

УДК 623.618.2

В.О. Павлій

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## МЕТОДИ СЛІПОЇ ДЕКОНВОЛЮЦІЇ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ЗОБРАЖЕНЬ В УМОВАХ РОЗФОКУСУВАННЯ ТА ЗМАЗУВАННЯ

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

**Ключові слова:** оптико електронне зображення, розфокусування, змазування, деконволюція, ітеративний алгоритм, відновлення зображення.

### Вступ

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Відомо [1-6], що в теорії обробки оптико-електронних зображень найбільш актуальною є задача обробки оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазування. Відомі методи обробки оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазування поділяються на [1 – 6]:

- методи «несліпої» деконволюції, коли відома функція розмітти точки (ФРТ);
- методи сліпої деконволюції, при невідомій ФРТ.

Методи обробки оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазування розглянуті в роботі [7].

**Мета статті** – провести аналіз методів сліпої деконволюції оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазування при невідомій ФРТ.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Відомо, що закон розмазування одного пікселя на оптико-електронному зображенні називається ФРТ [1, 2]. Розмір ФРТ, як правило, менший розміру самого зображення (рис. 1) [1].

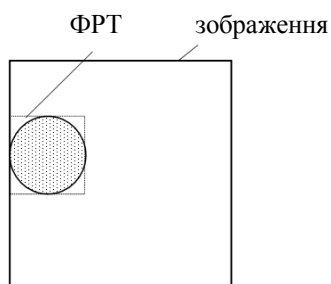


Рис. 1. Співвідношення розмірів оптико-електронного зображення та ФРТ [1]

В відомій літературі [1-7] при обробці оптико-електронних зображень враховується, що змазування зображення виникає при взаємному русі камери та об'єкту відносно один одного під час експозиції. У випадку, коли переміщення відбувається з постійною швидкістю ФРТ такої системи має вигляд (1):

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

де  $l_y$  - довжина змазування по одній з координат (в даному випадку – по координаті  $y$ ) що дорівнює добутку швидкості руху камери на час експозиції.

Вид ФРТ при змазуванні наведений на рис. 2, взаємне розташування зображення та ФРТ при змазуванні по одній координаті представлено на рис. 3.

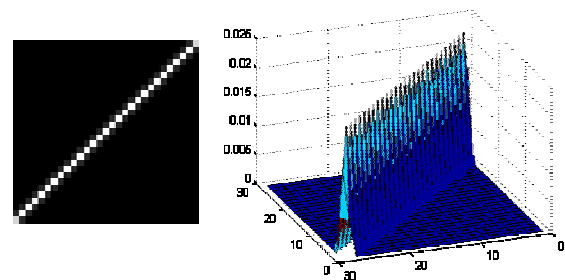


Рис. 2. ФРТ при змазуванні по одній координаті [7]



Рис. 3. Взаємне розташування зображення та ФРТ при змазуванні по одній координаті [1]

Чіткість оптико-електронного зображення характеризується відображенням мілких деталей та визначається розрізнявальною здатністю оптико-електронної системи [1-3]. Якщо площина зображення знаходиться у фокусі, то пучок світла, що виходить від об'єкта, сходиться в точку на зображенні.

При розфокусуванні точка відображається у вигляді деякого кружка розмиття, величина якого залежить від фокусної відстані об'єктива, від відстані «об'єкт – об'єктив» [1, 2]. Дискретне зображення буде чітким (сфокусованим), якщо діаметр кружка розмиття не перевищує шага дискретизації об'єкту, що спостерігається. В протилежному випадку лінійні спотворення стають помітними. При розфокусуванні розподіл інтенсивності яскравості на зображенні точкового джерела, що формується тонкою лінзою з круговою апертурою, постійний в межах кружка розмиття радіусом  $r$  та дорівнює нулю за його межами [1, 2]. Це відповідає циліндричній ФРТ (вираз (2)):

$$h(x, y) = \begin{cases} 1/(\pi r^2), & x^2 + y^2 \leq r^2; \\ 0 & \text{в інших випадках.} \end{cases} \quad (2)$$

В практичних задачах відновлення зображення вид ФРТ та її параметри визначаються експериментально або з урахуванням апріорних відомостей [1 – 3, 7]. Помилки у виборі ФРТ суттєво впливають на якість відновлення оптико-електронного зображення в умовах розфокусування та змазування. Так, в роботі [8] наведені приклади помилкового визначення ФРТ та вплив помилки на якість відновлення зображення (рис. 4).

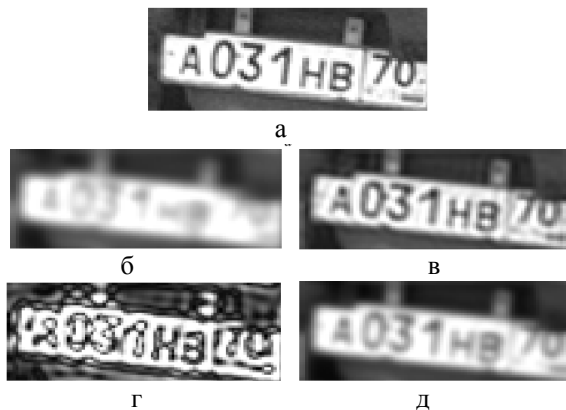


Рис. 4. Вплив помилок у визначенні ФРТ на якість відновлення зображення [8]

На рис. 4, а наведено вихідне зображення, на рис. 4, б – 4, д – відновлене зображення. У всіх випадках використовувалася гаусова ФРТ (рис. 5) з різними параметрами (радіус кружка розмиття).

Таким чином, при обробці оптико-електронних зображень не завжди відома ФРТ, тому використання відомих методів обробки оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазування [7] не завжди є обгрунтованим.

### Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

Різні модифікації ітеративних алгоритмів обробки оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазування при невідомій ФРТ розглянуті в роботах [1, 2, 8 – 10]. В указаних роботах бі-

льша увага приділяється питанням попередньої фільтрації шумів на зображенні, підвищенню швидкості роботи алгоритмів, зменшенню обчислювального навантаження при реалізації ітеративних алгоритмів на сучасних обчислювальних засобах.

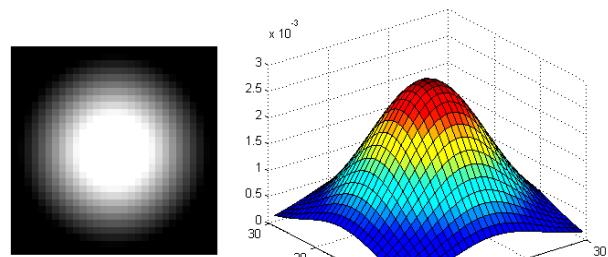


Рис. 5. Гаусова ФРТ

Схема формування зображення в умовах змазування наведена на рис. 6 [11]. При цьому ставиться задача відновлення зображення  $w(x, y)$  по зображенню  $g(x, y)$ , що є змазаним, з урахуванням величини та напрямку змазування  $\Delta$ .

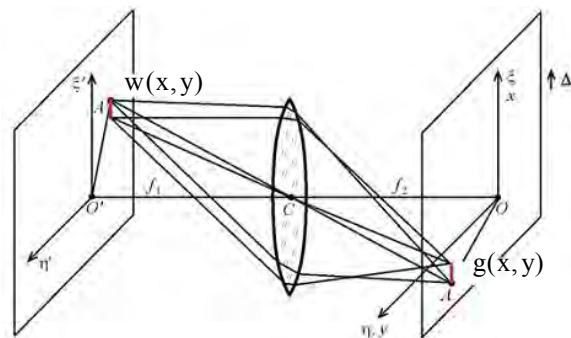


Рис. 6. Схема формування зображення в умовах змазування [11]

Найпростіший ітеративний алгоритм запропоновано Ван Кіттертом [12], відповідно до якого вираз для відновлення зображення на  $(n + 1)$  кроці може бути записаний наступним чином:

$$f^{n+1}(x, y) = f^n(x, y) + (g(x, y) - h(x, y) * f^n(x, y)), \quad (3)$$

де  $f^{n+1}(x, y)$ ,  $f^n(x, y)$  – відновлені зображення на  $(n + 1)$  і  $n$  кроці ітерації відповідно;  $g(x, y)$  – вихідне зображення;  $h(x, y)$  – ФРТ;  $*$  – операція згортки.

Ітеративний метод сліпої деконволюції передбачає введення функціоналу:

$$J(f(x, y), h(x, y)) = \|h(x, y) * f(x, y) - g(x, y)\|^2 + \alpha \cdot \|f(x, y)\|^2 + \beta \cdot \|h(x, y)\|^2, \quad (4)$$

де  $\alpha$ ,  $\beta$  – параметри регуляризації;  $\|\dots\|$  – евклідова норма.

При переході до перетворення Фур'є функціонал (4) можна переписати як

$$J(F(u, v), H(u, v)) = \left| H^*(u, v)F(u, v) - G(u, v) \right|^2 + \alpha \cdot |F(u, v)|^2 + \beta \cdot |H(u, v)|^2, \quad (5)$$

де відповідними буквами позначені образи у частотній області.

Мінімум функціонала (5) знайдемо з наступних умов (6), (7):

$$\frac{\partial J(F(u, v), H(u, v))}{\partial F(u, v)} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial J(F(u, v), H(u, v))}{\partial H(u, v)} = 0, \quad (7)$$

звідки для  $n$ -ої ітерації:

$$H_{(n+1)}(u, v) = \frac{F_{(n)}(u, v)G(u, v)}{|F_{(n)}(u, v)|^2 + \alpha}. \quad (8)$$

Вираз (8) дійсний для моделі ідеального спотворення з нульовою фазою. Оскільки фази ідеального та спотвореного зображень співпадають [17], то аналогічно (8):

$$F_{(n+1)}(u, v) = \frac{|H_{(n)}(u, v)G(u, v)|}{|H_{(n)}(u, v)|^2 + \beta} \cdot \frac{G(u, v)}{|G(u, v)|} = \frac{|H_{(n)}(u, v)|}{|H_{(n)}(u, v)|^2 + \beta} \cdot G(u, v). \quad (9)$$

Рівняння (8), (9) з початковими умовами  $F_{(n=0)}(u, v) = G(u, v)$ ,  $H_{(n=0)}(u, v) = 1$  дозволяють вирішити задачу обернення згортки. Вхідними параметрами є константи регуляризації  $\alpha$ ,  $\beta$  і параметр  $N$ , який задає максимальну кількість внутрішніх ітерацій.

З практичної точки зору доцільно здійснити перехід з частотної до просторової області, при цьому з'являється додатковий параметр – кількість зовнішніх ітерацій.

При використанні ітеративного метода сліпої деконволюції (8), (9) значно посилюються шуми на частотах, які відповідають малим значенням Фур'є-образа ФРТ. Для зменшення указаних шумів розглянемо ітеративний алгоритм Ландвебера.

Ітеративний алгоритм Ландвебера передбачає відновлення зображення проводити у відповідності з виразом (10) [13]:

$$f^{n+1}(x, y) = f^n(x, y) + \beta h^T(x, y)(g(x, y) - h(x, y) \cdot f^n(x, y)), \quad (10)$$

де  $\beta$  – константа регуляризації;  $h^T(x, y)$  - транспонована матриця  $h(x, y)$ .

Використання множника  $\beta h^T(x, y)$  обумовлено зниженням впливу шумів зображення на якість його відновлення [1, 2, 13].

Також при обробці зображень використовують ітеративний алгоритм Люсі-Річардсона, який передбачає відновлення зображення проводити у відповідності з виразом (11):

$$f^{n+1}(x, y) = f^n(x, y) \left( \hat{h}(x, y) * \frac{g(x, y)}{h(x, y)f^n(x, y)} \right), \quad (11)$$

де  $\hat{h}(x, y)$  - оціночне значення ФРТ.

Модифікований алгоритм Люсі-Річардсона передбачає відновлення зображення проводити у відповідності з виразом (12) [14-16]:

$$f^{n+1}(x, y) = f^n(x, y) \exp \left( \hat{h}(x, y) * \frac{g(x, y)}{h(x, y)f^n(x, y)} - 1 \right). \quad (12)$$

На рис. 7 наведені оптико-електронні зображення міста Фаллуджа (Ірак) [18].

На рис. 7, а – зображення в умовах розфокусування та змазування з космічного апарату дистанційного зондування Землі Ikonos [18], на рис. 7, б – відновлене зображення з використанням ітеративного алгоритму Ландвебера – вираз (10).



а

б

Рис. 7. Оптико-електронні зображення (Фаллуджа, Ірак): а) зображення в умовах розфокусування та змазування; б) відновлене зображення з використанням ітеративного алгоритму Ландвебера (10)

З аналізу рис. 7 видно, що ітеративний алгоритм Ландвебера за рахунок використання множника  $\beta h^T(x, y)$  знижує вплив шумів на якість зображення. Однак при цьому виникають обрамляючі ефекти на краях зображення.

### Висновки і напрямки подальших досліджень

Таким чином, основними недоліками відомих методів обробки оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазування методами сліпої деконволюції є:

- можливість обробки зображень підтверджується лише на основі результатів моделювання, при цьому ефективність методів невисока, а при відновленні зображень, що спотворені реальними системами формування зображень, - низька;

- не враховується вплив апріорної інформації при обробці зображень;
- нестійкість до нелінійних спотворень та шумів;
- необхідність мати декілька спотворених зображень або апріорну інформацію щодо належності функції, що спотворює, до визначеного класу функцій, що неможливо забезпечити при вирішенні практичних задач;
- поява обрамляючого ефекту, що приводить до суттєвих помилок при проведенні координатної прив'язки та дешифруванні оптико-електронних зображень;
- відсутні єдині критерії вибору параметрів алгоритмів обробки оптико-електронних зображень;
- відсутній єдиний критерій оцінки якості обробки зображення;
- значна обчислювальна складність та великий час обробки;
- відсутність можливості паралельної обробки великих зображень, а також вибіркової обробки обраного фрагменту зображення.

У подальших дослідженнях необхідно провести розробити метод обробки оптико-електронних зображень при невідомій ФРТ, який був би вільний від перелічених вище недоліків.

### Список літератури

1. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
2. Новейшие методы обработки изображений / [А.А. Потапов, Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, А.А. Пахомов, В.А. Герман]. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 456 с.
3. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.
4. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
5. Бейтс Р. Восстановление и реконструкция изображений / Р.Бейтс, М.Мак-Доннелл. Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 336 с.
6. Опенгейм А.В. Цифровая обработка сигналов / А.В. Опенгейм, Р.В. Шафер. Пер. с англ. Под ред. С.Я. Шаца. – М.: Связь, 1979. – 416 с.

7. Павлий В.А. Анализ известных методов восстановления оптико-электронных изображений, искаженных смазом / В.А. Павлий, Г.В. Худов // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2013. – Вып. 6 (113). – С. 118-121.
8. Конюхов А.Л. Определение функции рассеяния точки по характерным фрагментам изображения / А.Л.Конюхов, А.Г.Костевич, М.И.Курячий // Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. Доклады ТУСУРа, 2012. – № 2 (26). – Ч. 1. – С. 116-120.
9. 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.
10. Василенко Г.И. Восстановление изображений / Г.И. Василенко, А.М. Тараторин. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
11. Кирьянов К.А. Устойчивые методы восстановления изображений во встроженных системах для повышения точности измерений механических величин на объектах: автореферат дис. ... канд техн. наук: 05.11.01 / Кирьянов Константин Александрович. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 24 с.
12. Biemond J. Iterative methods for image deblurring / J. Biemond, R. Lagendijk, R. Mersereau // Proceedings of the IEEE, 1990. – Vol. 78. – № 5. – P. 856-883.
13. Landweber L. An iteration formula for Fredholm integral equations of the first kind / L. Landweber // Amer. J. Math., 2009. – Vol. 73. – P. 615-624.
14. Richardson W.H. Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration / W.H. Richardson // J. Opt. Soc. Am., 1972. – Vol. 62(1). – P. 55-59.
15. Lucy L.B. An iterative technique for the rectification of observed distributions / L.B. Lucy // The Astronomical Journal, 1974. – Vol. 79. – № 6. – P. 745-754.
16. Richardson W.H. Bayesian-Based iterative method of image restoration / W.H. Richardson // Journal of Optical Society of America. – 1970. – Vol. 62, № 1. – P. 55-59.
17. Маковейчук О.М. Алгоритми реставрації дефокусованих зображень / О.М. Маковейчук, В.О. Подліпаєв // Системи озброєння і військова техніка. – 2005. – № 3-4. – С. 99-103.
18. Сайт американской компании Space Image. [Электронный ресурс]. Режим доступа к материалам: <http://www.spaceimaging.com/gallery/default.htm>.

Надійшла до редколегії 13.08.2015

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

### МЕТОДЫ СЛЕПОЙ ДЕКОНВОЛЮЦИИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ РАСФОКУСИРОВАНИЯ И СМАЗЫВАНИЯ

В.А. Павлий

В статье проанализированы методы восстановления оптико-электронных изображений в условиях расфокусирования и смазывания при неизвестной 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, деконволюция, итеративный алгоритм, восстановление изображения.

### METHODS OF BLIND DECONVOLUTION OF OPTOELECTRONIC IMAGES IN THE CONDITIONS OF NOFOCUSING AND GREASINGS

V.A. Pavliy

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

**Keywords:** the optoelectronic image, nofocusing, greasing, deconvolution, iterative algorithm, image restoration.