

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 004.932.4
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-6-48-58>
EDN NZQPFH



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Цифровой трехкаскадный рекурсивно-сепарабельный фильтр обработки изображений с изменяемыми размерами сканирующей многоэлементной апертуры

А.В. Каменский,
Т.М. Акаева[@],
Д.А. Гребенщикова

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: ttnakaeva@gmail.com

Резюме

Цели. Основными целями цифровой обработки изображений являются повышение их четкости при сохранении качества изображения и устранение шумов. Однако объемы информации, содержащейся в файлах цифровых изображений, растут из года в год. Это обстоятельство негативно сказывается на времени их обработки, что критично для систем с высокими требованиями к нагрузке на вычислительную платформу. В связи с этим актуальным становится применение цифровых фильтров, позволяющих сократить время обработки поступающих данных. Для решения этой задачи разрабатываются адаптивные фильтры с различными размерами многоэлементной апертуры обработки, которые позволяют повысить четкость и сохранить детали изображения. Фильтры с адаптивными свойствами способны изменять свои параметры в процессе обработки данных, обеспечивая максимальное быстродействие при увеличении размеров апертуры. Целью работы является разработка рекурсивно-сепарабельного цифрового фильтра с изменяемыми размерами сканирующей многоэлементной апертуры, позволяющего сократить количество вычислительных операций при сохранении эффективности фильтрации входных данных (изображений).

Методы. В работе использовались рекурсивно-сепарабельные методы и алгоритмы построения цифровых фильтров.

Результаты. Описан алгоритм рекурсивно-сепарабельной реализации цифрового фильтра, а также представлен итоговый вид апертуры обработки и ее трехмерный вид. Для оценки быстродействия фильтра проведено сравнение разработанного алгоритма с алгоритмом классической двумерной свертки. Эксперимент проводился с использованием изображений различных размеров и заключался в определении времени, затраченного на процесс обработки тестового изображения. Установлено, что время обработки тестового изображения с применением разработанного фильтра в среднем в 5 раз меньше, чем время, затрачиваемое алгоритмом классической двумерной свертки. Определены оптимальные коэффициенты увеличения центрального элемента и поднятия положительной части апертуры цифрового фильтра, позволяющие повысить эффективность его применения.

Выводы. Проведенные исследования показывают эффективность использования разработанного рекурсивно-сепарабельного двумерного фильтра для повышения четкости изображений и уменьшения затрачиваемого на обработку времени.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, цифровые фильтры, рекурсия, сепарабельность, повышение четкости изображений, быстродействие

• Поступила: 29.09.2023 • Доработана: 22.04.2024 • Принята к опубликованию: 20.09.2024

Для цитирования: Каменский А.В., Акаева Т.М., Гребенщикова Д.А. Цифровой трехкаскадный рекурсивно-сепарабельный фильтр обработки изображений с изменяемыми размерами сканирующей многоэлементной апертуры. *Russ. Technol. J.* 2024;12(6):48–58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-6-48-58>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Digital three-stage recursive-separable image processing filter with variable sizes of scanning multielement aperture

Andrey V. Kamenskiy,
Tatyana M. Akaeva[®],
Darya A. Grebenschikova

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: ttnakaeva@gmail.com

Abstract

Objectives. The main aim of digital image processing is to increase clarity while maintaining image quality and eliminate noise. However, the amount of information contained in digital image files is growing year after year. This circumstance negatively affects processing time, critical for systems with high load requirements on the computing platform. In this regard, the use of digital filters which enable a reduction to the processing time of incoming data is important. In order to resolve this issue, adaptive filters with different sizes of multielement processing aperture are being developed to improve image clarity and preserve image details. Filters with adaptive properties are able to change their parameters during data processing, and provide maximum performance as the aperture size increases. The aim of the work is to develop a type of recursively separable digital filter with variable sizes of a scanning multielement aperture which allows the number of computational operations to be reduced while maintaining the efficiency of filtering input data (images).

Methods. The work used recursive-separable methods and algorithms to construct digital filters.

Results. An algorithm for the recursive-separable implementation of a digital filter is described, and the final view of the processing aperture and its three-dimensional appearance are presented. In order to evaluate the performance of the filter, a comparison of the developed algorithm with the classical two-dimensional convolution algorithm was carried out. The experiment was performed using images of various sizes and consisted of determining the time spent on the process of processing the test image. The study established that the processing time of a test image using the developed filter is on average 5 times less than the time taken by the classical two-dimensional convolution algorithm. The optimal coefficients for magnifying the central element and raising the positive part of the aperture of a digital filter were determined, enabling the efficiency of its use to be enabled.

Conclusions. The studies show the effectiveness of using the developed recursive-separable two-dimensional filter to improve image clarity and reduce the time spent on processing.

Keywords: digital image processing, digital filters, recursion, separability, increased image clarity, speed

• Submitted: 29.09.2023 • Revised: 22.04.2024 • Accepted: 20.09.2024

For citation: Kamenskiy A.V., Akaeva T.M., Grebenshchikova D.A. Digital three-stage recursive-separable image processing filter with variable sizes of scanning multielement aperture. *Russ. Technol. J.* 2024;12(6):48–58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-6-48-58>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Первым предварительным этапом при анализе изображений, как правило, является их цифровая обработка. Качество выполнения этого этапа может сильно влиять на результаты последующего анализа. Цифровая обработка, включающая в себя цифровую фильтрацию, применяется для решения таких задач, как повышение разрешения, восстановление «испорченных» объектов на изображении, повышение четкости и колоризации [1].

Основной целью фильтрации изображений является улучшение их четкости и повышение качества, а также устранение шумов. Однако объемы информации, содержащейся в файлах цифровых изображений, растут из года в год [2]. Это отрицательно сказывается на способности цифровых фильтров выполнять быструю и качественную обработку поступающих данных. Одним из путей решения этой проблемы является повышение быстродействия цифровых фильтров за счет сокращения количества вычислительных операций, необходимых для процесса обработки. Также важно обеспечить вариативность их использования и возможность коррекции параметров при работе. Эффективным решением является разработка адаптивных фильтров, которые могут изменять свои параметры в процессе обработки изображений, чтобы сохранить быстродействие при увеличении размеров апертуры. В адаптивных фильтрах скорость обработки всегда остается постоянной для конкретных размеров изображений независимо от размера апертуры обработки.

ФИЛЬТРЫ С АДАПТИВНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Адаптивные фильтры представляют собой класс фильтров, в которых настройка параметров происходит в процессе работы в соответствии с характеристиками входных данных [3]. При каждом фиксированном наборе параметров адаптивный фильтр – это линейное устройство, т.к. между его входными и выходными сигналами существует линейная зависимость [4, 5].

Адаптивные фильтры бывают двух типов [6, 7]:

- трансверсальный – фильтр с конечной импульсной характеристикой;
- рекурсивный – фильтр с бесконечной импульсной характеристикой.

Адаптивные фильтры широко используются в различных областях, таких как обработка сигналов, компьютерное зрение, обработка изображений и т.д. В двух последних случаях их основное назначение – очистка фото- и видеoinформации от шумов, которые перекрываются по спектру с полезным сигналом, или в случае, когда полоса шумов не определена и не может быть задана изначально [8]. Применение адаптивных фильтров может значительно повысить эффективность и качество обработки данных в различных приложениях, где необходима автоматическая настройка на изменяющиеся условия или требования [4, 9].

ОБРАЗУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

При разработке рекурсивных фильтров используются образующие рекурсивные ячейки (рециркуляторы). Рециркуляторами называют рекурсивные ячейки, которые выполняют обработку по строке (строчный рециркулятор, СР) и по кадру (кадровый рециркулятор, КР) матрицы входного изображения [10]. Их функциональность заключается в выполнении процедуры двумерной дискретной свертки, при которой входные данные обрабатываются в соответствии с заданной импульсной характеристикой рециркулятора. Импульсную характеристику можно представить в виде единичной матрицы (строка или столбец размером $N \times 1$ элементов). На рис. 1 представлены образующие рекурсивные ячейки по n_1 -строке (СР) (а)

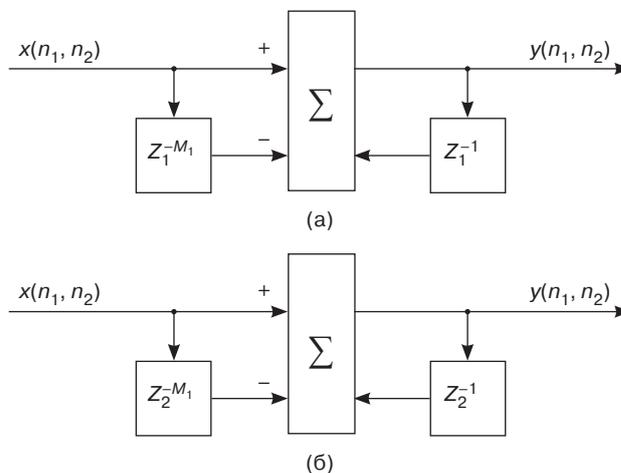


Рис. 1. Схемы рециркуляторов: (а) по n_1 -строке, (б) по n_2 -кадру

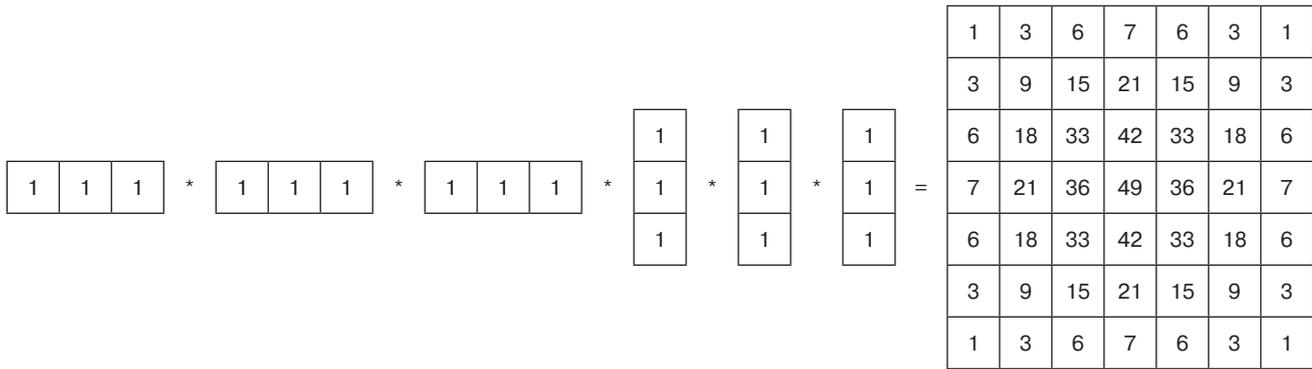


Рис. 2. Алгоритм рекурсивно-сепарабельной реализации фильтра

и по n_2 -кадру (КР) (б), реализующие соответствующие ортогональные направления обработки «скользящее среднее». Рециркулятор СР осуществляет обработку по строке матрицы входных данных, а КР – по столбцу данной матрицы; $x(n_1, n_2)$ – входные данные; $y(n_1, n_2)$ – выходные данные; Z – элементы задержки; M_1 – коэффициент, определяющий величину задержки по строке (целое число); M_2 – коэффициент определяющий величину задержки по столбцу (целое число) [11, 12].

ИСХОДНЫЙ ФИЛЬТР

Разработка двумерного фильтра основывается на последовательности определенных процессов. В качестве примера рассмотрим процесс формирования апертуры обработки размером 7×7 элементов двумерного трехкаскадного рекурсивно-сепарабельного фильтра (ТРСФ).

На вход фильтра подается информационная последовательность в виде единичной матрицы размером 1×1 элемент. Это действие позволит сформировать маску ТРСФ, которая в дальнейшем даст возможность провести корректное сравнение разработанного алгоритма с алгоритмом классической двумерной свертки (КДС). Для формирования основного размера апертуры обработки указанная последовательность проходит через три строчных (строка из единиц размером 3×1 элементов) и три кадровых (столбец из единиц размером 1×3 элементов) рециркуляторов. В результате образуется матрица размером 7×7 элементов, которая является основой для формирования итоговой маски и подвергается дальнейшим изменениям. На рис. 2 представлен алгоритм рекурсивно-сепарабельной реализации фильтра.

В результате операций, протекающих в фильтре после подачи на вход тестовой информационной последовательности в виде единичной матрицы, формируется маска ТРСФ, представленная на рис. 3, ее трехмерный вид показан на рис. 4 [13].

Из рис. 3 видно, что маска ТРСФ обладает положительной областью в центре размером

-1	-3	-6	-7	-6	-3	-1
-3	-9	-18	-21	-18	-9	-3
-6	-18	14	58	14	-18	-6
-7	-21	58	80	58	-21	-7
-6	-18	14	58	14	-18	-6
-3	-9	-18	-21	-18	-9	-3
-1	-3	-6	-7	-6	-3	-1

Рис. 3. Вид маски ТРСФ 7×7 элементов

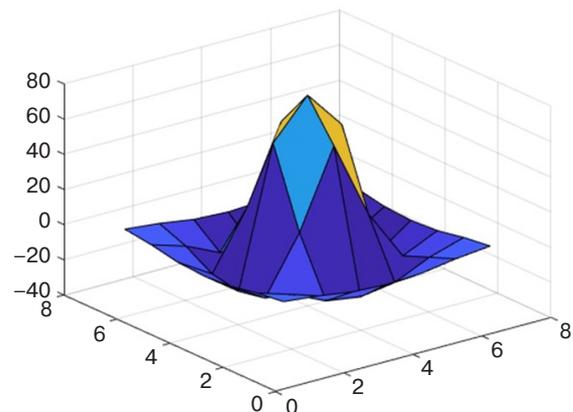


Рис. 4. Трехмерный вид маски ТРСФ

3×3 элементов, ее пропорциональное увеличение, приводящее к изменению изначальной суммы коэффициентов итоговой маски, позволит повысить эффективность обработки цифрового изображения. По такому же принципу выполняется обработка за счет изменения центрального элемента матрицы (для маски размером 7×7 элементов – это 4-й элемент в 4-й строке).

Структурная схема ТРСФ размерностью 7×7 элементов приведена на рис. 5, где обозначено: A_1 – коэффициент увеличения значений положительной части маски, A_2 – коэффициент увеличения значения центрального элемента маски. В первой ветви ТРСФ происходит формирование маски размером

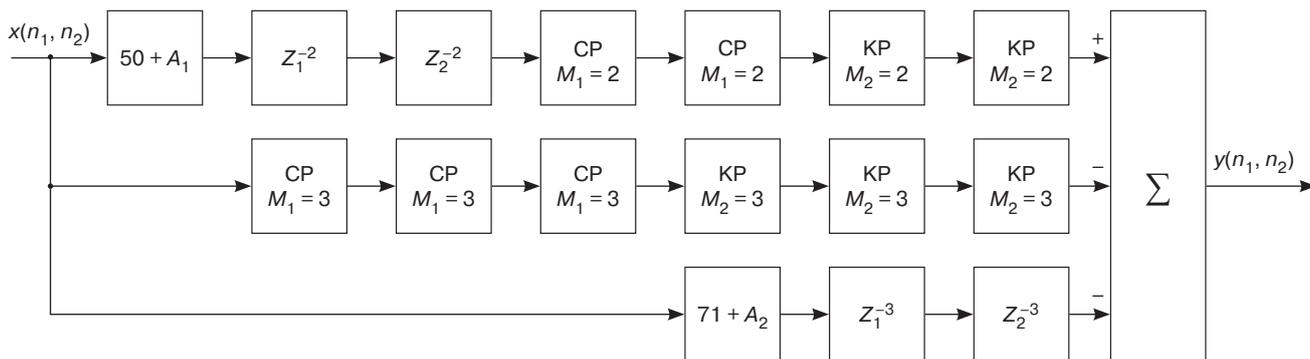


Рис. 5. Структурная схема ТРСФ

3×3 элементов, которая необходима для компенсации отрицательной части и формирования положительного центра итоговой маски за счет элементов задержки Z . Вторая ветвь фильтра формирует основную матрицу размером 7×7 элементов. Третья ветвь ТРСФ необходима для компенсации отрицательной части маски за счет добавления остатка к центральному элементу основной матрицы, а также для возможности его корректировки пользователем. Выходные данные ветвей суммируются, образуя выходной сигнал фильтра, причем для второй и третьей ветвей суммирование происходит с инверсией знака.

ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПОВ МОДИФИКАЦИИ ФИЛЬТРА ТРСФ

Для правильного функционирования адаптивного ТРСФ необходимо обеспечить его корректную реакцию на задаваемое пользователем значение размеров апертуры обработки. При этом работа происходит исключительно с нечетными значениями размеров (9×9 , 11×11 , 13×13 и т.д.). Важно учесть изменение коэффициентов рециркуляторов центральной маски к изменениям рециркуляторов основной маски фильтра в соотношении $1 : 2$. Это означает, что при изменении итогового размера основной апертуры фильтра также изменяется размер его центральной маски, но лишь при каждом втором увеличении размера основной маски. Один рециркулятор остается всегда неизменным, т.к. в фильтре используется нечетное количество рециркуляторов, и размер матрицы значений импульсной характеристики должен быть 3×1 или 1×3 элементов. В таком случае при заданной размерности 9×9 коэффициенты строчного и кадрового рециркулятора будут равны, соответственно 4 (единичная матрица 4×1 элементов) и 4 (единичная матрица 1×4 элементов), а при размерности 11×11 равны 5 (единичная матрица 5×1 элементов) и 5 (единичная матрица 1×5 элементов).

Важно отметить, что в центральной части фильтра генерируется маска меньшего размера по сравнению с основной. Эта центральная часть необходима

для достижения баланса суммы внешней и центральной частей итоговой маски, для приведения ее суммы к нулю и сохранения нормальной яркости обработанного изображения. Подобный баланс внешней и центральной частей итоговой маски можно наблюдать в фильтре лапласиан для «восьми соседей», где сумма всех коэффициентов равна нулю [14]. При увеличении размера маски необходимо сохранить нормальное соотношение между размерами внешней и центральной областей для пропорционального изменения ее трехмерного вида. Для этого используется изменение размера центральной маски с шагом 2. Например, центральная маска 3×3 будет использоваться для матриц размером 7×7 и 9×9 элементов, после чего произойдет ее увеличение на 2 элемента до матрицы 5×5 элементов, которая будет использоваться для итоговых матриц размером 11×11 и 13×13 элементов. Это достигается путем автоматизированного расчета коэффициентов рециркуляторов в нижней части фильтра за счет ввода размеров требуемой апертуры фильтра. Таким образом, каждое второе возможное значение размера маски, начиная с 3×3 , будет влиять на изменение размера внутренней маски. Например, при размерности 7×7 левый верхний угол маски находится в позиции $x(n_1 - 1, n_2 - 2)$. Затем, при следующем возможном значении размера маски (начиная с 5×5) коэффициент сдвига внутренней маски изменится на 1. Таким образом, при значении 5×5 сдвиг будет равен 2 (а не 1), потому что размер внутренней маски также уменьшится на 1 ячейку и станет равным 1×1 . Этот процесс будет продолжаться, и при размерности основной маски 9×9 и внутренней маски 3×3 , сдвиг будет равен 3.

Описанную зависимость можно программно выразить как функцию, используя параметры размеров апертуры матриц. Коэффициент сдвига внутренней маски будет равен разности между размером основной маски и размером центральной маски, деленной на два. Например, при размере 17×17 получаем: $(17 - 7) / 2 = 5$. Следовательно, матрица смещается на 5 элементов.

Этот процесс работает корректно для масок любых размеров. Сначала вычисляется общее количество ячеек

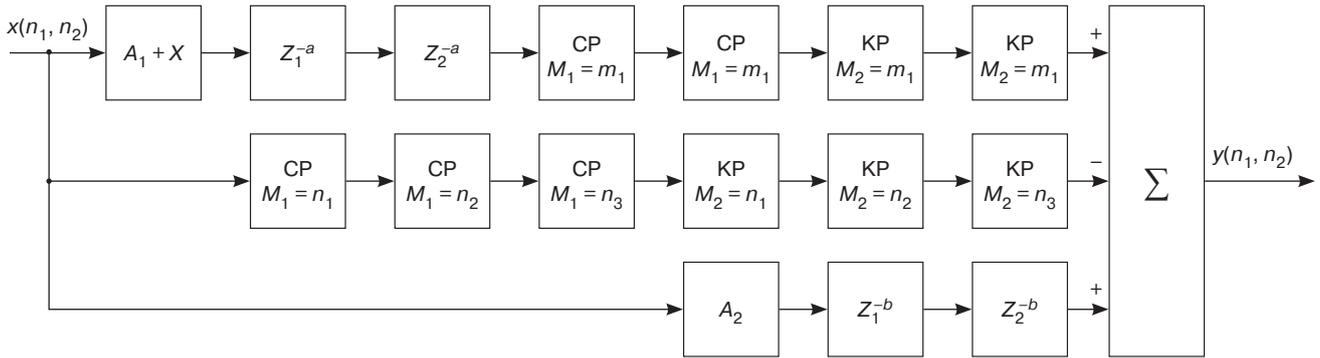


Рис. 6. Структурная схема ТРСФ

в маске, например, для маски 9×9 оно равно 81, а для маски 7×7 это 49. Затем суммируются все элементы маски, и эта сумма делится на предварительно рассчитанную сумму элементов положительного центра итоговой маски. Результат используется для создания новой маски в верхней части фильтра. Из нее происходит вычитание начальной маски, и в результате в ячейках образуются конечные значения, при суммировании которых получается, что вся маска (ее значения) равна 0.

Модифицированный фильтр должен быть настраиваемым с помощью двух входных коэффициентов. Один из этих коэффициентов будет использоваться для увеличения значений центральной части маски на заданную величину, а второй – для увеличения значения центрального элемента маски.

Закономерности, которые используются при создании фильтра, иллюстрируются табл. 1, где приведены значения коэффициентов рециркуляторов, размер центральной маски, количество рециркуляторов для свертки и значения сдвига центральной маски для различных размеров масок от 5×5 до 17×17 .

На базе описанных принципов модификации можно построить структурную схему фильтра, представленную на рис. 6, где обозначено: X – коэффициент уравнивания сумм центральной и внешней масок; A_1 – коэффициент увеличения значений

положительной части маски; A_2 – коэффициент увеличения значения центрального элемента маски; Z_1 и Z_2 – коэффициенты сдвига масок (зависимые от переменных $-a$ и $-b$, рассчитываемых автоматически в коде фильтра); m – коэффициенты строчного и кадрового рециркуляторов для положительной ветви; n – коэффициенты строчного и кадрового рециркуляторов для отрицательной ветви.

ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ РАЗРАБОТАННОГО ФИЛЬТРА ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ РАЗМЕРА АПЕРТУРЫ ОБРАБОТКИ

Для проведения экспериментальных исследований использовались три изображения различной размерности: 640×480 элементов формата tiff, 1280×720 элементов формата bmp и 3000×2000 элементов формата jpeg. При исследовании для каждого фильтра использовались маски размером 7×7 , 9×9 и 11×11 . Обработка изображений проводилась на персональном компьютере со следующими характеристиками: операционная система – Windows 10; процессор – 12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12400F 2.50 ГГц; оперативная память – 32 Гб. Измерение времени работы фильтра проводилось 10 раз при каждом эксперименте и вычислялось среднее значение.

Результатом экспериментального исследования являлись зависимости быстродействия обработки от размера апертуры для каждого из трех изображений. Средние значения времени обработки для КДС и ТРСФ, а также их компилированных MEX-функций¹ оценивались при помощи процедуры измерения времени из программного обеспечения MATLAB². Результаты измерения быстродействия обработки для трех изображений представлены в табл. 2.

¹ Minimum EXcluded, алгоритм поиска минимального отсутствующего числа. [Minimum EXcluded, algorithm for finding the minimum missing number.].

² <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Дата обращения 20.09.2023. / Accessed September 20, 2023.

Таблица 1. Зависимость показателей фильтра от изменения размера маски

Заданный размер	Коэффициент СР и КР	Размер внутренней маски	СР и КР для внутренней маски	Коэффициент сдвига внутренней маски
5×5	2 и 2	1×1	1 и 1	3
7×7	3 и 3	3×3	3 и 3	3
9×9	4 и 4	3×3	3 и 3	4
11×11	5 и 5	5×5	5 и 5	4
13×13	6 и 6	5×5	5 и 5	5
15×15	7 и 7	7×7	7 и 7	5
17×17	8 и 8	7×7	7 и 7	6

Таблица 2. Средние значения времени обработки изображения

Изображение 640 × 480, формат tiff				
Размер маски фильтра	Время обработки, с			
	MATLAB		MEX	
	КДС	ТРСФ	КДС	ТРСФ
7 × 7	0.6318	0.0995	0.1187	0.0891
9 × 9	4.2060	0.0969	3.1092	0.0951
11 × 11	5.2562	0.0979	4.1090	0.0884

Изображение 1280 × 720, формат bmp				
Размер маски фильтра	Время обработки, с			
	MATLAB		MEX	
	КДС	ТРСФ	КДС	ТРСФ
7 × 7	1.8361	0.3211	0.3622	0.2915
9 × 9	16.4342	0.3256	15.0594	0.2572
11 × 11	24.5264	0.3413	17.3964	0.2912

Изображение 3000 × 2000, формат jpeg				
Размер маски фильтра	Время обработки, с			
	MATLAB		MEX	
	КДС	ТРСФ	КДС	ТРСФ
7 × 7	12.3788	2.4025	2.4289	2.1971
9 × 9	30.3757	2.3876	12.3612	2.1965
11 × 11	45.5701	2.2715	19.3326	2.1916

На рис. 7 представлены графики зависимости времени обработки от размера апертуры фильтра для изображения 640 × 480 элементов.

На рис. 8 представлены графики зависимости времени обработки от размера апертуры фильтра для изображения 1280 × 720 элементов.

На рис. 9 представлены графики зависимости времени обработки от размера апертуры фильтра для изображения 3000 × 2000 элементов.

Из представленных графиков виден выигрыш в быстродействии разработанного фильтра при росте апертуры обработки относительно алгоритма КДС.

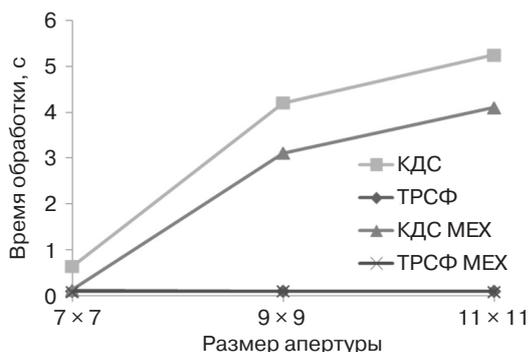


Рис. 7. График зависимости быстродействия от размера апертуры для изображения 640 × 480 (tiff)

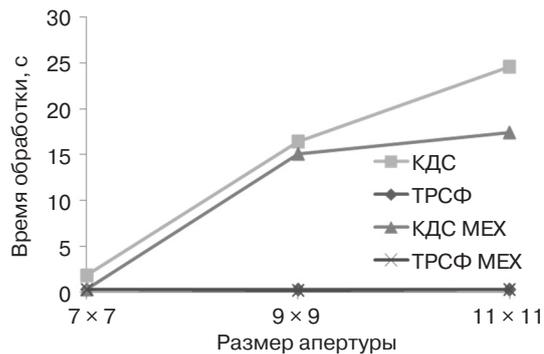


Рис. 8. График зависимости быстродействия от размера апертуры для изображения 1280 × 720 (bmp)

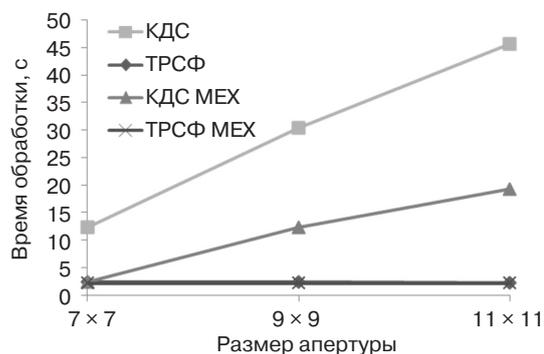


Рис. 9. График зависимости быстродействия от размера апертуры для изображения 3000 × 2000 (jpeg)

Следующий шаг – оценка влияния роста апертуры ТРСФ на время его работы. Были использованы значения размера маски апертур от 7 до 25 с шагом 2, а также 49, 75 и 99. Значения коэффициентов при всех вычислениях были одинаковы и равнялись: $A_1 = 10$, $A_2 = 0$. Результаты измерений приведены в табл. 3.

Таблица 3. Затраты времени на выполнение фильтрации изображения

Размер маски	Время обработки, с
7	2.46
9	2.39
11	2.24
13	2.27
15	2.33
17	2.29
19	2.31
21	2.32
23	2.31
25	2.33
49	2.56
75	2.62
99	2.49

Можно сделать вывод о том, что изменение апертуры фильтра приводит к незначительным изменениям в быстродействии алгоритма работы ТРСФ в диапазоне от 2.24 до 2.62 с.

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ЛИНИЙ НА ОБРАБОТАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

При разработке новых алгоритмов цифровой обработки изображений важно не только повысить их быстродействие, но и не потерять полезную информацию, хранящуюся в самих изображениях, а в идеальном случае – повысить их качество (увеличить четкость, удалить шумы и т.п.).

Исследование проводилось путем измерения количества телевизионных линий (ТВЛ) на обработанных изображениях при изменении коэффициентов A_1 и A_2 . Это необходимо для проверки способности фильтра сохранять мелкие детали изображений четкими [15]. Для пересчета числа «циклов на пиксель» (modulation transfer function, MTF50), получаемых при измерении разрешения в программном обеспечении *Imatest*³ в ТВЛ, использовалась формула [12]:

$$\text{ТВЛ} = \left(\frac{\text{CPP}}{0.5} \right) \times \text{предельное разрешение},$$

где CPP – число «циклов на пиксель», предельное разрешение (в ТВЛ) – значение количества пикселей по ширине изображения.

В качестве тестового изображения взят кадр, полученный активно-импульсной телевизионной измерительной системой⁴ (рис. 10) [16, 17].

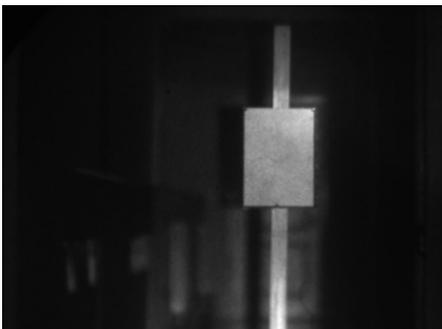


Рис. 10. Тестовое изображение

³ <https://www.imatest.com/>. Дата обращения 20.09.2023. / Accessed September 20, 2023.

⁴ Капустин В.В. *Активно-импульсные телевизионные измерительные системы с повышенной устойчивостью к оптическим помехам*: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2017. 118 с. [Kapustin V.V. *Active-impulse television measurement systems with increased immunity to optical interference*: Cand. Sci. (Eng.). Tomsk, 2017. 118 p. (in Russ.).]

Данное измерение было выполнено для определения оптимальных значений коэффициентов A_1 и A_2 , а также для определения факта наилучшей обработки при изменении либо A_1 , либо A_2 , т.к. их изменение независимо друг от друга приводило к разным результатам. Сначала изменялся коэффициент A_1 от 1 до 50, затем в таком же диапазоне изменялся коэффициент A_2 . Значение ТВЛ для исходного изображения – 158. На рис. 11 представлена зависимость значений ТВЛ от коэффициента A_1 .

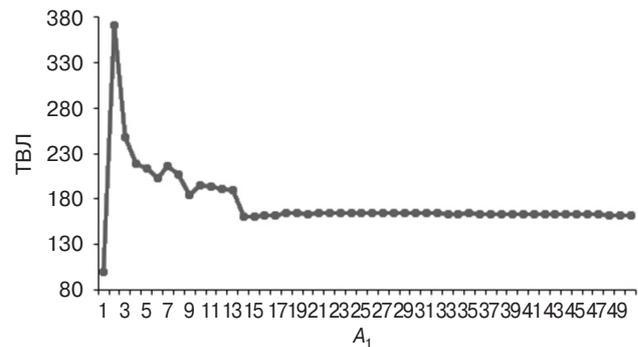


Рис. 11. Зависимость значений ТВЛ от коэффициента увеличения значения положительной части маски A_1

Как видно из полученных результатов, увеличение коэффициента A_1 от 15 и более не влияет на итоговое число ТВЛ. Разрешение изображения до обработки и после практически не изменяется, т.е. фильтрация теряет свою эффективность.

На рис. 12 представлен пример обработки исходного изображения фильтром с оптимальным значением коэффициента $A_1 = 1$.

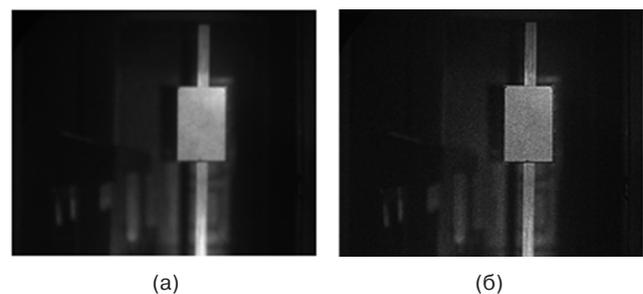


Рис. 12. Изображения до (а) и после (б) обработки фильтром с оптимальным коэффициентом A_1

Результаты измерений количества ТВЛ при изменении коэффициента A_2 приведены на рис. 13.

На рис. 14 представлен пример обработки исходного изображения фильтром с оптимальным значением коэффициента $A_2 = 21$.

На основании приведенных графиков и изображений можно сделать вывод, что изменение коэффициента A_2 дает хорошие результаты во всем диапазоне значений.

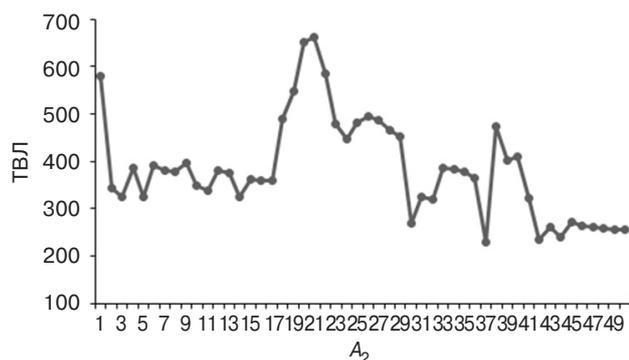


Рис. 13. Зависимость значений ТВЛ от изменения коэффициента увеличения значения центрального элемента маски A_2

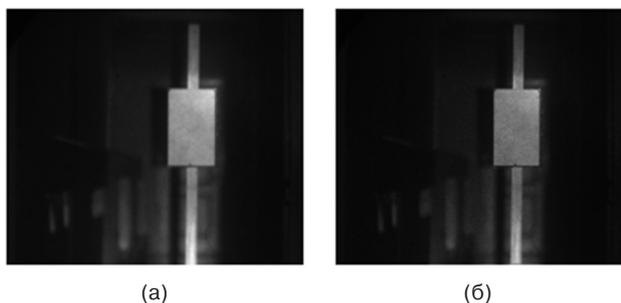


Рис. 14. Изображения до (а) и после (б) обработки фильтром с оптимальным коэффициентом A_2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен модифицированный ТРСФ для повышения четкости изображений. Описаны принципы его модификации и приведена структурная схема. Выполнено исследование быстродействия и эффективности обработки изображений, обеспечиваемых предложенной модификацией фильтра. Время, затрачиваемое на обработку изображения, оказалось меньше в среднем в 5.3 раза, чем время, затрачиваемое на обработку для КДС.

Представлены результаты оценки влияния коэффициента увеличения значения положительной

центральной апертуры и увеличения значения центрального элемента маски фильтра на характеристики обработанных изображений. Установлено, что величина центрального элемента маски сильнее влияет на параметры обработанного изображения, его изменение позволяет поднять качество изображения значительно, чем при увеличении положительной центральной апертуры фильтра. Найдены оптимальные значения коэффициентов фильтрации A_1 и A_2 .

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники за счет средств гранта Российского научного фонда № 21-79-10200.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was carried out at the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics under the Russian Science Foundation grant No. 21-79-10200.

Вклад авторов

А.В. Каменский – постановка цели и задачи исследования, методов обработки, научное редактирование статьи.

Т.М. Акаева – планирование исследования, написание текста статьи, интерпретация и обобщение результатов.

Д.А. Гребенщикова – проведение исследования, написание текста статьи.

Authors' contributions

A.V. Kamenskiy – setting the aim and objectives of the research, processing methods, scientific editing of the article.

T.M. Akaeva – planning the research, writing the text of the article, interpreting and summarizing the results.

D.A. Grebenshchikova – conducting research, writing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грошев И.В., Корольков В.И. *Системы технического зрения и обработки изображений*. М.: РУДН; 2008. 212 с.
2. Абрамов И.А., Кравченко Е.Н. Многопоточная реализация алгоритма локальной фильтрации изображений. *Вестник Пензенского государственного университета*. 2016;3(15):66–71.
3. Турулин И.И. *Основы теории рекурсивных КИХ-фильтров*. Таганрог: Южный федеральный университет; 2016. 264 с.
4. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. *Цифровая обработка сигналов. Практический подход*: пер. с англ. М.: Вильямс; 2004. 992 с.
5. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. *Цифровая обработка сигналов*. М.: Радио и связь; 1990. 256 с.
6. Курячий М.И., Гельцер А.А., Абеннов Р.Р., Рогожников Е.В., Попова К.Ю. *Цифровая обработка сигналов*. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники; 2018. 234 с.
7. Лукин А. *Введение в цифровую обработку сигналов*. М.: МГУ, Лаборатория компьютерной графики и мультимедиа; 2002. 44 с.

8. Матвеев Ю.Н., Симончик К.К., Тропченко А.Ю., Хитров М.В. *Цифровая обработка сигналов*. СПб.: СПбНИУ ИТМО; 2013. 166 с.
9. Бондина Н.Н., Мураров Р.Ю. Адаптивные алгоритмы фильтрации и изменения контраста изображения. *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*. Серия: Информатика и моделирование. 2014;35(1078):35–42.
10. Каменский А.В., Рылов К.А. Цифровой сглаживающий трапецеидальный рекурсивно-сепарабельный фильтр обработки изображений с изменяемыми размерами сканирующей многоэлементной апертуры. *Омский научный вестник*. 2024;1(189):127–136. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2024-189-127-136>
11. Сай С.В., Каменский А.В., Курячий М.И. *Современные методы анализа и повышение качества цифровых изображений*: монография. Хабаровск: Изд-во ТОГУ; 2020. 173 с.
12. Kamenskiy A.V. High-speed recursive-separable image processing filters. *Computer Optics*. 2022;46(4):659–665. <http://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1063>
13. Акаева Т.М., Каменский А.В., Струмилова М.А. Быстродействующий трапецеидальный рекурсивно-сепарабельный фильтр обработки изображений. *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2023;1:138–145.
14. Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений*: пер. с англ. М.: Техносфера; 2019. 1104 с.
15. Маланин М.Ю., Каменский А.В., Курячий М.И. Измерение разрешающей способности и четкости телевизионных изображений. В сб.: *Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символической информации*: сборник материалов XII Международной научно-технической конференции. Курск; 2015. С. 235–237.
16. Мовчан А.К., Капустин В.В., Курячий М.И. Методы и средства томографического видения пространства активно-импульсными телевизионными измерительными системами. *Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон»*. 2018;28:222–225. <http://www.graphicon.ru/html/2018/papers/proceedings.pdf>
17. Zaytseva E.V. Integral and spectral sensitivity assessment of the active-pulse television systems. In: *2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2016:7819115. <https://doi.org/10.1109/Dynamics.2016.7819115>

REFERENCES

1. Groshev I.V., Korol'kov V.I. *Sistemy tekhnicheskogo zreniya i obrabotki izobrazhenii (Technical Vision and Image Processing Systems)*. Moscow: RUDN; 2008. 212 p. (in Russ.).
2. Abramov I.A., Kravchenko E.N. Multithreaded realization of the algorithm of local image filtering. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta = Vestnik of Penza State University*. 2016;3(15):66–71 (in Russ.).
3. Turulin I.I. *Osnovy teorii rekursivnykh KIKh-fil'trov (Recursive FIR Filters Theory Base)*. Taganrog: Southern Federal University; 2016. 264 p. (in Russ.).
4. Ifeachor E.C., Jervis B.W. *Tsifrovaya obrabotka signalov. Prakticheskii podkhod (Digital Signal Processing: A Practical Approach)*: transl. from Engl. Moscow: Williams; 2004. 992 p. (in Russ.).
[Ifeachor E.C., Jervis B.W. *Digital Signal Processing: A Practical Approach*. Prentice Hall; 2001. 933 p.]
5. Gol'denberg L.M., Matyushkin B.D., Polyak M.N. *Tsifrovaya obrabotka signalov (Digital Signal Processing)*. Moscow: Radio i svyaz'; 1990. 256 p. (in Russ.).
6. Kuryachii M.I., Gel'tser A.A., Abenov R.R., et al. *Tsifrovaya obrabotka signalov (Digital Signal Processing)*. Tomsk: Tomsk State Univ. of Control Systems and Radioelectronics; 2018. 234 p. (in Russ.).
7. Lukin A. *Vvedenie v tsifrovuyu obrabotku signalov (Introduction to Digital Signal Processing)*. Moscow: MSU, Laboratory of Computer Graphics and Multimedia; 2002. 44 p. (in Russ.).
8. Matveev Yu.N., Simonchik K.K., Tropchenko A.Yu., et al. *Tsifrovaya obrabotka signalov (Digital Signal Processing)*. St. Petersburg: ITMO; 2013. 166 p. (in Russ.).
9. Bondina N.N., Murarov R.Yu. Adaptive algorithms of filtration and contrast changes of image. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "Khar'kovskii politekhnicheskii institute". Seriya: Informatika i modelirovanie = Bulletin of the National Technical University Kharkov Polytechnic Institute. Series: Informatics and Modeling*. 2014;35(1078):35–42 (in Russ.).
10. Kamenskiy A.V., Rylov K.A., Borodina N. Digital anti-aliasing trapezoidal recursively separable image processing filter with resizable scanning multielement aperture. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2024;1(189):127–136 (in Russ.). <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2024-189-127-136>
11. Say S.V., Kamenskiy A.V., Kuryachiy M.I. *Sovremennyye metody analiza i povyshenie kachestva tsifrovyykh izobrazhenii (Modern Methods of Analyzing and Improving the Quality of Digital Images: monograph)*. Khabarovsk: Pacific National University; 2020. 173 p. (in Russ.).
12. Kamenskiy A.V. High-speed recursive-separable image processing filters. *Computer Optics*. 2022;46(4):659–665. <http://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1063>
13. Akaeva T.M., Kamenskiy A.V., Strumilova M.A. Recursive-separable filter image enhancement. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika teledeniya = Questions of Radio Electronics. Series: TV Technique*. 2023;1:138–145 (in Russ.).
14. Gonzalez R., Woods R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii (Digital Image Processing)*: transl. from Engl. Moscow: Tekhnosfera; 2019. 1104 p. (in Russ.).
[Gonzalez R., Woods R. *Digital Image Processing*. Pearson/Prentice Hall; 2008. 954 p.]

15. Malanin M.Yu., Kamenskiy A.V., Kuryachiy M.I. Measurement of resolution and clarity of television images. In: *Optoelectronic Devices and Devices in Systems of Pattern Recognition, Image and Symbolic Information Processing: Collection of materials of the 12th International Scientific and Technical Conference*. Kursk; 2015. P. 235–237 (in Russ.).
16. Movchan A.K., Kapustin V.V., Kuryachiy M.I. Methods and means of tomographic vision of space by active-pulse television measuring systems. *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Vision "Graficon"*. 2018;28:222–225. <http://www.graphicon.ru/html/2018/papers/proceedings.pdf>
17. Zaytseva E.V. Integral and spectral sensitivity assessment of the active-pulse television systems. In: *2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2016:7819115. <https://doi.org/10.1109/Dynamics.2016.7819115>

Об авторах

Каменский Андрей Викторович, к.т.н., доцент, кафедра телевидения и управления, ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, д. 40). E-mail: andru170@mail.ru. Scopus Author ID 57191031758, ResearcherID AAX-9780-2021, SPIN-код РИНЦ 9572-4278, <https://orcid.org/0000-0001-6587-7776>

Акаева Татьяна Максимовна, аспирант, кафедра телевидения и управления, ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, д. 40). E-mail: ttnakaeva@gmail.com. Scopus Author ID 58511241300, ResearcherID GZK-2362-2022, SPIN-код РИНЦ 3514-9658, <https://orcid.org/0000-0002-4846-9508>

Гребенщикова Дарья Александровна, студент, ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (634050, Томск, пр. Ленина, д. 40). E-mail: gredasha9443@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0002-6576-6691>

About the authors

Andrey V. Kamenskiy, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (40, Lenina pr., Tomsk, 634050 Russia). E-mail: andru170@mail.ru. Scopus Author ID 57191031758, ResearcherID AAX-9780-2021, RSCI SPIN-code 9572-4278, <https://orcid.org/0000-0001-6587-7776>

Tatyana M. Akaeva, Postgraduate Student, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (40, Lenina pr., Tomsk, 634050 Russia). E-mail: ttnakaeva@gmail.com. Scopus Author ID 58511241300, ResearcherID GZK-2362-2022, RSCI SPIN-code 3514-9658, <https://orcid.org/0000-0002-4846-9508>

Darya A. Grebenshchikova, Student, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (40, Lenina pr., Tomsk, 634050 Russia). E-mail: gredasha9443@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0002-6576-6691>