

ЦИФРОВОЙ СГЛАЖИВАЮЩИЙ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫЙ РЕКУРСИВНО- СЕПАРАБЕЛЬНЫЙ ФИЛЬТР ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИЗМЕНЯЕМЫМИ РАЗМЕРАМИ СКАНИРУЮЩЕЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ АПЕРТУРЫ

Развитие телевизионных систем является важным фактором для многих отраслей, занимающихся получением, обработкой, хранением и передачей изображений. На сегодняшний день актуальной задачей в применении подобных систем является улучшение качества изображений, полученных с помощью цифровых фото- и видеокамер. Для решения этой задачи могут быть использованы цифровые рекурсивно-сепарабельные сглаживающие фильтры. В работе приводится описание процесса работы алгоритма изменения размера сканирующей многоэлементной апертуры сглаживающего трапецеидального рекурсивно-сепарабельного фильтра обработки цифровых изображений. Приведены результаты оценки его быстродействия относительно того же алгоритма, реализованного через классическую двумерную свертку при различных размерах тестовых изображений. Оценено влияние размеров апертуры разработанного фильтра на изменение отношения сигнал/шум. Алгоритм был реализован в вычислительной среде MATLAB.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, рекурсивно-сепарабельные фильтры, повышение четкости, оценка качества, быстродействие.

Введение. В настоящее время развитие и распространение телевизионных систем видеонаблюдения является неотъемлемой частью жизни современного человека [1]. Актуальной задачей является улучшение качества изображений, полученных с помощью цифровых фото- и видеокамер, рентгеновских аппаратов, активно-импульсных телевизионно-измерительных систем и других цифровых устройств. В решении этой задачи активно применяются цифровые фильтры, так как одним из основных преимуществ цифровых фильтров является их возможная адаптивность. Они позволяют пользователю настраивать параметры фильтрации в соответствии с конкретными требованиями и желаемыми результатами. Благодаря этому фильтры могут быть применены к различным типам изображений и ситуациям. Они помогают преобразовать нечеткие изображения в четкие и высококачественные, что способствует более точной и полной интерпретации полученных данных [2]. В зависимости от предметной области и задач, решаемых в ней, используются те или иные методы цифровой обработки изображений. Их можно разделить по эффекту, оказываемому на обрабатываемое изображение: коррекция

цветопередачи, при неправильном определении баланса белого; определение и подчеркивание контуров изображения; коррекция дисторсии; устранение шумов; устранение хроматических aberrаций и др. [3].

Целью данной работы является представление алгоритма изменения размера сканирующей многомерной апертуры для цифрового сглаживающего трапецеидального рекурсивно-сепарабельного (СТРС) фильтра обработки изображений.

Описание исходного фильтра. В базовом виде фильтр генерирует маску размером 7×7 элементов за счет коэффициентов строчного (СР) и кадрового (КР) рециркуляторов [4, 5]. Заданные в них значения служат для формирования размера апертуры обработки. Соответственно, для размера 7×7 используются два СР с коэффициентами 6 и 2 и два КР с коэффициентами 6 и 2. Структурная схема исходного фильтра представлена на рис. 1, где: $x(n_1, n_2)$ — входные данные; $z_{1,2}^{-2}$ — задержка на два элемента или строки; $z_{1,2}^{-3}$ — задержка на три элемента или строки; n — текущий номер отсчета сигнала, включая нулевой отсчет ($n = 0, 1, \dots$); M_1 — направление по строкам; M_2 — направление

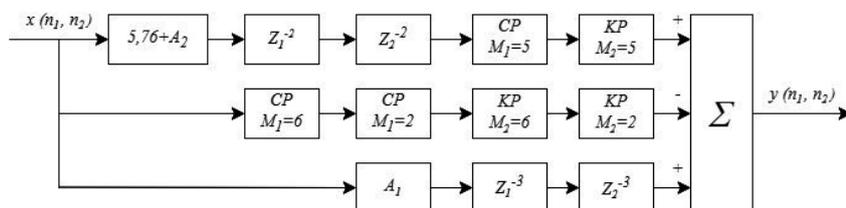


Рис. 1. Структурная схема СТРС фильтра

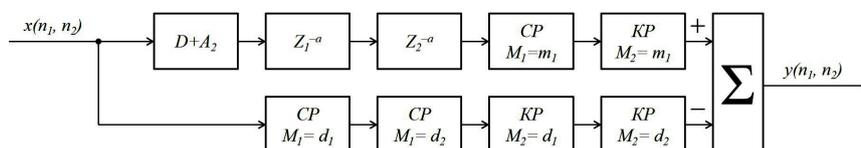


Рис. 2. Структурная схема модифицированного СТРС фильтра

Таблица 1

Параметры, определяемые в ходе внутренних расчетов алгоритма

Параметр	Значение				
	3×3	4×4	5×5	6×6	7×7
Размер апертуры	3×3	4×4	5×5	6×6	7×7
D	16	9	7,11	6,25	5,76
a	1	1	1	1	1
m_1	1	2	3	4	5
d_1	2	3	4	5	6
d_2	2	2	2	2	2

по кадру; $y(n_1, n_2)$ — выходные данные; A_1 — коэффициент увеличения центрального элемента матрицы на введённое значение; A_2 — коэффициент увеличения всей положительной части апертуры (5×5).

С подробным описанием и исследованием этого фильтра можно ознакомиться в работе «Быстродействующий трапецеидальный рекурсивно-сепарабельный фильтр обработки изображений» [6].

Модифицированный СТРС фильтр. Поскольку, за счет своей формы, СТРС фильтр имеет большое усечение положительной части, он оказывает сглаживающий эффект на обработанное изображение, что приводит к росту отношения сигнал/шум. Ввиду этого и того факта, что использование коэффициента, отвечающего за подъем центрального элемента маски фильтра, не оказывает значительного влияния на параметры обрабатываемого изображения, целесообразно отказаться от его использования. Это позволит модифицированному алгоритму построения СТРС фильтра осуществлять построение апертур в четной размерности. Изменение размерности маски СТРС фильтра будет осуществляться пользователем путем его задания в начале использования алгоритма. Размер маски задается путем задания положительных значений начиная с 3-х, поскольку у маски должен присутствовать положительный центр. Далее ограничением является только то, что задаваемые размеры должны указываться целыми числами. Структурная схема модифицированного СТРС фильтра представлена на рис. 2, она позволяет задавать требуемый размер апертуры обработки.

В структурной схеме присутствуют следующие элементы: $x(n_1, n_2)$ — входные данные; z_1^{-a} и z_2^{-a} —

задержка на a элементов или строк; n — текущий номер отсчёта сигнала, включая нулевой отсчёт ($n = 0, 1, \dots$); M_1 — направление по строкам; M_2 — направление по кадру; $y(n_1, n_2)$ — выходные данные; A_2 — коэффициент увеличения всей положительной части апертуры; D — дополнительный коэффициент, приводящий сумму положительной и отрицательной части матрицы к нулю; m_1 — размеры CP и KP, формирующих положительную часть маски фильтра; d_1 и d_2 — размеры CP и KP, формирующих основную матрицу фильтра.

В ходе выполнения внутренних расчетов алгоритм определяет значение переменных параметров D, a, m_1, d_1, d_2 и формирует маску заданной размерности. В табл. 1 представлены параметры, определяемые в ходе выполнения внутренних расчетов алгоритма. На рис. 3 представлены сформированные маски размерностью от 3×3 до 7×7 элементов.

Программная реализация модифицированного СТРС фильтра. Алгоритм реализован с использованием пакета прикладных программ MATLAB [7].

Входные данные для работы алгоритма:

- исходное изображение;
- размер маски (h);
- коэффициент подъема центральной апертуры формируемой маски.

Выходные данные работы алгоритма — изображение с примененной фильтрацией. После ввода входных данных автоматически производится расчёт размеров CP и KP, формирующих основную маску. Алгоритм расчёта размеров CP и KP представлен на рис. 4. На основании рассчитанных размеров CP и KP происходит определение размеров и формирование основной матрицы.

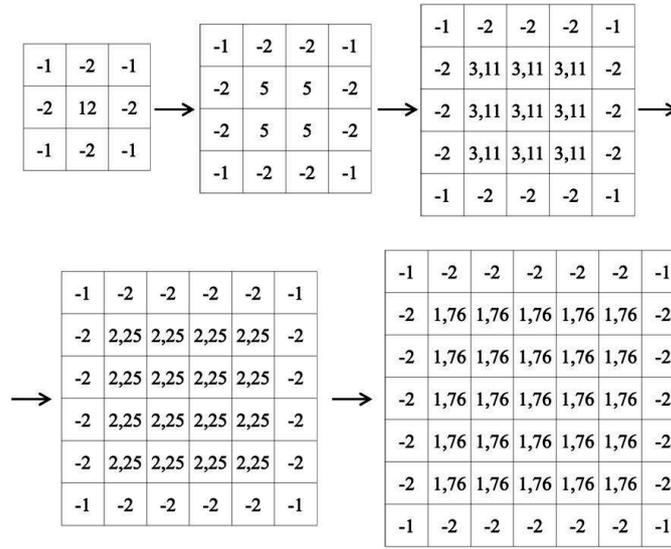


Рис. 3. Процесс изменения апертury фильтра в зависимости от заданной размерности (от 3x3 до 7x7 элементов)

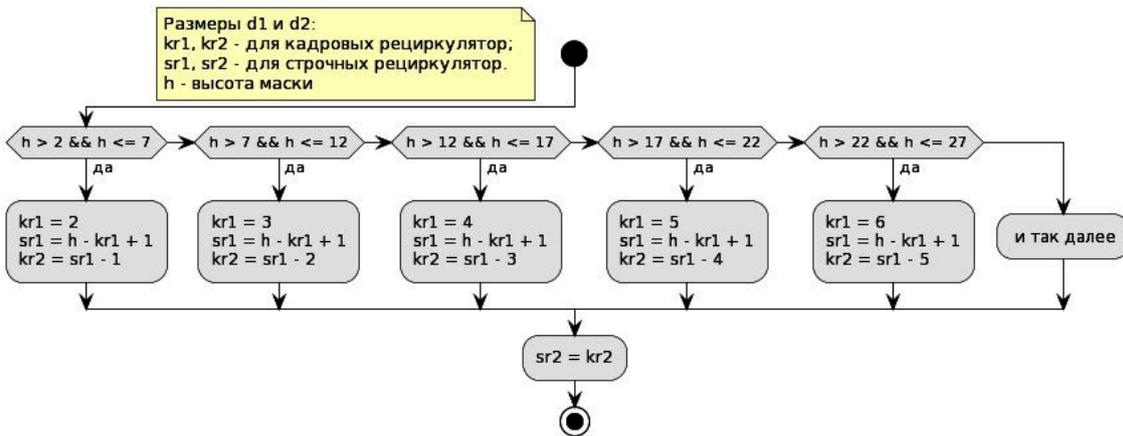


Рис. 4. Алгоритм расчёта размеров СР и КР

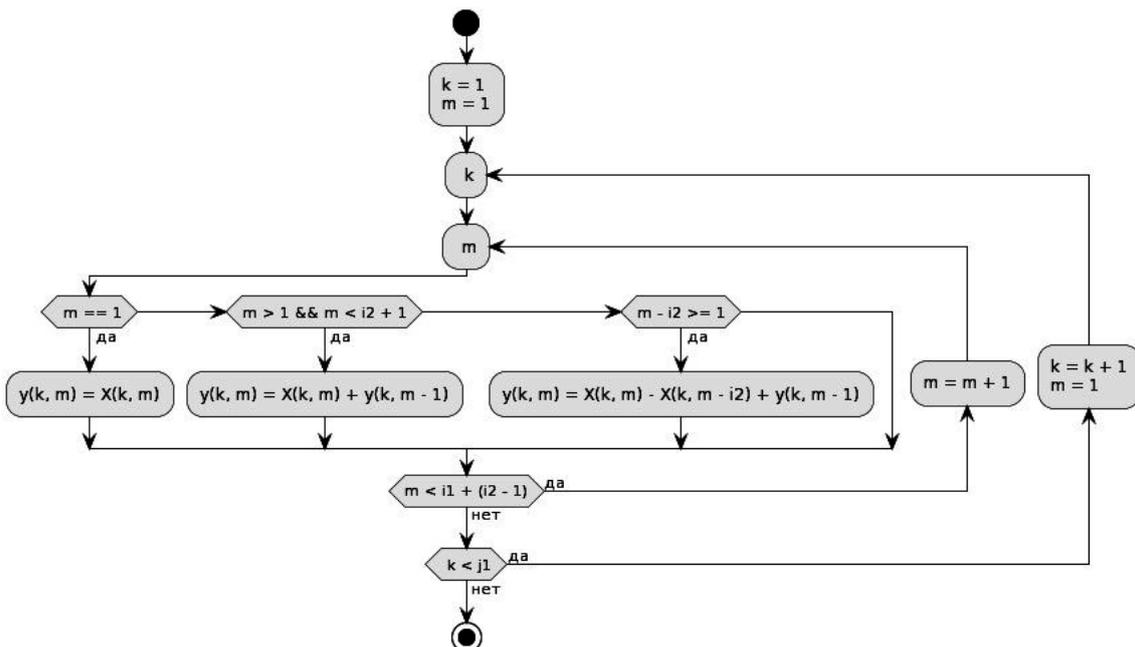


Рис. 5. Алгоритм работы строчного рециркулятора

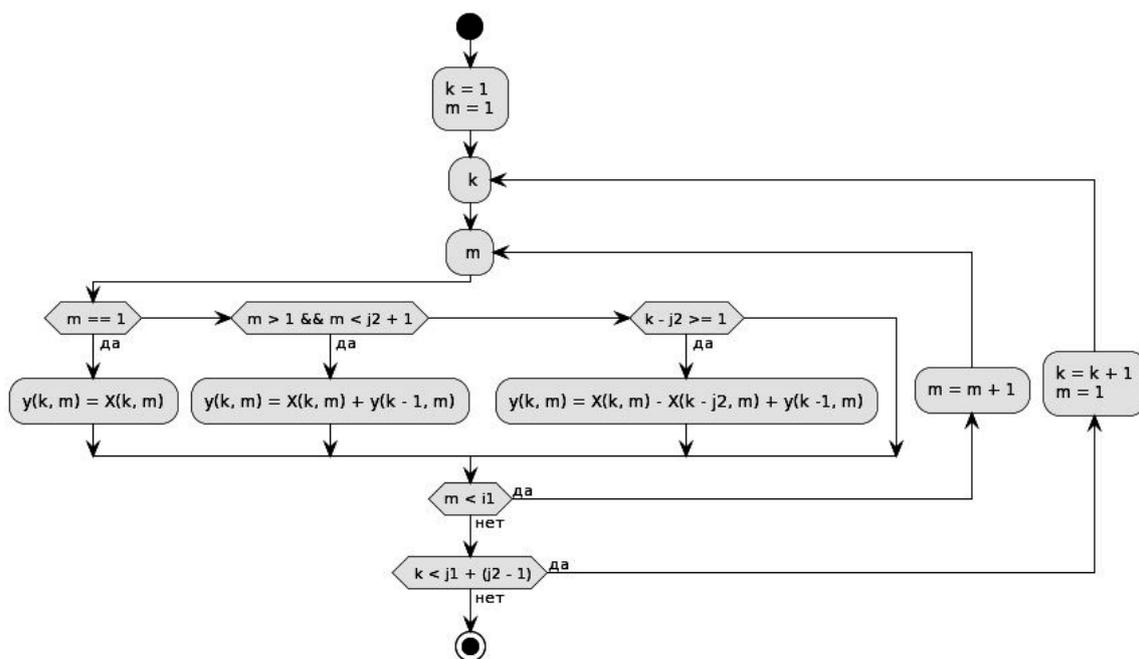


Рис. 6. Алгоритм работы кадрового рециркулятора

Следующим шагом алгоритм выполняет формирование отрицательной матрицы.

Для формирования отрицательной матрицы, согласно структурной схеме (рис. 2), необходимо последовательно выполнить работу 2-х строчных и 2-х кадровых рециркуляторов с рассчитанными размерами.

Алгоритм работы рециркуляторов основан на вложенных циклах: по ширине и высоте расширенного изображения (рис. 5, рис. 6).

На рис. 5 и рис. 6 используются следующие обозначения: k — позиция текущего элемента по горизонтали; m — позиция текущего элемента по вертикали; i_1, i_2 — общее количество элементов по горизонтали во входной и выходной матрицах; j_1, j_2 — общее количество элементов по вертикали во входной и выходной матрицах; $X(k, m)$ — входная матрица; $y(k, m)$ — выходная матрица.

В результате работы этой части фильтра реализуется отрицательная матрица. Сама матрица имеет положительные элементы, но будет использоваться с отрицательным знаком при суммировании двух ветвей фильтра.

Для формирования положительной части необходимо рассчитать дополнительный коэффициент приведения суммы положительной и отрицательной частей D матрицы к нулю и произвести последовательное выполнение процедур обработки СР и КР для исходного изображения с учетом этого коэффициента.

Расчет коэффициента D производится на основе полученных размеров рециркуляторов:

$$D = \frac{S_0}{P},$$

где D — коэффициент приведения; $S_0 = (sr_1 \cdot kr_1) \cdot (sr_2 \cdot kr_2)$ — сумма элементов матрицы при свертке с единицей; $P = sr_2 \cdot kr_2$ — сумма элементов при свертке положительной матрицы.

Коэффициент D является дополнительным слагаемым для коэффициента увеличения всей поло-

жительной части апертуры A_2 при умножении исходного изображения:

$$A = A_2 + D,$$

где A — общий коэффициент преобразования изображения.

После расчёта коэффициента и умножения исходного изображения на коэффициент A , в соответствии со структурной схемой (рис. 2), для получения положительной матрицы последовательно выполняются процедуры одним строчным (рис. 5) и одним кадровым (рис. 6) рециркуляторами с размерами m_1 и m_2 . В результате формируется положительная матрица работы фильтра.

Положительная и отрицательная матрицы суммируются в соответствии со структурной схемой (рис. 2), в результате формируется обработанное изображение.

Оценка быстродействия. Быстродействие — время, затраченное для обработки полного кадра изображения [8]. Алгоритмы оценки быстродействия подразделяются по виду затраченного ресурса: объём затраченной памяти или скорость (время выполнения алгоритма). Зачастую, эти показатели взаимосвязаны: задачу можно решить быстро, используя большой объём памяти, или медленнее, занимая меньший объём. Из этой зависимости вытекает задача оценки объёмно-временной сложности. При таком подходе алгоритм оценивается как с точки зрения скорости выполнения, так и с точки зрения потребляемой памяти. Но так как в рамках работы оцениваются кадры с одного видеоролика с одинаковым весом, то быстродействие можно определить только по затраченному времени [9].

Первый эксперимент заключался в сравнении работы алгоритма СТРС фильтра при рекурсивно-сепарабельной (РС) реализации и классической двумерной свертке (КДС), при изменении размеров апертуры обработки. Были выбраны следующие размеры апертуры обработки: 3×3; 4×4; 5×5; 6×6; 7×7; 8×8; 9×9; 10×10; 11×11; 12×12 и 27×27 элемен-

Таблица 2

Результаты измерения быстродействия
в рамках первого эксперимента

Коэффициент фильтрации	Время обработки, с	
	Функция в MATLAB	
	РС СТРС	ҚДС СТРС
3×3	8,71	12,21
4×4	8,48	12,44
5×5	8,46	12,67
6×6	8,40	12,98
7×7	8,56	13,00
8×8	8,43	13,55
9×9	8,41	13,83
10×10	8,49	13,90
11×11	8,51	14,45
12×12	8,59	14,84
27×27	9,03	23,53

тов. В исследовании было задействовано тестовое изображение размером 1032×720 элементов. Для исследования была взята вычислительная платформа со следующими характеристиками: процессор AMD A8-3850 APU with Radeon(tm) HD Graphics 2,90 GHz; оперативное запоминающее устройство 8 Гб.

Результаты измерения быстродействия фильтра РС СТРС и ҚДС СТРС представлены в табл. 2.

Из результатов эксперимента следует, что алгоритм СТРС фильтра при РС реализации работает быстрее, чем при ҚДС. При размерах апертуры от 3×3 до 12×12 элементов время обработки колеблется от 8,40 с до 8,71 с, в то время как при ҚДС от 12,21 с до 14,84 с. Рост апертуры до размерности 27×27 элементов показал выигрыш РС реализации относительно ҚДС в 2,61 раза.

В рамках второго эксперимента оценено влияние размеров тестового изображения на время обработки при росте размеров апертуры обработки. Тестовые изображения были выбраны следующих размеров: 640×480; 1280×720; 1280×1024; 1920×1080; 3000×2000 элементов. Исследование проводилось на вычислительной платформе со следующими харак-

теристиками: процессор 12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12400F 2,50 GHz; оперативная память 32 Гб. Для обработки были взяты апертуры размерностью 7×7, 15×15, 25×25, 49×49 и 75×75 элементов. В рамках исследования обработка каждой размерностью апертуры осуществлялась 10 раз и находилось их среднее значение. В табл. 3 представлены результаты изменения времени обработки.

Из результатов следует, что, при росте размеров апертуры обработки, время работы РС алгоритма незначительно возрастает, а в ҚДС алгоритме наблюдается значительный рост времени обработки. То же можно отметить и при росте размеров обрабатываемого изображения.

Оценка отношения сигнал/шум. Signal-to-Noise Ratio (SNR) — отношение сигнал/шум (ОСШ), выраженное в децибелах, используется как мера качества восстановления изображений и определяется через среднее значение яркости и стандартное отклонение между двумя изображениями [10, 11]. Оценка ОСШ проводилась с использованием программного обеспечения (ПО) ImageJ. ImageJ — открытое ПО для обработки и анализа цифровых изображений. В ПО ImageJ, на тестовом изображении выбиралась область, по которой происходило измерение дальности до объекта и строилась гистограмма. По полученной гистограмме ПО ImageJ определяло данные о среднем значении яркости и стандартном отклонении. На основе этих данных по области измерения производился расчет ОСШ по выражению

$$\text{ОСШ}_{\text{АВ}} = 20\lg(M/\sigma), \quad (1)$$

где M — среднее значение яркости; σ — стандартное отклонение [12].

Эксперимент заключался в изменении размерности фильтра и исследовании влияния изменения апертуры на результаты обработки.

Тестовые изображения, представленные на рис. 7, были получены на испытательном полигоне при помощи активно-импульсной телевизионной измерительной системы (АИ ТИС) [13], подробное описание получения видеоданных представлено в работе [14]. Изображения, сформированные АИ ТИС, используются для наблюдения за объектами при плохих условиях видимости и определения расстояния до этих объектов. Наличие шумов на фор-

Таблица 3

Результаты измерения быстродействия в рамках второго эксперимента

Время обработки, с	Размер тестового изображения	Тип алгоритма	Размер апертуры обработки				
			7×7	15×15	25×25	49×49	75×75
			640×480	РС СТРС	0,02	0,06	0,12
ҚДС СТРС	0,11	0,25		0,75	7,94	15,09	
1280×720	РС СТРС	0,06	0,17	0,37	2,00	3,42	
	ҚДС СТРС	0,16	0,74	3,17	13,64	44,20	
1280×1024	РС СТРС	0,08	0,18	0,56	2,99	4,6	
	ҚДС СТРС	0,45	1,56	4,65	29,69	75,40	
1920×1080	РС СТРС	0,09	0,35	0,75	3,46	5,60	
	ҚДС СТРС	0,55	1,96	6,40	41,17	90,05	
3000×2000	РС СТРС	0,52	0,83	2,47	7,42	15,60	
	ҚДС СТРС	1,81	9,49	27,40	120,10	247,35	

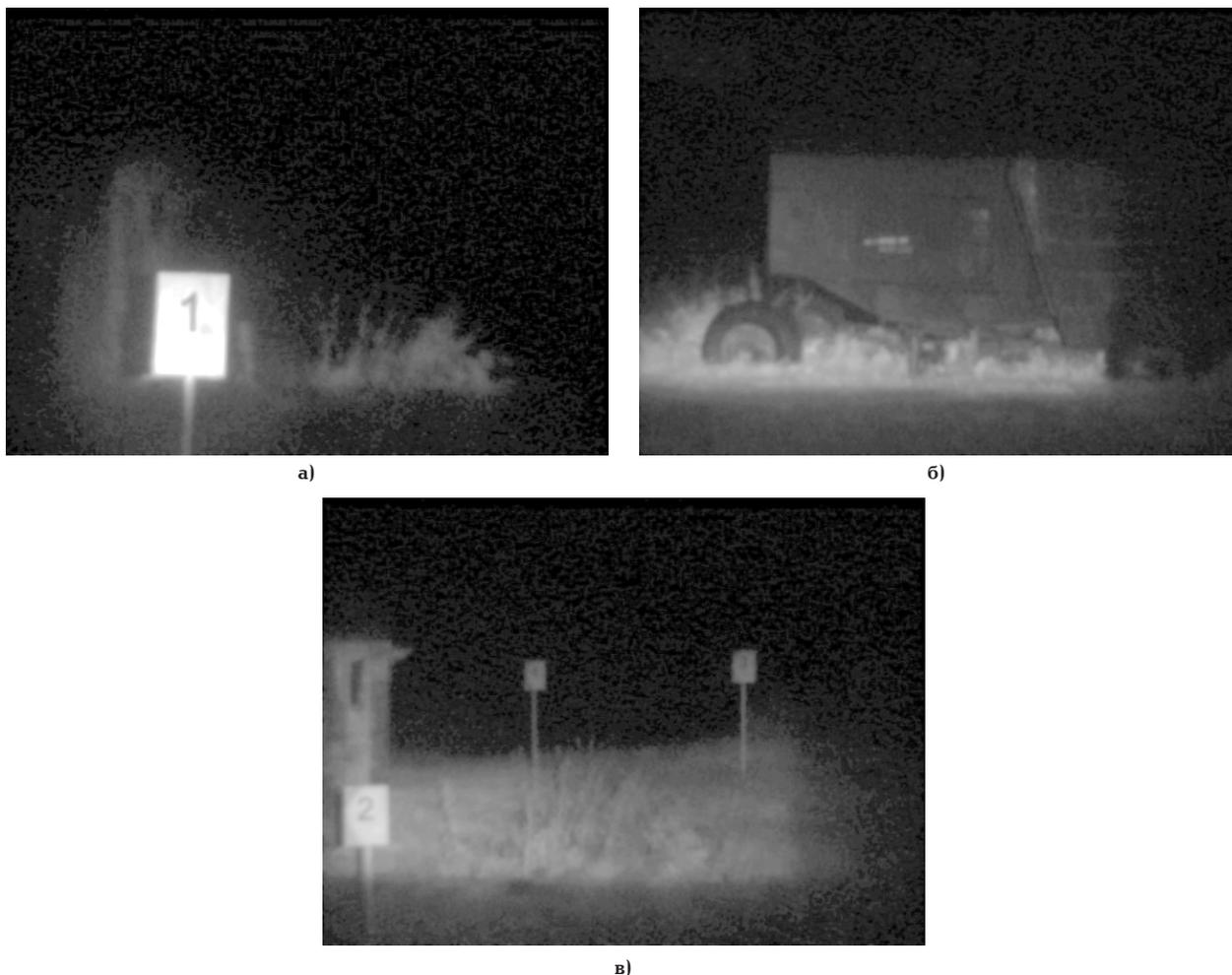


Рис. 7. Тестовые изображения: а — объект № 1; б — объект № 2; в — объект № 3

мируемых изображениях приводит к неточности определения расстояния до объектов наблюдения. Постобработка полученных изображений фильтрами для устранения шумов и повышения четкости повышает точность определения расстояния.

Представленные на рис. 7 исходные изображения, в ходе эксперимента были обработаны фильтрами СТРС с размерами масок 3×3, 5×5, 7×7, 9×9, 11×11, 13×13, 15×15, 25×25, 49×49, 75×75, 99×99. Оценка эффективности обработки производилась путем визуального сравнения и расчёта их ОСШ по формуле 1.

Полученные результаты в ходе эксперимента приведены в табл. 4.

На рис. 8 представлены результаты обработки фильтром с апертурой 13×13. Следует обратить внимание на края табличек и очертания цифр (рис. 8а, 8в) — они стали четче. На рис. 8б при детальном рассмотрении просматривается увеличение четкости прорисовки объектов, а на общем плане можно увидеть, что проявились объекты, или их части, которые были не заметны на исходном изображении.

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что рост размерности апертуры обработки приводит к повышению отношения сигнал/шум и, как следствие, к повышению качества полученных изображений за счет устранения шумов. Устранение шумов на изображениях, сформированных АИ ТИС, позволяет повышать точность определения расстояния до объектов интереса. Однако при размерах апертуры 49×49 (рис. 9) и более элементов

Таблица 4

Результаты измерения отношения сигнал/шум

Размерность фильтра	ОСШ, дБ		
	Объект № 1	Объект № 2	Объект № 3
	СТРС	СТРС	СТРС
Исходное	14,35	15,62	14,95
7×7	14,49	15,73	14,99
9×9	14,77	16,56	15,18
11×11	14,47	16,14	14,21
13×13	14,65	16,86	15,20
15×15	14,30	17,04	14,25
25×25	14,36	16,37	14,64
49×49	14,60	16,34	15,45
75×75	14,24	16,84	14,38
99×99	14,98	17,55	12,64

происходят нестабильные изменения, которые свидетельствуют о большой потере полезной части сигнала. Это явно наблюдается для объекта № 3, при обработке апертурой 7×7 элементов значение ОСШ равнялось 14,99, при увеличении апертуры до 13×13 элементов значение ОСШ равнялось 15,20, а при обработке апертурой 99×99 элементов снизилось до 12,64.

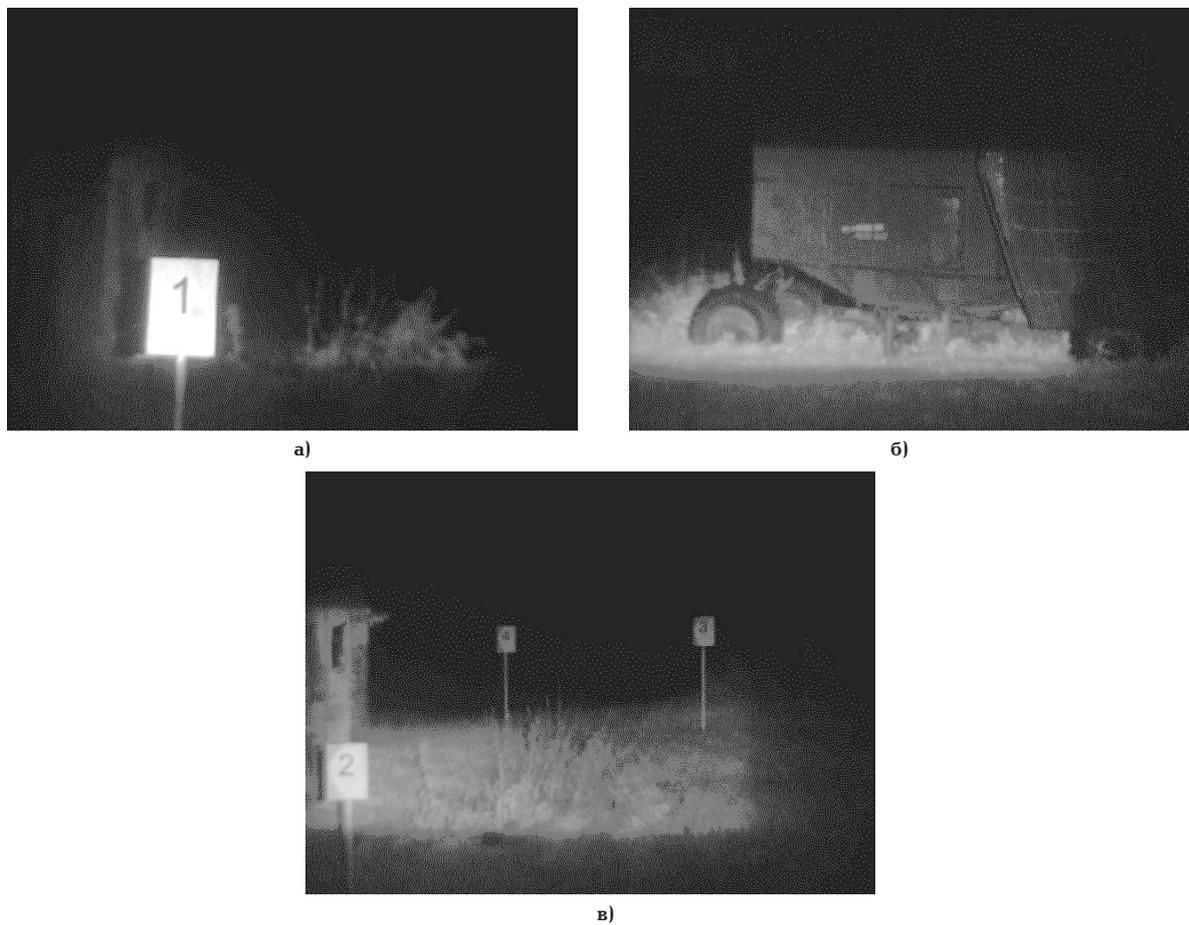


Рис. 8. Изображения, обработанные фильтром с апертурой 13×13: а — объект № 1; б — объект № 2; в — объект № 3



Рис. 9. Изображения, обработанные фильтром с апертурой 49×49: а — объект № 1; б — объект № 2; в — объект № 3

Заключение. Представлено описание алгоритма построения, модифицированного цифрового сглаживающего трапецидального рекурсивно-сепарабельного фильтра, приведена структурная схема для данного фильтра, в котором присутствует возможность изменения размера апертуры обработки. Проведена оценка эффективности обработки тестовых изображений, в ходе которой выявлена эффективность применения разработанного фильтра для задач шумоподавления. В рамках эксперимента наблюдается рост значения ОСШ при росте размера апертуры обработки.

Оценивая быстродействие алгоритма, было выяснено, что при росте размеров апертуры обработки время работы СТРС фильтра в РС реализации возрастает незначительно. В то же время как при реализации в виде КДС время работы алгоритма СТРС фильтра возрастает существенно, например, при изменении размера апертуры с 3×3 до 27×27 элементов время работы алгоритма увеличивается с 12,21 до 23,53 секунды. Все это свидетельствует об эффективности применения разработанного фильтра для задач технического зрения.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российской государственной академии наук № 21-79-10200 в ТУСУРе.

Библиографический список

- Li Y., Ibanez-Guzman J. Lidar for autonomous driving: The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems // *EEE Signal Processing Magazine*. 2020. Vol. 37, № 4. P. 50–61. DOI: 10.1109/MSP.2020.2973615.
- Loomis H. H., Sinha B. High-speed recursive digital filter realization // *Circuits, Systems and Signal Processing*. 1984. Vol. 3. P. 267–294. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01599077>.
- Yergaliyev S., Akhtar M. T. A Systematic Review on Distributed Arithmetic-based Hardware Implementation of Adaptive Digital Filters // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 85165–85183. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3304234.
- Толмачева А. С., Каменский А. В., Тисленко А. А., Титов Д. В. Применение быстродействующих рекурсивно-сепарабельных фильтров для обработки зашумленных изображений // *Доклады ТУСУР*. 2023. Т. 26, № 1. С. 56–62. DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-1-56-62.
- Kamenskiy A. V. High-speed recursive-separable image processing filters // *Computer Optics*. 2022. Vol. 46 (4). P. 659–665. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1063.
- Акаева Т. М., Каменский А. В., Струмилова М. А. Быстродействующий трапецидальный рекурсивно-сепарабельный фильтр обработки изображений // *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2023. № 1. С. 138–145. EDN: UPFVQZ.
- Moler C., Little J. A history of MATLAB // *Proceedings of the ACM on Programming Languages*. 2020. Vol. 4, № 81. P. 1–67. DOI: 10.1145/3386331.
- Bister M., Yap C. S., Ng K. H. [et al.]. Increasing the speed of medical image processing in MatLab // *Biomedical Imaging and Intervention Journal*. 2007. Vol. 3, № 1. DOI: 10.2349/bij.3.1.e9.

- C. E. F. do Amaral, Alves R. F., M. J. da Silva [et al.]. Image processing techniques for high-speed videometry in horizontal two-phase slug flows // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2013. Vol. 33. P. 257–264. DOI: 0.1016/j.flowmeasinst.2013.07.006.
- Ghosh A. K., Ansari A. A. To Analysis and Implement Image De-Noise Using Fuzzy and Wiener Filter in Wavelet Domain // *International Journal of Trend in Research and Development*. 2021. Vol. 8, № 3. P. 320–373. URL: <http://www.ijtrd.com/papers/IJTRD22695.pdf>.
- Casacio C. A., Madsen L. S., Terrasson A. Quantum-enhanced nonlinear microscopy // *Nature*. 2021. Vol. 594, № 7862. P. 201–206. DOI: 10.1038/s41586-021-03528-w.
- Altman D. G., Bland J. M. Standard deviations and standard errors // *Bmj*. 2005. Vol. 331, № 7521. P. 903. DOI: 10.1136/bmj.331.7521.903.
- Movchan A. K., Kapustin V. V., Kuryachiy M. I. [et al.]. Multi-Area Method of a Depth Map Building with Gain Modulation in Active-Pulse Television Measuring Systems // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). IEEE. 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002872.
- Kapustin V. V., Zahlebin A. S., Movchan A. K. [et al.]. Experimental assessment of the distance measurement accuracy using the active-pulse television measuring system and a digital terrain model // *Computer Optics*. 2022. Vol. 46 (6). P. 948–954. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1114.

КАМЕНСКИЙ Андрей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и управления, доцент кафедры цифрового телевидения Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), г. Томск. SPIN-код: 9572-4278
AuthorID (РИНЦ): 1057825
ORCID: 0000-0001-6587-7776
AuthorID (SCOPUS): 57191031758
Адрес для переписки: andru170@mail.ru

РЫЛОВ Кирилл Александрович, аспирант, ассистент кафедры телевидения и управления ТУСУР, г. Томск.
SPIN-код: 4436-9058
ORCID: 0009-0001-5936-535X
AuthorID (SCOPUS): 57214750784

БОРОДИНА Наталья, аспирант, ассистент кафедры телевидения и управления ТУСУР, г. Томск.
SPIN-код: 3701-2960
ORCID: 0000-0002-6134-9877
AuthorID (SCOPUS): 57815608800

Для цитирования

Каменский А. В., Рылов К. А., Бородина Н. Цифровой сглаживающий трапецидальный рекурсивно-сепарабельный фильтр обработки изображений с изменяемыми размерами сканирующей многоэлементной апертуры // *Омский научный вестник*. 2024. № 1 (189). С. 127–136. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-127-136.

Статья поступила в редакцию 11.09.2023 г.

© А. В. Каменский, К. А. Рылов, Н. Бородина

DIGITAL ANTI-ALIASING TRAPEZOIDAL RECURSIVELY SEPARABLE IMAGE PROCESSING FILTER WITH RESIZABLE SCANNING MULTI-ELEMENT APERTURE

The development of television systems is an important factor for many industries involved in the acquisition, processing, storage and transmission of images. Today, an urgent task in the use of such systems is to improve the quality of images obtained using digital photo and video cameras. To solve this problem, digital recursive-separable smoothing filters can be used. The paper describes the process of operation of the algorithm for changing the size of the scanning multi-element aperture of a smoothing trapezoidal recursive-separable filter for digital image processing. The results of evaluating its performance relative to the same algorithm implemented through classical two-dimensional convolution for various sizes of test images are presented. The influence of the aperture size of the developed filter on the change in the signal-to-noise ratio is assessed. The algorithm is implemented in the MATLAB computing environment.

Keywords: digital image processing, recursively separable filters, sharpening, quality assessment, performance.

Acknowledgments

The study is supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-79-10200 at TUSUR.

References

1. Li Y., Ibanez-Guzman J. Lidar for autonomous driving: The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems // *EEE Signal Processing Magazine*. 2020. Vol. 37, no. 4. P. 50–61. DOI: 10.1109/MSP.2020.2973615. (In Engl.).
2. Loomis H. H., Sinha B. High-speed recursive digital filter realization // *Circuits, Systems and Signal Processing*. 1984. Vol. 3. P. 267–294. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01599077>. (In Engl.).
3. Yergaliyev S., Akhtar M. T. A Systematic Review on Distributed Arithmetic-based Hardware Implementation of Adaptive Digital Filters // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 85165–85183. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3304234. (In Engl.).
4. Tolmacheva A. S., Kamenskiy A. V., Tislenko A. A., Titov D. V. Primeneniye bystrodeystvuyushchikh rekursivno-separabel'nykh fil'trov dlya obrabotki zashumlennykh izobrazheniy [Application of high-speed recursively-separable filters for processing noisy images] // *Doklady TUSUR. Proceedings of TUSUR University*. 2023. Vol. 26, no. 1. P. 56–62. DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-1-56-62. (In Russ.).
5. Kamenskiy A. V. High-speed recursive-separable image processing filters // *Computer Optics*. 2022. No. 46 (4). P. 659–665. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1063. (In Engl.).
6. Akaeva T. M., Kamenskiy A. V., Strumilova M. A. Bystrodeystvuyushchiy trapetseidal'nyy rekursivno-separabel'nyy fil'tr obrabotki izobrazheniy [Recursive-separable filter image enhancement] // *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika teledeniya. Questions of Radio Electronics. Series: TV Technique*. 2023. No. 1. P. 138–145. (In Russ.).
7. Moler C., Little J. A history of MATLAB // *Proceedings of the ACM on Programming Languages*. 2020. Vol. 4, no. 81. P. 1–67. DOI: 10.1145/3386331. (In Engl.).
8. Bister M., Yap C. S., Ng K. H. [et al.]. Increasing the speed of medical image processing in Matlab // *Biomedical Imaging and Intervention Journal*. 2007. Vol. 3, no. 1. DOI: 10.2349/bij.3.1.e9. (In Engl.).
9. C. E. F. do Amaral, Alves R. F., M. J. da Silva [et al.]. Image processing techniques for high-speed videometry in horizontal two-phase slug flows // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2013. Vol. 33. P. 257–264. DOI: 0.1016/j.flowmeasinst.2013.07.006. (In Engl.).
10. Ghosh A. K., Ansari A. A. To Analysis and Implement Image De-Noising Using Fuzzy and Wiener Filter in Wavelet Domain // *International Journal of Trend in Research and Development*. 2021. Vol. 8, no. 3. P. 320–373. URL: <http://www.ijtrd.com/papers/IJTRD22695.pdf>. (In Engl.).
11. Casacio C. A., Madsen L. S., Terrasson A. Quantum-enhanced nonlinear microscopy // *Nature*. 2021. Vol. 594, no. 7862. P. 201–206. DOI: 10.1038/s41586-021-03528-w. (In Engl.).
12. Altman D. G., Bland J. M. Standard deviations and standard errors // *Bmj*. 2005. Vol. 331, no. 7521. P. 903. DOI: 10.1136/bmj.331.7521.903. (In Engl.).

13. Movchan A. K., Kapustin V. V., Kuryachiy M. I. [et al.]. Multi-Area Method of a Depth Map Building with Gain Modulation in Active-Pulse Television Measuring Systems // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). IEEE. 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002872. (In Engl.).

14. Kapustin V. V., Zahlebin A. S., Movchan A. K. [et al.]. Experimental assessment of the distance measurement accuracy using the active-pulse television measuring system and a digital terrain model // Computer Optics. 2022. Vol. 46 (6). P. 948–954. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1114. (In Engl.).

KAMENSKIY Andrey Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Television and Management Department, Associate Professor of Digital Television Department, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), Tomsk.

SPIN-code: 9572-4278

AuthorID (RSCI): 1057825

ORCID ID: 0000-0001-6587-7776

AuthorID (SCOPUS): 57191031758

Correspondence address: andru170@mail.ru

RYLOV Kirill Aleksandrovich, Graduate Student, Assistant of Television and Management Department, TUSUR, Tomsk.

SPIN-code: 4436-9058

ORCID: 0009-0001-5936-535X

AuthorID (SCOPUS): 57214750784

BORODINA Natalya, Graduate Student, Assistant of Television and Management Department, TUSUR, Tomsk.

SPIN-code: 3701-2960

ORCID: 0000-0002-6134-9877

AuthorID (SCOPUS): 57815608800

For citations

Kamenskiy A. V., Rylov K. A., Borodina N. Digital anti-aliasing trapezoidal recursively separable image processing filter with resizable scanning multi-element aperture // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). P. 127–136. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-127-136.

Received September 11, 2023.

© A. V. Kamenskiy, K. A. Rylov, N. Borodina