

УДК 623.618.2

В.О. Павлій

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## МЕТОДИ «НЕСЛІПОЇ» ДЕКОНВОЛЮЦІЇ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ЗОБРАЖЕНЬ В УМОВАХ РОЗФОКУСУВАННЯ ТА ЗМАЗУВАННЯ

У статті проаналізовано методи відновлення оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазування при відомій функції розміття точки. Наведені переваги та недоліки відомих методів обробки оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазування.

**Ключові слова:** оптико електронне зображення, розфокусування, змазування, інтегральне рівняння, відновлення зображення.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Сучасний стан теорії обробки оптико-електронних зображень характеризується подальшим розвитком та удосконаленням статистичних методів, а також використанням нових фізичних ідей та широким застосуванням нестандартних розділів математики [1 – 6]. Найбільш актуальною є задача обробки оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазування [1 – 6]. Така задача виникає при спостереженні та реєстрації практичного любого типу зображення, починаючи від спотворених зображень, що отримуються з борту літального апарату, закінчуючи обробкою фотографічних знімків. Вирішенню такої задачі присвячено велика кількість робіт, що відрізняються постановкою задачі, видом функції розміття точки (ФРТ), вибором критерію та показників ефективності обробки зображень [1 – 7].

**Мета статті:** провести аналіз методів «несліпої» деконволюції оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазування.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Відомі методи обробки оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазування поділяються на [2, 5 – 7]:

- методи «несліпої» деконволюції, коли відома ФРТ;
- методи сліпої деконволюції, при невідомій ФРТ.

При «несліпої» деконволюції ФРТ відома, задача полягає у відновленні зображення по відомій ФРТ [5 – 7]. Приклади визначення та оцінки ФРТ наведені в роботах [8, 9].

### Виклад основного матеріалу

Загальним методом відновлення оптико-електронних зображень в умовах змазування є метод з використанням інтегральних рівнянь [10]. При цьому ставиться задача відновлення зображення  $w(x, y)$  по зображенню  $g(x, y)$ , що є змазаним, з урахуванням величини та напрямку змазування  $\Delta$ .

Схема формування зображення в умовах змазування наведена на рис. 1 [10].

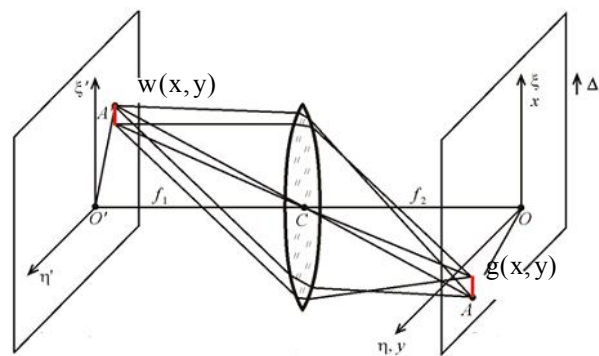


Рис. 1. Схема формування зображення в умовах змазування [10]

Відновлення зображення визначається набором нестандартних одномірних інтегральних рівнянь (ІР) Вольєрра I роду [5, 10 – 12]:

$$\frac{1}{\Delta} \int_x^{x+\Delta} w_y(\xi) d\xi = g_y(x) + \delta g, \quad (1)$$

або набором стандартних одномірних ІР Фредгольма I роду типу згортки [5, 10 – 12]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(x - \xi) w_y(\xi) d\xi = g_y(x) + \delta g, \quad (2)$$

або одним двомірним ІР Фредгольма I роду типу згортки [2, 10, 13]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x - \xi, y - \eta) w(\xi, \eta) d\xi d\eta = g(x, y) + \delta g. \quad (3)$$

В рівняннях (1 – 3):

- $h(x)$  - ФРТ, що визначається виразом (4):

$$h(x) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta}, & \text{при } -\Delta \leq x \leq 0; \\ 0, & \text{в інших випадках;} \end{cases} \quad (4)$$

–  $w(x, y)$ ,  $g(x, y)$  – інтенсивності яскравості на неспотвореному та спотвореному зображеннях відповідно;

- $\delta g$  – шум.

У виразах (1) та (2) вісь  $x$  направлена вздовж напрямку змазування, а  $y$  – параметр. Рівняння (1), (2) використовуються при вирішенні задачі змазування, а (3) – в задачі розфокусування, але часто (3) використовується для вирішення обох задач. В (1) перед інтегралом поставлено множник  $\frac{1}{\Delta}$  для того, щоб при  $\Delta \rightarrow 0$  та  $\delta g \rightarrow 0$  (при відсутності змазування та шуму)  $w_y(x) \leftrightarrow g_y(x)$ . Задача вирішення IP (1)–(3) є некоректною (нестійкою) [14].

Таким чином, задача відновлення зображення зводиться до рішення множини одномірних IP Фредгольма (2) при кожному значенні  $y$  (в кожній строчці зображення). Кількість рівнянь, що необхідно вирішити, визначається кількістю строк зображення.

У відомому методі інверсної фільтрації [2, 10] рішення IP, що визначає розподіл інтенсивності яскравості на неспотвореному зображенні  $w(x, y)$ , записується у вигляді зворотного перетворення Фур'є [2, 10]:

$$w_y(\zeta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_y(w)}{H(w)} e^{-jw\zeta} dw; \quad (5)$$

$$G_y(w) = \int_{-\infty}^{\infty} g_y(x) e^{jwx} dx; \quad (6)$$

$$H(w) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x) e^{jwx} dx, \quad (7)$$

де  $G_y(w)$ ,  $H(w)$  – перетворення Фур'є (спектри) від  $g_y(x)$  та  $h(x)$ .

Однак на практиці інверсна фільтрація не застосовується із-за великих значень функції  $H(w)$ . Відповідно, інверсна фільтрація може використовуватися лише при нульових або практично нульових значеннях шуму. Додаток лише невеликого шуму призведе до значних завад на зображенні, що сильно обмежує практичне використання методу інверсної фільтрації [7]. Таким чином, метод інверсної фільтрації є нестійким. Нестійким є також і метод псевдоінверсної фільтрації, в якому значення

$$w(x, y) \in [-w_{\max}, w_{\max}].$$

Стійке рішення IP (2) дає метод перетворення Фур'є з регуляризациєю Тіхонова [10, 14]:

$$w_{\alpha y}(\zeta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{H^*(w)G_y(w)}{|H(w)|^2 + \alpha w^{2p}} e^{-jw\zeta} dw, \quad (10)$$

де  $\alpha > 0$  – параметр регуляризації;

$p \geq 0$  – порядок регуляризації.

При комп'ютерній реалізації в методі перетворення Фур'є з регуляризациєю Тіхонова замість пере-

творення Фур'є (8) використовують дискретні та швидкі перетворення Фур'є [10]. В роботі [10] метод перетворення Фур'є з регуляризациєю Тіхонова в дискретному вигляді запропоновано реалізовувати у наступних варіантах:

- варіант 1. Використовується усічене змазане зображення розміром  $(m \times (n-\Delta))$ , де  $(m \times n)$  – розмір вихідного змазаного зображення  $g(x, y)$ . Це дозволяє уникнути використання «граничних умов»;
- варіант 2. Використовується усічене змазане зображення з розмиттям країв розміром  $(m \times (n + \Delta))$ . Розмиття країв дозволяє знизити ефект Гіббса.

Метод параметричної фільтрації Вінера відновлення зображення в умовах змазування також використовує перетворення Фур'є [10]:

$$w_{Ky}(\zeta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{H^*(w)G_y(w)}{|H(w)|^2 + K} e^{-jw\zeta} dw, \quad (9)$$

де  $K \geq 0$  – константа (параметр) – оцінка відношення енергетичних спектрів сигнал/шум.

Однак метод перетворення Фур'є з регуляризациєю Тіхонова (8) та метод параметричної фільтрації Вінера (9) відновлення зображення в умовах змазування не зовсім адекватно описують фізичний процес змазування зображення: використовуються операції додавання, експоненти, косінус, синус, множення, ділення. Це веде до розузгодження задачі відновлення, до зниження швидкості сходження до точного рішення і до підвищення погрішності віжновлення зображення (наприклад, до ефекту Гіббса).

Метод кінцевих сум (метод квадратур) з регуляризациєю Тіхонова відновлення зображення в умовах змазування є алгебраїчним методом та використовує лише алгебраїчні операції. В цьому методі розглядається IP (10)

$$Aw_y = \int_a^b h(x, \xi) w_y(\xi) d\xi = g_y(x), \quad (10)$$

в якому інтеграл при кожному  $x$  замінюється кінцевою сумою та утворюється система лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) при кожному  $y$ :

$$Aw_y = g_y. \quad (11)$$

При цьому розглядаються три варіанта кінцевих сум:

- схема з усіченням зображення  $g$  (неовизначена СЛАР);
- схема з розмиттям країв зображення  $g$  (перевизначена СЛАР);
- схема подвійного усічення зображень  $g$  та  $w$ .

При всіх варіантах рішення СЛАР методом регуляризації Тіхонова є [10, 14]:

$$w_{\alpha y} = (\alpha E + A^T A)^{-1} A^T g_y, \quad (12)$$

де  $E$  – одинична матриця;  $A^T$  – транспонована матриця.

В роботі [10] показано, що при правильно підібраним параметрі регуляризації  $\alpha$  схема з розмиттям країв зображення  $g$  (перевизначена СЛАР) дає найкраще відновлення зображення.

Методи відновлення зображення в умовах розфокусування зводяться до вирішення двомірного IP Фредгольма I роду типу згортки (3), якщо ФРТ просторово-інваріантна:  $h = h(x - \xi, y - \eta)$  [10]. Найбільш розповсюджені методи рішення рівняння (3) – методи інверсної та псевдоінверсної фільтрації, оптимальної та параметричної фільтрації Вінера, регуляризації Тіхонова. Ці методи використовують двомірне перетворення Фур'є. При використанні метода регуляризації Тіхонова рішення IP (3) представляє вираз (13):

$$w_\alpha(\xi, \eta) = 1 / (4\pi^2) \times \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \frac{H^*(w_1, w_2)G(w_1, w_2)}{|H(w_1, w_2)|^2 + \alpha(w_1^2 + w_2^2)^p} e^{-j(w_1\xi + w_2\eta)} dw_1 dw_2, \quad (13)$$

$$\text{де } G(w_1, w_2) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{-j(w_1x + w_2y)} dx dy;$$

$$H(w_1, w_2) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} h(x, y) e^{-j(w_1x + w_2y)} dx dy.$$

При використанні методу параметричної фільтрації Вінера рішення IP (3) представляє вигляд (14):

$$w_K(\xi, \eta) = 1 / (4\pi^2) \times \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \frac{H^*(w_1, w_2)G(w_1, w_2)}{|H(w_1, w_2)|^2 + K} e^{-j(w_1\xi + w_2\eta)} dw_1 dw_2. \quad (14)$$

Якість відновлення оптико-електронного зображення в умовах розфокусування та змазування при використанні методу регуляризації Тіхонова і метода параметричної фільтрації Вінера визначається вибором параметрів  $\alpha$  та  $K$ . Існує декілька способів вибору параметра  $\alpha$  [10, 14]:

– спосіб, заснований на візуальній оцінці відновленого зображення  $w_\alpha$ ;

– спосіб, заснований на використанні відносної середньоквадратичної погрішності відновлення зображення:

$$\sigma_{rel}(\alpha) = \|w_\alpha - \bar{w}\|_{L_2} / \|\bar{w}\|_{L_2}, \quad (15)$$

де  $\bar{w}$  – точне зображення (вихідний образ).

Значення  $\alpha = \alpha_{opt}$  обирається, виходячи з умови  $\sigma_{rel}(\alpha) = \min_{\alpha}$ .

Для вибору параметра  $K$  використовуються способи візуальної оцінки відновленого зображення

$w_K$  та спосіб, аналогічний вибору параметра  $\alpha$  [10, 14]:

$$K_{opt} = \arg \min \sigma_{rel}(K), \quad (16)$$

$$\text{де } \sigma_{rel}(K) = \frac{\|w_K - \bar{w}\|_{L_2}}{\|\bar{w}\|_{L_2}}. \quad (17)$$

Спосіб, заснований на використанні відносної середньоквадратичної погрішності відновлення зображення, може бути використаний при обробці модельних зображень, коли  $\bar{w}$  відомо (задано).

В [10, 14] встановлено, що перетворення Фур'є недостатньо точно описує фізичну природу розфокусування зображення. Тому IP (3) може бути вирішено з використанням кубатур [10, 14]. Однак із-за двомірності IP (3) СЛАР буде дуже великого розміру ( $m^2 \times n^2$ ). Метод ітеративної регуляризації Фрідмана відновлення зображення в умовах розфокусування використовує кубатури, що не пов'язані з рішенням СЛАР. У відповідності з цим методом IP (3) вирішується ітераціями:

$$w_k(x, y) = w_{k-1}(x, y) + v \left[ g(x, y) - \int_a^b \int_c^d h(x - \xi, y - \eta) w_{k-1}(\xi, \eta) d\xi d\eta \right],$$

де  $k - 1, 2, 3, \dots$  – номер ітерації;

$$0 < v < \frac{2}{\|A\|} \quad (\text{звичайно } \|A\| = 1).$$

Погрішність відновлення  $k$ -ої ітерації дорівнює [10]:

$$\sigma_{rel}(k) = \frac{\|w_k - \bar{w}\|_{L_2}}{\|\bar{w}\|_{L_2}}. \quad (18)$$

На рис. 2 наведено результати обробки вихідного зображення в умовах розфокусування та змазування з використанням методу ітеративної регуляризації Фрідмана при п'яти, двадцяти та сорока ітераціях.



Рис. 2. Приклад обробки вихідного зображення в умовах розфокусування та змазування методом ітеративної регуляризації Фрідмана [10]

З аналізу рис. 2 видно, що при збільшенні кількості ітерацій суттєвий вплив на якість зображення оказує шум. Сходимість та розходимість методу ітеративної регуляризації Фрідмана продемонстрована на рис. 3, коли погрішності збільшуються вже при 1% гаусовому шумі.

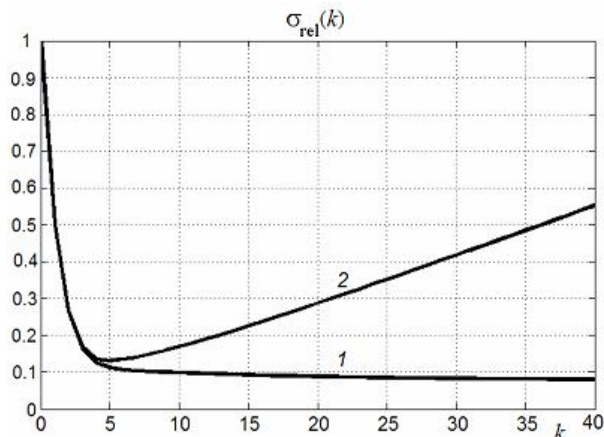


Рис. 3. Сходимість та розходимість методу ітеративної регуляризації Фрідмана (1 – без шуму, 2 – с 1% гаусовим шумом,  $\nu = 1,5$ ) [10]

## Висновки

Таким чином, основними недоліками відомих методів обробки оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазування при відомій ФРТ є: нестійкість до дії нелінійних спотворень в згортки, обмежені можливості отримання високого розрізнення, складність реалізації, великі витрати машинних ресурсів, сходимість ітеративного процесу неможливо гарантувати у всіх випадках обробки зображень.

У подальших дослідженнях необхідно провести аналіз відомих методів сліпої деконволюції оптико-електронних зображень, коли не відома ФРТ.

## Список літератури

1. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.
2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

3. Бейтс Р. Восстановление и реконструкция изображений / Р. Бейтс, М. Мак-Доннелл. – М.: Мир, 1989. – 336 с.

4. Оппенгейм А.В. Цифровая обработка сигналов / А.В. Оппенгейм, Р.В. Шафер. – Пер. с англ. / Под ред. С.Я. Шаца. – М.: Связь, 1979. – 416 с.

5. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.

6. Новейшие методы обработки изображений / [А.А. Потапов, Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, А.А. Пахомов, В.А. Герман. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 456 с.

7. Павлій В.А. Анализ известных методов восстановления оптико-электронных изображений, искаженных смазом / В.А. Павлій, Г.В. Худов // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2013. – Вып. 6 (113). – С. 118-121.

8. Павлій В.А. Функция размытия точки оптико-электронных изображений при смазе и дефокусировке, обусловленных неоднородностью атмосферы / В.А. Павлій, А.Н. Маковейчук, Г.В. Худов // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2013. – Вып. 9 (116). – С. 145-149.

9. Павлій В.О. Функция размытия точки дефокусированных оптико-электронных изображений / В.О. Павлій, Г.В. Худов // Вісник Української академії залізничного транспорту. – Х.: УАЗТ, 2013. – № 5. – С. 34-38.

10. Кирьянов К.А. Устойчивые методы восстановления изображения во встроенных системах для повышения точности измерений механических величин на объектах: автореферат дис. ... канд техн. наук: 05.11.01 / Кирьянов Константин Александрович. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2013. – 24 с.

11. Конохов А.Л. Определение функции рассеяния точки по характерным фрагментам изображения / А.Л. Конохов, А.Г. Костевич, М.И. Курячий // Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. Доклады ТУСУРа, 2012. – № 2 (26). – Ч. 1. – С. 116-120.

12. Переславцева Е.Е. Метод ускоренного восстановления изображений, смазанных при движении / Е.Е. Переславцева, М.В. Филиппов // Наука и образование. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – № 2. – С. 1-13.

13. Воскобойников Ю.Е. Устойчивый алгоритм восстановления изображения при неточно заданной аппаратной функции / Ю.Е. Воскобойников, В.А. Литасов // Автоматика, 2006. – Т. 43. – № 6. – С. 3-15.

14. Верлань А.Ф. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы / А.Ф. Верлань, В.С. Сизиков. – К.: Наук. думка, 1986. – 544 с.

Надійшла до редколегії 12.06.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## МЕТОДЫ «НЕСЛЕПОЙ» ДЕКОНВОЛЮЦИИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ РАСФОКУСИРОВАНИЯ И СМАЗЫВАНИЯ

В.А. Павлій

В статье проанализированы методы восстановления оптико-электронных изображений в условиях расфокусирования и смазывания при известной функции размытия точки. Приведены преимущества и недостатки известных методов обработки оптико-электронных изображений в условиях расфокусирования и смазывания.

**Ключевые слова:** оптико-электронное изображение, расфокусирование, смазывание, интегральное уравнение, восстановление изображения.

## METHODS OF "NOT BLIND" DECONVOLUTION OF OPTIKO-ELECTRONIC IMAGES IN THE CONDITIONS OF NOFOCUSING AND GREASINGS

V.A. Pavliy

In article methods of restoration of optiko-electronic images in conditions of nofocusing and greasings at known function of degradation of a point are analysed. Advantages and lacks of known methods of processing of optiko-electronic images of conditions of nofocusing and greasings are resulted.

**Keywords:** the optiko-electronic image, nofocusing, greasing, the integrated equation, image restoration.