нами як MSSIM, що є середнім арифметичним від всіх значень SSIM для всіх вікон з 8×8 пікселів. В програмному середовищі Mathcad математичне сподівання, дисперсія та коваріація відповідають вбудованим функціям $\text{mean}(S)$, $\text{var}(S)$ та $\text{cvar}(S, S_0)$ відповідно.

CC – нормалізована кореляція – приймає значення від 0 (розбіжність) до 1 (повний збіг матриць) [17]

$$CC = \sigma_x \sigma_y / \sigma_{xy},$$

і в програмному середовищі Mathcad відповідає вбудованій функції $\text{corr}(S, S_0)$.

В даній роботі будемо розраховувати метрики між ідеальним зображенням, рис. 1, а, отриманим з тепловізора, та, по-перше, цим же зображенням, спотвореним шумами, по-друге, зображенням із шумами, що пройшло крізь цифрові фільтри.

Типи шумів

Шуми бувають адитивними, мультиплікативними та імпульсними [11].

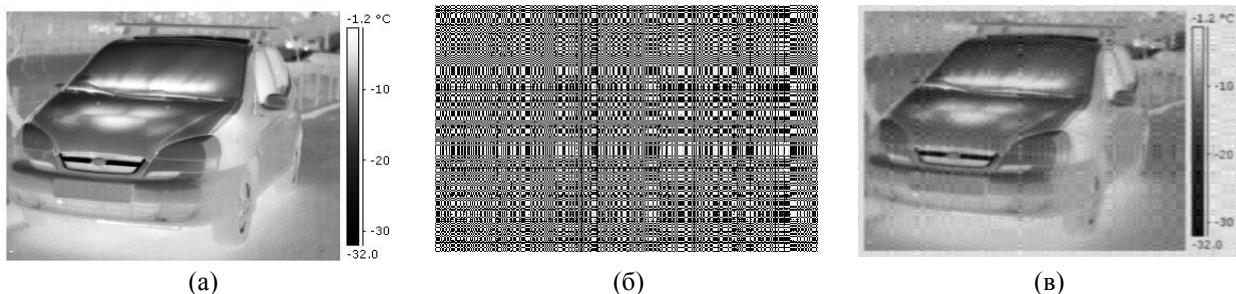


Рис. 1. Світлина тестового зображення, отриманого в середовищі Mathcad: а – ідеальне зображення; б – зображення шуму, розподіленого за Гаусом з нульовим математичним сподіванням і дисперсією 0,02; в – зображення, що є сумою ідеального (а) і розподіленого за Гаусом

Різновидом адитивного шуму є шум (рис. 2, а), розподілений періодично, наприклад, за законом синусу

$$N(x_i, y_j) = 8 \cdot 256 \cdot \sin\left(\frac{i\pi}{2 \cdot Nx}\right), \quad (2)$$

де i – номер пікселя у рядку, Nx – кількість пікселів у рядку.

Мультиплікативний шум, утворюється, коли матриця пікселів спотвореного сигналу є добутком ідеального сигналу $S_0(x_i, y_i)$ та випадково розподіленого сигналу $N(x_i, y_i)$:

Адитивний шум (рис. 1, в) не залежить статистично від прийнятого сигналу і розглядається, як додаток корисного (ідеального) сигналу $S_0(x_i, y_i)$, рис. 1, а, та шуму $N(x_i, y_i)$, рис. 1, б:

$$S(x_i, y_i) = S_0(x_i, y_i) + N(x_i, y_i).$$

Такі дефекти зображення, вносяться, наприклад, приймачем випромінювання або електронікою. Простіше всього відтворити шум $N(x_i, y_i)$, розподілений за законом Гауса

$$p(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

де μ – математичне сподівання випадкової величини z та σ – дисперсія випадкової величини z . Для створення такого шуму в Mathcad існує вбудована функція $\text{norm}(A, \mu, \sigma)$, що повертає матрицю, в якій до матриці A доданий шум з математичним сподіванням μ та дисперсією σ . Зображення шуму, розподіленого за Гаусом із $\mu = 0$ та $\sigma = 0.1$, відтворене на рис. 1, б.

На рис. 1, в наведена світлина з адитивним шумом, що складається з ідеального сигналу S_0 , рис. 1, а, та шуму, рис. 1, б, розподіленого за законом Гауса (1).

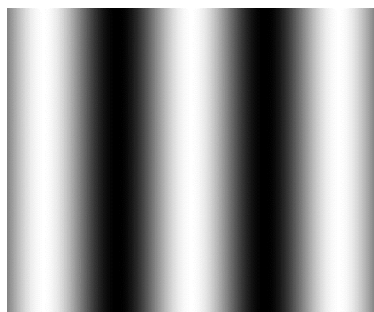
$$S(x_i, y_i) = S_0(x_i, y_i) + N(x_i, y_i)S_0(x_i, y_i).$$

Такі спотворення зображень можуть виникати, наприклад, через зміни характеристик ліній зв'язку, коефіцієнтів підсилення схем при коливаннях напруги живлення. Як приклад за $N(x_i, y_i)$ візьмемо сигнал, сформований генератором випадкової величини, що в Mathcad задається функцією $\text{RND}(x)$ і повертає випадкове число від 0 до x , (рис. 3, а).

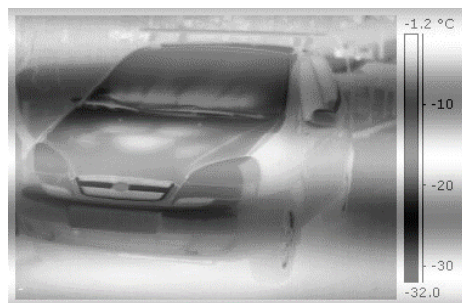
Якщо шум на зображенні поширений не по всій протяжності поля зображення, а тільки у ви-

падково розташованих точках, його називають імпульсним і описують формулою

$$S(x_i, y_i) = N(x_i, y_i) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} h(x_k, y_l) S_0(x_i - k, y_i - l) \cdot$$

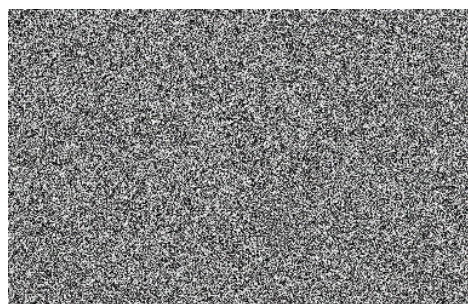


а)

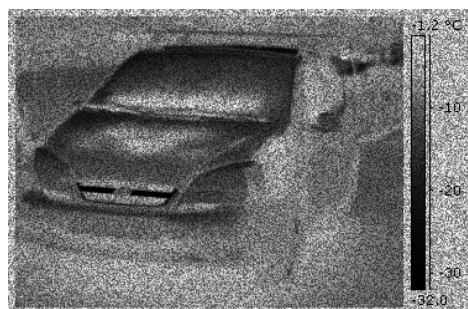


б)

Рис. 2. Зображення з шумом, що має періодичний закон розподілу інтенсивності пікселів, отримане в середовищі Mathcad: а) – шум з періодичним законом розподілу зображення, згенерований за формулою (2); б) – ідеальне зображення на рис. 1 (а) з накладеним на нього шумом за рис. 2 (а)



а)



б)

Рис. 3. Зображення з мультиплікативним шумом, отримане в середовищі Mathcad: а) – шум, згенерований генератором випадкової величини, що змінює своє значення від 0 до 2; б) – зображення рис. 1, а з мультиплікативним шумом рис. 3 (а)



а)



б)

Рис. 4. Зображення з шумом «сіль та перець» (а) та випадкові чорні та білі пікселі (б), відтворені в програмі Mathcad, кількість яких становить 10 % від загальної кількості пікселів зображення рис.1 (а)

Такий шум виникає в зображеннях за наявності швидких перехідних процесів, наприклад, при неправильній комутації. Для створення такого шуму в програмному середовищі Mathcad існує вбудована функція $\text{addnoise}(M, a, Na)$, що повертає матрицю інтенсивностей M , в якій у випадково обраних $(a/100)\%$ пікселів змінюють інтенсивність додаванням або відніманням числа "Na".

Фільтри зображень у програмному середовищі Mathcad

У програмному середовищі Mathcad фільтри 2D зображень викликаються за допомогою операції Insert Function в категорії Image Processing і представлені наступними вбудованими функціями:

1. $\text{medfilt}(M)$ – медіанний фільтр,
2. $\text{wiener2d}(M)$ – фільтр Вінера,

3. `gaussconv(M)` – фільтр Гауса,
4. `orthosmooth(M)` – фільтр з маскою 3x3,
5. `orthosmooth5(M)` – фільтр з маскою 5x5,
6. `centsmooth(M)` – згладжувальний фільтр.

Усі фільтри 1 - 6 застосовують згортку вхідного зображення та маски, які переважно формуються з «вікон» зображення розміром 3x3 або 5x5 (ядро згортки) і діють на значення пікселю вхідного зображення, що попадає у центр такого «вікна».

Функція `medfilt(M)` повертає матрицю M відфільтрованого зображення медіанним фільтром. Робота медіанного фільтра полягає в згортці матриці зображення з ядром згортки 3x3, в якому значення центрального пікселю змінюють його «медіанним» значенням, визначеним по 8-ми найближчим сусіднім пікселям («вікно» 3x3). Тобто, замість центрального пікселя «вікна» отримаємо середньозважене значення ряду при впорядкуванні 8-ми значень сусідніх пікселів [6, 11].

Функція `wiener2d(M,p,q)` повертає матрицю M відфільтрованого зображення фільтром Вінера, використовуючи «вікно» з максимальним значенням пікселю p і роздільною здатністю q . Технічно фільтр Вінера реалізується за допомогою дискретного перетворення Фур'є в частотній області відсіканням нижніх та високих частот, на яких найбільше реалізується шум.

Існує кілька можливих варіантів фільтрів Вінера. Той, що використовується в Mathcad, є 2D-адаптивною фільтрацією Вінера, запропонованою Лі в 1980 році [6], і полягає в заміні значення пікселя x в центрі «вікна» 3x3 вхідного зображення значенням y

$$y = \mu_x - (x - \mu_x) \frac{\sigma_x}{\sigma_x + \sigma_n},$$

де μ_x, σ_x – математичне сподівання та дисперсія околу пікселя x , σ_n – дисперсія адитивного шуму, оцінена за вхідним зображенням.

Функція `gaussconv(M)` повертає матрицю M відфільтрованого зображення фільтром Гауса. Цей фільтр проводить згортку зображення з Гаусовим ядром, що визначається формулою (1), в якій z – центральний піксель матриці 3x3, а μ_x, σ_x – його

математичне сподівання та дисперсія, визначена за значенням околу пікселя.

Робота фільтрів `orthosmooth(M)` та `orthosmooth5(M)` полягає в згортці матриці зображення з ядром згортки 3x3 (`orthosmooth(M)`) або 5x5 (`orthosmooth5(M)`), де ядра мають вигляд [6]:

$$K_3 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$K_5 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -4 & 2 & -1 \\ 1 & -4 & 13 & -4 & 1 \\ -1 & 2 & -4 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Робота фільтру `centsmooth(M)` полягає в згортці матриці зображення з ядром згортки 3x3 (`orthosmooth(M)`), де ядро має вигляд [4]

$$K = \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Оцінка статистичних метрик знешумлених зображень

Для кожного з типів шумів були змодельовані в програмному середовищі Mathcad спотворення ідеального зображення, рис. 1, а. Шуми призводять як до візуально спостережуваних недоліків, так і до зростання метрики MSE і зменшенню метрик PSNR, SSIM, CC (табл. 1-4).

За критеріями метрик MSE, PSNR та SSIM найкращим фільтром для шуму, розподіленого за Гаусом, є застосування маски 5x5 (3). Дійсно, згідно рис. 5, д – шуми зменшились, але впала чіткість цифр. Тоді, як візуально з рис. 5 випливає, що оптимальне зменшення шумів і, навіть, підвищення чіткості дає дія фільтру Вінера. Це підтверджується найбільшим значенням метрики CC (табл. 1) для цього фільтру порівняно з іншими.

Таблиця 1. Метрики зображення, що має шум, розподілений за законом Гауса (рис. 1, в) та знешумлений фільтрами, вбудованими в програмне середовище Mathcad (рис. 5, а)

Фільтри	MSE	PSNR	SSIM	CC
Без фільтру	1482	16.46	0.600	0.956
Медіанний	618	20.22	0.787	0.952
Вінера	1296	17.00	0.750	0.985
Гауса	658	19.95	0.812	0.963
З маскою 3x3	821	18.99	0.788	0.970
З маскою 5x5	554	20.70	0.823	0.955
Згладжувальний	710	19.62	0.787	0.962

Таблиця 2. Метрики зображення, що має шум, розподілений періодично за формулою (12), рис. 2, б та знешумлений фільтрами, вбудованими в програмне середовище Mathcad (рис. 5, б)

Фільтри	MSE	PSNR	SSIM	CC
Без фільтру	2912	13.49	0.854	0.636
Медіанний	3241	13.02	0.799	0.603
Вінера	3107	13.21	0.790	0.619
Гауса	3178	13.11	0.808	0.614
З маскою 3x3	3221	13.05	0.789	0.605
З маскою 5x5	3369	12.86	0.763	0.585
Згладжувальний	3260	13.00	0.778	0.60

Таблиця 3. Метрики зображення, що має мультиплікативний шум (рис. 3, б) та знешумлений фільтрами, вбудованими в програмне середовище Mathcad (рис. 5, в)

Фільтри	MSE	PSNR	SSIM	CC
Без фільтру	4652	11.45	0.196	0.785
Медіанний	3736	12.41	0.488	0.883
Вінера	3216	13.06	0.416	0.901
Гауса	3141	13.16	0.411	0.907
З маскою 3x3	2582	14.011	0.567	0.932
З маскою 5x5	3926	10.67	0.689	0.940
Згладжувальний	2713	13.80	0.580	0.929

Таблиця 4. Метрики зображення, що має шум - «сіль та перець» (рис. 4, а) та знешумлений фільтрами, вбудованими в програмне середовище Mathcad (рис. 5, г)

Фільтри	MSE	PSNR	SSIM	CC
Без фільтру	2194	14.72	0.708	0.786
Медіанний	401	22.10	0.906	0.952
Вінера	812	19.03	0.689	0.905
Гауса	560	20.65	0.646	0.937
З маскою 3x3	573	20.56	0.588	0.933
З маскою 5x5	548	20.74	0.706	0.940
Згладжувальний	597	20.37	0.59	0.930

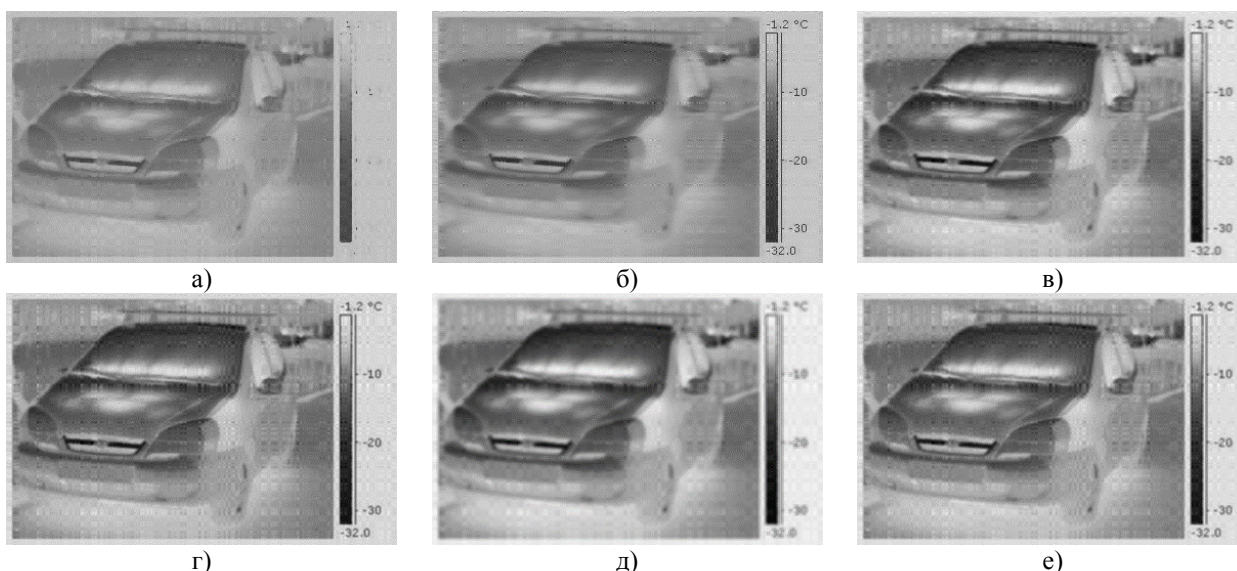


Рис. 5. Результат зменшення шумів, розподілених за законом Гауса, рис. 1 (в), після дії фільтрів: а) медіанного; б) Вінера; в) Гауса; г) з маскою 3x3; д) з маскою 5x5; е) згладжувального

Як бачимо з табл. 1, значення CC для маски 5x5 та медіанного фільтру є навіть меншими за значення для зашумленого зображення, що підтвер-

джується розмиттям на відповідних світлинах, рис. 5, а і рис. 5, д. Близькими за дією для зменшення шуму, розподіленого за Гаусом, згідно візуальному

спостереженню (рис. 5) та порівнянню метрик є застосування маски 3x3, фільтрів згладжувального та Гауса.

Як видно з табл. 2, метрики CC, PSNR, SSIM для зображення, що має шум, розподілений пері-

одично (рис. 2, б), мають більші значення, порівняно з метриками знешумлених зображень (рис. 6). Тому застосування фільтрів – медіанного, Вінера, Гауса та фільтрів з масками 3x3 й 5x5, для усунення такого типу шуму, є неефективними.

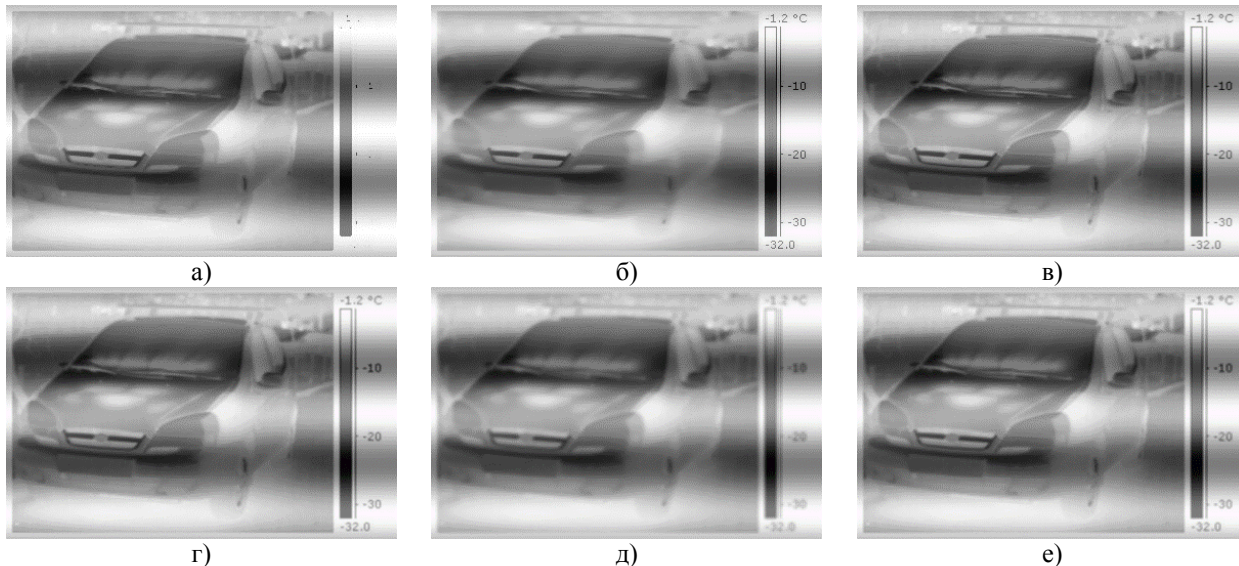


Рис. 6. Результат зменшення шумів, розподілених періодично за формулою (2), рис. 2, б, після дії фільтрів: а) медіанного; б) Вінера; в) Гауса; г) з маскою 3x3; д) з маскою 5x5; е) згладжувального

Порівняємо метрики відфільтрованих зображень, що відповідають мультиплікативному шуму, рис. 3, а, доданому до ідеального зображення рис. 1, а, з використанням генератора випадкової величини $RND(x)$

$$S = S_0 + RND(2)S_0,$$

де випадкова величина $RND(2)$ змінює своє значення від 0 до 2. Зауважимо, що досліджувані фільтри із фільтрацією зашумлення (рис. 7) такого типу справляються не дуже добре, про що свідчать (табл. 3), великі значення MSE і маленькі значення метрики CC порівняно з метриками для зображень, що мають шум, розподілений за законом Гауса (табл. 1).

За показниками MSE та PSNR найбільш ефективним для зменшення мультиплікативного шуму є згладжувальний фільтр, а за показниками SSIM та CC – фільтр з маскою 5x5. Однак, з візуального порівняння дії фільтрів (рис. 7), можна дійти висновку про зменшення чіткості цифр при дії медіанного фільтру (рис. 7, а) та маски 5x5 (рис. 7, д). Більш оптимальним як з візуального спостереження, так і з метрик табл. 3, є застосування для зменшення мультиплікативного шуму маски 3x3. Фільтри Гауса і Вінера дають середні статистичні показники і візуально мають схожі результати.

Імпульсний шум «сіль та перець» (рис. 4, а), як впливає з табл. 4, вельми ефективно усувається медіанним фільтром, тобто має найменше серед усіх значення MSE і найбільші інші

показники PSNR, SSIM та CC, що легко побачити й візуально, рис. 8, а. Але водночас чіткість цифр зникає. Найгіршим, за статистичними показниками табл. 4 є усунення шуму за допомогою фільтра Вінера, хоча саме цей фільтр крім усунення шумів, покращує чіткість цифр у зображенні.

Фільтри з масками 3x3 та 5x5, а також згладжувальний і Гауса мають майже однакові статистичні показники, хоча візуально дія маски 3x3, рис. 8, г, є кращою – зменшуються шуми і є чіткість цифр на відфільтрованому зображенні.

Висновки

Досліджено ефективність застосування цифрових фільтрів для зменшення шумів зображення тепловізійного каналу оглядових оптико-електронних пристроїв, які реалізуються вбудованими функціями в програмному середовищі Mathcad: `medfilt(M)`, `wiener2d(M)`, `gaussconv(M)`, `orthosmooth(M)`, `orthosmooth5(M)`, `centsmooth(M)`. Зіставляючи статистичні метрики MSE, PSNR, SSIM, CC відфільтрованих зображень, дійшли висновку, що зазначені вбудовані функції фільтрації

- 1) не рекомендується застосовувати для усунення періодичного шуму;
- 2) для усунення мультиплікативного шуму та шуму, розподіленого за законом Гауса ефективніше використовувати матричний фільтр з ядром згортки 3x3;
- 3) для усунення імпульсного шуму «сіль та перець» найефективнішим є медіанний фільтр.

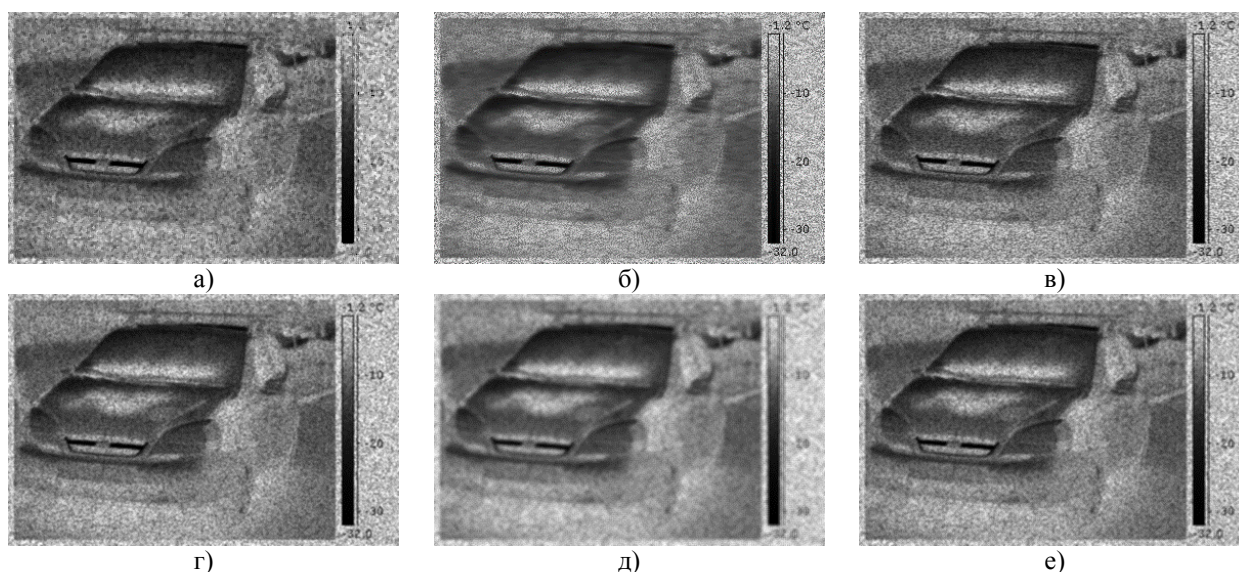


Рис. 7. Результат зменшення мультиплікативного шуму, рис. 3, б, після дії фільтрів: а) – медіанного; б) – Вінера; в) – Гауса; г) – з маскою 3x3; д) – маскою 5x5; е) – згладжувального

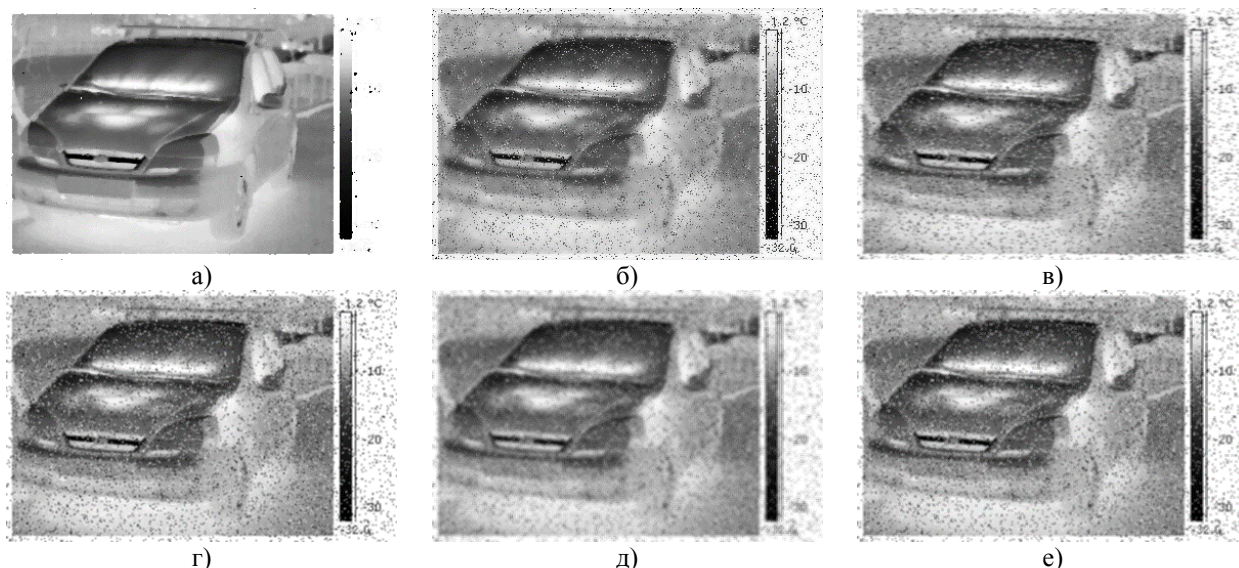


Рис. 8. Результат зменшення шуму типу- «сіль та перець», рис. 4, а після дії фільтрів: а) – медіанного; б) – Вінера; в) – Гауса; г) – з маскою 3x3; д) – маскою 5x5; е) – згладжувального

Виконані експериментальні дослідження дозволяють сформувавши практичні рекомендації по застосуванню цифрових фільтрів, але не дають можливості виявити природу відмінностей у їх ефективності. У подальшому планується створити математичну модель перетворення тепловізійних зображень при їх формуванні у приймачі випромінювання і при обробці в електронному блоку. Аналіз такої моделі в просторово-частотній області дозволить не тільки порівнювати існуючі цифрові фільтри, але й синтезувати нові фільтри, виходячи з конструктивних особливостей приймального блоку тепловізора.

Література

[1] G. C. Holst, *Electro-Optical Imaging System Performance*, Fifth Edition. JCD Publishing, 2008.

[2] М. М. Тарасов, Ю. Г. Якушенков, *Инфракрасные системы «смотрящего» типа*. Москва, Россия: Логос, 2004.

[3] В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, Є. Г. Балінський, *Ефективність інфрачервоних оптико-електронних систем спостереження*. Київ, Україна: Вік принт, 2017.

[4] Л. П. Ярославский, *Введение в цифровую обработку изображений*. Москва: Советское радио, 1979.

[5] *Infrared and electro-optical system handbook*. Ed. by J. S. Accetta, D. L. Shumaker. Bellingham, SPIE Press, 1993.

[6] В. Е. Кошелев, *Самоучитель Photoshop CS2*. Москва, Россия: Бином-Пресс, 2012.

[7] Н. В. Комолова, *Самоучитель CorelDRAW X4*. Москва, Россия: БХВ-Петербург, 2015.

- [8] Е. А. Курбатова, *MATLAB 7. Самоучитель*: Вильямс, 2005.
- [9] Ю. С. Магда, *LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков*. Москва, Россия: ДМК. Пресс, 2012.
- [10] About Image Processing Functions, PTC Mathcad Help [Электронный ресурс], Доступно: https://help.ptc.com/mathcad/en/index.html#page/PTC_Mathcad_Help%2Fabout_image_processing.html%23 - 05.06.2018.
- [11] Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс, *Цифровая обработка изображений в среде MATLAB*. Москва, Россия: Техносфера, 2006.
- [12] Ю. В. Визильтер, С. Ю. Желтов, В. А. Князь, А. Н. Ходарев, А. В. Моржин, *Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision*. Москва, Россия: ДМК Пресс, 2016.
- [13] В. Г. Колобродов, И. М. Костирко. «Методы уменьшения шумов изображений у тепловизорах з мікроболометричною матрицею» *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*. Серія Приладобудування, Вип. 47, С. 112-119, 2014.
- [14] R. H. Vollmerhausen, D. A. Reago, R. G. Driggers, *Analysis and evaluation of sampled imaging systems*. SPIE press, 2010.
- [15] J. C. Leachtenauer, R. G. Driggers, *Surveillance and Reconnaissance Systems: Modeling and Performance Prediction*. Artech House, Incorporated, 2001.
- [16] В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, М. С. Мамута, «Оцінка ефективності багатоканальних оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням інформації», *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, №6(86), с. 127 – 131, 2012.
- [17] В. Ю. Игнатъев, И. А. Матвеев, А. Б. Мурыннин, А. Н. Трекин, «Оценка качества изображений при повышении разрешения на основе пространственного спектрального синтеза», *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, № 1, с. 124-141, 2017.
- [18] П. Г. Доля, «Математические методы обработки изображений», *Харьковский национальный Университет*, с. 42, 2014.

УДК 681.7.013.8

Н. А. Балахонова, В. И. Микитенко, Р. А. Пашков*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина***СРАВНЕНИЕ КАЧЕСТВА РАБОТЫ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ШУМА ИЗОБРАЖЕНИЙ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КАНАЛА ОБЗОРНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

Оптико-электронные приборы дистанционного наблюдения приобретают все большее распространение в различных областях науки и техники. В связи со значительным удешевлением приемников излучения инфракрасного диапазона спектра в состав таких систем все чаще вводят тепловизионный канал. Он существенно повышает функциональные возможности всей системы наблюдения, позволяет работать без внешнего освещения и в дыму. Температурные контрасты на объекте часто выше, чем контрасты в видимом диапазоне спектра. Но чувствительность инфракрасных приемников излучения ниже. Поэтому тепловизионные изображения имеют небольшое отношение сигнал/шум. Обязательным этапом обработки сигнала в тепловизионном канале является уменьшение шумов. Стандартным способом повышения отношения сигнал/шум является применение цифровой фильтрации. Очевидным простым способом фильтрации является использование стандартных фильтров, которые были разработаны для обычных изображений видимого диапазона спектра. Но возникает вопрос эффективности применения таких фильтров для тепловизионных изображений. Исследована возможность применения стандартных цифровых фильтров для уменьшения шумов тепловизионных изображений. Фильтры реализуются встроенными функциями в программной среде Mathcad: medfilt (M), wiener2d (M), gaussconv (M), orthosmooth (M), orthosmooth5 (M), centsmooth (M). Для оценки эффективности использования фильтров на базе реального тепловизионного изображения рассчитаны статистические метрики MSE, PSNR, SSIM, CC. Рассматриваются отфильтрованные изображения при аддитивном, импульсном и мультипликативном типах шумов. Даны рекомендации по использованию рассмотренных цифровых фильтров при различных типах шумов. Ни один из рассмотренных фильтров не рекомендуется применять для устранения периодического шума. Для устранения импульсного шума «соль и перец» наиболее эффективным является медианный фильтр. Для устранения мультипликативного шума и шума, распределенного по закону Гаусса, эффективнее использовать матричный фильтр с ядром свертки 3x3. Выполненное сравнение работы фильтров может быть применено при проектировании адаптивных фильтров на микроконтроллерах для уменьшения шумов изображения тепловизионного канала обзорных оптико-электронных устройств.

Ключевые слова: тепловизор; цифровая обработка изображения; Mathcad; медианный фильтр; фильтр Винера; маска; вейвлет-преобразования Добеши; метрики: MSE, PSNR, SSIM, CC.

Volodymyr I. Mykytenko, Nataliia O. Balakhonova, Rostyslav A. Pashkov*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine***EVALUATION OF THE NOISE REDUCTION FILTERS FOR THERMAL IMAGING CHANNEL OF SURVEILLANCE OPTOELECTRONIC DEVICES**

Optoelectronic devices for remote sensing are becoming more common in various fields of science and technology. Taking into account significant reduction in the cost of infrared detectors, thermal imager is increasingly being introduced into the composition of such systems. It essentially increases the functionality of the entire surveillance system, and allows you to work without external lighting and in smoke. Temperature contrasts on an object are oftenly higher than contrasts in the visible range of the spectrum. But the sensitivity of infrared detectors is less than in visible range. Therefore, thermal images have a small signal-to-noise ratio. An obligatory stage of signal processing in a thermal imager is noise reduction. A standard way to increase the signal-to-noise ratio is to use digital filtering. An obvious simple filtering method is the use of standard filters that have been developed for conventional visible images. But there is a question of the effectiveness of the use of such filters for thermal imaging. The possibility of using standard digital filters to reduce the noise of thermal images is investigated. Filters are implemented by embedded functions in the Mathcad software environment: medfilt (M), wiener2d (M), gausconv (M), orthosmooth (M), orthosmooth5 (M), centsmooth (M). To evaluate the effectiveness of using filters based on real thermal imaging, statistical metrics MSE, PSNR, SSIM, CC were calculated. Filtered images with additive, pulsed and multiplicative types of noise are considered. Recommendations are given on the use of the considered digital filters for various types of noise. None of the considered filters is recommended to eliminate periodic noise. To eliminate the “salt and pepper” impulse noise, the median filter is most effective. To eliminate the multiplicative noise and noise distributed according to the Gauss law, it is more efficient to use a 3x3 convolution kernel filter. Comparison of filter operation can be applied when designing adaptive filters on microcontrollers to reduce image noise of a thermal imaging channel of surveillance optoelectronic devices.

Keywords: thermal imager; digital image processing; Mathcad; median filter; Wiener filter; mask; Daubechi wavelet transform; metrics: MSE, PSNR, SSIM, CC.

*Надійшла до редакції
22 березня 2019 року*

*Рецензовано
04 квітня 2019 року*

УДК 621.384.3

**ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА РЕГИСТРАЦИИ
ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ С БОЛЬШИМ ДИАПАЗОНОМ ЯРКОСТИ
НА МОДУЛЯЦИОННУЮ ПЕРЕДАТОЧНУЮ ФУНКЦИЮ
РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО ИЗОБРАЖЕНИЯ**

*Пивторак Д. А.**Национальный технический университет Украины**“Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”, Киев, Украина**E-mail: p_diana@i.ua*

Получено выражение для модуляционной передаточной функции результирующего изображения, сформированного с использованием комбинированного способа регистрации изображений объектов фотографирования с большим диапазоном яркости. Проанализировано влияние параметров процесса регистрации изображения комбинированным способом на модуляционной передаточной функции результирующего изображения. Выражение может быть использовано при проведении теоретических исследований влияния процесса комбинированного способа регистрации изображений на эффективность съёмки.

Ключевые слова: МПФ; динамический диапазон; изображение.

Введение

Для снижения потерь информации, вызванных несоответствием динамического диапазона входного сигнала (интервала яркости объектов

фотографирования) динамическому диапазону регистратора изображения, в современных фотокамерах широко используется предварительная пространственно-частотная фильтрация оптиче-