

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ НЕЛОКАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ЗАДАЧЕ УСТРАНЕНИЯ ШУМА НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

О.В. Удалова¹

¹Самарский университет, г. Самара
e-mail: coffeecloudjam@gmail.com

Аннотация

Работа посвящена сравнительному анализу методов нелокальной фильтрации в задаче устранения шума на изображениях. В фокусе исследования находятся такие методы, как Non-Local Means, Block-matching 3D и Weighted Nuclear Norm Minimization. Представлены результаты экспериментального сравнения эффективности методов при воздействии аддитивного гауссова и импульсного шумов.

Ключевые слова: шумоподавление, нелокальное самоподобие, WNNM, NLM, низкоранговая аппроксимация, Python.

Введение

Традиционные методы подавления шума, основанные на локальной фильтрации зачастую, не обеспечивают должного качества восстановления текстур и мелких деталей на изображениях. Наиболее перспективным направлением в этой области являются методы, использующие нелокальное самоподобие изображений. Целью данной работы является исследование этих подходов, а также программная реализация метода взвешенной минимизации ядерной нормы (WNNM) и оценка его эффективности.

1. Обзор методов на основе нелокального самоподобия

Натуральные изображения часто содержат множество повторяющихся локальных структур, и один локальный небольшой фрагмент изображения (далее патч) может иметь множество схожих патчей по всему изображению. Это называется нелокальным самоподобием (non-local self-similarity, NSS). Совместная обработка такой группы патчей позволяет отделить «общее» содержимое (сигнал) от случайных различий (шум).

Благодаря такому подходу удаётся одновременно подавлять шум и сохранять мелкие детали изображения.

Базовым алгоритмом в этом классе является метод нелокальных средних (NLM). Данный метод обходит каждый пиксель на изображении в поисках патчей, похожих на целевой пиксель. Чем выше сходство, тем больший вес получает пиксель. После нормализации весов итоговое значение каждого пикселя равно сумме произведений всех пикселей и соответствующих им весов [1].

Дальнейшим развитием подхода стал метод BM3D (Block-Matching and 3D filtering). В основе BM3D лежит группировка – процедура, которая находит взаимно похожие блоки двумерных изображений и складывает их в трехмерные массивы (группы). Благодаря сходству между такими сгруппированными блоками

3D-преобразование дает очень разреженное представление групп, что позволяет эффективно проводить шумоподавление [2].

Современным этапом эволюции нелокальных методов является применение алгоритмов низкоранговой аппроксимации матриц, в частности, метода WNNM. Для группы схожих патчей формируется матрица $Y = X + N$, где X – чистые данные, а N – шум. Задача восстановления формируется как минимизация взвешенной ядерной нормы:

$$\hat{X} = \min_X \|Y - X\|_F^2 + \|X\|_{\omega,*},$$

где $\|X\|_{\omega,*} = \sum_j \omega_j \sigma_j(X)$ – сумма взвешенных сингулярных значений [3].

2. Методика экспериментального исследования

Исследование проводилось на наборе тестовых изображений из открытого набора [4]. К исходным изображениям добавлялся аддитивный гауссов шум с нулевым средним и пятью уровнями интенсивности $\sigma \in \{0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5\}$, а также импульсный шум «соль и перец» с плотностью заполнения от 5% до 25%.

Для сравнительного анализа использовались фильтр Гаусса, медианный фильтр и методы NLM, BM3D, WNNM. Все эксперименты проводились в среде Python. Метод WNNM был реализован самостоятельно на основе подхода предложенного в [3], тогда как для остальных методов использовались оптимизированные открытые библиотеки.

Качество восстановления оценивалось с помощью метрик PSNR и SSIM, а также по времени выполнения алгоритмов.

3. Экспериментальные результаты

Количественные результаты для изображения «Arisa», приведенные в таблице 1 наглядно демонстрируют общую динамику изменения эффективности методов, характерную для всей выборки. Динамика изменения метрики PSNR в зависимости от уровня гауссова шума приведена на рисунке 1.

Установлено, что при малых уровнях зашумления гауссовым шумом ($\sigma = 0,1$) метод WNNM уступает NLM и BM3D. Однако при достижении интенсивности $\sigma = 0,3$ алгоритм WNNM обходит NLM по метрике PSNR и начинает стремиться к показателям эталонного BM3D. При экстремальном шуме ($\sigma = 0,5$) WNNM демонстрирует наилучшую устойчивость, достигая PSNR 17,14 дБ, что сопоставимо с BM3D (17,11 дБ).

Таблица 1 – Сравнение эффективности различных методов устранения гауссова шума на изображение «Arisa» [4]

	PSNR			SSIM		
	$\sigma = 0,1$	$\sigma = 0,3$	$\sigma = 0,5$	$\sigma = 0,1$	$\sigma = 0,3$	$\sigma = 0,5$
Gaussian	26,903	19,759	16,006	0,748	0,408	0,275
Median	26,839	18,743	14,885	0,634	0,300	0,191
NLM	29,099	19,577	15,917	0,889	0,665	0,562
BM3D	30,945	21,790	17,119	0,930	0,814	0,688
WNNM	27,835	20,648	17,148	0,786	0,583	0,540

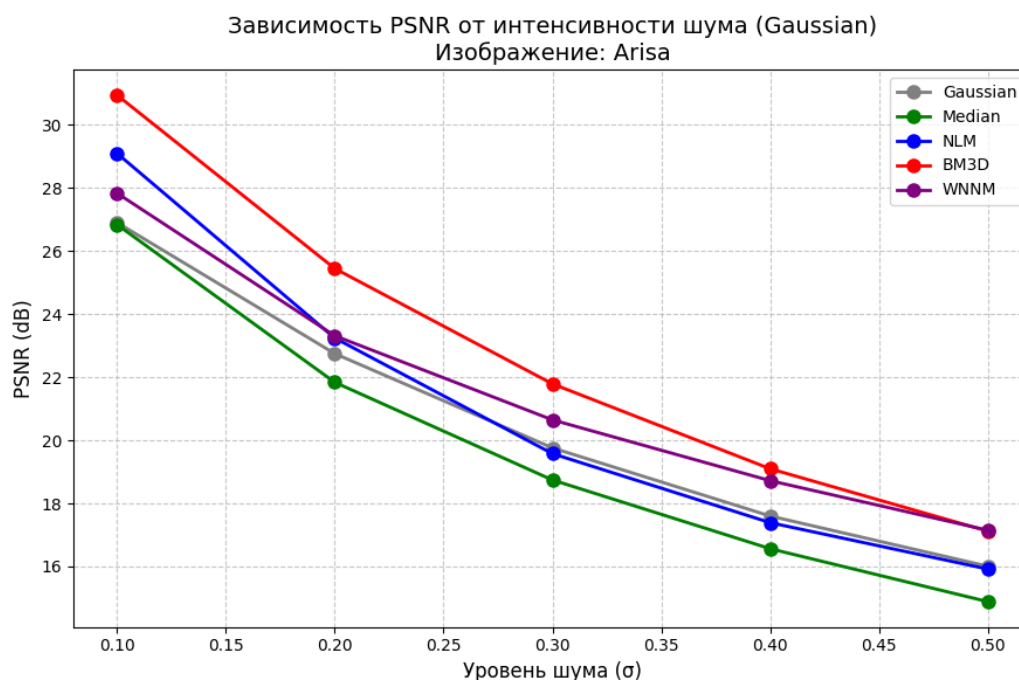


Рисунок 1 – График зависимости PSNR от интенсивности гауссова шума

Важным преимуществом WNNM является скорость работы. Для изображения «Arisa» (827x1170 px) время обработки методом BM3D составило 74,32 с, тогда как для WNNM 52,93 с. Аналогичное соотношение временных затрат (в среднем в 1,4 раза быстрее в пользу WNNM) зафиксировано на всех тестовых изображениях.

По метрике SSIM метод WNNM уступает аналогам, за исключением изображения «Img_041» с высокой регулярностью структур.

При импульсном шуме лидером остается медианный фильтр. Нелокальные методы на данном типе шума демонстрируют меньшую стабильность: BM3D превосходит WNNM и NLM по PSNR, а вот метрики качества WNNM и NLM сильно зависят от структуры конкретного изображения.

Заключение

В рамках данной работы:

1. Была сформулирована задача повышения восстановления зашумлённых изображений и изучены нелокальные методы её решения.
2. Разработано программное средство восстановления зашумлённых изображений разными методами, в частности, NLM, BM3D и WNNM. Метод WNNM был реализован самостоятельно.
3. Проведены экспериментальные исследования и проведено качественное и количественное сравнение результатов работы различных методов.

Таким образом, исследование подтвердило, что методы нелокальной фильтрации являются высокоэффективным инструментом для сохранения структурной целостности изображений. В особенности WNNM проявляет свою эффективность при высоких уровнях шума превосходя NLM и обеспечивая сопоставимое с BM3D качество при меньших временных затратах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. A Non-Local Means Based Multiplicative Denoising Method for Image Processing / Bowen Yu, Yangfan Zhou, Xin Liu, Xuguang Wang // 6-th International Technical Conference on Advances in Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE 2021). – 2022. – V. 920. – P. 763–773. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-3927-3_75 (дата обращения: 10.04.2026).
2. Comments on “Image Denoising by Sparse 3-D Transform-Domain Collaborative Filtering” / Yingkun Hou, Chunxia Zhao, Deyun Yang, Yong Cheng // IEEE Transactions on Image Processing. – 2011. – V. 20, № 1. – P. 268–270. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5484591> (дата обращения: 10.04.2026).
3. Weighted Nuclear Norm Minimization and Its Applications to Low Level Vision / Shuhang Gu, Qi Xi, Deyu Meng, Wangmeng Zuo, Xiangchu Feng, Lei Zhang // International Journal of Computer Vision. – 2017. – V. 121. – P. 183–208. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11263-016-0930-5> (дата обращения: 10.04.2026).
4. El Helou, M. Denoising Datasets / M. El Helou // GitHub. – 2021. – URL: https://github.com/majedelhelou/denoising_datasets (дата обращения: 10.04.2026).

COMPARATIVE STUDY OF NON-LOCAL FILTERING METHODS FOR IMAGE DENOISING

O.V. Udalova¹

¹*Samara University, Samara
e-mail: coffeecloudjam@gmail.com*

Abstract

This paper presents a comparative analysis of non-local filtering methods for image denoising. The study focuses on methods such as Non-Local Means, Block-matching 3D, and Weighted Nuclear Norm Minimization. The results of an experimental comparison of the methods' effectiveness under additive Gaussian and impulse noise are presented.

Keywords: image denoising, non-local self-similarity, WNNM, NLM, low-rank approximation, Python.