

# Влияние неравносторонних апертур на характеристики цифровых фильтров лапласиан «усеченная пирамида» и лапласиан «двойная пирамида»

К.С. Куприянова<sup>1</sup>, К.А. Рылов<sup>1</sup>, А.В. Каменский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ТУСУР, ул. Ленина 40, г. Томск, 634050, Россия

## Аннотация

В процессе обработки цифровых изображений важную роль играет увеличение эффективности применяемых методов и алгоритмов обработки. Одним из методов повышения эффективности является преобразование пространственных фильтров в рекурсивно-сепарабельные цифровые фильтры. Применение таких фильтров позволяет сократить количество вычислительных операций. В данной статье представлены цифровые рекурсивно-сепарабельные фильтры лапласиан «усеченная пирамида» и «двойная пирамида», преобразованные в неравностороннюю форму. Данное преобразование позволяет дополнительно сократить количество вычислительных операций и ускорить процесс обработки. Также, в статье рассматриваются принцип работы данных фильтров, их структура и алгоритм работы. По результатам обработки изображений цифровым рекурсивно-сепарабельным фильтром лапласиан «двойная пирамида» производится оценка и сравнение качества обработки фильтром с базовой маской 7x7 элементов и неравносторонними апертурами.

## Ключевые слова

Цифровая обработка изображений, рекурсивно-сепарабельные фильтры, лапласиан «усеченная пирамида», лапласиан «двойная пирамида», разрешение, пиковое отношение сигнал/шум.

## Influence of Non-Equilateral Apertures on the Characteristics of Digital Filters "Truncated Pyramid" Laplacian and "Double Pyramid" Laplacian

K.S. Kupriyanova<sup>1</sup>, K.A. Rylov<sup>1</sup>, A.V. Kamenskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> TUSUR, st. Lenina 40, Tomsk, 634050, Russia

## Abstract

In the process of processing digital images, an important role is played by increasing the efficiency of the applied methods and processing algorithms. One way to improve efficiency is to convert spatial filters into recursively separable digital filters. The use of such filters makes it possible to reduce the number of computational operations. This article presents digital recursively-separable Laplacian filters "truncated pyramid" and "double pyramid" converted into non-equilateral form. This transformation allows to further reduce the number of computational operations and speed up the processing. Also, the article discusses the principle of operation of these filters, their structure and operation algorithm. Based on the results of image processing by a digital recursively separable filter Laplacian "double pyramid", the quality of processing by a filter with a base mask of 7x7 elements and non-equilateral apertures is evaluated and compared.

ГрафиКон 2023: 33-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-21 сентября 2023 г., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Россия

EMAIL: kupriyanovak8@gmail.com (К. С. Куприянова); tstr70@mail.ru (К. А. Рылов); andru170@mail.ru (А. В. Каменский)

ORCID: 0009-0008-0372-9004 (К. С. Куприянова); 0009-0001-5936-535X (К. А. Рылов); 0000-0001-6587-7776 (А. В. Каменский)



© 2023 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

**Keywords**

Digital image processing, recursively separable filters, truncated pyramid Laplacian, double pyramid Laplacian, resolution, peak signal-to-noise ratio.

## 1. Введение

В настоящее время цифровая обработка изображений является неотъемлемой частью современных видеоинформационных систем, отвечающих за обработку и передачу мультимедийной информации, получение и обработку медицинских изображений, машинное зрение и робототехнику, сейсмологию и др. [1]. В процессе получения изображения оно подвергается различным воздействиям, например, появляются шумовые искажения, вследствие чего ухудшается качество изображения. Процесс устранения искажений называется фильтрацией. В связи со стремительным развитием компьютерных технологий и повсеместным внедрением видеоинформационных технологий усовершенствование способов и методов обработки изображений является весьма актуальной задачей.

Фильтрация изображений производится с помощью операции двумерной дискретной свертки, которая представляет собой сумму произведений значений пикселей изображения и значений маски фильтра. Данный метод фильтрации известен как пространственная фильтрация. Но при использовании фильтров больших размеров такой способ требует большого числа вычислений, т.к. функцию свертки необходимо вычислить для каждого пикселя изображения [2].

Одним из способов усовершенствования классических алгоритмов работы цифровых фильтров является применение свойств рекурсии и сепарабельности. Свойство рекурсии подразумевает использование предыдущих выходных значений функции свертки для формирования, текущего отсчета [3,4]. Однако при использовании рекурсии происходит создание фильтров с бесконечной импульсной характеристикой, поэтому при программной реализации рекурсивных ячеек в них прописываются ограничения. Данные ограничения позволяют использовать свойства рекурсии и формировать требуемую маску фильтра. Свойство сепарабельности позволяет реализовать разделение на обработку по столбцу и по строке матрицы значений входного изображения. Таким образом, чтобы ускорить процесс фильтрации, уменьшая при этом количество вычислений, используются цифровые рекурсивно-сепарабельные фильтры.

Рекурсивно-сепарабельные фильтры – «масочные» фильтры, что означает использование так называемых масок, представленных в виде двумерной матрицы. Примером рекурсивно-сепарабельных цифровых фильтров является фильтр лапласиан «усеченная пирамида» (ЛУП) и фильтр лапласиан «двойная пирамида» (ЛДП). На данный момент для цифровых фильтров ЛУП и ЛДП существуют маски ортогональной (равносторонней) апертуры. Целью данной работы является оценка влияния модифицированных цифровых фильтров ЛУП и ЛДП с масками неравносторонней апертуры на быстродействие работы алгоритма и влияния оказываемого на параметры исходного изображения. Обработка масками цифровых фильтров данной апертуры позволяет ускорить процесс фильтрации, сокращая количество вычислительных затрат, уменьшая при этом количество вычислительных операций.

Для достижения поставленной цели необходимо преобразовать апертуры цифровых фильтров ЛУП и ЛДП в неравносторонний вид. Для подтверждения увеличения быстродействия фильтрации необходимо сравнить скорость выполнения фильтров ортогональной и неортогональной формы на ряде тестовых изображений. Свойство быстродействия вырождается в реализацию известных алгоритмов обработки в другом представлении за счет каких-либо преобразований, что позволяет сократить количество вычислительных операций и приводит к уменьшению вычислительных затрат, при этом сохраняя эффективность обработки.

## 2. Синтез неравносторонних апертур рекурсивно-сепарабельных цифровых лапласиан «усеченная пирамида» и лапласиан «двойная пирамида»

Разработка неравносторонних апертур цифрового фильтра заключается в преобразовании ортогональной формы апертуры фильтра [5]. Данное преобразование осуществляется путем расчета и изменения значений коэффициентов кадровых и строчных рециркуляторов. Но с условием, что форма преобразованного фильтра должна быть схожа с изначальным трехмерным видом исходной матрицы  $7 \times 7$  элементов. Рециркуляторами называют образующие рекурсивные ячейки, которые соответствуют обработке по строке (СР) и по кадру (КР) матрицы входного изображения, а заданные в них значения служат для формирования размера требуемой маски.

Структурная схема цифрового фильтра ЛУП [6], формирующая маску апертурой  $7 \times 7$  элементов, представлена на рисунке 1, где  $z^{-1}$  – задержка на два элемента,  $x(n_1, n_2)$  – входная информация,  $y_1(n_1, n_2)$  – выходная информация,  $n$  – текущий номер отсчета сигнала, включая нулевой отсчет ( $n = 0, 1, \dots$ ),  $M_1$  – размер строчного рециркулятора,  $M_2$  – размер кадрового рециркулятора, СР – строчный рециркулятор, КР – кадровый рециркулятор.

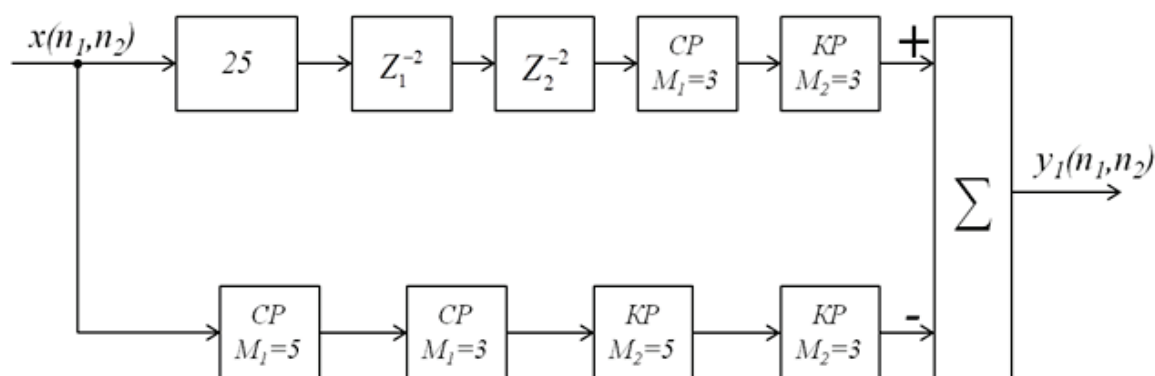


Рисунок 1 – Структурная схема фильтра ЛУП

Данная структурная схема состоит из двух ветвей. В первой ветви фильтра формируется маска размером  $3 \times 3$  элемента, которая необходима для создания области положительных элементов (при наличии окаймления в виде отрицательных элементов) внутри основной маски, это осуществляется для нормализации яркости обработанного изображения. Вторая ветвь фильтра формирует основную маску фильтра размерностью  $7 \times 7$  элементов, которая подается на сумматор с отрицательным знаком. Далее происходит суммирование полученных масок первой и второй ветви фильтра, и за счет полученной отрицательной основной маски происходит вычитание первой положительной маски, в результате чего на выходе получается итоговая маска фильтра размерностью  $7 \times 7$  элементов, эквивалентная обработанному изображению.

В результате модификации структурной схемы, для формирования маски неравносторонней формы размерностью  $7 \times 3$  элементов, для фильтра ЛУП были изменены значения коэффициентов строчного (СР) и кадрового (КР) рециркуляторов. В данном случае для апертуры  $7 \times 3$  элемента в начале структурной схемы задается начальный добавочный коэффициент 20, он необходим для корректного соотношения сумм внутренней и внешней частей итоговой матрицы, вычисляется он и находится из условия равенства нулю суммы внешней и внутренней частей маски фильтра. Далее, в соответствии со структурной схемой, происходит перемножение коэффициентов рециркуляторов, где в первой ветви фильтра используются строчный рециркулятор с коэффициентом 3 и кадровый рециркулятор с коэффициентом 0, во второй ветви фильтра используются два строчных рециркулятора с коэффициентами 5 и 3 и два кадровых рециркулятора с коэффициентами 2 и 2. Подробный алгоритм работы фильтров описан в ранее опубликованной работе [7].

Формирование маски неравносторонней формы размерностью  $7 \times 3$  элементов для фильтра ЛДП происходит аналогичным образом, как и в случае фильтра ЛУП. Структурная схема цифрового фильтра ЛДП, представленная на рисунке 2, состоит из трех ветвей, одна из которых

подается с отрицательным знаком, и сумматора, на выходе которого формируется итоговая маска, эквивалентная обработанному изображению.

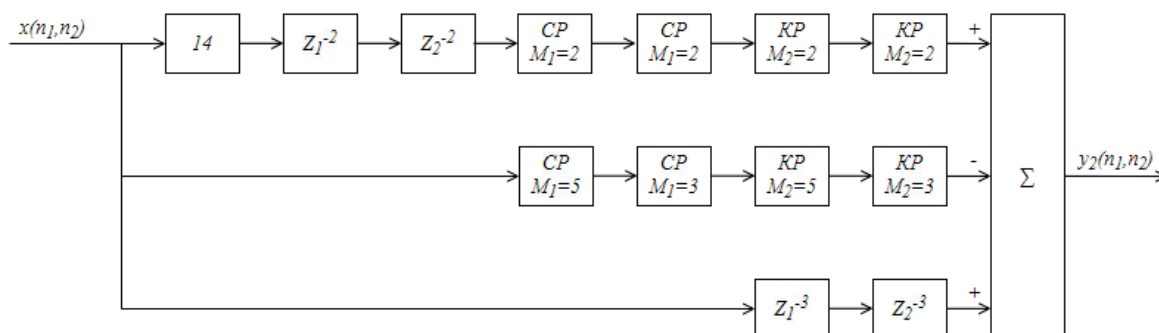


Рисунок 2 – Структурная схема ЛДП

В ходе преобразования масок для каждого фильтра в неравностороннюю форму были получены значения начального добавочного коэффициента и значения коэффициентов СР и КР, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов рециркуляторов для фильтров ЛУП и ЛДП

Фильтр ЛУП					
		1-ая ветвь фильтра		2-ая ветвь фильтра	
Размер маски	Добавочный коэфф-нт	Коэфф-ты СР и КР		Коэфф-ты СР	Коэфф-ты КР
7x7	25	3 и 3		5 и 3	5 и 3
7x5	16,67	3 и 3		5 и 3	4 и 2
7x3	20	3 и 0		5 и 3	2 и 2
Фильтр ЛДП					
		1-ая ветвь фильтра		2-ая ветвь фильтра	
Размер маски	Добавочный коэфф-нт	Коэфф-ты СР	Коэфф-ты КР	Коэфф-ты СР	Коэфф-ты КР
7x7	14	2 и 2	2 и 2	5 и 3	5 и 3
7x5	9,375	2 и 2	2 и 2	5 и 3	4 и 2
7x3	15	2 и 2	0 и 0	5 и 3	2 и 2

Полученные итоговые маски цифровых рекурсивно-сепарабельных фильтров ЛУП и ЛДП размерностью 7x3 элементов представлены на рисунке 3.

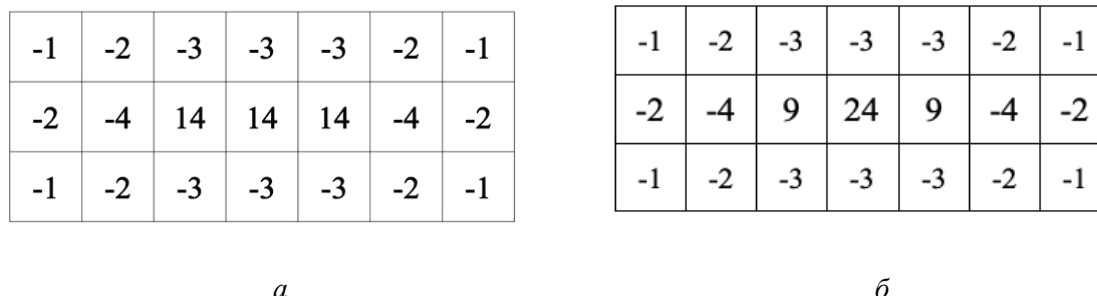


Рисунок 3 – Маски апертурой 7x3 элементов: *a* – фильтр ЛУП, *б* – фильтр ЛДП

### 3. Оценка быстродействия работы алгоритмов цифровых фильтров ЛУП и ЛДП

Оценка быстродействия работы алгоритма и эффективности обработки модифицированными фильтрами ЛУП и ЛДП проводилась при помощи тестовых изображений (ТИ), представленных на рисунке 4.

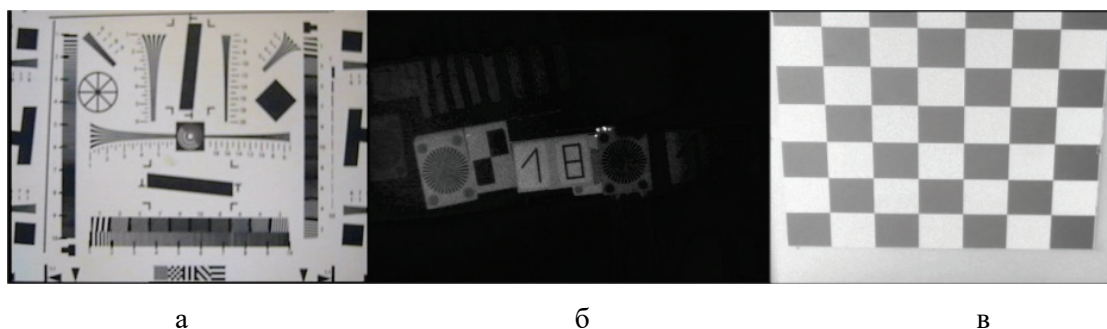


Рисунок 4 – Тестовые изображения: а – ТИ №1, б – ТИ №2, в – ТИ №3

Выбор данных трех тестовых изображений обусловлен тем, что они сформированы различными системами и имеют разную размерность. ТИ №1 – 640 x 480 пикселей, ТИ №2 – 1280 x 720 пикселей, ТИ №3 – 740 x 576 пикселей.

Одним из важных параметров обработки изображений является быстродействие, то есть соответствие фильтров необходимой скорости при осуществлении своей работы.

Рекурсивно-сепарабельный метод обработки изображений позволяет сократить количество вычислительных операций относительно стандартного метода двумерной свертки, тем самым он ускоряет процесс фильтрации.

Для того чтобы провести оценку быстродействия работы фильтров ЛУП и ЛДП, были проведены 3 эксперимента на 3 платформах с разной вычислительной мощностью. В рамках каждого эксперимента для каждого измерения было проведено 10 повторов, в результате которых получено среднее значение времени выполнения процесса обработки изображения.

В рамках первого эксперимента измерение скорости обработки фильтрами ЛУП и ЛДП проводилось на процессоре Intel Core i5-9600K, 3.7 ГГц под управлением операционной системы Windows 10. Полученные результаты измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерений 1-го эксперимента

Размер маски	Среднее время обработки, мс.					
	Фильтр ЛУП			Фильтр ЛДП		
	ТИ №1	ТИ №2	ТИ №3	ТИ №1	ТИ №2	ТИ №3
7x7	11,4	35,1	16	11,5	35	16
7x5	8,2	25	11,4	8,2	25,2	11,7
7x3	4,8	14,7	6,5	4,8	14,9	6,9

В рамках второго эксперимента, измерение скорости обработки фильтрами ЛУП и ЛДП проводилось на процессоре Apple silicon m1 3.2 GHz под управлением операционной системы macOS Ventura 13. Полученные результаты измерений приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты измерений 2-го эксперимента

Размер маски	Среднее время обработки, мс.					
	Фильтр ЛУП			Фильтр ЛДП		
	ТИ №1	ТИ №2	ТИ №3	ТИ №1	ТИ №2	ТИ №3
7x7	8,7	26,2	12	8,7	26,2	12,1
7x5	5,5	17,2	8	5,9	17,3	8
7x3	3,5	10,1	4,6	5,2	10,1	4,4

В рамках третьего эксперимента измерение скорости обработки фильтрами ЛУП и ЛДП проводилось на процессоре Intel Core i5, 2.5 ГГц под управлением операционной системы macOS Catalina 10.15.7. Полученные результаты измерений приведены в таблице 4

**Таблица 4** – Результаты измерений 3-го эксперимента

Размер маски	Среднее время обработки, мсек					
	Фильтр ЛУП			Фильтр ЛДП		
	ТИ №1	ТИ №2	ТИ №3	ТИ №1	ТИ №2	ТИ №3
7x7	16,3	49,8	21	15	47,8	23,4
7x5	11,2	37,6	15,3	14,2	33,1	18,4
7x3	7	24,7	9,6	11	21,5	16,1

При сравнении результатов измерения скорости обработки масками с ортогональной и неравносторонней апертурами можно сделать вывод о том, что независимо от мощности процессора, с уменьшением размерности маски и преобразованием её в неравностороннюю форму, скорость обработки увеличивается в среднем в 1,5 раза.

#### 4. Оценка эффективности обработки модифицированным фильтром ЛДП

Для оценки эффективности обработки для каждой маски фильтра производилось изменение положительной части матрицы значений путем её пошагового увеличения за счет добавления дополнительных коэффициентов [8-10]. Увеличение происходит за счет изменения добавочных коэффициентов, к исходному его значению добавляются дополнительные коэффициенты от 0 до 10. Результатом оценки эффективности обработки изображения будет являться выбор оптимального коэффициента, при котором разрешение изображения будет максимальным, но не превышать уровень 0,5 циклов/пиксель. В результате работы фильтров с измененными масками были получены наборы изображений.

Для каждого изображения были проведены измерения среднеквадратического отклонения (СКО), пикового отношения сигнал шум (ПОСШ), и рассчитана разрешающая способность в телевизионных линиях (ТВЛ). Формулы для расчёта характеристик приведены ниже:

$$\text{СКО} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N_1} \sum_{j=0}^{N_2} (x_{ij} - y_{ij})^2}{N_1 \times N_2}},$$

где  $x_{ij}$  – текущий отсчет входного изображения,

$y_{ij}$  – текущий отсчет выходного изображения,

$N_1, N_2$  – ширина и высота изображения.

$$\text{ПОСШ} = 20 \log \frac{M}{\sigma},$$

где  $M$  – средняя яркость изображения,

$\sigma$  – среднеквадратичное отклонение.

$$\text{ТВЛ} = \left( \frac{\text{СРР}}{0,5} \right) \times \text{Предельное разрешение},$$

где СРР – значение количества циклов на пиксель.

Результаты измерений и расчетов параметров для цифрового фильтра ЛДП приведены в таблицах 5, 6, 7 [8].

По данным таблицы 5 можно сделать вывод о том, что оптимальным коэффициентом для ТИ №1, обработанного фильтром ЛДП, при котором значение разрешающей способности максимально, но не превышает 0,5 циклов/пиксель от значения исходного, является коэффициент 3 с апертурой 7x3 элементов. При нем наблюдается рост разрешения относительно значения, полученного на исходном изображении, на 163 ТВЛ. Можно заметить, что при данном

коэффициенте уменьшаются значения СКО и увеличиваются значения ПОСШ, что говорит об улучшении качества изображения.

**Таблица 5** – Результаты измерений параметров ТИ №1

ТИ №1									
	Разрешение, ТВЛ			СКО			ПОСШ, dB		
Исход-е знач.	176			–			–		
Коэфф-ты	7x3	7x5	7x7	7x3	7x5	7x7	7x3	7x5	7x7
0	688	323	648	1,22	0,92	7,75	28,11	48,83	30,34
1	498	300	559	1,67	0,76	2,16	46,39	50,50	41,46
2	397	296	505	1,48	0,64	1,91	43,66	52,00	42,52
<b>3</b>	<b>339</b>	291	357	<b>1,20</b>	0,55	1,63	<b>44,74</b>	53,34	43,91
4	286	228	350	0,82	0,48	1,37	46,56	54,50	45,38
5	273	267	331	0,67	0,43	1,18	49,90	55,50	46,67
6	268	266	316	0,60	0,39	1,06	51,56	56,34	47,66
7	258	253	313	0,50	0,36	0,95	52,63	57,12	48,56
8	253	252	307	0,46	0,33	0,87	54,22	57,87	49,31
9	248	247	297	0,38	0,30	0,80	54,91	58,60	50,08
10	239	244	294	0,36	0,28	0,74	56,43	59,29	50,75

**Таблица 6** – Результаты измерений параметров ТИ №2

ТИ №2									
	Разрешение, ТВЛ			СКО			ПОСШ, dB		
Исход-е знач.	210			–			–		
Коэфф-ты	7x3	7x5	7x7	7x3	7x5	7x7	7x3	7x5	7x7
0	1248	241	1296	2,49	0,30	4,95	40,20	58,66	34,23
1	687	155	928	1,20	0,25	1,37	46,54	60,22	45,38
2	719	158	795	0,62	0,21	0,75	52,27	61,61	50,63
3	745	206	790	0,42	0,19	0,53	55,75	62,72	53,61
4	516	233	738	0,41	0,17	0,46	55,93	63,48	54,93
<b>5</b>	<b>413</b>	159	695	<b>0,31</b>	0,16	0,39	<b>58,21</b>	64,03	56,38
6	281	216	299	0,33	0,15	0,36	57,82	64,38	57,03
7	174	188	289	0,26	0,15	0,31	59,85	64,83	58,17
8	159	127	185	0,28	0,14	0,30	59,18	65,14	58,59
9	131	120	131	0,22	0,14	0,27	61,11	65,51	59,64
10	120	113	119	0,25	0,13	0,26	60,22	65,93	59,92

По данным таблицы 6 можно сделать вывод о том, что для ТИ №2, обработанного фильтром ЛДП, оптимальным коэффициентом, при котором значение разрешающей способности максимально, является коэффициент 5 с апертурой 7x3 элементов. При данном коэффициенте наблюдается рост разрешения относительно значения, полученного на исходном изображении, на 203 ТВЛ. Можно заметить, что при данном коэффициенте уменьшаются значения СКО и увеличиваются значения ПОСШ, что говорит об улучшении качества изображения.

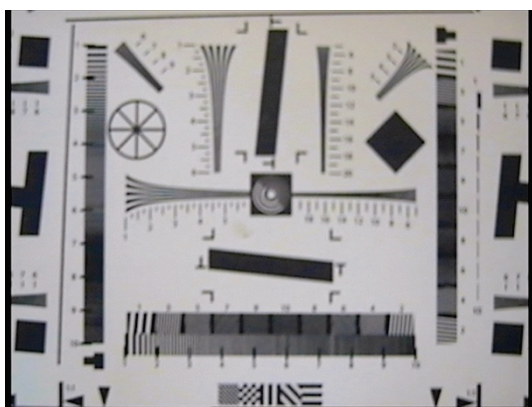
По данным таблицы 7 можно сделать вывод о том, что для ТИ №3, обработанного фильтром ЛДП, оптимальным коэффициентом, при котором значение разрешающей способности максимально, является коэффициент 4 с апертурой 7x5 элементов. При данном коэффициенте наблюдается рост разрешения относительно значения, полученного на исходном изображении, на 187 ТВЛ. Можно заметить, что при данном коэффициенте уменьшаются значения СКО и увеличиваются значения ПОСШ, что говорит об улучшении качества изображения.

Результат обработки ТИ №1 фильтром ЛДП представлен на рисунке 5.

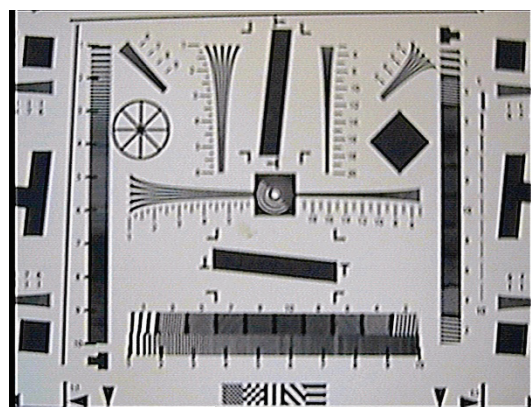


Таблица 7 – Результаты измерений параметров ТИ №3

ТИ №3									
	Разрешение, ТВЛ			СКО			ПОСШ, дВ		
Исход-е знач.	188			–			–		
Коэфф-ты	7x3	7x5	7x7	7x3	7x5	7x7	7x3	7x5	7x7
0	769	762	743	4,33	0,67	10,13	35,39	51,60	28,02
1	770	750	775	2,36	0,61	2,70	40,69	52,36	39,52
2	760	745	752	1,31	0,54	1,52	45,78	53,41	44,51
3	744	756	541	0,73	0,50	0,72	50,84	54,13	51,02
4	759	<b>375</b>	571	0,12	<b>0,48</b>	0,44	66,43	<b>54,55</b>	55,35
5	749	271	444	0,37	0,46	0,67	56,77	54,92	51,57
6	406	238	400	0,49	0,44	0,74	54,41	55,30	50,74
7	353	226	367	0,49	0,42	0,73	54,38	55,72	50,89
8	352	232	251	0,52	0,40	0,71	53,77	56,09	51,12
9	308	226	136	0,51	0,38	0,67	54,02	56,46	51,55
10	365	146	139	0,52	0,37	0,65	53,75	56,80	51,86



а



б

Рисунок 5 – Результат обработки ТИ №1: а – Исходное изображение, б – обработанное изображение

Результат обработки ТИ №2, фильтром ЛДП представлен на рисунке 6.



а

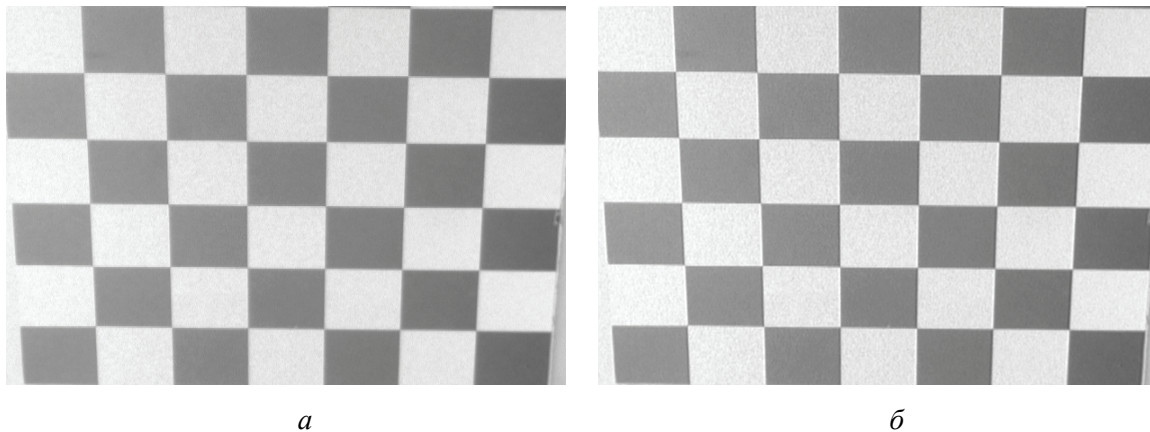


б

Рисунок 6 – Результат обработки ТИ №2: а – Исходное изображение, б – обработанное изображение

Результат обработки ТИ №3 фильтром ЛДП представлен на рисунке 7.





**Рисунок 7** – Результат обработки ТИ №3: *а* – Исходное изображение, *б* – обработанное изображение

## 5. Заключение

Из представленного исследования следует, что рекурсивно-сепарабельный метод обработки изображений фильтрами с неравносторонней апертурой позволяет сократить количество вычислительных операций относительно базовой размерности исходного фильтра. Данное заключение подтверждается результатами трех проведенных экспериментов по оценке влияния неравносторонних апертур на быстродействие цифровых фильтров лапласиан «усеченная пирамида» и лапласиан «двойная пирамида». Оценка влияния неравносторонних апертур размерностью  $7 \times 3$  и  $7 \times 5$  элементов относительно базовой размерности  $7 \times 7$  элементов показала сохранение свойств исходной размерности фильтра по повышению разрешения исходного изображения.

## 6. Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200 в ТУСУР.

## 7. Литература

- [1] Kapustin, V.V. Vision area parameters analysis for activepulse television-computing systems // V.V. Kapustin, A.K. Movchan, M.I. Kuryachiy // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2017. P. 1 – 4.
- [2] Петкевич К.О. Использование цифровых фильтров для обработки изображений // Информационные радиотехнологии, 55-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. 2019. С. 144-145.
- [3] Егоров В.В., Мингалев А. Н. Рекурсивные фильтры с конечной импульсной характеристикой // XV Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь». Сборник трудов. – Москва, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 2022. С. 98-100.
- [4] Альтман, Е.А. Применение метода разложения двумерной свертки при реализации цифровых фильтров // Е.А. Альтман, Е.И. Захаренко, Т.В. Васеева // Научный вестник НГТУ, 2017, том 69, №4, С. 95–104.
- [5] Kamenskiy A.V. High-speed recursive-separable image processing filters // Computer Optics 2022; 46(4): 659-665. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1063.
- [6] High-speed recursive-separable image processing filters with variable scanning aperture sizes / A.V. Kamenskiy, M.I. Kuryachiy, A.S. Krasnoperova, Y.V. Ilyin, T.M. Akaeva, S.E. Boyarkin // Computer Optics 2023; 47(4): 605-613. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1240.

- [7] Сай С.В. Современные методы анализа и повышения качества цифровых изображений: монография. С.В. Сай, А.В. Каменский, М.И. Курячий; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Тихоокеанский государственный университет. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2020. 173с.
- [8] Диязитдинов Р.Р. Методы различения и оценки параметров оптических сигналов: монография // Научное издание. Самара: ПГУТИ, 2019. 141с.
- [9] Смирнов В.М. Влияние размера апертуры на степень устранения импульсного шума при медианной фильтрации // Научная сессия гуап. 2019. С. 22-29.
- [10] Методика определения зависимости среднеквадратического отклонения отношения сигнал-помеха в дециметровом радиодиапазоне от выбора частоты / В. П. Пашинцев [и др.] // Системы управления, связи и безопасности. 2023. №. 2. С. 63-80.