

## Анализ характеристик линейных искажений в задачах восстановления мультиспектральных изображений<sup>1</sup>

В.Н. Карнаухов, В.И. Кобер

*Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, 127051, Россия*

Поступила в редколлегию 31.05.2017

**Аннотация**—Существующих методы восстановления искаженных мультиспектральных изображений часто используют модель линейного искажения. Эти искажения могут быть обусловлены техническими характеристиками изображающих систем, внешними условиями регистрации сигнала, а также движением регистрирующей камеры или объекта. Для того, чтобы процедура восстановления искаженного изображения была эффективной, необходимо провести анализ искажающего оператора, включающий в себя как способ определения типа искажения, так и оценку параметров оператора. В данной статье предлагается метод анализа линейного искажающего оператора по спектру искаженного изображения. С помощью компьютерного моделирования проиллюстрированы характерные особенности искажений спектров тестовых мультиспектральных изображений с помощью типичных линейных операторов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** восстановление изображений, мультиспектральное изображение, линейный искажающий оператор.

### ВВЕДЕНИЕ

При цифровой обработке многомерных данных часто возникает необходимость в восстановлении мультиспектральных искаженных изображений по наблюдаемым данным. Искажения могут быть обусловлены турбулентностью среды, оптическими аберрациями, техническими характеристиками оптических преобразователей, движением регистрирующей камеры или объекта и т.д. Изображения, сформированные искажающими системами, как правило, не поддаются непосредственной интерпретации и требуют выполнения тех или иных операций улучшающих их качество. Поэтому первым этапом цифровой обработки во многих случаях является восстановление неискаженного изображения по наблюдаемому искаженному изображению.

Цифровому восстановлению изображений посвящено большое количество исследований. Большинство методов восстановления используют модель однородного линейного оператора [1]–[5]. Модели неоднородного оператора, как правило, основываются на предположениях локальной однородности искажения, например, для моделирования линейного искажения на изображениях при кусочно-равномерном движении объектов сцены или камеры [6]–[10]. В настоящее время разрабатываются глобальные модели неоднородного искажения, однако в этом случае на движения объектов и камеры накладываются дополнительные ограничения, связанные, например, с траекторией и другими параметрами движения камеры или объектов [11].

Заметим, что каким бы эффективным не был восстанавливающий алгоритм, качество восстановленного изображения, прежде всего, зависит от точности математической модели искажающей системы. В частности, от точности задания параметров искажения (скорости движе-

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00150)

ния, прозрачности среды и т.п.), которые априори не известны. Поэтому проблеме идентификации модели искажающих систем и выбора ее параметров посвящено много работ [13]–[15].

В данной работе предложен метод анализа искажающего оператора, включающий в себя способ определения типа искажения, а также метод оценки искажающих параметров в спектральной области искаженного изображения. Статья организована следующим образом: в разделе 1 описана модель формирования мультиспектрального изображения, искаженного линейным оператором, в разделе 2 описан предлагаемый подход к анализу характеристик искажающего оператора по спектру наблюдаемого изображения, а также представлены характерные особенности искажений спектров тестовых изображений с помощью типичных линейных операторов, и, наконец, раздел заключение суммирует наши выводы.

### 1. ФОРМИРОВАНИЕ ИСКАЖЕННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Информация о мультиспектральном исходном изображении  $\{S(g, v, \lambda), \lambda = \lambda_1, \dots, \lambda_P\}$  переносится излучением в оптическую систему, которая характеризуется функцией размытия точки  $PSF(x, y, g, v, \lambda)$ . Оптическая система формирует монохроматическое изображение  $s(x, y, \lambda)$  на матричном фотоприемнике по линейному закону, записанному с учетом длины волны электромагнитного излучения  $\lambda$ , как

$$s(x, y, \lambda) = \iint_{\Delta S} S(g, v, \lambda) PSF(x, y, g, v, \lambda) dg dv, \quad (1)$$

где  $\Delta S$  – область исходного изображения,  $(g, v)$  – координаты точки в плоскости исходного изображения,  $(x, y)$  – координаты точки в плоскости регистрируемого изображения. При регистрации мультиспектрального изображения формируется множество монохроматических изображений с  $P$  спектральными диапазонами  $\{s(x, y, \lambda), \lambda = \lambda_1, \dots, \lambda_P\}$ . Для реальных матричных фотоприемниках спектральная чувствительность элементов сенсора  $\gamma(x, y, \lambda)$  может быть неодинаковой по полю датчика. Однако, как правило, эта функция задана производителем или ее можно измерить. В реальной жизни исходное изображение является непрерывным, и процесс его линейного формирования можно записать при помощи интегрального уравнения Фредгольма первого рода, которое в случае регистрации мультиспектрального изображения примет вид:

$$\iint_{\Delta S} S(g, v, \lambda) PSF(x, y, g, v, \lambda) dg dv = s(i, j, \lambda) + n(i, j, \lambda), \quad (2)$$

$$PSF_r(i, j, g, v, \lambda) = \iint_{A_{i,j}} \gamma(x, y, \lambda) PSF(x, y, g, v, \lambda) dx dy, \quad (3)$$

где  $A_{i,j}$  – площадь  $(i, j)$ -го светочувствительного элемента,  $n(i, j, \lambda)$  – ошибка преобразования  $(i, j)$ -ым элементом матричного приемника сигнала на длине волны  $\lambda$  (аддитивный шум сенсора).

Формально, можно определить динамическую функцию размытия точки, зависящую от времени, а в выражениях (1)–(3) дополнительно ввести интегрирование по времени в интервале экспонирования. Однако на практике, удобно заменить интегрирование по времени на взвешенную сумму множества проективных отображений сцены на камеру, с учетом изменения положения и ориентации камеры. В матричной форме это можно записать следующим образом:

$$f_p = Ws_p + n_p, \quad (4)$$

где  $\{f_p, p = 1, \dots, P\}$  – искаженные компоненты мультиспектрального наблюдаемого изображения,  $\{s_p, p = 1, \dots, P\}$  – компоненты неискаженного мультиспектрального изображения с  $P$  спектральными диапазонами,  $\{n_p, p = 1, \dots, P\}$  – мультиспектральный аддитивный шум сенсора,  $s_p, f_p, n_p \in \mathbf{R}^N$ ,  $N = N_R \times N_C$  – размер изображений, а  $W \in \mathbf{R}^{N \times N}$  – разреженная весовая матрица, содержащая информацию о проективных преобразованиях сцены и ее изображениях в камере, то есть о локальных линейных искажениях исходного изображения. Моделирование системы формирования изображений представляет собой самостоятельную и часто сложную задачу. В данной работе мы ограничимся рассмотрением линейных, пространственно-инвариантных систем, которые описываются уравнением

$$f_p = Ws_p + n_p, = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s_p(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta + n(x, y), \quad (5)$$

где  $h(x, y)$  – импульсная характеристика линейной изображающей системы.

В области преобразования Фурье (при известных ограничениях на функции) это уравнение можно записать как

$$F(\omega_1, \omega_2) = H(\omega_1, \omega_2) S(\omega_1, \omega_2) + N(\omega_1, \omega_2), \quad (6)$$

где  $F(\omega_1, \omega_2)$ ,  $H(\omega_1, \omega_2)$ ,  $S(\omega_1, \omega_2)$ ,  $N(\omega_1, \omega_2)$  – спектры соответствующих функций из уравнения (5).

## 2. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ИСКАЖАЮЩЕГО ОПЕРАТОРА ПО ИСКАЖЕННОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ

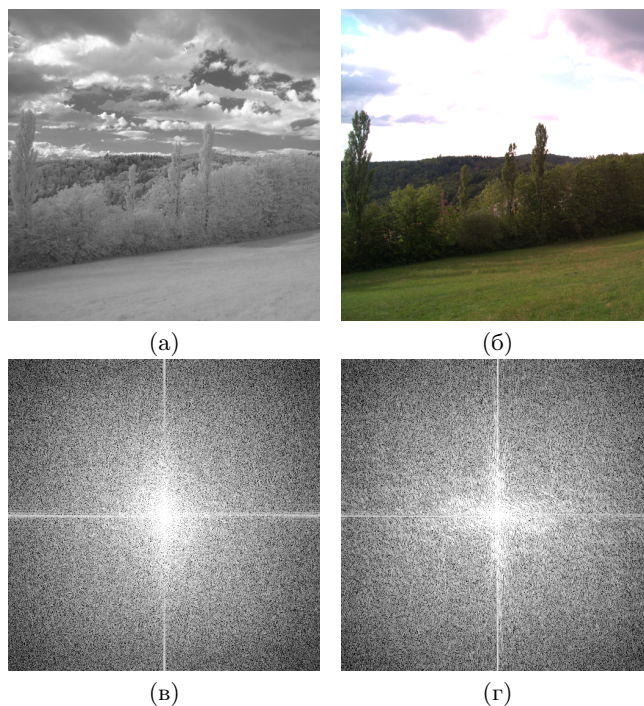
Качество восстановленного изображения зависит от точности математической модели искажающей системы, типа искажения и оценки характеристик искажающего оператора. Предлагаемый подход к анализу параметров линейного искажения состоит из двух процедур: для оценки характеристик искажения используется анализ пересечения с нулем модуля спектра искаженного изображения, а для определения типа искажающего оператора используется обучаемый алгоритм распознавания на действие типичных операторов линейного искажения. Во-первых, опишем линейное искажение в пространственной области, например, из-за относительного движения между камерой и объектом, представляющим интерес. Отметим, что соседние пиксели изображения экспонируются в одной и той же точке на плоскости объекта во время экспозиции. Это означает, что интенсивность исходной точки объекта распределяется между пикселями изображения в соответствии с относительной продолжительностью экспозиции для каждого пикселя. В реальных ситуациях скорость и направление движения во время экспозиции приблизительно постоянны. В этом случае, линейный оператор имеет линейную фазовую зависимость и синкоподобное поведение амплитуды в спектральной области, что приводит к четко определенным впадинам в логарифме модуля спектра (кепстра) наблюдаемого изображения. Поэтому оценивание параметров линейного оператора, характеризующих такое поведение амплитуды в спектральной области, можно выполнить, используя функцию спектра мощности наблюдаемого изображения. Положение нулей можно легко обнаружить по функции кепстра, а степень размытия можно оценить, измеряя расстояние между нулями спектра мощности наблюдаемого изображения. Импульсная и частотная характеристики оператора искажения равномерного линейного смаза имеют, соответственно, следующий вид:

$$h(x, y) = \begin{cases} 1/L, & \text{если } \sqrt{x^2 + y^2} \leq L/2, y/x = \tan(\beta), \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}, \quad (7)$$

$$H(\omega_1, \omega_2) = \text{sinc}(\pi L(\omega_1 \cos \beta + \omega_2 \sin \beta)). \quad (8)$$

где  $L$  и  $\beta$  – параметры протяженности и направления искажения равномерного линейного смаза.

На Рис. 1 показаны тестовое мультиспектральное изображение, полученное в NIR и RGB диапазонах, и логарифмы модулей спектров этих изображений. Размер изображений –  $512 \times 512$  пикселей. Частотная характеристика искажения (7) с  $L = 9$  элементов и  $\beta = 15$  градусов,

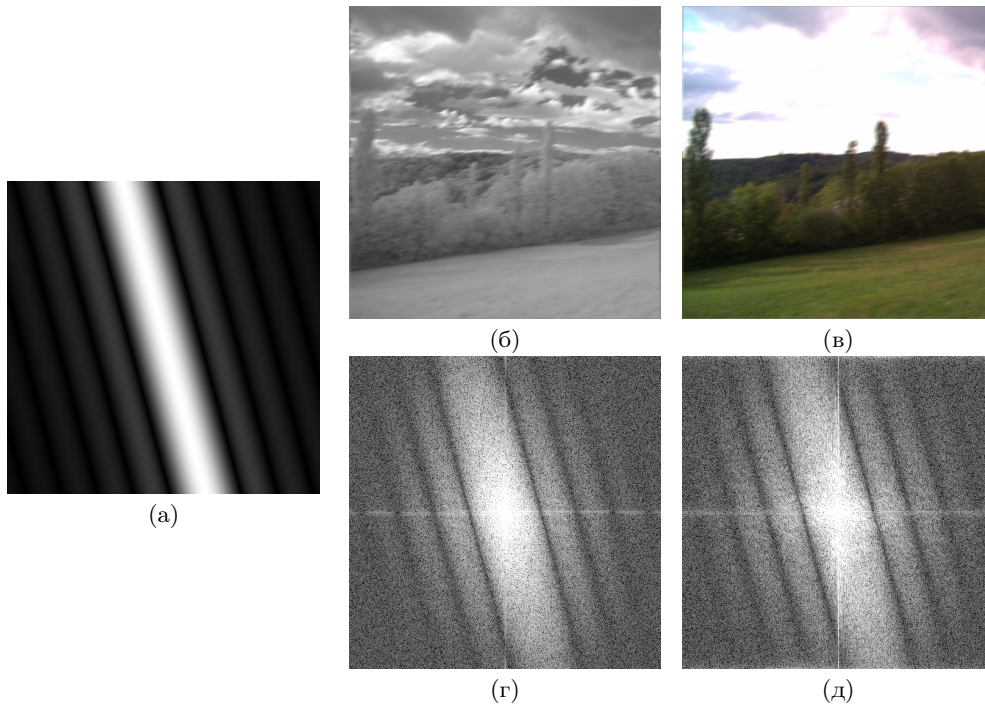


**Рис. 1.** (а) и (б) Тестовое мультиспектральное изображение, полученное в NIR и RGB диапазонах, соответственно, (в) и (г) логарифмы модулей спектров тестового изображения в NIR и RGB диапазонах, соответственно.

искаженные тестовые изображения NIR и RGB диапазонов и логарифмы модулей спектров искаженных изображений NIR и RGB диапазонов, соответственно, показаны на Рис. 2.

Для определения ориентации параллельных линий можно использовать эффективный алгоритм обнаружения линии, основанный на двумерных фильтрах Габора [12]. Импульсная характеристика такого фильтра определяется в виде гармонической функции помноженной на гауссову функцию. Предлагаемый алгоритм анализа параметров линейного искажения состоит из следующих шагов:

1. Определить ориентацию линейного искажения с помощью фильтров Габора [12].
2. Повернуть искаженное изображение на угол, противоположный углу ориентации линейного искажения. Таким образом, полученное изображение будет искажено только вдоль строк.
3. Протяженность импульсной характеристики искажающего оператора  $L$  оценивается путем измерения расстояния между соседними пересечениями с нулем модуля искаженного и повернутого изображений [14]. При сканировании изображения линейное искажение возникает из-за интегрирования отчетов исходного изображения по апертуре сканирования. Такие искажения наблюдаются, например, при вводе изображения в цифровую систему с помощью



**Рис. 2.** (а) Частотная характеристика искажающего оператора (7) с  $L = 9$  и  $\beta = 15$ , (б) и (в) искаженные этим оператором тестовые изображения NIR и RGB диапазонов, соответственно, (г) и (д) логарифмы модулей спектров искаженных изображений NIR и RGB диапазонов, соответственно.

радарной станции. Импульсная и частотная характеристики линейной системы могут быть записаны, соответственно, как

$$h(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right), \quad (9)$$

$$H(\omega_1, \omega_2) = ab \text{sinc}(L_x \omega_1) \text{sinc}(L_y \omega_2), \quad (10)$$

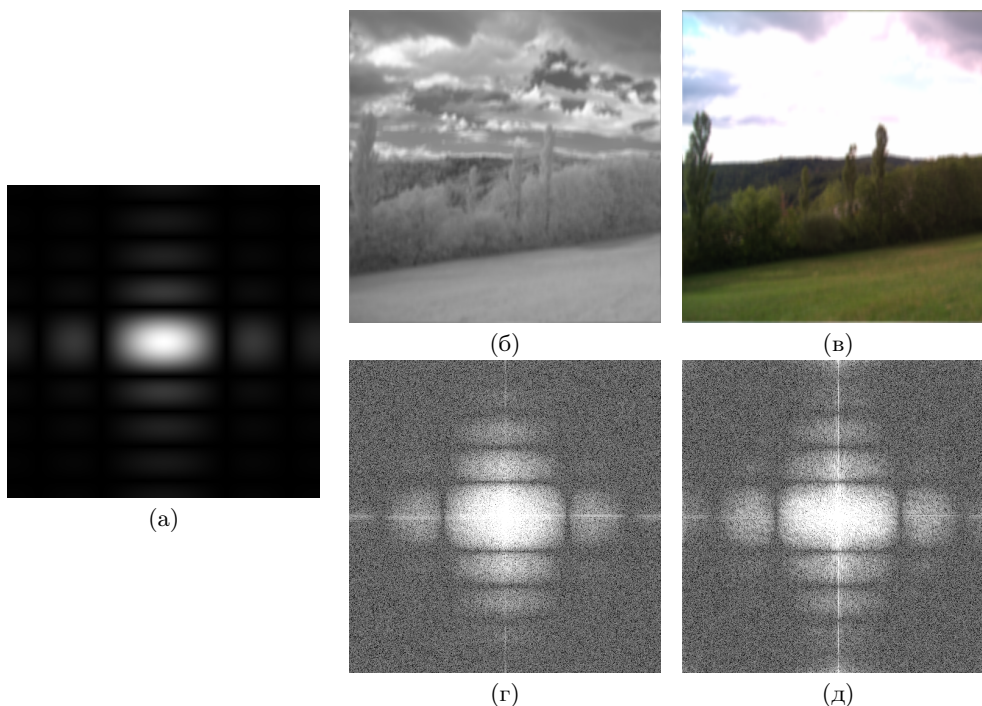
где  $L_x \times L_y$  - прямоугольная апертура.

На Рис. 3 показаны частотная характеристика искажения (9) с  $L_x = 5$  и  $L_y = 9$  элементов, искаженные тестовые изображения NIR и RGB диапазонов и логарифмы модулей спектров искаженных изображений NIR и RGB диапазонов, соответственно.

Еще один пример применения алгоритма анализа пересечения с нулем модуля спектра искажённого изображения – дефокусировка наблюдаемого изображения из-за конечных размеров апертуры камеры. При сильной дефокусировке можно использовать однородную модель, для которой импульсная и частотная характеристики выражаются, соответственно, как

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi r^2}, & \text{если } x^2 + y^2 \leq r^2 \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (11)$$

$$H(\omega_1, \omega_2) = \frac{J_1(rp)}{rp}, \quad p = \omega_1^2 + \omega_2^2, \quad (12)$$



**Рис. 3.** (а) Частотная характеристика искажающего оператора (9) с  $L_x = 5$  и  $L_y = 9$ , (б) и (в) искаженные этим оператором тестовые изображения NIR и RGB диапазонов, соответственно, (г) и (д) логарифмы модулей спектров искаженных изображений NIR и RGB диапазонов, соответственно.

где  $J_1$  – функция Бесселя первого рода.

На Рис. 4 показаны частотная характеристика искажения (11) с  $r = 7$  элементов, искаженные тестовые изображения NIR и RGB диапазонов и логарифмы модулей спектров искаженных изображений NIR и RGB диапазонов, соответственно.

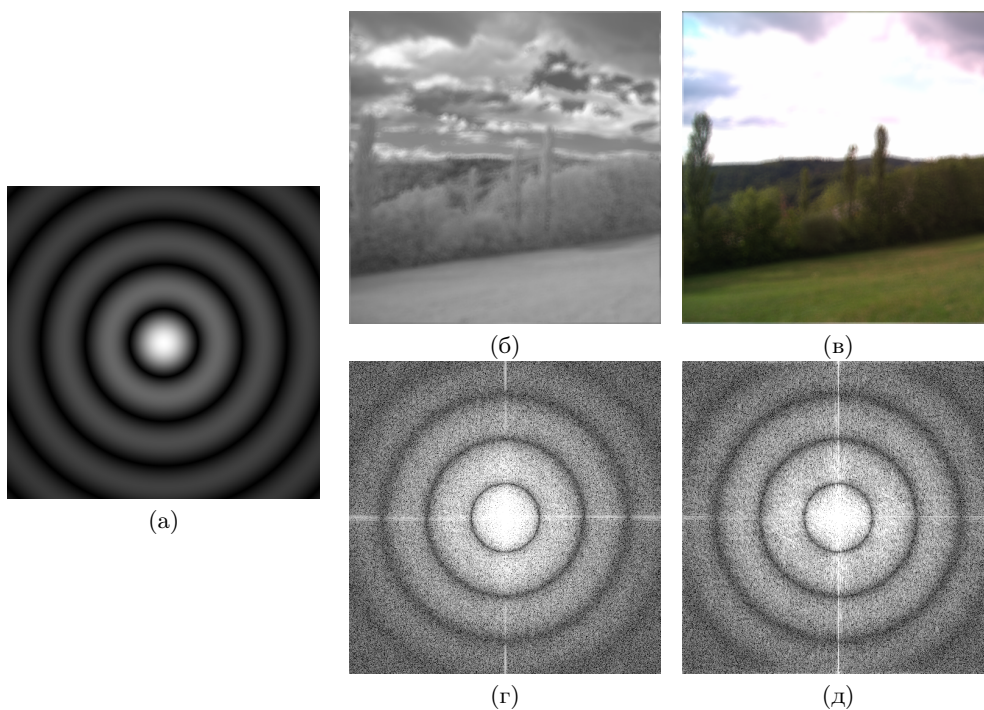
Предположим, что величина передаточной функции линейного искажающего оператора не имеет переходов через нуль. В этом случае будем использовать другой подход для идентификации параметров искажающего оператора – обучение алгоритма распознавания с помощью типичных линейных искажающих операторов. Атмосферная турбулентность является типичным линейным искажением в дистанционном зондировании и аэрофотосъемке. При длительной экспозиции через атмосферу можно использовать гауссову модель искажения. Импульсная характеристика линейного искажающего оператора турбулентности имеет вид:

$$h(x, y) = e^{-\pi a^2(x^2+y^2)}, \tag{13}$$

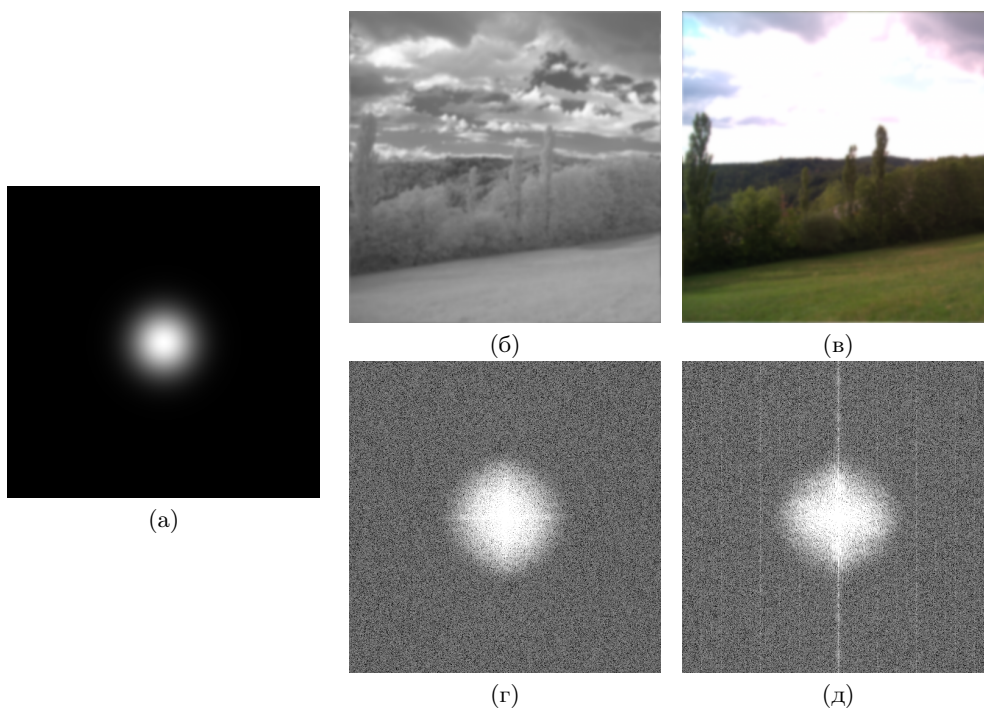
$$H(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{\alpha^2} e^{\frac{-\pi(\omega_1^2+\omega_2^2)}{\alpha^2}}, \tag{14}$$

где  $\alpha$  - параметр, определяющий степень искажения.

На Рис. 5 показаны частотная характеристика искажения (13) с  $\alpha = 5$ , искаженные тестовые изображения NIR и RGB диапазонов и логарифмы модулей спектров искаженных изображений NIR и RGB диапазонов, соответственно. Известно, что величина спектра реального изображения содержит информацию о распределении энергии сигнала в частотной области. Для идентификации параметров линейного оператора была создана база данных, содержащая величины спектра в зависимости от параметров искажающего линейного оператора. Выборка



**Рис. 4.** (а) Частотная характеристика искажающего оператора (11) с  $r = 7$ , (б) и (в) искаженные этим оператором тестовые изображения NIR и RGB диапазонов, соответственно, (г) и (д) логарифмы модулей спектров искаженных изображений NIR и RGB диапазонов, соответственно.



**Рис. 5.** (а) Частотная характеристика искажающего оператора (13) с  $\sigma\alpha = 5$ , (б) и (в) искаженные этим оператором тестовые изображения NIR и RGB диапазонов, соответственно, (г) и (д) логарифмы модулей спектров искаженных изображений NIR и RGB диапазонов, соответственно.

базы данных, используемая для обучения, получена с помощью компьютерного моделирования. На практике число искажающих операторов не очень велико. Далее, модуль спектра искаженного изображения сопоставляется с модулем спектра в базе данных. Эта простая система распознавания хорошо работает для определения типа искажающего оператора для типичных искажений. Рисунки 2, 3, 4 и 5 иллюстрируют модули спектров для типичных искажающих операторов. Очевидно, что модули спектров искаженных изображений содержат характерную (индивидуальную) информацию о каждом операторе искажения. Эта информация легко формализуется, и может быть использована в системе автоматического распознавания искажающих операторов.

Сложные искажения можно представить как комбинацию базовых искажающих операторов. В этом случае частотная характеристика полного искажения является произведением частотных характеристик базовых искажающих операторов. Однако, если доминирует один из операторов искажения, частотная характеристика композитного искажения не может быть синтезирована простой комбинацией частотных характеристик базовых искажающих операторов. Это означает, что размер обучающей выборки соответствующей системы должно быть увеличен. В области преобразования Фурье амплитуда и фаза играют разные роли. Наиболее важная информация о деталях изображения содержится в фазе. Более того, часто фазовой информации достаточно, чтобы с высокой точностью восстановить изображение. Если можно пренебречь аддитивным шумом датчика, фаза частотной характеристики оператора искажения равна разности фаз искаженного и исходного изображений. Если ядро оператора искажения гауссово, а его фаза равна нулю, то фазы искаженного и исходного изображений совпадают. Если оператор искажения является конечной функцией, то фаза искаженного изображения может отличаться от фазы исходного изображения на  $\pm\pi$ , а точки, в которых скачки фазы на  $\pm\pi$  совпадают с положением нулей модуля спектра искаженного изображения. Эти нули для четных функций расположены на вещественной оси. Таким образом, фаза исходного изображения либо совпадает с фазой искаженного изображения, либо отличается от фазы искаженного изображения на  $\pm\pi$ . Поэтому, при определенных условиях, мы можем определить тип оператора искажения и оценить его фазу по спектру искаженного изображения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен метод идентификации линейного искажающего оператора по спектру искаженного изображения, основанный на анализе фазового распределения и пересечения с нулем модуля спектра искаженного изображения. Результаты показывают, что предложенная схема определения параметров точна для каждой рассматриваемой модели искажающего оператора. С помощью компьютерного моделирования проиллюстрированы характерные особенности искажений спектров тестового изображения с помощью типичных линейных операторов. В дальнейшей работе предполагается автоматизировать процесс распознавания широкого спектра искажающих операторов на зашумленных изображениях и вычисления параметров искажающих операторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Biemond, J., Lagendijk, R.L., Mersereau, R.M. Iterative methods for image deblurring, Proceedings of the IEEE, Vol. 78, No 5, pp. 856–883 (1990).
2. Banham, M., Katsaggelos, A. Digital image restoration, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 14, No.2, pp. 24–41 (1997).
3. Sroubek, F., Flusser, J. Multichannel blind iterative image restoration, IEEE Trans. Image Process., Vol. 12, No. 9, pp. 1094–1106 (2003).



4. Sawchuk, A. A. Space-variant image restoration by coordinate transformations, *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 64, No. 2, pp. 138–144 (1974).
5. Karnaukhov V., Mozerov M. Restoration of multispectral images by the gradient reconstruction method and estimation of the blur parameters on the basis of the multipurpose matching model, *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2016, Vol. 61, No. 12, pp. 1426–1431.
6. Chakrabarti, A., Zickler, T., Freeman, W.T. Analyzing spatially-varying blur, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 2512–2519 (2010).
7. Karnaukhov V., Kober V. A fast preview restoration algorithm for space-variant degraded images, *Proc. SPIE 9971, Applications of Digital Image Processing XXXIX*, 2016, pp. 99712W–7, doi:10.1117/12.2236812. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2565221>.
8. Levin A., Weiss Y., Durand F., Freeman, W.T. Understanding and evaluating blind deconvolution algorithms, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1964–1971 (2009).
9. Kober, V. Robust and Efficient Algorithm of Image Enhancement, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 52, No. 2, pp. 655–659 (2006).
10. Kober, V., Karnaukhov, V. Adaptive correction of nonuniform illumination of multispectral digital images, *Journal of Communications Technology and Electronics*, Vol. 61, No. 12, pp. 1419–1425 (2016).
11. Tai, Y.-W., Tan, P., Brown, M. S. Richardson-Lucy deblurring for scenes under a projective motion path, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 33, No. 8, 1603–1618 (2011).
12. Feichtinger, H.G, Strohmer, T. *Gabor analysis and algorithms*, Birkhäuser, Basel (1998).
13. Karnaukhov V., Kober V. Blind identification of linear degradation operators in the Fourier domain, *Proc. SPIE's 60 Annual Meeting: Applications of Digital Image Processing XXXVIII*, 2015, Vol. 9599, pp. 95992I–7, doi: 10.1117/12.2188481, Accession Number WoS:000366385200074. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2444276>
14. Dash, R., Majhi, B. Motion blur parameters estimation for image restoration, *Optik*, Vol. 125, pp. 1634–1640 (2014).
15. Karnaukhov V., Mozerov M. Motion blur estimation based on multitarget matching model. *Optical Engineering*, 2016, Vol. 55, No. 10, pp. 100502X/1–4, doi:10.1117/1.OE.55.10.100502. <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=2571712>.

## Analysis of linear distortion characteristics in restoration of multispectral images

Karnaukhov V. and Kober V.

Common methods of restoration of degraded multispectral images often use a linear distortion model. These distortions may be due to the technical characteristics of imaging systems, environmental conditions of signal input, and either camera or object motion. In order to efficiently recover a degraded image, it is necessary to analyze the distorting operator; that is, to evaluate the distortion type and operator parameters. In this paper, we propose a method for analyzing a linear distorting operator from the degraded image spectrum. With the help of computer simulation, we illustrate the impact of typical linear operators to the spectra of test multispectral images.

**KEYWORDS:** image restoration, multispectral images, linear blur operator.