

Подоплелова Елизавета Сергеевна – Южный федеральный университет; e-mail: chuzhinova@sfnedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79525844188; аспирант.

Князев Иван Игоревич – e-mail: ikniazev@sfnedu.ru; тел.: +79265347104; аспирант.

Podoplelova Elizaveta Sergeevna – Southern Federal University; e-mail: chuzhinova@sfnedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79525844188; postgraduate student.

Knyazev Ivan Igorevich – e-mail: ikniazev@sfnedu.ru; phone: +79265347104; postgraduate student.

УДК 004.932.4

DOI 10.18522/2311-3103-2023-6-95-104

К.О. Север, Д.А. Гужва, И.И. Турулин

РЕКУРСИВНЫЙ РАЗДЕЛИМЫЙ ДВУМЕРНЫЙ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТР ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕЗКОСТИ RGB-ИЗОБРАЖЕНИЙ

Важную роль в восприятии качества изображения играет резкость, то есть величина градиента яркости в областях вблизи границ объектов. Данная характеристика отвечает за четкость и детализацию мелких элементов изображения. Расфокусировка объектива камеры и недостаточная освещенность являются основными факторами, которые могут привести к размытию цифрового изображения. Для увеличения резкости используют различные методы обработки, такие как фильтрация в частотной области, например применение быстрого преобразования Фурье для подчеркивания границ и текстур изображения. Применение данного типа фильтрации позволяет управлять контрастом и частотным содержанием изображения, что приводит к улучшению визуального восприятия. Однако данный метод имеет ряд существенных недостатков, таких как логарифмическая сложность и выполнение дополнительных вычислений, связанных с прямым и обратным преобразованием Фурье. Поэтому предпочтительным методом повышения резкости изображения является так называемая пространственная обработка, обеспечивающая прямую фильтрацию пикселей изображения без дополнительных преобразований, а повторное использование результатов обработки (рекурсивной составляющей) в фильтре позволяет сократить число операций, уменьшить вычислительную сложность. В статье описана разработка эффективного рекурсивного разделимого двумерного цифрового фильтра для повышения резкости RGB-изображений большой размерности. Приведены алгоритмы его построения, спроектированы соответствующие структурные схемы. Фильтр обладает свойством более равномерной детализации объектов изображения, и менее подвержен созданию импульсного шума. Также для исходного RGB-изображения высокого разрешения смоделирован фильтр размытия, матрица которого заполняется по нормальному (гауссовому) закону. Для оценки качества фильтрации разработанный фильтр сравнивается с алгоритмом классической двумерной свертки с ядром фильтра высоких частот Лапласа 5x5.

Обработка изображений; двумерные цифровые фильтры; рекурсивные алгоритмы; резкость; фильтр; двумерный; изображение.

K.O. Sever, D.A. Guzhva, I.I. Turulin

RECURSIVE SEPARABLE 2D DIGITAL FILTER FOR INCREASING THE SHARPNESS OF RGB IMAGES

An important role in the perception of image quality is sharpness, that is, the magnitude of the brightness gradient in areas near the boundaries of objects. This characteristic is responsible for the clarity and detail of small image elements. Defocusing the camera lens and insufficient illumination are the main factors that can lead to digital image blurring. To increase the sharpness, various processing methods are used, such as filtering in the frequency domain, for example, the use of fast Fourier transform to emphasize the boundaries and textures of the image. The use of this type

of filtering allows you to control the contrast and frequency content of the image, which leads to an improvement in visual perception. However, this method has a number of significant drawbacks, such as logarithmic complexity and performing additional calculations associated with forward and inverse Fourier transforms. Therefore, the preferred method of image sharpening is the so-called spatial processing, which provides direct filtering of image pixels without additional transformations, and the reuse of processing results (recursive component) in the filter allows you to reduce the number of operations, reduce computational complexity. The article describes the development of an effective recursive separable two-dimensional digital filter to sharpen large-dimensional RGB images. The algorithms of its construction are given, the corresponding block diagrams are designed. The filter has the property of more uniform detail of image objects, and is less susceptible to the creation of pulse noise. Also, for the original high-resolution RGB image, a blur filter is modeled, the matrix of which is filled according to the normal (Gaussian) law. To assess the filtration quality, the developed filter is compared with the algorithm of classical two-dimensional convolution with a 5x5 Laplace high-pass filter core.

Image processing; two-dimensional digital filters; recursive algorithms; sharpness; filter; two-dimensional; image.

Введение. В современных системах видеонаблюдения с ростом пропускной способности передаваемого видеосигнала увеличивается и размер изображения. Так, изображения высокого разрешения, например Full HD (1920×1080 пикселей), 4К (2560×1440 пикселей), содержат огромное количество информации и требуют больших ресурсов для их обработки. Это приводит к росту вычислительной сложности и объема памяти.

Также при передаче видеосигнала надо учитывать разрешение, контрастность, цветопередачу, динамический диапазон. Важную роль в восприятии качества изображения является резкость, величина градиента яркости в областях вблизи границ объектов [1]. Данная характеристика отвечает за четкость и детализацию мелких элементов изображения. Однако увеличение резкости также может привести к усилению шумов, артефактов и других нежелательных эффектов, поэтому необходимо найти баланс между увеличением резкости и сохранением естественного вида изображения.

Основными факторами ухудшения резкости цифрового изображения являются расфокусировка и недостаточная освещённость [2]. Так, аберрации оптической системы проводят к размытию изображения [3], а светочувствительные приемники добавляют электронный шум [4].

Аберрации, вносимые оптической системой, можно записать в виде следующего математическое выражение операции свертки:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y), \quad (1)$$

где $f(x, y)$ – неискажённое изображение;

x, y – координаты в плоскости изображения;

$h(x, y)$ – искажающее ядро свёртки.

Для решения вышеописанной проблемы разрабатываются различные методы, алгоритмы и способы, направленные на снижение вычислительной сложности обработки изображений. Существует несколько популярных методов цифровой фильтрации изображения [5].

1) Фильтрация в частотной области.

Вместо прямой фильтрации изображения с помощью вычисления двумерной свертки можно использовать фильтрацию в частотной области, например, с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) [6]. Это обычно позволяет существенно снизить количество операций (выигрыш зависит от размеров изображения). Данный тип фильтра эффективен для удаления шума, равномерно распределенного по изображению (например, электромагнитные помехи), повышения

резкости всего изображения, увеличения насыщенности, подчеркивания границ и текстур. Фильтрация в частотной области позволяет управлять контрастом и частотным содержанием изображения, что приводит к улучшению визуального восприятия. Однако данный метод имеет ряд существенных недостатков:

- ◆ *Логарифмическая сложность.* Время выполнения БПФ пропорционально $\Theta(N \log N)$ [7]. Это может быть затратно в случае обработки больших изображений.
- ◆ *Дополнительные вычисления.* В случае фильтрации в частотной области требуется выполнить дополнительные вычисления, связанные с преобразованиями Фурье и обратными преобразованиями (рис. 1). Это требует дополнительных ресурсов и может замедлить процесс обработки изображений.

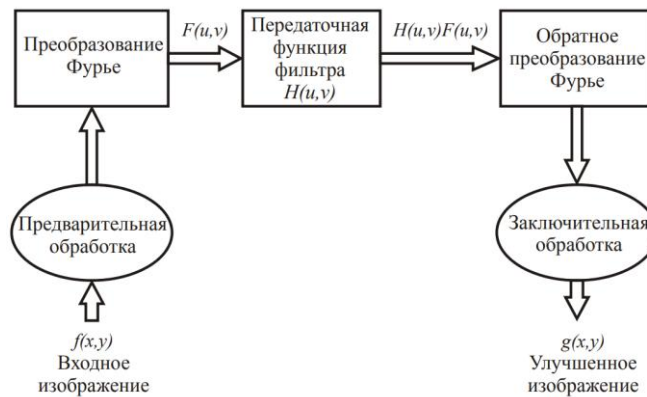


Рис. 1. Основные этапы фильтрации в частотной области

- ◆ *Подверженность артефактам.* При применении фильтрации в частотной области могут возникать артефакты, такие как зигзаговые искажения, потеря высокочастотной информации или появление полосовых структур (артефакты (эффekt) Гиббса) [8]. Это связано с особенностями БПФ и обратного БПФ, а также с выбором размера фильтра и границы изображения.

2) Сегментация изображения с установкой приоритетных регионов (областей) фильтрации [9].

Вместо применения фильтра ко всем пикселям изображения, можно определить наиболее важные области изображения и сосредоточить вычислительные ресурсы на обработке только значимых регионов. Например, приоритет могут иметь регионы с высокой детализацией [10], что позволяет сократить количество операций и время, затрачиваемое на обработку. Это особенно полезно при работе с большими изображениями при использовании сложных типов фильтров, а также при работе с встроенными системами, ресурсы которых ограничены.

Недостатками данного метода являются:

- ◆ потеря деталей или информации в неприоритетных регионах [11]. Это может быть неприемлемым в некоторых приложениях, где точность и полнота обработки изображений являются основными требованиями;
- ◆ выбор критерия (контрастность, текстура или градиенты) для определения приоритетных регионов может быть сложной задачей [12].
- ◆ сам процесс приоритизации регионов может потребовать дополнительных вычислительных ресурсов, чтобы определить приоритет регионов. Это может увеличить общую вычислительную нагрузку и компенсировать преимущество, полученное от снижения числа операций.

Таким образом, выбор метода приоритезации регионов изображения сильно зависит от конкретных требований и характеристик задачи.

3) Использование пространственной обработки [13].

Пространственные методы обработки изображений применяются, когда необходимо выполнить обработку пикселей с учетом их соседей. Например, для размытия, повышения резкости, детектирования краев или текстур. Пространственный метод фильтрации изображения обеспечивает прямую обработку пикселей изображения без дополнительных преобразований и потерь пространственной информации.

Интересным направлением исследования для сокращения времени пространственной обработки изображения является применение рекурсивно-сепарабельного алгоритма [14]. Он основан на разделении операции фильтрации маской большой размерности на простейшие последовательные горизонтальные (строчные рециркуляторы – СР) и вертикальные (кадровые рециркуляторы – КР) проходы (рис. 2).

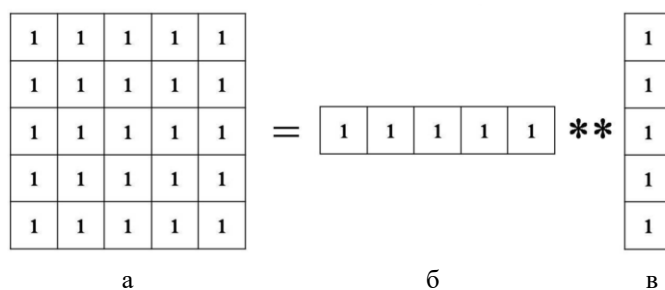


Рис. 2. Процесс реализации разделимого фильтра “скользящего среднего с маской 5x5”; а – исходная матрица 5x5; б – строчный рециркулятор; в – кадровый рециркулятор

Выигрыш по вычислительным операциям при применении разделимого фильтра заключается в следующем.

Например, при реализации нерекурсивного фильтра с апертурой 5x5 элементов требуется 25 операций умножения и 24 операции сложения/вычитания. А при рекурсивно-сепарабельном алгоритме построения фильтра требуются в основном операции сложения/вычитания и малое количество операций умножения, что сокращает требуемые вычислительные ресурсы за счет свертки опорных областей (например, две единичные области дают пирамидальную опорную область без использования операции умножения). Заметим, что операции умножения в общем случае являются более ресурсозатратными.

Также разделимые фильтры более гибки в смысле настройки параметров фильтрации для достижения желаемых эффектов (например, размер и тип маски фильтра).

Таким образом, предпочтительным методом фильтрации изображения является пространственный, обеспечивающий прямую обработку пикселей изображения без дополнительных преобразований, а рекурсивная составляющая (повторное использование отфильтрованных пикселей) разделимого фильтра позволяет сократить число операций, уменьшить вычислительную сложность [15].

Цель работы – разработка эффективного в смысле вычислительной сложности рекурсивного разделимого двумерного цифрового фильтра (РРДЦФ) для повышения резкости при обработке RGB-изображений большой размерности.

Постановка задачи. Для исходного RGB-изображения высокого разрешения (2048×1536 пикселей), необходимо смоделировать фильтр размытия, матрица которого заполняется по нормальному (гауссовому) закону. После этого – разработать и смоделировать РРДЦФ для повышения резкости деталей изображения и произвести обработку размытого изображения. Для оценки качества фильтрации – сравнить разработанный фильтр с алгоритмом классической двумерной свертки (КДС) с ядром фильтра высоких частот Лапласа 5×5 (рис. 3) и построить гистограммы распределения яркости для отфильтрованных изображений.

$$\begin{pmatrix} -1 & -3 & -4 & -3 & -1 \\ -3 & 0 & 6 & 0 & -3 \\ -4 & 6 & 20 & 6 & -4 \\ -3 & 0 & 6 & 0 & -3 \\ -1 & -3 & -4 & -3 & -1 \end{pmatrix}$$

Рис. 3. Ядро фильтра высоких частот Лапласа 5×5

Моделирование. Для моделирования фильтра размытия и последующей фильтрации используем исходное изображения «Рентген», представленное на рис. 4,а.

Двумерный фильтр размытия, матрица которого заполняется по нормальному (гауссовому) закону [16], выражается формулой:

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

где x – расстояние от центра по горизонтальной оси;

y – расстояние от центра по вертикальной оси;

σ – среднеквадратичное отклонение распределения гаусса.

Важным аспектом РРДЦФ является то, что он может быть эффективно реализован с использованием накопления – процесса, который позволяет осуществлять фильтрацию по строкам, а затем использовать уже отфильтрованные результаты для фильтрации по кадрам (столбцам) [17]. Это уменьшает вычислительную сложность и объем памяти, так как требуют меньше места для хранения промежуточных результатов, по сравнению с использованием полных фильтров.

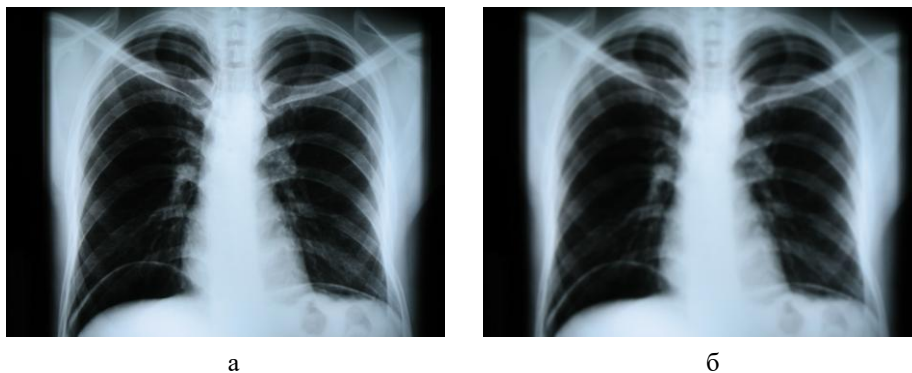


Рис. 4. Изображение: а – исходное; б – искажённое с помощью фильтр размытия с величиной среднеквадратичное отклонение распределения $\sigma = 5$

Для построения РРДЦФ необходимы образующие рекурсивные ячейки (рециркуляторы) [14]. На рис. 5 представлены образующие рекурсивные ячейки (рециркуляторы), а) i – по строке (строчный рециркулятор – СР) и б) j – по кадру (кадровый рециркулятор – КР), реализующие соответствующие ортогональные направления обработки типа “скользящее среднее”.

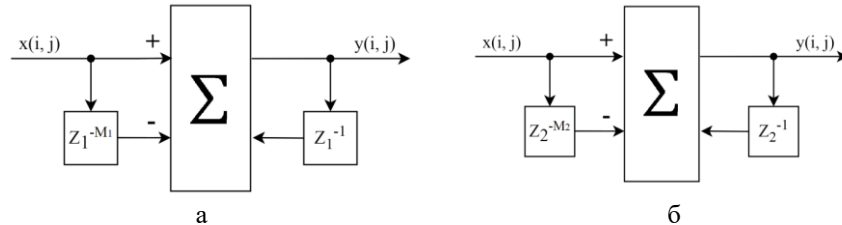


Рис. 5. Рециркуляторы: а – i – по строке, б – j – по кадру

Для строчного рециркулятора разностное уравнение

$$y(i, j) = x(i, j) - x(i - M_1, j) + y(i - 1, j), \tag{3}$$

для кадрового –

$$y(i, j) = x(i, j) - x(i, j - M_2) + y(i, j - 1), \tag{4}$$

где M_1 и M_2 – размер ядра в строчном и кадровом рециркуляторе.

Структурная схема РРДЦФ для обработки одной плоскости RGB изображения представлена на рис. 6.

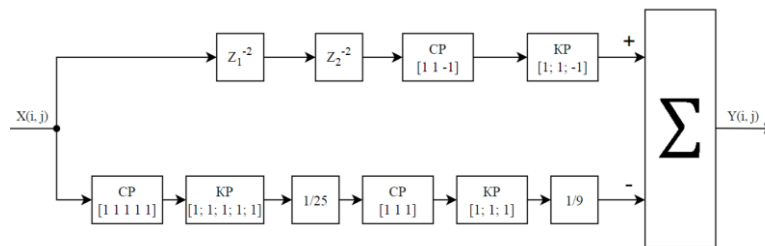


Рис. 6. Структурная схема РРДЦФ

После прохождения СР и КР требуется нормализация яркости изображения на величину суммы коэффициентов полного ядра фильтра.

При работе фильтра с RGB-изображением рекурсивный разделимый двумерный цифровой фильтр применяется для каждой плоскости отдельно (рис. 7). После объединения массивов выходной сигнал усиливается на множитель $a1$ и суммируется с входным сигналом X_{RGB} .

Оценка качества фильтрации. Результат фильтрации изображения рекурсивным разделимым двумерным цифровым фильтром представлен на рисунке 8, а. Здесь искаженное изображения с фильтром размытия $\sigma = 5$ обработано РРДЦФ и умножено на коэффициент $a1 = 10$. Суммирование отфильтрованного и взвешенного (отмасштабированного) изображения с входным сигналом X_{RGB} (рис. 9,а) добавляет резкости размытому изображения, подчеркивает контуры ребер, приближая изображения к исходному (рис. 4,а). Гистограмма распределения яркости обработанного изображения РРДЦФ наглядно отображает равномерное подчеркивание границ объектов на всём диапазоне (рис. 9,а).

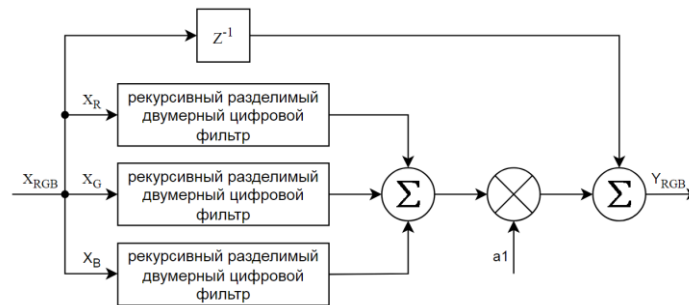


Рис. 7. Структурная схема РРДЦФ для повышения резкости при обработке RGB изображения

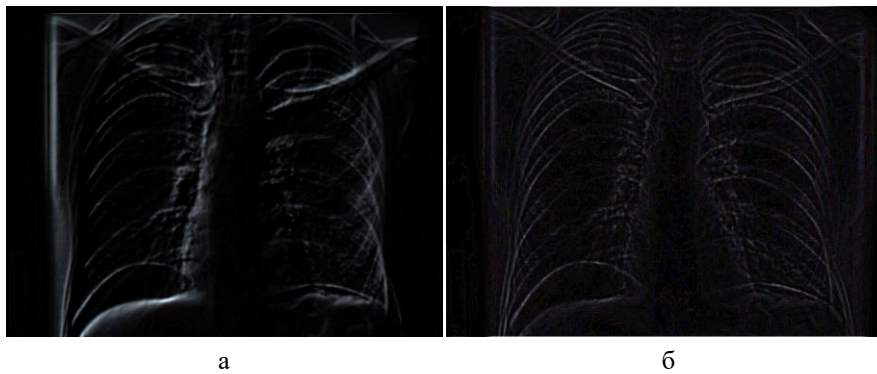


Рис. 8. Изображения с фильтром размытия $\sigma = 5$: а – обработанное РРДЦФ; б – обработанное фильтром высоких частот Лапласа

Для сравнения обрабатываем размытое изображение размытия ($\sigma = 5$) алгоритмом классической двумерной свертки (КДС) с ядром фильтра высоких частот Лапласа 5×5 (рис. 3).

Двумерная дискретная свертка определяется следующей формулой [18]:

$$CON_{j_1, j_2} = \sum_{i_1=0}^{n_1-1} \sum_{i_2=0}^{n_2-1} x_{i_1, i_2} \cdot y_{i_1-j_1, i_2-j_2}, \quad (5)$$

где n_1 и n_2 – это длина ядра цифрового фильтра по первой и второй координатам соответственно, x – ядро или импульсная характеристика цифрового фильтра, y – отсчеты входной последовательности (обрабатываемое изображение) и CON – выходная последовательность фильтра (свертка входной последовательности с ядром фильтра).

Результат фильтрации умножен на коэффициент $a_1 = 2$ (рис. 8,б). При обработке фильтром высоких частот Лапласа появляется небольшой импульсный шум в изображении, выраженный в хаотично разбросанных красных, зелёных и синих точках. На гистограмме распределения яркости изображения отчётливо видна ярко выраженная интенсивность пикселей 0 и 255 бита, что является проявлением точечного шума или так называемого шума «соль и перец» [19] (рис. 9,б). При суммировании отфильтрованного и взвешенного (отмасштабированного) изображения с входным сигналом X_{RGB} (рис. 10,б) не только улучшается четкость к размытым объектам изображения, но и подмешивается шум, который необходимо дополнительно устранять, например медианным фильтром 3×3 [20, 21].

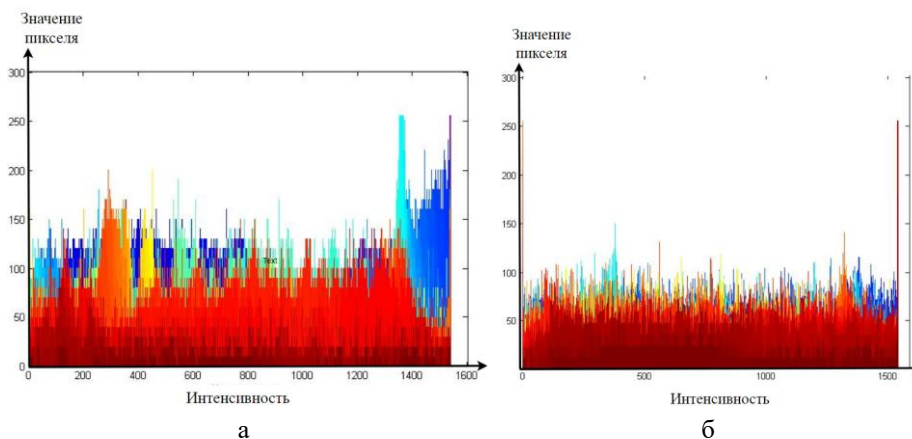


Рис. 9. Гистограмма распределения яркости изображения в области Red: а – фильтром РРДЦФ; б – фильтром высоких частот Лапласа 5x5

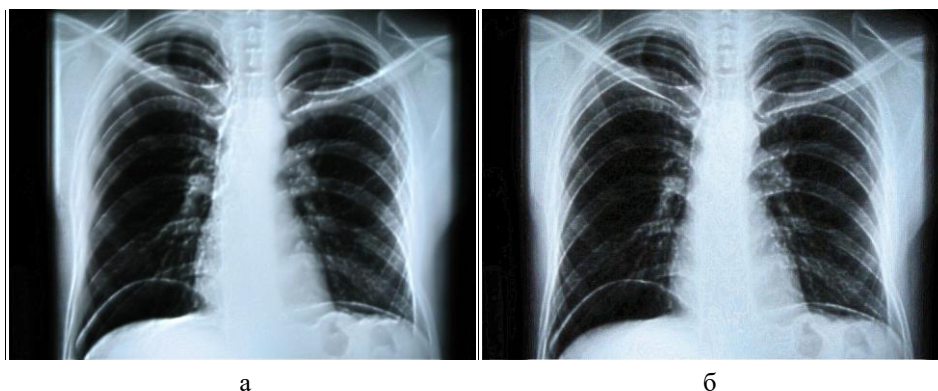


Рис. 10. Размытое изображение $\sigma = 5$, смешанное с: а – результатом РРДЦФ; б – результатом фильтра высоких частот Лапласа 5x5

Заключение. В результате разработан эффективный рекурсивный разделимый двумерный цифровой фильтр для повышения резкости RGB-изображений большой размерности. Описаны алгоритмы его построения, спроектированы соответствующие структурные схемы.

Разработанный фильтр обладает свойством более равномерной детализации объектов изображения, и менее подвержен созданию импульсного шума по сравнению с фильтром высоких частот Лапласа 5x5. Возможности фильтра продемонстрированы на примере тестового искажённого изображения «Рентген».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Мищенко Н.И., Пустынский И.Н. Методы и средства повышения технических характеристик активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем наблюдения // Доклады Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 3 (35). – С. 47-52.
3. Беззубик В.В., Белашенков Н.Р., Никифоров В.О. Метод количественной оценки контраста цифрового изображения // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 6 (70). – С. 86-88.

4. *Миленин Н.К.* Шумы в формирователях сигнала на ПЗС // Техника кино и телевидения. – 1980. – № 6. – С. 51-57.
5. *Приоров А.Л., Апальков И.В., Хряцев В.В.* Цифровая обработка изображений: учеб. пособие. – Ярославль: ЯрГУ, 2007. – 235 с.
6. *Грузман И.С., Киричук В.С. и др.* Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.
7. *Кандидов В.П. и др.* Дискретное преобразование Фурье: учеб. пособие. – М.: физический факультет МГУ, 2019. – 88 с.
8. *Sitdikov I.T., A. S. Krylov.* Variational image deringing using varying regularization parameter // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2015. – Vol. 25, No. 1. – P. 96-100.
9. *Старовойтов В.В., Голуб Ю.И.* Получение и обработка изображений на ЭВМ: учебно-методическое пособие. – Минск: БНТУ, 2018. – 204 с.
10. *Шапиро Л., Стокман Дж.* Компьютерное зрение. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
11. *Яне Б.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
12. *Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю.* Фрактальные методы сегментации текстурных изображений // Приборостроение. – 2013. – Т. 56, № 5. – С. 63-70.
13. *Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
14. *Каменский А.В., Курячий М.И.* Рекурсивно-сепарабельные методы и алгоритмы повышения качества изображений в телевизионных измерительных системах. – Томск, 2018. – 10 с.
15. *Турулин И.И., Ткаченко М.Г.* Быстроперестраиваемые цифровые фильтры: монография. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. – 104 с.
16. *Шлезингер М.И.* Математические средства обработки изображений. – К.: Наукова думка, 1989. – 200 с.
17. *Турулин И.И.* Основы теории рекурсивных КИХ-фильтров: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 264 с.
18. *Naito Y., Miyazaki T., Kuroda I.* A fast full-search motion estimation method for programmable processors with a multiply-accumulator // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 1996. – Vol. 6. – P. 3221-3224.
19. *Селянкин В.В., Скороход С.В.* Анализ и обработка изображений в задачах компьютерного зрения: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – 82 с.
20. *Fabijańska A., Sankowski D.* Noise adaptive switching median-based filter for impulse noise removal from extremely corrupted images // IET Image Processing. – 2011. – Vol. 5, Issue 5. – P. 472-480. – DOI: 10.1049/iet-ipr.2009.0178.
21. *Ng P.-E., Ma K.-K.* A switching median filter with boundary discriminative noise detection for extremely corrupted images // IEEE Transactions on Image Processing. – 2006. – Vol. 15, Issue 6. – P. 1506-1516. – DOI: 10.1109/TIP.2005.871129.

REFERENCES

1. *Gonsales R., Vuds R.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]. М.: Tekhnosfera, 2005, 1072 p.
2. *Mishchenko N.I., Pustynskiy I.N.* Metody i sredstva povysheniya tekhnicheskikh kharakteristik aktivno-impul'snykh televizionno-vychislitel'nykh sistem nablyudeniya [Methods and means of improving the technical characteristics of active-pulse television-computer surveillance systems], *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo un-ta sistem upravleniya i radio-elektroniki* [Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2014, No. 3 (35), pp. 47-52.
3. *Bezzubik V.V., Belashenkov N.R., Nikiforov V.O.* Metod kolichestvennoy otsenki kontrasta tsifrovogo izobrazheniya [Method for quantitative assessment of digital image contrast], *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik SPbGU ITMO* [Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University ITMO], 2010, No. 6 (70), pp. 86-88.
4. *Milenin N.K.* Shумы v formirovatel'yakh signala na PZS [Noise in CCD signal conditioners], *Tekhnika kino i televideniya* [Film and television technology], 1980, No. 6, pp. 51-57.
5. *Priorov A.L., Apal'kov I.V., Khryashchev V.V.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy: ucheb. posobie [Digital image processing: tutorial]. Yaroslavl': YarGU, 2007, 235 p.

6. *Gruzman I.S., Kirichuk V.S. i dr.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v informatsionnykh sistemakh: ucheb. posobie [Digital image processing in information systems: a tutorial]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2002, 352 p.
7. *Kandidov V.P. i dr.* Diskretnoe preobrazovanie Fur'e: ucheb. posobie [Discrete Fourier transform: tutorial.]. Moscow: fizicheskiy fakul'tet MGU, 2019, 88 p.
8. *Sitdikov I.T., A. S. Krylov.* Variational image deringing using varying regularization parameter, *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2015, Vol. 25, No. 1, pp. 96-100.
9. *Starovoytov V.V., Golub Yu.I.* Poluchenie i obrabotka izobrazheniy na EVM: uchebno-metodicheskoe posobie [Receiving and processing images on a computer: educational and methodological manual]. Minsk: BNTU, 2018, 204 p.
10. *Shapiro L., Stokman Dzh.* Komp'yuternoe zrenie [Computer vision]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2006, 752 p.
11. *Yane B.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2007, 584 p.
12. *Fisenko V.T., Fisenko T.Yu.* Fraktal'nye metody segmentatsii teksturnykh izobrazheniy [Fractal methods for segmenting texture images], *Priborostroenie [Instrumentation]*, 2013, Vol. 56, No. 5, pp. 63-70.
13. *Shovengerdt R.A.* Distsionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazheniy [Remote sensing. Models and methods of image processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2010, 560 p.
14. *Kamenskiy A.V., Kuryachiy M.I.* Rekursivno-separabel'nye metody i algoritmy povysheniya kachestva izobrazheniy v televizionnykh izmeritel'nykh sistemakh [Recursive-separable methods and algorithms for improving image quality in television measurement systems]. Tomsk, 2018, 10 p.
15. *Turulin I.I., Tkachenko M.G.* Bystroperestraivaemye tsifrovye fil'try: monografiya [Fast-tunable digital filters: monograph]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2008, 104 p.
16. *Shlezinger M.I.* Matematicheskie sredstva obrabotki izobrazheniy [Mathematical tools for image processing]. Kiev: Naukova dumka, 1989, 200 p.
17. *Turulin I.I.* Osnovy teorii rekursivnykh KIKh-fil'trov: monografiya [Fundamentals of the theory of recursive FIR filters: monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 264 p.
18. *Naito Y., Miyazaki T., Kuroda I.* A fast full-search motion estimation method for programmable processors with a multiply-accumulator, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1996, Vol. 6, pp. 3221-3224.
19. *Selyankin V.V., Skorokhod S.V.* Analiz i obrabotka izobrazheniy v zadachakh komp'yuternogo zreniya: ucheb. posobie [Analysis and processing of images in computer vision tasks: a tutorial]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2015, 82 p.
20. *Fabijańska A., Sankowski D.* Noise adaptive switching median-based filter for impulse noise removal from extremely corrupted images, *IET Image Processing*, 2011, Vol. 5, Issue 5, pp. 472-480. DOI: 10.1049/iet-ipr.2009.0178.
21. *Ng P.-E., Ma K.-K.* A switching median filter with boundary discriminative noise detection for extremely corrupted images, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, Vol. 15, Issue 6, pp. 1506-1516. DOI: 10.1109/TIP.2005.871129.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Н. Чернов.

Север Константин Олегович – Южный федеральный университет; e-mail: sever@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Гужва Дмитрий Александрович – e-mail: aleksandrovich777@inbox.com; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Турулин Игорь Ильич – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

Sever Konstantin Olegovich – Southern Federal University; e-mail: sever@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of theoretical foundations of radio engineering; post-graduate student.

Guzhva Dmitry Alexandrovich – e-mail: aleksandrovich777@inbox.com; the department of theoretical foundations of radio engineering; post-graduate student.

Turulin Igor Ilyich – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; the department of theoretical foundations of radio engineering; dr. of eng. sc.; professor.