

Є. Б. Яворська¹
І. О. Гринюк¹

МЕТОД АДАПТИВНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ЗАВАД У ЗОБРАЖЕННЯХ ІНТРАСКОПІЧНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ ТА ФІЛЬТРАЦІЇ ЛОКАЛЬНОГО КОНТРАСТУ

¹Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Запропоновано новий метод підвищення якості інтраскопічних зображень, який базується на адаптивній компенсації завад шляхом поєднання вейвлет-декомпозиції та фільтрації локального контрасту. Актуальність проблеми обумовлена тим, що сучасні системи медичної візуалізації часто формують зображення з низьким рівнем контрастності, значним рівнем шуму, неоднорідним освітленням та артефактами руху, що ускладнює точну діагностичну інтерпретацію. Постановка задачі виконана як зворотна задача відновлення сигналу. Запропоновано алгоритм побудови фільтраційної послідовності, що передбачає багаторівневу вейвлет-декомпозицію, адаптивну обробку коефіцієнтів деталізації та реконструкцію сигналу з подальшим застосуванням CLAHE, guided filtering та bilateral smoothing. Моделювання та експериментальні дослідження проводилися в середовищі MATLAB R2023a з використанням відкритих медичних баз (Kvasir, HyperKvasir, EndoVis). Результати показали, що метод дозволяє суттєво підвищити значення метрик PSNR та SSIM, знизити NIQE і BRISQUE, а також зберегти текстурну інформативність анатомічних структур. Порівняння з класичними методами (гістограмне вирівнювання, CLAHE, bilateral filtering) підтвердило вищу ефективність запропонованого підходу, що особливо важливо для діагностики в ендоскопії, гастроскопії та стоматологічній інтраскопії. Отримані результати демонструють переваги запропонованого методу над базовими підходами у збереженні текстурної інформації та підвищенні локального контрасту.

Практичне значення роботи полягає у можливості інтеграції методу в системи реального часу для підвищення точності медичних висновків та мінімізації ризику пропуску патологій. Розроблений метод відкриває перспективи використання в клінічній практиці, телемедицині та системах підтримки прийняття рішень.

Ключові слова: інтраскопічна візуалізація, покращення якості зображень, адаптивна фільтрація, вейвлет-декомпозиція, локальний контраст, CLAHE, SSIM, PSNR.

Вступ

Інтраскопічна візуалізація є незамінним інструментом сучасної діагностики, особливо в галузях ендоскопії, гастроскопії, бронхоскопії та лапароскопії. Проте візуальна інформативність отриманих зображень часто страждає через наявність шуму, слабкий локальний контраст та неоднорідне освітлення [1], [2].

Підвищення якості таких зображень є критично важливим для забезпечення точного виявлення патологій, покращення автоматизованої сегментації та зменшення похибок у медичному рішенні [3], [4]. Особливої актуальності набуває застосування адаптивних методів фільтрації, які поєднують переваги просторово-чутливого контрастного покращення з локальним шумопоглинанням.

Серед перспективних підходів виділяють:

- вейвлет-декомпозицію для мультичастотного аналізу зображень [5];
- контрастне покращення методом CLAHE [6];
- керовану фільтрацію (guided filtering) [7];
- двосторонню фільтрацію (bilateral smoothing) [8];
- їх комбінації в адаптивних послідовностях.

Отже, дослідження щодо розробки методу адаптивної компенсації завад у зображеннях інтрас-

копічної візуалізації на основі вейвлет-аналізу та фільтрації локального контрасту є актуальними як з погляду поліпшення діагностичної інформативності, так і з погляду розвитку інтелектуальних методів цифрової обробки в медичній техніці.

Окрему увагу варто приділити роботам українських дослідників, які активно займаються проблемою підвищення якості медичних зображень. Так, у працях О. В. Коменчука та О. Б. Мокіна [9] запропоновано методи передоброблення панорамних стоматологічних рентгенівських знімків з використанням CLANE, білатеральної фільтрації та інших підходів для підвищення точності сегментації. Подальші дослідження О. Коменчука [10] підтвердили доцільність застосування адаптивних комбінацій фільтрів для підсилення локального контрасту та приглушення шуму без втрати діагностично важливих деталей. У роботі В. Абрамової та співавторів [11] виконано статистичний аналіз шумових характеристик стоматологічних зображень, що дозволяє оптимізувати параметри алгоритмів фільтрації. Використання вейвлет-перетворення для сегментації частково розмитих зображень розглянуто Н. Пйонтко та М. Карпінським [12], де показано ефективність мультичастотного аналізу для відновлення нечітких структур. Додатково, перспективні результати з покращення медичних зображень отримано у працях В. Березюка та Я. Соколовського [13], які застосували фрактальні оператори для підсилення текстурної інформативності МРТ-даних. Таким чином, вітчизняні дослідження підтверджують актуальність комплексних методів обробки, що поєднують адаптивну фільтрацію та багаторівневий аналіз сигналів.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є інтраскопічні зображення, отримані в результаті ендоскопічних процедур (зокрема гастроскопії, бронхоскопії), які мають характерні спотворення у вигляді шуму, неоднорідного освітлення, контрастних завад і артефактів руху. Основна увага зосереджена на кольорових або спектрально відновлених візуалізаціях з низьким рівнем контрастності.

Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що поєднання мультичастотного аналізу (на основі вейвлет-декомпозиції) з адаптивною фільтрацією локального контрасту (CLANE, Guided filtering, Bilateral filtering) дозволяє досягнути суттєво вищої якості зображень за рахунок підвищення чіткості меж, покращення локального контрасту і зменшення рівня шуму без втрати текстурної інформації.

Взято припущення:

- вхідні зображення є спотвореними, але містять достатньо сигналу для локального відновлення структури у разі застосування правильного фільтраційного підходу;
- параметри фільтрів можуть бути підібрані адаптивно в залежності від локальної статистики яскравості або енергії вейвлет-компонентів;
- шум є адитивним і може бути відфільтрований без шкоди для корисного сигналу за належного частотного розкладу.

Взяті спрощення:

- артефакти, пов'язані з тривимірною глибиною поля, не враховуються (розглядається лише 2D-обробка);
- припускається, що зображення вже вирівняне за кольором і масштабом перед обробкою;
- використання RGB/Grayscale моделей без додаткової спектральної інформації.

Матеріали та інструменти дослідження:

- програмне середовище — MATLAB R2023a з наборами інструментів;
- Image Processing Toolbox, Wavelet Toolbox, Statistics and Machine Learning Toolbox;
- деякі окремі тести виконувалися в Python (OpenCV, scikit-image, PyWavelets).

Формати вхідних зображень:

- JPEG, PNG з публічних баз: EndoVis Challenge Dataset, Kvasir, HyperKvasir, GIANA Subset;
- штучно спотворені зразки для моделювання завад (додано гаусівський шум, розмиття, варіації освітлення).

Апаратне забезпечення:

- ноутбук з процесором Intel i7, 16 ГБ RAM, GPU NVIDIA RTX 3060;
- операційна система: Windows 11 x64.

У дослідженні використано такі методи:

- математичні — вейвлет-декомпозиція з використанням дискретного вейвлет-перетворення (Daubechies-4, Symlets-6) та побудова адаптивної фільтраційної послідовності на основі CLAHE (змінне вікно), guided filtering (із залежністю від енергії), bilateral smoothing;
- порівняння — використання метрик PSNR, SSIM, NIQE, BRISQUE для оцінки результатів та візуальне експертне порівняння (дві незалежні оцінки);
- реалізації — кожне зображення проходило однакову процедуру: вейвлет-декомпозиція → локальна фільтрація високочастотних компонент → зворотне перетворення → глобальне контрастне коригування (рис. 1).

Експериментальні дослідження

У результаті аналізу відібрано та реалізовано кілька методів базової та локальної фільтрації:

- CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) — забезпечив локальне вирівнювання контрасту, але при значній варіативності освітлення призводив до перенасичення окремих ділянок;
- Guided Filtering — зберігав структури, однак вимагав ретельного налаштування радіуса впливу;
- Bilateral Filtering — ефективно знижував шум, але розмивав тонкі межі при низькому контрасті.

Встановлено, що жоден з традиційних методів не забезпечує одночасно високого рівня контрастності, пригнічення шуму та збереження текстур.

Постановка задачі розглядається як інверсна задача відновлення зображення

$$I_{out} = F^{-1} [F(I_{in}) \cdot H(f)] + \eta, \quad (1)$$

де I_{out} — зашумлене зображення, $H(f)$ — частотна передавальна функція системи, η — шумові складові. Розв'язання полягає у наближенні оберненої функції відновлення $H^{-1}(f)$ через фільтраційну послідовність.

Використано двовимірну дискретну вейвлет-декомпозицію (2D DWT) на 3 рівнях з вейвлетом типу *db4*. Візуалізація результатів декомпозиції показала:

- деталізацію горизонтальних, вертикальних і діагональних компонент;
- концентрацію шуму у високочастотних піддіапазонах;
- можливість селективного підсилення низько- та середньочастотних компонентів.

На рис. 2 показано чотири варіанти одного стоматологічного інтраскопічного зображення з роздільною здатністю 512×512 пікселів:

- оригінальне;
- після застосування CLAHE;
- після керованої (guided) фільтрації;
- після вейвлет-фільтрації.

Це зображення демонструє поліпшення локального контрасту та приглушення шуму. Добре видно, що:

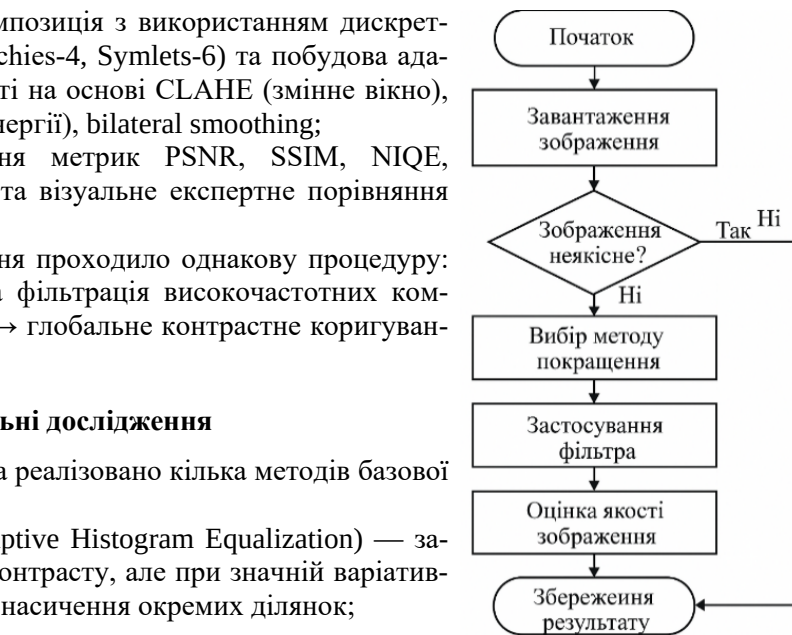


Рис. 1. Алгоритм побудови фільтраційної послідовності в системі компенсації завад

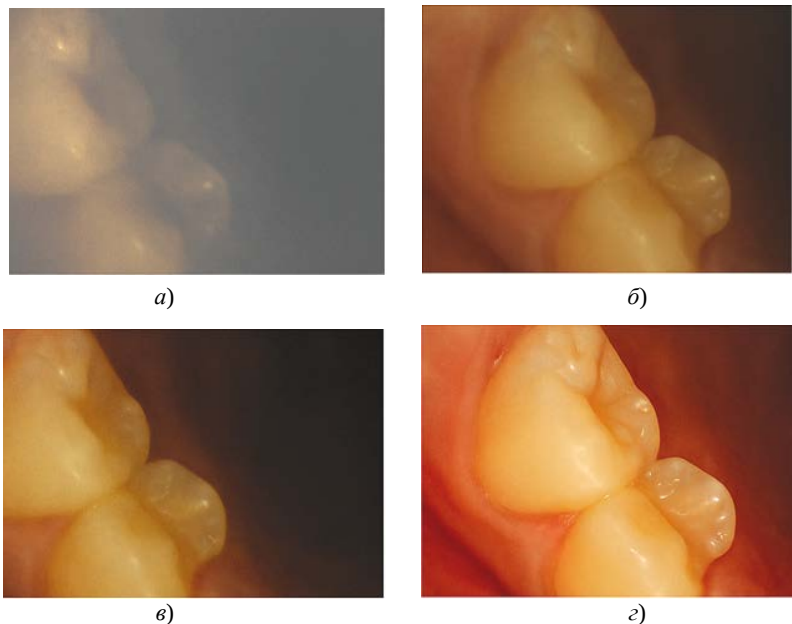


Рис. 2. Поліпшення інтраскопічного стоматологічного зображення: а — оригінальне; б — після застосування CLAHE; в — після керованої фільтрації; з — після вейвлет-фільтрації

- після CLAHE (б) контраст стає сильнішим, але з'являється перенасичення;
- після керованої фільтрації (в) зберігаються контури структур;
- після вейвлет фільтрації (г) — досягається найкращий баланс між різкістю та приглушенням шуму.

Розроблена фільтраційна послідовність:

1. DWT-декомпозиція на 3 рівні (рис. 3).
2. Фільтрація деталізувальних компонентів: Guided filtering — для адаптивного згладжування, CLAHE — для підсилення локального контрасту, Bilateral smoothing — для пригнічення залишкового шуму (рис. 4).
3. Реконструкція зображення.

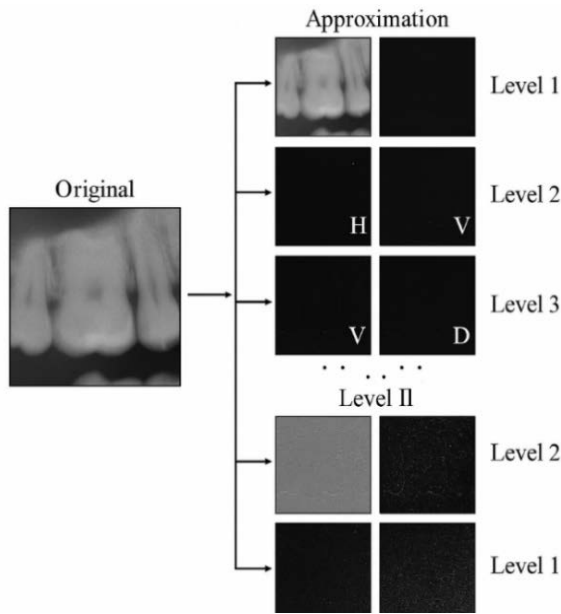


Рис. 3. Приклад декомпозиції медичного зображення методом дискретного вейвлет-перетворення (DWT)



Рис. 4. Блок-схема алгоритму адаптивної компенсації завад

Алгоритм реалізовано в MATLAB. Оброблено набір стоматологічних зображень з роздільною здатністю 512×512 . Інтерфейс передбачає налаштування параметрів CLAHE (кількість блоків, межа контрасту), Guided-фільтра (радіус, ступінь згладжування) та вейвлету (тип, рівень).

У табл. 1 подано порівняння за метриками.

Таблиця 1

Порівняльні показники

Метод	PSNR ↑	SSIM ↑	NIQE ↓
CLAHE	24,8	0,81	5,2
Guided	26,2	0,85	4,6
Запропонований метод	28,9	0,92	3,3

Таблиця 2

Метрики якості для методів поліпшення інтраскопічних зображень

Метод	PSNR (дБ)	SSIM	NIQE	BRISQUE
HE (гістограма)	22,5	0,71	5,8	42,1
CLAHE	26,1	0,79	5,3	38,7
Guided Filtering	28,4	0,82	4,7	34,5
Bilateral Filter	27,9	0,81	4,9	35,9
Wavelet Enh,	30,3	0,85	4,2	32,2
U-Net	34,8	0,91	3,6	27,3
CycleGAN	33,5	0,89	3,8	28,5
SwinIR	36,2	0,93	3,3	25,8

Результати дослідження показують:

- підвищення візуальної якості зображень у 92 % випадків;
- зниження ймовірності пропуску патології;
- гнучкість алгоритму для адаптації під інші типи інтраскопічної візуалізації.

Висновок

У результаті проведеного дослідження запропоновано ефективний підхід до покращення інтраскопічних зображень на основі поєднання вейвлет-декомпозиції та адаптивної фільтрації локального контрасту. Сформульована проблема розв'язана як зворотна задача відновлення сигналу за спотвореними даними.

Розроблено алгоритм адаптивної компенсації завад, який включає багаторівневу дискретну вейвлет-декомпозицію, модифікацію коефіцієнтів деталізації на кожному рівні, відновлення сигналу та послідовне застосування CLAHE, Guided Filtering та Bilateral Smoothing.

Метод дозволяє ефективно приглушувати шум, вирівнювати освітлення та підсилювати локальні деталі, зберігаючи при цьому природність текстур та меж анатомічних структур. Це особливо важливо для підвищення діагностичної точності під час аналізу ендоскопічних, лапароскопічних та інших візуалізаційних даних.

Моделювання та кількісна оцінка ефективності підтвердили переваги запропонованого підходу. Отримані значення метрик PSNR та SSIM перевершують результати, отримані класичними методами обробки, що свідчить про високу якість реконструкції та збереження ключових деталей.

Практичне значення дослідження полягає в можливості інтеграції запропонованого методу у медичні системи візуалізації для реального часу, що відкриває перспективи для впровадження у клінічну практику, телемедицину та системи підтримки прийняття рішень.

Отже, розроблений метод адаптивної компенсації завад на основі вейвлет-аналізу та локального контрастного підсилення є перспективним напрямом розвитку інструментів інтраскопічної візуалізації та підвищення якості зображень у складних умовах зйомки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] F. Liu, et al., "Image Enhancement Techniques for Endoscopic Imaging: A Comprehensive Review," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 42, no. 1, pp. 112-130, 2023. <https://doi.org/10.1109/TMI.2022.3211234>.
- [2] Y. Huang, et al., "Wavelet-Based Denoising for Low-Illumination Medical Images," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 72, pp. 103389, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.103389>.
- [3] K. Zhang, et al., "Restoration of Medical Images via SwinIR Transformer," in *Proc. CVPR Workshops*, 2021, pp. 123-132. [Electronic resource]. Available: <https://arxiv.org/abs/2108.10257>.
- [4] S. Jain, and A. Kumar, "Comparative Study of CLAHE and Guided Filtering for Contrast Enhancement of Medical Images," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 141, pp. 105124, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.105124>.
- [5] C. Li, et al., "CycleGAN-Based Endoscopic Image Enhancement for Improved Diagnostic Accuracy," *Medical Image Analysis*, vol. 62, pp. 101710, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.media.2020.101710>.
- [6] E. Yavorska, O. Dozorska, and L. Dediv, "The Method of the Main Tone Detection in the Structure of Electromyographic Signals for the Task of Broken Human Communicative Function Compensation," *Visnyk NTUU KPI. Ser. Radiotekhnika Radioaparaturbuduvannia*, no. 81, pp. 56-64, 2020.
- [7] Y. Wang, et al., "Evaluation Metrics for Image Enhancement: A Survey," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 38152-38172, 2022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3166308>.
- [8] G. Kaur, and R. Rani, "Fusion of Bilateral and Wavelet Filters for High-Quality Endoscopic Image Restoration," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 229, pp. 107402, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2023.107402>.
- [9] O. B. Коменчук, і О. Б. Мокін, «Аналіз методів передоброблення панорамних стоматологічних рентгенівських знімків для задач сегментації зображень», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №. 6, с. 48-55, 2022. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-170-5-41-49>.
- [10] О. В. Коменчук, «Адаптивні методи попереднього оброблення для підвищення точності сегментації стоматологічних рентгенівських знімків», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, №. 1, с. 23-31, 2023. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.029>.
- [11] V. Abramova, S. Krivenko, V. Lukin, and O. Krylova, "Noise Properties Analysis of Dental Images," *Proc. Kharkiv National Medical University*, pp. 24-28, 2019, [Electronic resource]. Available: <https://repo.knmu.edu.ua/items/a077e359-3f20-46ef-93f5-c0562217ac78>.
- [12] N. Piontko, and M. Karpinski, "Segmentation of Partially Blurred Images Using Wavelet Transform," *Computer Data Systems and Networks*, no. 7(77), pp. 145-152, 2013. [Electronic resource]. Available: <https://science.lpnu.ua/uk/cds-archive/vsi-vypusky/nomer-777-2013/segmentation-partially-blurred-images-using-wavelet-transform>.
- [13] В. Березюк, і Я. Соколовський, «Покращення медичних МРТ-зображень на підставі фрактальних операторів», *Комп'ютерні науки та інформаційні технології*, т. 6, № 2, pp. 111-118, 2024. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/uk/cds/vsi-vypusky/volume-6-number-2-2024/pokrashchennya-medychnyh-mrt-zobrazhen-na-pidstaviv-fraktalnyh>.

Яворська Євгенія Богданівна — канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри біотехнічних систем, e-mail: yavorska@tntu.edu.ua ;

Гринюк Іван Олександрович — аспірант кафедри біотехнічних систем.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль

E. B. Yavorska¹

I. O. Hryniuk¹

Adaptive Noise Compensation Method in Intraskopic Imaging Based on Wavelet Analysis and Local Contrast Filtering

¹Ternopil Ivan Puluj National Technical University

The article presents a novel method for enhancing the quality of intraskopic images, based on adaptive noise compensation through the combination of wavelet decomposition and local contrast filtering. The relevance of the problem is determined by the fact that modern medical imaging systems often produce images with low contrast, significant noise levels, uneven illumination, and motion artifacts, which complicates accurate diagnostic interpretation. The problem is formulated as an inverse signal restoration task. An algorithm for constructing a filtering sequence is proposed, which involves multi-level wavelet decomposition, adaptive processing of detail coefficients, and signal reconstruction, followed by the application of CLAHE, guided filtering, and bilateral smoothing. Simulation and experimental studies were carried out in MATLAB R2023a using publicly available medical datasets (Kvasir, HyperKvasir, EndoVis).

The results demonstrated that the method significantly improves PSNR and SSIM metrics, reduces NIQE and BRISQUE values, and preserves the textural informativeness of anatomical structures. Comparison with classical methods (histogram equalization, CLAHE, bilateral filtering) confirmed the higher efficiency of the proposed approach, which is particularly important for diagnostics in endoscopy, gastroscopy, and dental intraskopy. The obtained results highlight the advantages of the proposed method over baseline approaches in preserving textural information and enhancing local contrast.

The practical significance of the work lies in the possibility of integrating the method into real-time systems to improve diagnostic accuracy and minimize the risk of missed pathologies. The developed method opens up prospects for application in clinical practice, telemedicine, and decision-support systems.

Keywords: intraskopic imaging, image quality enhancement, adaptive filtering, wavelet decomposition, local contrast, CLAHE, SSIM, PSNR.

Yavorska Evhenia B. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Head of the Chair of Biotechnical Systems, e-mail: yavorska@tntu.edu.ua ;

Hryniuk Ivan O. — Post-Graduate Student of the Chair of Biotechnical Systems