

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ БІОНІЧНИХ АЛГОРИТМІВ ОПТИМІЗАЦІЇ
ПАРАМЕТРІВ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ ЗНЕСУМЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ІЗ
ІМПУЛЬСНИМ ШУМОМ**

Дорогокупля К.О.¹ [ORCID], Андрющенко В.О.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій,
канд. техн. наук, доц., доц. каф., Україна

Анотація. У роботі досліджено ефективність біонічних алгоритмів оптимізації параметрів фільтрів знесумлення зображень в умовах імпульсного шуму типу *salt & pepper*. Проведено порівняльний аналіз алгоритмів ННО, GWO, WOA та АСО при налаштуванні параметрів *Gaussian* та *Adaptive Median* фільтрів. Експерименти виконано на стандартних тестових зображеннях *Lena* та *Barbara* з різними рівнями шуму із використанням метрик *PSNR*, *convergence_iter* та *runtime*. Показано, що *Adaptive Median filter* забезпечує суттєво вищу якість відновлення (≈ 32.7 dB) порівняно з *Gaussian filter* (≈ 24.7 dB), при цьому досягаючи збіжності вже на початкових ітераціях. Встановлено, що тип фільтра має визначальний вплив на якість знесумлення, тоді як біонічні алгоритми оптимізації впливають переважно на швидкість збіжності та обчислювальну ефективність.

Ключові слова: інформаційні технології, знесумлення зображень, біонічні алгоритми, оптимізація.

Вступ. Задача знесумлення зображень є важливою складовою сучасних систем комп'ютерного зору, медичної візуалізації та супутникового моніторингу. У реальних умовах зображення часто спотворюються шумами, серед яких особливу складність становить імпульсний шум типу *salt & pepper*, що проявляється у вигляді випадкових пікселів із екстремальними значеннями інтенсивності та ускладнює відновлення структурних деталей.

Якість фільтрації значною мірою визначається параметрами фільтрів. Некоректний вибір параметрів може призводити як до недостатнього пригнічення шуму, так і до втрати важливих деталей зображення. У більшості випадків ці параметри підбираються емпірично, що є суб'єктивним і не гарантує оптимального результату.

У зв'язку з цим доцільним є застосування біонічних алгоритмів оптимізації, які дозволяють автоматично знаходити ефективні параметри фільтрів у складних нелінійних умовах. Метою роботи є порівняльний аналіз ефективності біонічних алгоритмів при оптимізації параметрів фільтрів знешумлення зображень в умовах імпульсного шуму з урахуванням якості відновлення та швидкості збіжності.

Огляд біонічних алгоритмів. Біонічні алгоритми оптимізації є популяційними стохастичними методами, що використовують множину кандидатних рішень для паралельного пошуку у просторі параметрів. Їх характерною особливістю є поєднання випадковості та використання інформації про найкращі знайдені рішення, що дозволяє уникати локальних оптимумів. Ключовим принципом є баланс між двома процесами: *exploration* (глобальне дослідження простору рішень) та *exploitation* (локальне уточнення). Ефективність алгоритму визначається здатністю підтримувати цей баланс у процесі оптимізації.

До класичних підходів належать генетичні алгоритми (GA) та Particle Swarm Optimization (PSO), які широко застосовуються як базові методи. Однак вони часто потребують налаштування значної кількості гіперпараметрів і можуть демонструвати повільнішу збіжність. Сучасні алгоритми, такі як ННО, GWO та WOA, мають простішу структуру, меншу кількість керуючих параметрів та більш ефективний баланс між *exploration* і *exploitation*, що робить їх зручнішими для практичного застосування.

У роботі розглядаються такі біонічні алгоритми Harris Hawks Optimization (ННО):

- використовує адаптивний механізм переходу між фазами пошуку, що залежить від динаміки процесу оптимізації; Grey Wolf Optimizer (GWO)
- базується на ієрархічній структурі популяції та орієнтації на лідерів; Whale Optimization Algorithm (WOA)
- поєднує глобальний пошук із локальним уточненням через спіральні оновлення; Ant Colony Optimization (ACO) для неперервних задач
- використовує ймовірнісне моделювання для генерації нових рішень. Ці алгоритми характеризуються відносною простотою налаштування та ефективністю в задачах неперервної оптимізації.

Постановка задачі. Задача полягає у знаходженні параметрів фільтра, що забезпечують максимальну якість відновлення зображення. Нехай задано чисте та зашумлене зображення, отримане шляхом додавання імпульсного шуму. Необхідно знайти параметри фільтра, які максимізують значення PSNR між відновленим і оригінальним зображенням.

Методика експериментів. Для оцінювання ефективності біонічних алгоритмів у задачі оптимізації параметрів фільтрів знешумлення було сформовано контрольований експериментальний протокол, який забезпечує коректне порівняння алгоритмів за однакових умов.

У дослідженні використано два стандартні тестові зображення у відтінках сірого: зображення з переважно гладкими областями та помірною кількістю текстур (Lena); зображення зі складною текстурною структурою, що містить велику кількість високочастотних деталей (Barbara). Використання цих двох зображень дозволяє оцінити ефективність методів як на простих, так і на складних сценах. До зображень додається імпульсний шум типу *salt & pepper*, який характеризується випадковою заміною пікселів на мінімальні або максимальні значення інтенсивності. Розглядаються два рівні шуму: (0.03) із низьким рівнем шуму та (0.06) – середнім. Такий вибір дозволяє дослідити поведінку алгоритмів при різній інтенсивності спотворень.

У роботі використовуються два типи фільтрів: **Gaussian filter** — лінійний фільтр згладжування з параметром (σ), **Adaptive Median filter** — нелінійний фільтр, призначений для ефективного видалення імпульсного шуму, з параметром максимального розміру вікна. Ці фільтри представляють різні підходи до знешумлення, що дозволяє провести більш повний аналіз.

Для оптимізації параметрів фільтрів застосовуються біонічні алгоритми ННО, GWO, WOA, ACO. Алгоритми відрізняються механізмами пошуку, що дозволяє оцінити їх ефективність у контексті поставленої задачі. Для всіх алгоритмів використовуються однакові параметри: розмір популяції – 20, кількість ітерацій – 60, кількість запусків – $N_RUNS = 1$, розмір зображень – (128 * 128) пікселів. Така конфігурація забезпечує баланс між обчислювальною складністю та достатньою точністю результатів.

У роботі використовується базовий експериментальний сценарій, реалізований у модулі *main_runner*, який передбачає повне факторне поєднання досліджуваних компонентів: $\text{algorithm} \times \text{filter} \times \text{noise} \times \text{image}$. Додаткові експерименти, пов'язані з масштабуванням параметрів алгоритмів та аналізом їх внутрішніх параметрів, у даній роботі не розглядаються, оскільки виходять за межі поставленої задачі тез.

Для аналізу результатів використовуються такі метрики: **PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio)** — основна метрика якості відновлення; **convergence_iter** — ітерація, на якій досягається 99% від максимального значення PSNR; **runtime** — час виконання алгоритму.

Результати. У результаті проведених експериментів було отримано кількісні оцінки ефективності біонічних алгоритмів при оптимізації параметрів фільтрів знешумлення. Аналіз результатів показав суттєву залежність якості від типу фільтра та значно меншу залежність від обраного алгоритму оптимізації. Для Gaussian filter середнє значення PSNR становило приблизно 24.68 dB для всіх алгоритмів, при цьому ітерація збіжності знаходилась на рівні (*convergence_iter* \approx 16). Це свідчить про поступову збіжність алгоритмів і наявність фази активного пошуку параметрів. Для Adaptive Median filter отримано значно вищі значення PSNR — близько 32.7 dB, при цьому (*convergence_iter* = 1) для всіх алгоритмів. Це означає, що оптимальне або близьке до оптимального рішення досягається вже на початковій ітерації.

Час виконання (*runtime*) для Gaussian filter знаходиться в межах 200–280 мс, тоді як для Adaptive Median filter — значно більший (\approx 1100–1600 мс), що пов'язано з обчислювальною складністю адаптивного вікна.

Аналіз scaling-експериментів показав, що збільшення розміру популяції та кількості ітерацій має обмежений вплив на фінальне значення PSNR, але призводить до зростання обчислювальних витрат. Internal-параметри алгоритмів також впливають переважно на швидкість збіжності, а не на кінцеву якість рішення.

Обговорення. Отримані результати дозволяють зробити кілька важливих висновків щодо поведінки алгоритмів та фільтрів. По-перше, відмінності між алгоритмами (ННО, GWO, WOA, ACO) у даній задачі є незначними з точки зору фінального значення PSNR. Це може свідчити про відносно простий ландшафт функції якості, де всі алгоритми здатні знайти близькі до оптимальних рішення. По-друге, значення ($convergence_iter = 1$) для adaptive median свідчить про те, що даний фільтр є малочутливим до параметрів у межах досліджуваного діапазону. Фактично, оптимізація не відіграє суттєвої ролі, оскільки хороше рішення досягається вже на етапі ініціалізації. На відміну від цього, Gaussian filter демонструє залежність від параметрів, що підтверджується більшими значеннями $convergence_iter$. Це означає, що біонічні алгоритми дійсно виконують корисну оптимізацію, поступово покращуючи якість рішення. По-третє, тип фільтра має значно більший вплив на якість знешумлення, ніж вибір алгоритму оптимізації. Adaptive Median filter демонструє суттєво кращі результати для імпульсного шуму, що підтверджує його спеціалізовану природу.

Разом з тим, різниця у значеннях $runtime$ та $convergence_iter$ дозволяє оцінити ефективність алгоритмів з точки зору швидкості збіжності, що є важливим фактором при практичному застосуванні. Результати scaling-експериментів підтверджують, що збільшення ресурсів (популяції, ітерацій) не завжди призводить до покращення якості, що вказує на наявність ефекту насичення.

Висновки

У роботі проведено порівняльний аналіз біонічних алгоритмів оптимізації параметрів фільтрів знешумлення зображень в умовах імпульсного шуму.

Показано, що: 1) якість знешумлення в першу чергу визначається типом фільтра; 2) Adaptive Median filter забезпечує кращі результати для імпульсного шуму; 3) Gaussian filter суттєво виграє від застосування оптимізації параметрів; 4) біонічні алгоритми демонструють подібну ефективність у даній задачі; 5) $convergence_iter$ є інформативною метрикою для оцінки швидкості збіжності алгоритмів.

Отримані результати підтверджують доцільність використання біонічних алгоритмів для задач оптимізації параметрів, а також вказують на важливість вибору відповідного типу фільтра для конкретного виду шуму.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer // Advances in Engineering Software. – 2014. – Vol. 69. – P. 46–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
2. Heidari A. A., Mirjalili S., Faris H. et al. Harris Hawks Optimization: Algorithm and Applications // Future Generation Computer Systems. – 2019. – Vol. 97. – P. 849–872. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.028>
3. Mirjalili S., Lewis A. The Whale Optimization Algorithm // Advances in Engineering Software. – 2016. – Vol. 95. – P. 51–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>
4. Dorigo M., Stützle T. Ant Colony Optimization. – MIT Press, 2004. URL: <https://mitpress.mit.edu/9780262042192/ant-colony-optimization/>
5. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. – Pearson, 2018. URL: <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/digital-image-processing/P200000003390>

COMPARATIVE ANALYSIS OF BIONIC ALGORITHMS OPTIMIZATION

PARAMETERS OF FILTERS FOR DENOISING IMAGES WITH IMPULSE NOISE

Kyrylo Dorohokuplia, Vadym Andriushchenko

Abstract. *The paper investigates the effectiveness of bionic algorithms for optimizing image denoising filter parameters in conditions of salt & pepper impulse noise. A comparative analysis of the HHO, GWO, WOA and ACO algorithms when setting the parameters of Gaussian and Adaptive Median filters is carried out. Experiments are performed on standard test images Lena and Barbara with different noise levels using the PSNR, convergence_iter and runtime metrics. It is shown that the Adaptive Median filter provides significantly higher restoration quality (≈ 32.7 dB) compared to the Gaussian filter (≈ 24.7 dB), while achieving convergence already in the initial iterations. It is established that the type of filter has a decisive influence on the quality of denoising, while bionic optimization algorithms mainly affect the convergence speed and computational efficiency.*

Keywords: *information technology, image denoising, bionic algorithms, optimization.*