

**В.О. Павлій, викл.**

*Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба*

**О.М. Маковейчук, к.т.н.**

*Львівська філія Київського транспортного університету*

**Г.В. Худов, д.т.н., проф.**

*Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба*

## ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕФОКУСОВАНИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ЗОБРАЖЕНЬ ТА ЗОБРАЖЕНЬ, ЩО СПОТВОРЕНІ ЗМАЗОМ

*Проаналізовано відомі методи обробки оптико-електронних зображень в умовах дефокусування та змазу, наведено відомі показники оцінки якості обробки зображень. Запропоновано оцінку якості обробки оптико-електронних зображень проводити з використанням показників ефективності, які добре себе зарекомендували в теорії захисту від перешкод щодо радіолокаційних сигналів: коефіцієнт підперешкодової видимості та коефіцієнт придушення перешкоди. Отримані аналітичні вирази для указаних показників.*

**Ключові слова:** обробка зображень, дефокусоване зображення, змаз, ефективність відновлення, методи обробки, функція розмиття точки.

**Вступ. Постановка проблеми.** На сьогодні у системах обробки результатів вимірів при спостереженні та фіксації оптико-електронних зображень об'єктів актуальним є питання відновлення зображень при впливі різномірних спотворюючих факторів, таких, як адитивні та мультиплікативні перешкоди, різного роду шуми (імпульсний, гаусів), неправильна експозиція, дисторсія, поворот, зсув, зміна масштабу зображення та інші [1–5]. Найбільш складними для виправлення є спотворення оптико-електронних зображень, що зумовлені неоднорідністю атмосфери (для зображень, що отримані з літальних апаратів), розмиттям через неправильне фокусування та змаз, зумовлені рухом об'єкта або апаратури, що знімає [6–10].

**Мета статті.** Проаналізувати показники ефективності відновлення дефокусованих та оптико-електронних зображень та зображень, що спотворені змазом.

**Аналіз останніх досягнень та публікацій.** Відомо [1–5, 11], що модель процесу спотворення оптико-електронного зображення може бути представлена у наступному вигляді:

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + n(x, y) = \sum_{i=-a}^a \sum_{j=-b}^b h(i, j) f(x+i, y+j) + n(x, y), \quad (1)$$

де  $f(x, y)$  – вихідне неспотворене зображення;  $h(x, y)$  – спотворююча функція;  $n(x, y)$  – адитивний шум;  $g(x, y)$  – спотворене зображення (розфокусоване або змазане);  $a = \frac{M-1}{2}$ ,  $b = \frac{N-1}{2}$ ;

( $M \times N$ ) – розмір зображення; \* – оператор звертання.

Задача відновлення вихідного зображення полягає в отриманні функції  $f(x, y)$  з функції  $g(x, y)$ . Якщо знаходити розв'язок рівняння (1), то для отримання функції  $f(x, y)$  (відновлення зображення) необхідно сформулювати велику систему рівнянь [11]. Для спрощення процедури відновлення використовують перетворення Фур'є [1, 5], а саме:

$$h(x, y) * f(x, y) = H(u, v)F(u, v), \quad (2)$$

де  $H(u, v)$ ,  $F(u, v)$  – Фур'є-образи відповідних функцій.

З урахуванням (1) та (2) процес спотворення зображення можна переписати у частотній області таким чином:

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v). \quad (3)$$

Для отримання функції  $F(u, v)$  з (3) розділимо обидві його частини на  $H(u, v)$  та отримаємо наступну оцінку  $\hat{F}(u, v)$  вихідного зображення:

$$\hat{F}(u, v) = F(u, v) + \frac{N(u, v)}{H(u, v)}. \quad (4)$$

Вираз (4) визначає інверсну фільтрацію спотвореного зображення. Однак на практиці інверсна фільтрація не використовується через великі значення функції  $H(u, v)$  [11]. Відповідно, інверсна фільтрація використовується лише за нульових або практично нульових значеннях шуму. Додавання навіть незначного значення шуму призводить до значних перешкод на зображенні, що сильно обмежує практичне використання методу інверсної фільтрації зображення [5, 11].

Одним з відомих методів відновлення зображення, що спотворене змазом, який враховує наявність шуму, є фільтр Вінера [1–5, 11]. У вказаному фільтрі знаходиться така оцінка  $r(x, y)$  для неспотвореного зображення  $f(x, y)$ , що середньоквадратичне відхилення цих величин мінімально. Мінімум цього відхилення досягається і в частотній області при

$$\hat{F}(u, v) = \left( \frac{|H(u, v)|^2}{H(u, v)(|H(u, v)|^2 + \frac{S_n(u, v)}{S_f(u, v)})} \right) G(u, v), \quad (5)$$

де  $S_n(u, v)$  – енергетичний спектр шуму  $n(x, y)$ ;  $S_f(u, v)$  – енергетичний спектр вихідного зображення  $f(x, y)$ .

Функції  $S_n(u, v)$  та  $S_f(u, v)$  практично ніколи не відомі, тому їх відношення замінюють на константу, що називається відношенням сигнал/шум [1–5, 11].

Наступним відомим методом відновлення зображень, що спотворені неправильним фокусуванням та змазом, є фільтрація методом найменших квадратів або регуляризація за Тихоновим [11]. При цьому рішенні має такий вигляд:

$$\hat{F}(u, v) = \left( \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \gamma |P(u, v)|^2} \right) G(u, v),$$

де  $\gamma$  – параметр регуляризації;  $P(u, v)$  – Фурьє-перетворення оператора Лапласа (матриці  $(3 \times 3)$ ).

Відомі методи відновлення зображень, що розглянуті вище, є лінійними. Нелінійним методом відновлення зображень, що спотворені неправильним фокусуванням та змазом, є метод Люсі–Річардсона [1]. Особливістю методу є використання ітераційних процедур, що може покращити якість відновленого зображення. При цьому використовується метод максимальної правдоподібності при допущенні, що яскравість зображення розподілена за законом Пуасона [9, 11]. Вираз для відновленого зображення має такий вигляд [11]:

$$r_{k+1}(x, y) = r_k(x, y) \left( h(-x, -y) * \frac{g(x, y)}{h(x, y) * r(x, y)} \right). \quad (6)$$

Однак при використанні методу Люсі–Річардсона складнощі виникають з вибором критерію зупинки ітераційного процесу, що може призвести до зростання часу обробки спотвореного зображення [11].

При розгляді усіх наведених вище методів функція спотворення точки точно відома [11]. Але на практиці функція спотворення точки відома лише приблизно за характером видимих спотворень [1, 5]. Для обробки зображень у випадку невідомої функції спотворення точки розроблений ряд методів, що називаються сліпою деконволюцією [1, 11]. При цьому обирається перше приближення функції розмиття точки, далі за одним з методів проводиться деконволюція, після чого уточнюється функція розмиття точки, і ітерація повторюється до досягнення необхідного результату [11].

В роботі [1] запропоновано алгоритми відновлення зображення, що спотворено змазом, коли ані само неспотворене зображення, ані функція розмиття точки невідомі. Встановлено, що у такій постановці задачі не вдається в загальному вигляді створити стійкий алгоритм, що сходиться, відновлення зображення, що спотворене змазом [11]. В [1] показано, що для багатьох практичних випадків задача вирішується [1, 11]. Сутність обробки при цьому полягає у виділенні неостаточної, але неспотвореної інформації та відновлення за ній зображення. В [1] встановлено, що фаза спектра неспотвореного зображення збігається з фазою спектра спотвореного зображення. Також встановлено [1] неспотворене відношення модулів спектрів спотвореного та неспотвореного зображення [1]. У цьому випадку завдання відновлення зображення, що спотворене, наприклад Гаусовим змазом, переформульована в завдання

відновлення неспотвореного зображення тільки за фазою його спектра і по відношенню модулів спектрів спотвореного та неспотвореного зображень [1, 11].

Проаналізуємо основні показники якості відновлення оптико-електронних зображень при використанні відомих методів їх обробки.

**Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження.** Відомо [1–5, 12–16], що ефективність використання методик обробки оптико-електронних зображень залежить від великої кількості параметрів, які, в більшості випадків, обираються емпірично. При цьому суб'єктивні оцінки є не завжди задовільними, оскільки в результаті обробки можуть маскуватися важливі особливості зображення та, навпаки, привноситися артефакти [17].

У відомій літературі [1–5, 12–17] запропоновано наступні міри якості обробки зображення, які визначаються як відстань у деякій метриці між вихідним  $g(x, y)$  та відновленим  $r(x, y)$  зображенням розміром  $(M \times N)$ .

1. Середня різниця:

$$AD = \frac{1}{MN} \sum_x \sum_y |r(x, y) - g(x, y)|. \quad (7)$$

2. Нормована кореляція:

$$NCC = \frac{\sum_x \sum_y r(x, y)g(x, y)}{\sqrt{\sum_x \sum_y [r(x, y)]^2}}. \quad (8)$$

3. Якість кореляції:

$$CQ = \frac{\sum_x \sum_y r(x, y)g(x, y)}{\sum_x \sum_y r(x, y)}. \quad (9)$$

4. Вірність зображення:

$$IF = 1 - \frac{\sum_x \sum_y |r(x, y) - g(x, y)|^2}{\sum_x \sum_y |r(x, y)|^2}. \quad (10)$$

5. Максимальна різниця:

$$MD = \max_{x, y} |r(x, y) - g(x, y)|. \quad (11)$$

6. Середньоквадратична лапласіанова похибка:

$$LMSE = \frac{\sum_x \sum_y [r(x, y) - g(x, y)] * L}{\sum_x \sum_y [(r(x, y) * L)^2]}, \quad (12)$$

де  $L = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$  – дискретний (3 x 3) оператор Лапласа.

7. Середньоквадратична похибка:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_x \sum_y |r(x, y) - g(x, y)|^2. \quad (13)$$

8. Максимальна середньоквадратична похибка:

$$PMSE = \frac{\frac{1}{MN} \sum_x \sum_y [r(x, y) - g(x, y)]^2}{\left[ \max_{x, y} r(x, y) \right]^2}. \quad (14)$$

9. Нормована абсолютна похибка:

$$NAE = \frac{\sum_x \sum_y |r(x, y) - g(x, y)|}{\sum_x \sum_y |r(x, y)|}. \quad (15)$$

10. Нормована середньоквадратична похибка:

$$NMSE = \frac{\sum_x \sum_y \mathbf{I}(x, y) - g(x, y)_{-}^2}{\sum_x \sum_y \mathbf{I}(x, y)_{-}^2} = 1 - IF. \quad (16)$$

11. Норма Мінковського:

$$L_p = \left\{ \frac{1}{MN} \sum_x \sum_y |r(x, y) - g(x, y)|^p \right\}^{\frac{1}{p}}, \quad (17)$$

де параметр  $p$  визначає відносну значимість похибки при різних значеннях яскравості.

Частіше використовуються наступні норми Мінковського:

$L_1$  – середнє абсолютне відхилення;

$L_2$  – середнє квадратичне відхилення;

$L_\infty$  – максимальне абсолютне відхилення.

12. Відношення сигнал/шум:

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\sum_x \sum_y \mathbf{I}(x, y)_{-}^2}{\sum_x \sum_y \mathbf{I}(x, y) - g(x, y)_{-}^2}. \quad (18)$$

13. Максимальне відношення сигнал/шум:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{\left[ \max_{x,y} r(x, y) \right]^2}{\frac{1}{MN} \sum_x \sum_y \mathbf{I}(x, y) - g(x, y)_{-}^2}. \quad (19)$$

Оцінки якості, що представлені виразами (7)–(19), зручні для використання, але вони не завжди об'єктивно дозволяють оцінити якість обробки зображення в умовах впливу перешкод, турбулентності атмосфери, дефокусування та змазу, особливо з точки зору візуального сприйняття зображення. Основним недоліком розглянутих показників є некоректна оцінка якості спотворених зображень [17].

Також використовуються інформаційні міри якості [18–20].

1. Дисперсія зображення:

$$D = \frac{1}{MN} \sum_x \sum_y \mathbf{I}(x, y) - \bar{r}_{-}^2, \quad (20)$$

де  $\bar{r} = \langle r \rangle$  – середнє значення  $r(x, y)$ .

2. Ентропія зображення:

$$H = - \sum_c p_c \log_2 p_c, \quad (21)$$

де  $p_c$  – імовірність появи в зображенні кольору  $c$ , що розраховується за гистограмою

$$p = \frac{1}{MN} \text{hist}(r).$$

3. Ентропія джерела:

$$H = - \sum_x \sum_y r(x, y) \log_2 r(x, y), \quad (22)$$

де  $r(x, y) \in [0-1]$ .

Параметри обробки зображення обираються за максимумом міри якості відновленого зображення, що визначаються виразами (20)–(22).

На сьогодні завдання обробки оптико-електронних зображень при впливі перешкод, дефокусуванні, змазі не ставиться та не вирішується у прямій постановці як загальна задача покращення якості зображення шляхом його відновлення. Тому в завданнях обробки зображень відсутні такі поняття, як «захист від перешкод», «показники якості захисту від перешкод».

Введемо і в подальшому будемо використовувати показники якості обробки оптико-електронних зображень в умовах дефокусування та змазу, що розроблені для випадку адитивних перешкод для часових (одномірних) сигналів. За показники ефективності оберемо ті, що добре себе зарекомендували в теорії захисту від перешкод щодо радіолокаційних сигналів: коефіцієнт підперешкодової видимості та коефіцієнт придушення перешкоди [17, 21].

Дамо трактовку указаних показників. Для цього введемо додатково позначення:

$g_1$  – неспотворена область зображення  $g$  ;

$g_2$  – спотворена область зображення  $g$  ;

$r_1$  – результат відновлення неспотвореної області. Враховуючи те, що при обробці неспотворена область незмінна, то  $r_1 \approx g_1$  ;

$r_2$  – результат відновлення спотвореної області.

Відомо [21], що коефіцієнт підперешкодової видимості  $K_{i\bar{a}}$  визначається як

$$K_{i\bar{a}} = \left( \frac{P_c}{P_i} \right)_{\bar{a}\bar{e}\bar{o}} : \left( \frac{P_c}{P_i} \right)_{\bar{a}\bar{o}}, \quad (23)$$

де  $P_c$  – потужність сигналу;  $P_i$  – потужність перешкоди.

Як зазначено у [21], еквівалентне відношення сигнал/перешкода для перешкоди  $s$  визначається тільки середнім значенням  $\langle s \rangle$  и дисперсією  $D(s)$  процесу, що характеризує перешкоду:

$$\frac{P_c}{P_i} = \frac{\langle s \rangle^2}{D(s)}. \quad (24)$$

Таким чином (23) з урахуванням (18) можна представити у вигляді:

$$K_{i\bar{a}} = \frac{\langle s_1 \rangle^2}{D(s_1)} : \frac{\langle s_2 \rangle^2}{D(s_2)}, \quad (25)$$

де прийнято, що

$$\left( \frac{P_c}{P_i} \right)_{\bar{a}\bar{e}\bar{o}} = \frac{\langle s_1 \rangle^2}{D(s_1)}, \quad \left( \frac{P_c}{P_i} \right)_{\bar{a}\bar{o}} = \frac{\langle s_2 \rangle^2}{D(s_2)}$$

та визначено  $s_1 = \frac{r_1}{g_1}$ ,  $s_2 = \frac{r_2}{g_2}$  – значення перешкоди для спотвореної та неспотвореної областей відповідно.

Відповідно коефіцієнт придушення перешкоди  $K_{ii}$  визначається як [21]:

$$K_{ii} = \frac{\left( \frac{P_i}{P_c} \right)_{\bar{a}\bar{e}\bar{o}}}{\left( \frac{P_i}{P_c} \right)_{\bar{a}\bar{o}}}. \quad (25)$$

Щодо обробки оптико-електронних зображень вираз [25] може бути записаний у вигляді:

$$K_{ii} = \frac{\langle s_2 \rangle}{\langle s_1 \rangle}. \quad (26)$$

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Таким чином, в роботі проаналізовано відомі методи обробки оптико-електронних зображень в умовах дефокусування та змазу, наведені відомі показники оцінки якості обробки зображень. Запропоновано оцінку якості обробки оптико-електронних зображень оцінювати з використанням показників ефективності, які добре себе зарекомендували в теорії захисту від перешкод щодо радіолокаційних сигналів: коефіцієнт підперешкодової видимості та коефіцієнт придушення перешкоди. Отримані аналітичні вирази для указаних показників.

Напрямок подальших досліджень є оцінка введених показників за результатами обробки модельних (фантомів) та реальних оптико-електронних зображень при їх дефокусуванні та змазуванні.

**Список використаної літератури:**

1. Новейшие методы обработки изображений / *А.А. Потапов, Ю.В. Гуляев, С.А. Микитов* и др. ; под ред. *А.А. Потапова*. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 456 с.
2. *Оптенгейм А.В.* Цифровая обработка сигналов / *А.В. Оптенгейм, Р.В. Шафер*. ; пер. с англ. ; под ред. *С.Я. Шаца*. – М. : Связь, 1979. – 416 с.
3. *Бейтс Р.* Восстановление и реконструкция изображений / *Р.Бейтс, М.Мак-Доннелл* ; пер. с англ. – М. : Мир, 1989. – 336 с.
4. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. *В.А. Соифера*. – 2-е изд., испр. – М. : Физматлит, 2003. – 784 с.
5. *Гонсалес Р.* Цифровая обработка изображений / *Р.Гонсалес, Р.Вудс*. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
6. *Егошкин Н.А.* Коррекция смаза изображений в системах космического наблюдения Земли / *Н.А. Егошкин, В.В. Еремеев* // Цифровая обработка сигналов. – 2010. – № 4. – С. 28–32.
7. *Воскобойников Ю.Е.* Устойчивый алгоритм восстановления изображения при неточно заданной аппаратной функции / *Ю.Е. Воскобойников, В.А. Литасов* // Автометрия. – 2006. – Т. 43. – № 6. – С. 3–15.
8. *Rees W.G.* Physical Principles of Remote sensing / *W.G. Rees*. – Cambridge University Press, 2012. – 530 p.
9. Внешний масштаб динамической турбулентности по результатам акустического зондирования атмосферы / *О.Ф. Капегешева, Н.П. Красненко, П.Г. Стафеев* и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26. – № 11. – С. 964–968.
10. *Жуков Б.С.* Анализ точности пространственно-частотных методов коррекции смаза космических изображений / *Б.С. Жуков* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – № 3. – С. 94–105.
11. *Павлий В.А.* Анализ известных методов восстановления оптико-электронных изображений, искаженных смазом / *В.А. Павлий, Г.В. Худов* // Системи оборобки інформації. – Х. : ХУПС, 2013. – Вип. 6 (113). – С. 118–121.
12. *Прэнт У.* Цифровая обработка изображений / *У.Прэнт*. – М. : Мир, 1982. – Кн. 2. – 480 с.
13. *Воробель Р.А.* Повышение контраста изображений с помощью модифицированного метода кусочного растяжения / *Р.А. Воробель, И.М. Журавель* // Отбор и обработка информации. – 2000. – № 14 (90). – С. 116–121.
14. *Журавель И.М.* Локально-адаптивні методи підвищення контрастності зображень / *Ігор Миколайович Журавель* : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06. – Львів, 2001. – 154 с.
15. *Ярославский Л.П.* Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии : Введение в цифровую оптику / *Л.П.Ярославский*. – М. : Радио и связь, 1987. – 296 с.
16. *Land E.* An alternative technique for the computation of the designator in the retinex theory of color vision? / *E.Land* // Proc. Nat. Acad. Sci. – 1986. – Vol. 83. – Pp. 3078–3080.
17. *Маковейчук О.М.* Оцінка коефіцієнта використання енергії при захисті видових зображень від маскуючих перешкод штучного походження / *О.М. Маковейчук, Г.В. Худов* // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Х. : ХУПС, 2010. – № 2 (4). – С. 75–77.
18. *Теребиж В.Ю.* Восстановление изображений при минимальной априорной информации / *В.Ю. Теребиж* // УФН. – 1995. – Т. 165. – № 2. – С. 165–176.
19. *Шлихт Г.Ю.* Цифровая обработка цветных изображений / *Г.Ю. Шлихт*. – М. : Издательство ЭКОМ, 1997. – 336 с.
20. *Маковейчук О.М.* Об'єктивна оцінка якості обробки зображень / *О.М. Маковейчук* // Системи озброєння і військова техніка. – Х. : ХУПС, 2008. – № 3 (15). – С. 135–137.
21. *Харкевич А.А.* Борьба с помехами / *А.А. Харкевич*. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Наука, 1965. – 276 с.

ПАВЛІЙ Владислав Олександрович – викладач кафедри Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба.

Наукові інтереси:

- обробка оптико-електронних зображень;
- дешифрування зображень, отриманих з борта літальних апаратів.

МАКОВЕЙЧУК Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри Львівської філії Київського транспортного університету.

Наукові інтереси:

- обробка оптико-електронних зображень;
- дешифрування зображень, отриманих з борта літальних апаратів.

ХУДОВ Геннадій Володимирович – доктор технічних наук, професор, начальник кафедри Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба.

Наукові інтереси:

- обробка оптико-електронних зображень;
- дешифрування зображень, отриманих з борта літальних апаратів.

Стаття надійшла до редакції 12.08.2013

**Павлій В.О., Маковейчук О.М., Худов Г.В.** Показники ефективності відновлення дефокусованих оптико-електронних зображень та зображень, що спотворені смазом.

**Павлий В.А., Маковейчук А.Н., Худов Г.В.** Показатели эффективности восстановления дефокусированных оптико-электронных изображений и изображений, искаженных смазом.

**Pavliy V.A., Makovejchuk A.N., Hudov G.V.** Indexes of efficiency of restoration refocusing optiko-electronic images and the images deformed by smearing  
смазом.

#### **УДК 623.618.2**

**Показатели эффективности восстановления дефокусированных оптико-электронных изображений и изображений, искаженных.**

В статье проанализированы известные методы обработки оптико-электронных изображений в условиях дефокусирования и смаза, приведены известные показатели оценки качества обработки изображений. Предложено оценку качества обработки оптико-электронных изображений проводить с использованием показателей эффективности, которые хорошо себя зарекомендовали в теории защиты от помех для радиолокационных сигналов: коэффициент подпомеховой видимости и коэффициент подавления помехи. Получены аналитические выражения для указанных показателей.

Ключевые слова: обработка изображений, дефокусированное изображение, смаз, эффективность восстановления, методы обработки, функция размытия точки

#### **УДК 623.618.2**

**Indexes of efficiency of restoration refocusing optiko-electronic images and the images deformed by smearing**

In article known methods of handling of optical-electronic images in conditions refocusing are analyzed and smearing, known indexes of an estimation of quality of image processing are resulted. It is offered to lead an estimation of quality of handling of optical-electronic images with usage of indexes of efficiency which well recommended itself in the theory of protection against noises for radar-tracking signals: index of noise visibilities and coefficient of suppression of a noise. Analytical expressions for the specified indexes are received.

Keywords: image processing, the refocusing image, smearing, efficiency of recovery, handling methods, function of blur of a point.