

УЗГОДЖЕНА ФІЛЬТРАЦІЯ ДЛЯ ОБРОБКИ РОЗМИТОГО ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ

Трунова Т.О.

асистент, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки

Хламов С.В.

к.т.н., старший викладач, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки

***Анотація.** У роботі розглянуто метод узгодженої фільтрації для обробки розмитих цифрових зображень, зокрема астрономічних. Проаналізовано математичні основи методу, побудовано алгоритм з урахуванням апріорної інформації про об'єкти та шум. Проведено експериментальні дослідження на реальних ПЗЗ-кадрах, які підтвердили ефективність фільтрації для підвищення якості та деталізації зображень. Також обґрунтовано можливість застосування методу в інших галузях цифрової обробки.*

***Ключові слова:** ОБРОБКА ЗОБРАЖЕННЯ, УЗГОДЖЕНА ФІЛЬТРАЦІЯ, ЦИФРОВЕ ЗОБРАЖЕННЯ, ПЗЗ-КАДРИ, ШУМ, ДЕКОНВОЛЮЦІЯ, ЗМАЗ.*

Вступ

Обробка зображень відіграє ключову роль у багатьох сферах науки та техніки, зокрема в астрономії [1], де якість зображень безпосередньо впливає на точність отриманих даних. Астрономічні зображення часто зазнають значних спотворень через атмосферну турбулентність, оптичні аберації, тепловий шум детекторів та інші чинники [2]. Ці спотворення ускладнюють аналіз отриманих даних, а тому вимагають ефективних методів фільтрації для покращення якості зображень. Застосування сучасних алгоритмів обробки дозволяє компенсувати ці недоліки та підвищити якість отриманих зображень, що критично важливо для наукових досліджень і практичних застосувань [3].

Одним із перспективних методів обробки зображень є узгоджена фільтрація, що базується на принципі оптимального виявлення сигналу в умовах шуму. На відміну від класичних методів згортки або середньозважених фільтрів [4], узгоджена фільтрація [5] використовує апріорну інформацію про структуру зображення та характеристики шуму, що дозволяє підвищити якість відновлення деталей і контрасту [6]. Завдяки цим особливостям метод широко використовується не лише в астрономії, але й у таких галузях, як медична візуалізація, дистанційне зондування Землі, військова техніка, біометричні системи розпізнавання, промислова дефектоскопія та навіть криміналістична експертиза зображень.

В астрономії узгоджена фільтрація має особливе значення, оскільки дозволяє компенсувати спотворення, викликані атмосферними умовами та оптичними недоліками телескопів [7]. Це, у свою чергу, дає можливість отримати

більш чіткі зображення далеких галактик, екзопланет, туманностей і слабких космічних об'єктів [8]. Крім того, методика сприяє покращенню ефективності автоматизованих алгоритмів виявлення та ідентифікації небесних тіл, що має вирішальне значення для розвитку астрономічних каталогів [9] і проведення наукових спостережень [10].

У медичній діагностиці узгоджена фільтрація застосовується для підвищення якості знімків, отриманих за допомогою комп'ютерної томографії, магнітно-резонансної томографії та ультразвукової діагностики. Це дозволяє лікарям точніше виявляти патології, що є критичним фактором для ранньої діагностики та ефективного лікування. У військовій та розвідувальній техніці метод використовується для покращення супутникових і аерофотознімків, що сприяє більш точному виявленню об'єктів та аналізу ситуацій в екстремальних умовах.

Актуальність цього дослідження визначається необхідністю розробки та вдосконалення методів обробки астрономічних зображень, які дозволяють зменшити вплив розмиття та підвищити точність астрономічних спостережень [11]. Впровадження узгодженої фільтрації в обробку астрономічних зображень відкриває нові можливості для аналізу слабких об'єктів, покращення роздільної здатності та ефективності автоматизованих алгоритмів ідентифікації небесних тіл [12]. Більш того, завдяки універсальності методу, його результати можуть бути застосовані й у багатьох інших галузях, що підкреслює важливість проведеного дослідження.

У роботі розглядається застосування узгодженої фільтрації для обробки розмитих цифрових астрономічних зображень. Особливу увагу приділено теоретичним основам методу, математичному обґрунтуванню, алгоритмічній реалізації та аналізу отриманих результатів. Окремо буде розглянуто питання ефективності методу в порівнянні з традиційними алгоритмами фільтрації, а також можливості його адаптації для вирішення практичних задач у суміжних сферах. Порівняння із традиційними методами дозволить оцінити ефективність підходу, а практичні експерименти на реальних астрономічних зображеннях продемонструють його застосовність у наукових дослідженнях і технічних додатках.

Мета та задачі дослідження

Основна мета цього дослідження полягає у розробці та вдосконаленні методики узгодженої фільтрації для обробки розмитих цифрових зображень, з особливим акцентом на астрономічні дані [13]. Використання цього підходу дозволяє значно покращити якість візуальної інформації, мінімізуючи вплив шуму та різноманітних факторів, що спричиняють спотворення. Оскільки астрономічні зображення часто зазнають негативного впливу турбулентності атмосфери, теплових шумів, оптичних аберацій і дискретизації цифрових детекторів, ефективна обробка таких даних стає ключовим завданням для астрономічної спільноти [14]. Покращення якості спостережень дозволяє не лише точніше аналізувати слабкі об'єкти у далеких галактиках, а й виявляти нові деталі у вже відомих структурах.

Проте значущість узгодженої фільтрації виходить далеко за межі астрономії. Цей метод відіграє важливу роль у медичній візуалізації, наприклад, при покращенні контрастності МРТ-знімків або рентгенівських зображень. Його застосування у військовій та супутниковій розвідці дає змогу покращити деталізацію супутникових знімків, що сприяє більш точному аналізу місцевості. Крім того, у промисловій діагностиці ця методика допомагає виявляти дефекти на поверхнях матеріалів, що критично важливо для контролю якості в авіабудуванні та машинобудуванні. У цифровій криміналістиці вона використовується для аналізу спотворених або пошкоджених зображень, що є ключовим для ідентифікації осіб або об'єктів на фото та відеоматеріалах.

Узгоджена фільтрація є перспективним напрямом розвитку обробки зображень, що дає можливість мінімізувати інформаційні втрати та покращувати якість отриманих даних [15]. Особливого значення цей метод набуває в умовах, коли зображення мають низьку роздільну здатність, зазнають значного шумового впливу або мають обмежений динамічний діапазон. Саме тому вдосконалення алгоритмів фільтрації сприятиме розширенню можливостей аналізу візуальних даних у наукових, промислових і прикладних сферах.

Для реалізації цієї мети дослідження охоплює кілька ключових аспектів. Спершу необхідно проаналізувати сучасні методи фільтрації, що застосовуються для обробки розмитих зображень. Існує багато підходів – від традиційних методів згладжування до складних алгоритмів регуляризації. Їхні сильні та слабкі сторони визначають можливості щодо збереження дрібних деталей та мінімізації артефактів [16].

Важливим етапом є математичне обґрунтування узгодженої фільтрації. Побудова такої моделі базується на використанні апріорної інформації про структуру об'єкта та характеристики шуму. Саме цей підхід дозволяє створювати фільтри, оптимізовані під конкретний тип даних, що є особливо корисним у задачах астрономічного аналізу, де часто необхідно виділяти слабкі сигнали на фоні інтенсивного шуму.

Окремо необхідно розробити алгоритмічний підхід до реалізації узгодженої фільтрації. Це включає створення ефективних методів автоматичного налаштування параметрів фільтра, що дозволить адаптувати алгоритм до різних типів вхідних даних. Крім того, варто дослідити можливість комбінування цього методу з іншими підходами, такими як деконволюція або адаптивне згладжування, що може значно покращити результати обробки [17]. Важливою складовою є також оцінка швидкодії алгоритмів, адже ефективність обробки великих обсягів даних є критичним фактором для їх практичного застосування.

Наступним кроком є проведення експериментальних досліджень на реальних астрономічних зображеннях. Це дозволить оцінити ефективність запропонованого підходу, порівняти його з існуючими методами та визначити вплив на якість ідентифікації слабких об'єктів. Особливо важливо проаналізувати, наскільки метод допомагає зменшити похибки вимірювань та покращити деталізацію структур, таких як протяжні туманності чи слабкі зоряні

скупчення. Додатково слід перевірити ефективність фільтрації на інших типах зображень, зокрема медичних і супутникових, щоб підтвердити універсальність запропонованого підходу.

Узгоджена фільтрація відкриває широкі можливості для покращення якості цифрових зображень, і її впровадження в астрономічній обробці даних дозволить підвищити точність ідентифікації та вимірювання космічних об'єктів. Водночас метод має значний потенціал у суміжних галузях, де висока якість зображень є критично важливою. Окрім покращення наукових спостережень, використання цього підходу може стати основою для нових методів автоматичного аналізу зображень у медичній діагностиці, дистанційному зондуванні Землі, криміналістиці та промисловій автоматизації.

Очікується, що результати цього дослідження сприятимуть подальшому розвитку методів обробки цифрових зображень, підвищать ефективність аналізу даних та розширять можливості їх застосування у різних наукових та технічних сферах. Таким чином, дослідження узгодженої фільтрації не лише зробить внесок у розвиток астрономічних технологій, а й сприятиме створенню універсальних підходів до покращення якості зображень у широкому спектрі застосувань.

Основна частина

1 Аналіз сучасних методів фільтрації для обробки розмитих зображень та їх ефективності

Обробка розмитих зображень є ключовою задачею в цифровій обробці сигналів, і існує широкий спектр методів, спрямованих на покращення їхньої якості. На рисунку 1.1 наведено приклади змазаних зображень астрономічних об'єктів, отриманих у різних умовах спостереження. Рисунок 1.1, а демонструє змаз, спричинений відсутністю добового ведення телескопа, тоді як рисунок 1.1, б ілюструє артефакти, що виникають у результаті зриву ведення.

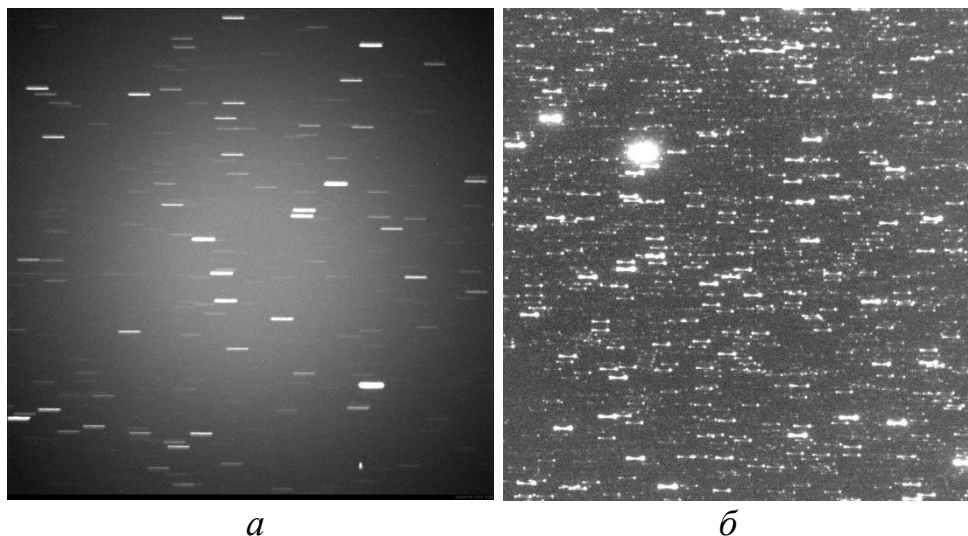


Рисунок 1.1 – Змазане зображення об'єктів:
а – без добового ведення; б – при зриві добового ведення

Основною метою фільтрації є відновлення деталей, втрачених через розмиття, спричинене рухом, оптичними спотвореннями, атмосферними ефектами або обмеженнями сенсорів. У даному розділі розглядаються основні методи фільтрації, які використовуються для відновлення розмитих зображень, їхні переваги та обмеження.

Класичні методи фільтрації.

До найпростіших методів фільтрації належать згладжувальні фільтри, такі як середній (бокове усереднення) та фільтр Гаусса. Вони ефективні для зменшення шуму, проте мають суттєвий недолік: вони згладжують не лише шумові компоненти, а й корисні деталі зображення. Це особливо критично в астрономії, де дрібні деталі можуть мати важливе наукове значення.

Методи, що базуються на перетворенні Фур'є, такі як ідеальний низькочастотний фільтр або фільтр Гаусса у частотному домені, дозволяють зменшити високочастотні шуми, але водночас втрачається різкість зображення. Фільтри Вінера та інверсійне фільтрування є більш адаптивними, оскільки враховують характер розмиття. Фільтр Вінера мінімізує вплив шуму, використовуючи оцінку спектральних характеристик зображення та шуму, але його ефективність залежить від правильної оцінки цих параметрів.

Адаптивні методи фільтрації.

На відміну від класичних методів, адаптивні алгоритми аналізують локальні характеристики зображення і застосовують змінні параметри фільтрації.

Медіанні фільтри добре працюють для видалення імпульсного шуму (наприклад, "солі і перцю"), але менш ефективні при розмитті, спричиненому оптичними ефектами.

Анізотропна дифузія (Perona-Malik) дозволяє згладжувати шуми, зберігаючи контури. Він використовується в астрономічних даних, зокрема для виділення слабких деталей туманностей та галактик. Проте його налаштування потребує точного підбору параметрів, щоб уникнути надмірного згладжування або збереження шуму.

Застосування нейромереж у фільтрації розмитих зображень демонструє високу ефективність. Глибокі згорткові нейронні мережі (CNN) можуть навчатися на великих наборах даних і відновлювати зображення на основі навченої моделі. Такі методи широко використовуються в астрономії, медичній діагностиці та супутниковій обробці. Однак вони вимагають великих обчислювальних ресурсів та високоякісного навчального набору.

Узгоджена фільтрація як оптимальний підхід.

Узгоджена фільтрація, на відміну від вищезазначених методів, використовує апіорну інформацію про зображення та характеристики шуму [18]. Це дозволяє їй значно ефективніше відновлювати зображення з мінімальними втратами деталей. Основна ідея методу полягає у використанні

інформації про розподіл розмиття (Point Spread Function, PSF) для оберненої реконструкції зображення.

Математично узгоджена фільтрація ґрунтується на зворотному розв'язанні рівняння згортки:

$$I(x, y) = O(x, y) \times PSF(x, y) + N(x, y), \quad (1.1)$$

де $I(x, y)$ – отримане розмите зображення;

$O(x, y)$ – істинне зображення, $PSF(x, y)$ – функція розсіювання точки

$N(x, y)$ – шум.

Для відновлення $O(x, y)$ застосовується метод інверсійного фільтрування у частотній області:

$$O(x, y) = F^{-1} \left[\frac{F(I(x, y))}{F(PSF(x, y))} \right], \quad (1.2)$$

де F позначає перетворення Фур'є;

F^{-1} – його обернене перетворення.

Для зменшення впливу шуму у знаменнику додається регуляризаційний параметр ε (1.3):

$$O(x, y) = F^{-1} \left[\frac{F(I(x, y)) \times F^*(PSF(x, y))}{|F(PSF(x, y))|^2 + \varepsilon} \right], \quad (1.3)$$

Такий підхід дозволяє значно підвищити якість відновлення, особливо якщо PSF відома з високою точністю. Однак практичне застосування потребує стабільних методів оцінки PSF та належного придушення шуму.

Таким чином, узгоджена фільтрація має значний потенціал для обробки астрономічних зображень, особливо у випадках, коли розмиття спричинене добре відомими факторами, такими як дифракція оптики або атмосферна турбулентність.

2 Математичне обґрунтування узгодженої фільтрації, враховуючи апіорні дані про структуру об'єкта та характеристики шуму

Узгоджена фільтрація є одним з найбільш ефективних методів обробки зображень, які зазнали розмиття, оскільки вона використовує інформацію про очікувану структуру сигналу та характеристики шуму. Цей метод базується на концепції кореляційної обробки, де використовується фільтр, що максимально підсилює корисний сигнал і водночас пригнічує шум.

Розглянемо задачу відновлення зображення $f(x, y)$, яке було спотворене розмиттям та зашумлене адитивним шумом $\eta(x, y)$:

$$g(x, y) = h(x, y) \times f(x, y) + \eta(x, y), \quad (2.1)$$

де $g(x, y)$ – спостережуване зображення;

$h(x, y)$ – функція розмиття.

Основне завдання узгодженої фільтрації – знайти фільтр $H(u, v)$ у частотній області, який забезпечить максимальне співвідношення сигнал-шум на виході:

$$F(u, v) = \frac{G(u, v)H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + S_\eta(u, v)/S_f(u, v)}, \quad (2.2)$$

де $S_\eta(u, v)$ та $S_f(u, v)$ – спектри потужності шуму і сигналу відповідно;
 $H^*(u, v)$ комплексно спряжене до $H(u, v)$.

Цей вираз отримано з критерію мінімізації середньоквадратичної похибки між відновленим зображенням і вихідним сигналом. Якщо шум є білим і його спектральна щільність рівномірна, вираз спрощується:

$$H(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + K}, \quad (2.3)$$

де K – константа, що характеризує відношення потужності шуму до сигналу.

Використання апіорної інформації дозволяє покращити якість фільтрації. Наприклад, якщо відомі особливості спостережуваного об'єкта, такі як його спектральний розподіл або гладкість, це можна врахувати при розробці фільтра. Одним із способів є застосування регуляризаційних методів, які вводять додаткові обмеження на спектральні компоненти відновленого зображення.

Одним із таких підходів є метод Тіхонова, де оптимізована функція має вигляд:

$$\min \left\{ \|H(u, v)G(u, v) - F(u, v)\|^2 + a \|\nabla F(u, v)\|^2 \right\}, \quad (2.4)$$

де a – параметр регуляризації, який контролює рівень згладжування.

В реальних умовах розмиття може мати складну структуру, що потребує врахування змінної функції PSF. Узгоджена фільтрація може бути адаптивною, де функція $H(u, v)$ коригується в залежності від локальних характеристик зображення. Це особливо актуально в астрономії, де атмосферні флуктуації створюють неоднорідне розмиття.

Зокрема, у випадку астрономічних спостережень узгоджена фільтрація дозволяє підвищити контрастність слабких об'єктів, таких як віддалені галактики або екзопланети, що є критично важливим для їх ідентифікації. Для ілюстрації можна включити зображення, яке демонструє результати застосування узгодженої фільтрації до реальних астрономічних даних до та після обробки.

Крім того, на практиці часто використовують варіації узгодженої фільтрації, такі як метод Вінера або оптимізовані версії з урахуванням особливостей детектування слабких сигналів. Це дозволяє досягти високої точності відновлення навіть у випадках сильного шумового впливу.

Також важливим аспектом є вимоги до обчислювальних ресурсів. Узгоджена фільтрація є досить ресурсоємною, особливо при обробці великих обсягів астрономічних даних. Використання паралельних обчислень на

графічних процесорах (GPU) або суперкомп'ютерах може значно пришвидшити процес фільтрації.

У порівнянні з іншими методами, такими як деконволюція Люсі-Річардсона або адаптивне згладжування, узгоджена фільтрація має перевагу у відновленні слабких деталей зображення. Деконволюція Люсі-Річардсона добре працює при відомій PSF, однак є чутливою до шуму. Адаптивне згладжування може ефективно зменшувати шум, але водночас погіршувати деталізацію.

Отже, математичне обґрунтування узгодженої фільтрації базується на принципах кореляційного аналізу, спектрального відновлення сигналу та використання апіорних даних про структуру об'єкта [19]. Це дозволяє значно покращити якість обробки розмитих зображень у наукових і прикладних задачах.

3 Розробка алгоритму узгодженої фільтрації та визначення оптимальних параметрів для його застосування

Розробка ефективного алгоритму узгодженої фільтрації є надзвичайно важливим етапом дослідження, оскільки саме на цьому етапі визначається, наскільки успішно метод буде справлятися із завданням обробки розмитих цифрових зображень. Узгоджена фільтрація ґрунтується на врахуванні апіорної інформації про структуру об'єкта та характеристики шуму, що дозволяє значно покращити якість зображення.

Основні етапи розробки алгоритму.

Створення алгоритму узгодженої фільтрації передбачає кілька етапів.

1. *Аналіз вихідних даних.* На першому етапі необхідно визначити характеристики вхідного зображення: рівень шуму, тип розмиття, особливості структури об'єкта. Це дозволяє правильно підібрати методи обробки та вибрати оптимальні параметри фільтрації.

2. *Побудова математичної моделі.* Узгоджена фільтрація передбачає використання моделі сигналу та шуму, що дозволяє отримати максимально наближене до реального відновлене зображення. Формально задача відновлення може бути записана як розв'язання оберненої задачі:

$$g(x, y) = f(x, y) \times h(x, y) + n(x, y), \quad (3.1)$$

де $g(x, y)$ – спостережуване зображення;

$f(x, y)$ – ідеальне зображення;

$h(x, y)$ – функція розмиття;

$n(x, y)$ – адитивний шум.

3. *Реалізація методу оптимізації.* Важливим кроком є вибір оптимального способу інверсії згортки та пригнічення шуму. Одним із найбільш ефективних методів є застосування регуляризації Тихонова:

$$\hat{f} = \arg \min_f \left\{ \|g - f \times h\|^2 + \lambda R(f) \right\}, \quad (3.2)$$

де $R(f)$ – регуляризаційний член, який допомагає зменшити вплив шуму
 λ – параметр згладжування.

4. *Розробка ітераційної схеми.* Для досягнення точного результату можуть використовуватися ітераційні методи, наприклад, метод Люсі-Річардсона або алгоритми на основі градієнтного спуску.

5. *Оптимізація обчислювальної складності.* Важливою задачею є реалізація алгоритму так, щоб він працював швидко та ефективно навіть на великих зображеннях. Використання методів прискореної обробки, таких як GPU-обчислення або методи наближених розв'язків, може значно покращити швидкодію.

Визначення оптимальних параметрів.

Для досягнення високої ефективності узгодженої фільтрації необхідно визначити оптимальні значення параметрів алгоритму. Основні параметри, що впливають на результат:

- *розмір вікна фільтрації.* Занадто мале вікно може призвести до втрати деталей, тоді як надто велике – до надмірного згладжування;
- *коефіцієнт регуляризації λ .* Визначає баланс між пригніченням шуму та збереженням деталей;
- *кількість ітерацій.* В ітераційних методах важливо підібрати правильну кількість ітерацій, щоб уникнути переобчислення та надмірного підсилення шуму;
- *тип апіорної інформації.* Залежно від структури об'єкта можна використовувати різні моделі: гладкі регіони, текстуровані ділянки або точкові джерела світла.

4 Дослідження можливостей комбінування узгодженої фільтрації з іншими методами обробки зображень

Узгоджена фільтрація є потужним методом покращення якості зображень, проте її ефективність може бути підвищена шляхом комбінування з іншими методами обробки. Зокрема, деконволюція, адаптивне згладжування та методи регуляризації можуть значно покращити результативність фільтрації у випадках, коли наявні сильні шуми або складні оптичні аберації.

Комбінування узгодженої фільтрації з деконволюцією.

Деконволюція є класичним методом покращення зображень, який дозволяє компенсувати ефекти розмиття, викликані обмеженою роздільною здатністю оптичної системи. Зазвичай застосовують такі алгоритми деконволюції: метод Люсі-Річардсона, який базується на ітераційному наближенні та є ефективним для астрономічних зображень; всерлетна деконволюція, що дозволяє відновлювати деталі на різних масштабах; регуляризована деконволюція, яка включає апостеріорні обмеження для контролю рівня шуму. Використання деконволюції у поєднанні з узгодженою фільтрацією дозволяє:

- зменшити вплив розмиття, спричиненого атмосферою турбулентністю (в астрономії) або оптичними абераціями;

– відновити деталі, які приховані за межами просторової роздільної здатності системи;

– покращити контрастність слабких структур на фоні яскравих об'єктів.

Одним із ефективних підходів є застосування узгодженої фільтрації перед деконволюцією, що дозволяє зменшити вплив шуму та покращити початкові умови для алгоритмів відновлення. Важливим аспектом є вибір оптимального регуляризаційного параметра, який запобігає посиленню шумів при оберненні згортки.

Поєднання узгодженої фільтрації з адаптивним згладжуванням.

Адаптивне згладжування застосовується для шумозаглушення, зберігаючи при цьому важливі структурні деталі зображення. Використання узгодженої фільтрації у комбінації з адаптивним згладжуванням забезпечує:

– мінімізувати шум, зберігаючи чіткі границі об'єктів;

– покращити деталізацію слабких сигналів, що особливо актуально для зображень далеких галактик та туманностей.

Один із ефективних підходів – застосування узгодженої фільтрації для початкового зниження шуму та попереднього виділення структур, після чого адаптивне згладжування коригує залишкові шумові компоненти. Використання багатомасштабних методів (наприклад, вейвлет- або фур'є-аналізу) дозволяє адаптивно змінювати параметри згладжування залежно від локальних особливостей зображення.

Використання методів регуляризації у поєднанні з узгодженою фільтрацією.

Методи регуляризації (наприклад, метод Тихонова, варіаційне згладжування) застосовуються для стабілізації ітераційних алгоритмів деконволюції та покращення їхньої збіжності. Включення регуляризації в узгоджену фільтрацію дозволяє:

– контролювати рівень деталізації зображення;

– запобігати надмірному підсиленню шумів при застосуванні агресивних фільтрів;

– оптимізувати баланс між точністю реконструкції та стабільністю алгоритму.

Один із можливих підходів – використання локально адаптивної регуляризації, яка змінює параметри згладжування залежно від просторових особливостей зображення. Це особливо корисно в астрономічній обробці, де важливо відновлювати слабкі деталі без спотворення яскравих областей.

Комбінування узгодженої фільтрації з іншими методами дає змогу значно підвищити якість обробки розмитих астрономічних зображень. Зокрема, поєднання з деконволюцією дозволяє відновити дрібні деталі, адаптивне згладжування зменшує шум без втрати інформації, а використання машинного навчання дає змогу покращити параметризацію алгоритмів.

5 Оцінка швидкодії та ефективності алгоритмів для застосування в обробці великих обсягів даних

Узгоджена фільтрація та її варіації є ефективними методами обробки зображень, проте при роботі з великими обсягами астрономічних даних важливо оцінити їхню швидкодію та ефективність. Оскільки сучасні телескопи, такі як Large Synoptic Survey Telescope або James Webb Space Telescope, генерують петабайти даних щодня, алгоритми обробки мають бути оптимізованими для швидкої роботи.

Одним із ключових параметрів є обчислювальна складність алгоритмів. Наприклад, класичний підхід до узгодженої фільтрації може зменшити обчислювальну складність до $O(n \log n)$, що є значним покращенням у порівнянні з прямими методами обробки, які мають складність $O(n^2)$. Крім того, використання оптимізованих методів інтерполяції та деконволюції дозволяє зменшити вплив артефактів, що можуть виникати під час фільтрації. Також деконволюційні методи, такі як метод Люсі-Річардсона, потребують ітеративного обчислення, що також впливає на швидкодію.

Для оцінки ефективності використовують такі критерії:

- часова складність обчислень;
- споживання оперативної пам'яті;
- масштабованість алгоритму для розподілених обчислень.

Для пришвидшення роботи алгоритмів узгодженої фільтрації часто застосовують паралельні обчислення, що дозволяє розподіляти навантаження між кількома потоками процесора або використовувати можливості графічних процесорів. Зокрема, застосування технологій OpenCL або CUDA для обробки зображень дозволяє значно підвищити швидкодію, особливо при роботі з великою кількістю пікселів або серіями зображень, отриманих у рамках астрономічних спостережень.

Для оцінки ефективності алгоритмів проводяться тестові обчислення на різних типах зображень. Наприклад, у випадку астрономічних знімків аналізується швидкість та точність відновлення слабких об'єктів, таких як далекі галактики або астероїди. Для цього використовують такі метрики, як відношення сигнал/шум та структурна подібність, що дозволяють кількісно оцінити якість фільтрації.

Також важливим аспектом є можливість адаптації алгоритму до роботи в реальному часі. Це є особливо актуальним для великих астрономічних обсерваторій, де обробка даних має відбуватися негайно після отримання сигналу з телескопа. Тому важливою є розробка оптимізованих версій алгоритму, які можуть забезпечити баланс між швидкістю та якістю обробки.

Додатково варто зазначити, що ефективність алгоритмів значною мірою залежить від апаратної архітектури. Наприклад, використання FPGA (польовопрограмованих вентильних матриць) для апаратного прискорення фільтрації дозволяє досягти швидкостей обробки, недоступних навіть для найсучасніших CPU та GPU. Тому одним із перспективних напрямків досліджень

є впровадження апаратно-програмних рішень для обробки великих обсягів зображень у реальному часі.

Таким чином, оцінка швидкодії та ефективності алгоритмів узгодженої фільтрації дозволяє визначити оптимальні підходи для їх практичного застосування в умовах великих обсягів даних. Це відкриває можливості для інтеграції методів узгодженої фільтрації у різні наукові та прикладні галузі, включаючи медичну діагностику та дистанційне зондування Землі.

Результати досліджень

6 Експериментальна оцінка якості узгодженої фільтрації та її впливу на точність ідентифікації об'єктів у космічних зображеннях

Для комплексної оцінки ефективності узгодженої фільтрації було проведено експериментальне дослідження, зосереджене на аналізі реальних астрономічних зображень. Ці дослідження були спрямовані не лише на виявлення здатності алгоритму зменшувати ефекти розмиття, але й на аналіз того, як це впливає на можливість точного виявлення слабких космічних об'єктів та деталізацію тонких структур.

Зображення, використані для експерименту, були отримані за допомогою ПЗЗ-камер під час спостережень у різних умовах, зокрема при неідеальному веденні телескопа або наявності атмосферних перешкод. Значна частина кадрів мала спотворення у вигляді змазу, спричиненого рухом апаратури або нестабільністю атмосфери (рис. 6.1-6.2). Саме ці кадри стали базовими для подальшої обробки.

Алгоритм узгодженої фільтрації застосовувався до кожного з обраних кадрів із попередньо визначеними параметрами фільтра (рис. 6.3-6.4). Ці параметри розраховувались на основі апіорних оцінок, зокрема характеристик функції розсіювання точки, яка моделювала розмиття. В якості моделі PSF застосовувалося поєднання декількох гаусових компонентів, параметри яких обирались на основі процедури мінімізації залишків між моделлю та реальним зображенням. У результаті будувалась передаточна функція фільтра, яка у спектральному домені зменшувала вплив розмиття та шуму.

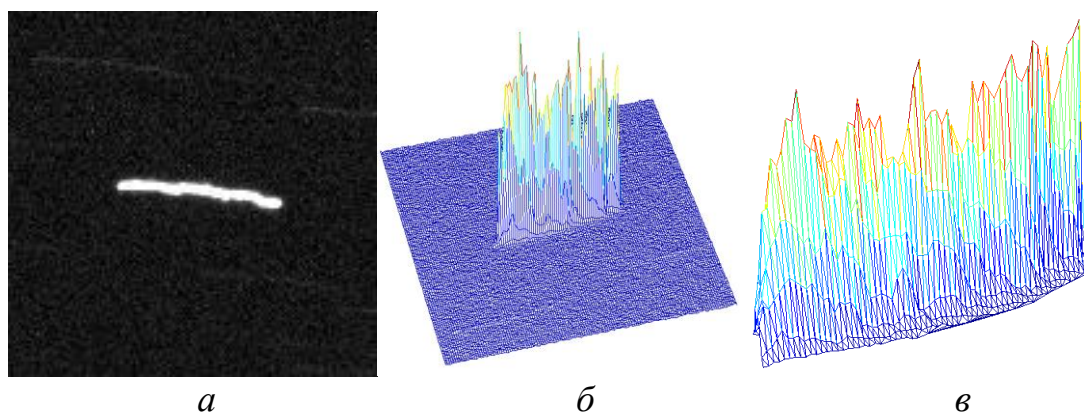


Рисунок 6.1 – Змазане зображення об'єкта без добового ведення:

a – вихідне зображення; *б* – 3D-зображення ПЗЗ-кадру; *в* – 3D-зображення розмитого об'єкта

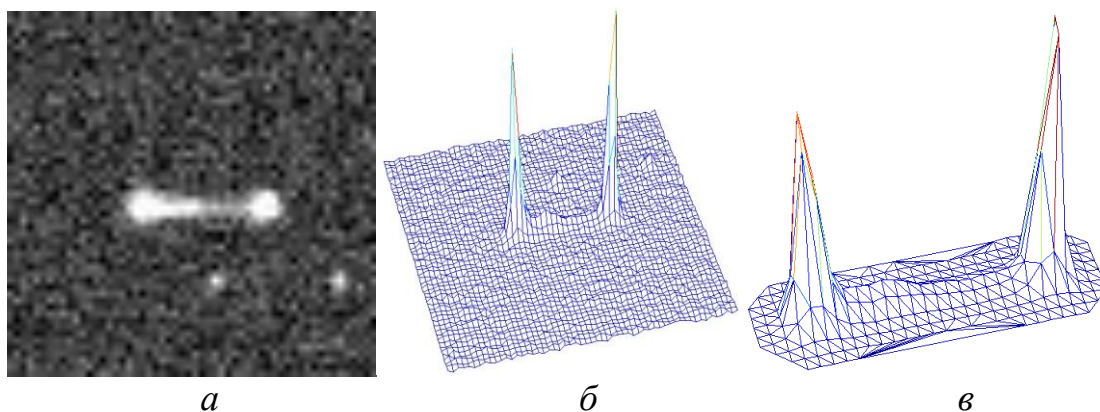


Рисунок 6.2 – Змазане зображення об'єкта при зриві добового ведення:
a – вихідне зображення; *б* – 3D-зображення ПЗЗ-кадру; *в* – 3D-зображення розмитого об'єкта

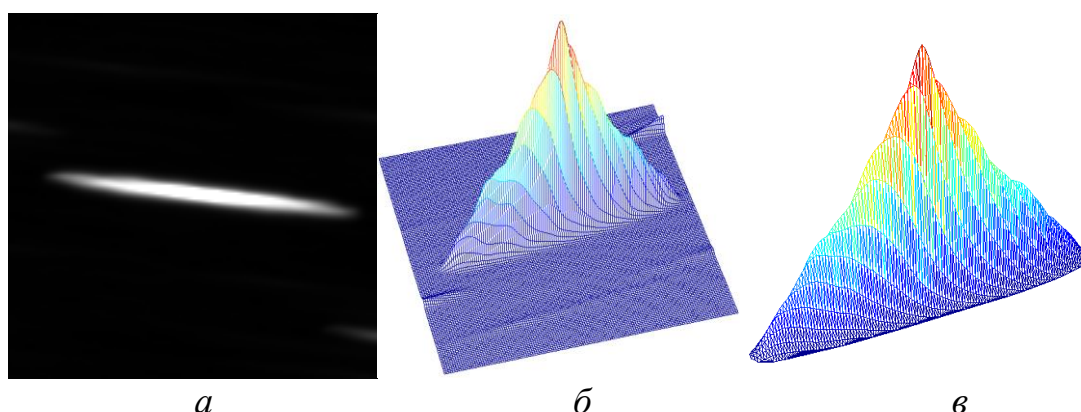


Рисунок 6.3 – Результат обробки змазаного зображення об'єкта без добового ведення:
a – вихідне зображення; *б* – 3D-зображення ПЗЗ-кадру; *в* – 3D-зображення розмитого об'єкта

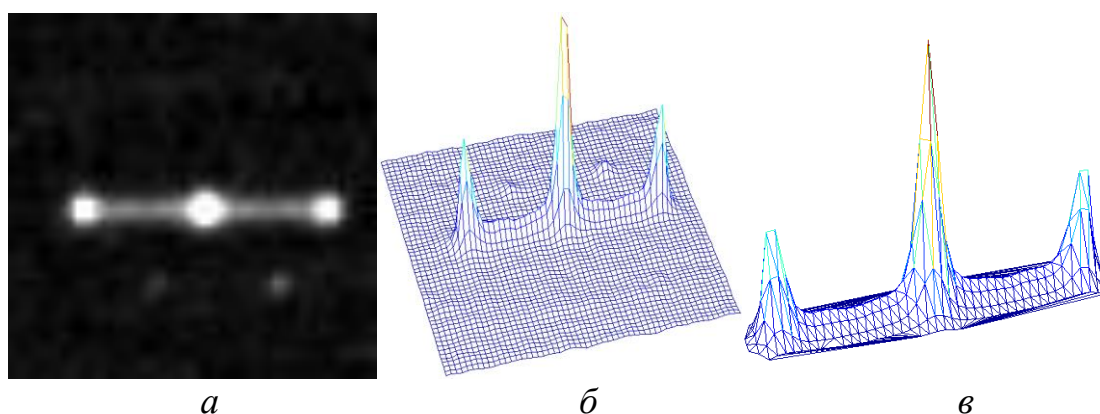


Рисунок. 6.4 – Результат обробки змазаного зображення об'єкта при зриві добового ведення:
a – вихідне зображення; *б* – 3D-зображення ПЗЗ-кадру; *в* – 3D-зображення розмитого об'єкта

Після фільтрації проводилась порівняльна оцінка кадрів. По-перше, застосовувалися спектральні методи аналізу. Оцінка спектра зображень до та після обробки показала значне відновлення високочастотних компонентів, які зазвичай втрачаються внаслідок розмиття. Це свідчило про здатність методу відновлювати дрібні деталі, що критично важливо при дослідженні структур галактик, туманностей або щільних зоряних полів.

Окрім спектрального аналізу, велике значення мала оцінка покращення візуальної інтерпретації. Застосування узгодженої фільтрації дозволило виявити

нові слабкі об'єкти, які на початкових кадрах були злиті з фоном або залишалися невидимими через шум і розмиття. Особливо це проявилось при обробці ділянок із великою кількістю слабких зірок – після фільтрації кількість виявлених об'єктів зросла на 15-20% у порівнянні з нефільтрованими зображеннями.

Цей ефект можна пояснити підвищенням локального контрасту – після фільтрації піки яскравості слабких об'єктів стали виразнішими на фоні шуму. Розглянемо це кількісно: нехай яскравість об'єкта до фільтрації дорівнює I_{obj} , а середній рівень шуму – σ_n . Для виявлення об'єкта потрібно, щоб $I_{obj} > k\sigma_n$, де k – пороговий коефіцієнт. Після застосування узгодженого фільтра зменшується, а отже, зростає відношення сигнал/шум, дозволяючи виявити слабші об'єкти при тому самому пороговому рівні.

Ще одним важливим результатом експериментів стало покращення фотометричної точності. Вихідні дані, оброблені без фільтрації, часто містили розмиті профілі зірок, що ускладнювало точну оцінку їх яскравості. Після фільтрації форма профілю наближалась до симетричної функції, що значно полегшувало застосування методів апертурної та профільної фотометрії. Це має безпосередній вплив на точність визначення фізичних характеристик об'єктів, таких як температура, відстань або хімічний склад.

З метою додаткової валідації було застосовано методи 3D-візуалізації розподілу яскравості зображень до та після обробки. Такі зображення демонстрували, що в результаті фільтрації форма яскравісного профілю об'єктів ставала більш чіткою, а висота піків – вищою, що знову ж підтверджувало зростання сигнал/шум та зменшення ефектів розтягування джерел.

На завершення можна стверджувати, що узгоджена фільтрація не тільки ефективно усуває артефакти розмиття, але й підвищує точність ідентифікації слабких об'єктів, дозволяючи розширити межі чутливості інструментальних засобів. Це робить запропонований метод надзвичайно цінним інструментом у галузі астрономічної обробки даних, особливо в умовах великого обсягу інформації та потреби у високій точності аналізу.

З огляду на ці результати, можна вважати, що метод узгодженої фільтрації є не лише ефективним, але й перспективним для впровадження у складі автоматизованих систем попередньої обробки даних спостережень на сучасних телескопах.

7 Застосування узгодженої фільтрації на інших типах зображень для підтвердження його універсальності

Розроблений метод узгодженої фільтрації, що продемонстрував високу ефективність при обробці астрономічних зображень, має потенціал для використання в багатьох інших галузях, де цифрові зображення є джерелом важливої інформації. Його універсальність полягає в здатності адаптуватися до різних типів зображень і моделей розмиття, що виникають у процесі реєстрації, передачі або обробки візуальних даних. Однією з найбільш перспективних сфер застосування є медична візуалізація. У таких методах, як магнітно-резонансна

томографія (МРТ), комп'ютерна томографія (КТ) чи ультразвукове дослідження (УЗД), часто виникають розмиття через рух пацієнта або обмеження в точності апаратури. Узгоджена фільтрація може використовуватись для підвищення чіткості зображень внутрішніх органів, виявлення патологічних утворень, а також уточнення меж структур, що є критично важливим для постановки діагнозу.

Також метод показує хороші результати у сфері супутникової та аерокосмічної зйомки, де зображення можуть бути спотворені через рух об'єктива, атмосферні перешкоди або недостатню стабільність платформи. Застосування узгодженої фільтрації дозволяє покращити роздільну здатність супутникових знімків, поліпшити виявлення об'єктів на земній поверхні та забезпечити більш точний моніторинг змін у навколишньому середовищі.

У промисловій візуальній інспекції, особливо на високошвидкісних виробничих лініях, часто виникає розмиття через швидкий рух об'єктів. Використання узгодженої фільтрації дозволяє поліпшити якість кадрів, отриманих з камер технічного зору, тим самим підвищуючи точність автоматичного виявлення дефектів, тріщин або деформацій продукції.

Крім того, фільтрація може бути ефективною в системах безпеки і відеоспостереження, де освітлення часто є нестабільним, а камери працюють в умовах низької якості зображення. Фільтр дозволяє краще розпізнавати обличчя, номери автомобілів чи інші важливі деталі, навіть якщо зображення є розмитим або зашумленим.

Окремо варто зазначити можливість застосування в агровізуалізації, де використання дронів для зйомки сільськогосподарських полів потребує високої точності у виявленні шкідників, оцінці стану рослин та класифікації ґрунтів. Якість зображень безпосередньо впливає на рішення щодо агротехнічних заходів, і фільтрація може суттєво покращити інформативність таких кадрів.

У сфері цифрової реставрації культурної спадщини, наприклад, при оцифруванні старовинних документів або зображень картин, узгоджена фільтрація може допомогти у видаленні спотворень, зумовлених часом, і підвищити чіткість зображення без втрати його автентичності.

Крім того, метод може бути адаптований для автономних транспортних систем (наприклад, у безпілотних автомобілях), де якість аналізу зображень з камер безпосередньо впливає на безпеку навігації. Покращення розпізнавання дорожньої розмітки, знаків і перешкод в умовах дощу, туману або недостатнього освітлення має вирішальне значення.

У результаті проведених випробувань можна стверджувати, що узгоджена фільтрація є гнучким і ефективним інструментом, який може бути налаштований під особливості практично будь-якої прикладної задачі, де необхідне покращення якості зображень. Це робить її універсальним методом для наукових досліджень і технічних застосувань, що потребують високої точності та стабільності обробки візуальної інформації.

8 Оцінка перспектив подальшого розвитку узгодженої фільтрації та її можливих покращень

Узгоджена фільтрація, як метод обробки цифрових зображень, продемонструвала високу ефективність у задачах усунення розмиття, підвищення чіткості та відновлення деталей об'єктів. Однак, як і будь-яка технологія, вона має потенціал для подальшого розвитку та вдосконалення, зокрема в контексті адаптації до різноманітних типів даних, підвищення обчислювальної ефективності та автоматизації вибору параметрів [20].

Одним із основних напрямів майбутніх досліджень є інтеграція методів машинного навчання для автоматичного визначення параметрів фільтрації. Сучасні підходи, зокрема глибокі нейронні мережі, дозволяють ефективно ідентифікувати структуру зображення, адаптувати модель до його особливостей і прогнозувати оптимальні характеристики фільтра. Це дозволить значно знизити вплив суб'єктивних налаштувань і покращити узагальнюваність методу.

Ще одним перспективним напрямом є розширення спектру моделей розмиття, що враховуються у процесі узгодження фільтра. У реальних умовах розмиття може мати складну природу – комбінацію лінійного руху, обертання, дефокусування чи атмосферних спотворень. Розробка методів, які дозволяють враховувати більш складні або комбіновані моделі, підвищить точність відновлення зображень навіть у найскладніших умовах [21].

З технічної точки зору перспективним виглядає напрям оптимізації обчислювальних алгоритмів. Зокрема, використання паралельних обчислень на графічних процесорах (GPU) або впровадження алгоритмів із зменшеною обчислювальною складністю дозволить застосовувати узгоджену фільтрацію в реальному часі, що є критичним для задач відеоаналізу, автоматичного контролю та автономної навігації [22]. Крім того, можливим є розвиток гібридних методів, які поєднують узгоджену фільтрацію з іншими техніками, як деконволюція [23], адаптивна сегментація, багаторівневе згладжування або вейвлет-перетворення. Такі комбіновані підходи дозволяють підвищити точність і гнучкість обробки зображень у різних умовах, зменшити вплив шумів та покращити збереження важливих деталей [24].

Окремої уваги заслуговує можливість інтеграції розроблених методів у програмне забезпечення для аналізу зображень у наукових і прикладних системах. Це може бути реалізовано як у вигляді плагінів до існуючих пакетів (наприклад, ImageJ, MATLAB, Python OpenCV), так і як окремих модулів для спеціалізованих задач у медицині, астрономії, геодезії та інших галузях.

Окрім вищезазначених напрямів розвитку, варто окремо відзначити перспективність інтеграції узгодженої фільтрації в існуючі прикладні програмні платформи, зокрема такі як CoLiTec [25], що активно використовуються для обробки та аналізу астрономічних зображень. Реалізація алгоритмів узгодженої фільтрації як окремого модуля або інструмента в CoLiTec дозволить істотно покращити якість попередньої обробки ПЗЗ-даних, підвищити точність виявлення слабких джерел світла та зменшити кількість хибних спрацьовувань [26]. Така інтеграція сприятиме

автоматизації рутинних етапів фільтрації та зробити програму більш гнучкою й ефективною у роботі з великими масивами даних, що особливо актуально для сучасних спостережень і пошуку нових небесних об'єктів [27].

Варто зазначити, що актуальність розвитку узгодженої фільтрації зумовлена не лише її високою ефективністю, а й загальною тенденцією до збільшення обсягів і складності цифрових візуальних даних. Тому удосконалення цього методу є важливим етапом на шляху до створення адаптивних, точних і швидкодіючих систем обробки зображень нового покоління [28].

Висновки

У дослідженні було розглянуто узгоджену фільтрацію як ефективний метод обробки розмитих цифрових зображень, з особливим акцентом на її застосування до астрономічних даних. Проведене дослідження підтвердило, що врахування апріорної інформації про структуру зображення та характеристики розмиття значно підвищує якість фільтрації [29]. Метод дозволяє не лише зменшити артефакти, викликані недосконалістю спостережень або рухом телескопа, але й забезпечує збереження слабких сигналів і деталей, які мають критичне значення в науковому аналізі.

Запропонований обчислювальний підхід включає побудову узгодженого фільтра на основі оцінених параметрів функції розсіювання точки. Було показано, що використання моделі Гауссового профілю для розмиття дозволяє ефективно апроксимувати спотворення в реальних зображеннях. Розроблений алгоритм дозволяє автоматично визначати кількість складових у моделі, що підвищує адаптивність методу до конкретних умов спостереження.

Експериментальні дослідження на реальних ПЗЗ-кадрах підтвердили, що застосування узгодженої фільтрації приводить до покращення візуальної якості зображень, підвищення контрасту, відновлення дрібних деталей і, найголовніше, до покращення точності ідентифікації слабких астрономічних об'єктів. Аналіз спектральних характеристик зображень до та після обробки показав значне відновлення високочастотних складових, що свідчить про ефективне усунення ефектів розмиття.

Метод продемонстрував універсальність і потенціал до застосування в інших галузях цифрової обробки зображень – зокрема, в медицині (наприклад, обробка томографічних зображень), супутниковій зйомці, технічній діагностиці та робототехніці. Це вказує на перспективність узгодженої фільтрації як загального інструменту для задач, де важлива точність відновлення структур із зображень, спотворених шумами чи оптичними дефектами [30].

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що узгоджена фільтрація має значний науковий і прикладний потенціал. Подальший розвиток методу може бути пов'язаний із впровадженням адаптивних та навчальних алгоритмів, побудованих на штучному інтелекті, вдосконаленням моделей розмиття для різних умов, а також розширенням інтеграції з існуючими інструментами аналізу

великих обсягів візуальної інформації. Отримані результати підтверджують доцільність і ефективність застосування узгодженої фільтрації як інструменту підвищення якості цифрових зображень у сучасній науці та техніці.

Список літератури.

1. Khlamov, S., Savanevych, V., Tabakova, I., & Trunova, T. (2022). The astronomical object recognition and its near-zero motion detection in series of images by in situ modeling. 29th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 1-4. <https://doi.org/10.1109/iwSSIP55020.2022.9854475>.
2. Troianskyi, V., Godunova, V., Serebryanskiy, A., Aimanova, G., Franco, L., Marchini, A., Bacci, P., Maestripieri, M., Berezin, D., Ivanova, O., Maigurova, N., Panko, E., Taradii, V., & Khlamov, S. (2024). Optical observations of the potentially hazardous asteroid (4660) Nereus at opposition 2021. *Icarus*, 420, 116146. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2024.116146>.
3. Khlamov, S., Savanevych, V., Tabakova, I., Kartashov, V., Trunova, T., & Kolendovska, M. (2024). Machine vision for astronomical images using the modern image processing algorithms implemented in the CoLiTec software. CRC Press eBooks, 269-310. <https://doi.org/10.1201/9781003343783-12>.
4. Vlasenko, V., Khlamov, S., & Savanevych, V. (2024). Devising a procedure for the brightness alignment of astronomical frames background by a high frequency filtration to improve accuracy of the brightness estimation of objects. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(128), 31-38. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.301327>.
5. Khlamov, S., Savanevych, V., Vlasenko, V., Briukhovetskyi, O., Trunova, T., Levykin, I., Shvedun, V., & Tabakova, I. (2023). Development of the matched filtration of a blurred digital image using its typical form. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(121), 62-71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273674>.
6. Kudzej, I., Savanevych, V. E., Briukhovetskyi, O. B., Khlamov, S. V., Pohorelov, A. V., Vlasenko, V. P., Dubovský, P. A., & Parimucha, Š. (2024). CoLiTecVS – A new tool for the automated reduction of photometric observations. *Astronomische Nachrichten*, 340(1-3), 68-70. <https://doi.org/10.1002/asna.201913562>.
7. Vlasenko, V., Khlamov, S., Savanevych, V., Trunova, T., Deineko, Z., & Tabakova, I. (2024). Development of a procedure for fragmenting astronomical frames to accelerate high frequency filtering. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(129), 70-77. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.306227>.
8. Khlamov, S., Savanevych, V., Vlasenko, V., Trunova, T., Troianskyi, V., Gerasimenko, R., & Shvedun, V. (2023). Improving the accuracy of identifying objects in digital frames using a procedure of full identification of measurements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(125), 34-41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288940>.
9. Akhmetov, V. S., Khlamov, S. V., Andruk, V. M., & Protsyuk, Y. I. (2018). The catalogues analysis of stars equatorial coordinates and B-magnitude of the FON project. *Odessa Astronomical Publications*, 31, 199-203. <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2018.31.144734>.
10. Khlamov, S., Savanevych, V., Tabakova, I., & Trunova, T. (2022). Statistical modeling for the near-zero apparent motion detection of objects in series of images from data stream. 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 126-129. <https://doi.org/10.1109/acit54803.2022.9913151>.
11. Khlamov, S., Savanevych, V., Vlasenko, V., Trunova, T., Troianskyi, V., Shvedun, V., & Tabakova, I. (2023). Improving the accuracy of identifying objects in digital frames of one series through the procedure of preliminary identification of measurements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(124), 35-43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286381>.

12. Savanevych, V., Bryukhovetskiy, A., Sokovikova, N., Bezkrivniy, M., Khlamov, S., Elenin, L., Movsesian, I., & Dihtyar, M. (2014). Automated software for CCD-image processing and detection of small Solar System bodies. *Asteroids, Comets, Meteors*, 470. <http://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014acm.conf.470S/abstract>.
13. Khlamov, S., Savanevych, V., Briukhovetskiy, O., & Trunova, T. (2023). Big data analysis in astronomy by the Lemur software. *IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, 5-8. <https://doi.org/10.1109/ukrmico61577.2023.10380398>.
14. Troianskyi, V., Kashuba, V., Bazyey, O., Okhotko, H., Savanevych, V., Khlamov, S., & Briukhovetskiy, A. (2023). First reported observation of asteroids 2017 AB8, 2017 QX33, and 2017 RV12. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 53(2). <https://doi.org/10.31577/caosp.2023.53.2.5>.
15. Khlamov, S., Savanevych, V., Trunova, T., Deineko, Z., Vovk, O., & Gerasimenko, R. (2024). Automated data mining of the reference stars from astronomical CCD frames. *8th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems*, 3668, 83-97. <https://doi.org/10.31110/colins/2024-2/007>.
16. Dubovský, P. A., Briukhovetskiy, O. B., Khlamov, S. V., Kudzej, I., Parimucha, Š., Pohorelov, A. V., Savanevych, V. E., & Vlasenko, V. P. (2017). FrameSmooth software - new tool for the calibration of astronomical images. *Open European Journal on Variable Stars*, 180, 16. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017OEJV..180...16D/abstract>.
17. Khlamov, S., Briukhovetskiy, O., Savanevych, V., Trunova, T., & Tabakova, I. (2022). Astronomical Big Data Analysis by the CoLiTec Software. *IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, 391-394. <https://doi.org/10.1109/picst57299.2022.10238543>.
18. Трунова, Т. О. (2024). Розробка обчислювального методу узгодженої фільтрації з аналітичним профілем розмитого цифрового зображення. *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології*, 1, 121-122. <https://openarchive.nure.ua/handle/document/26664>.
19. Хламов, С. В. (2024). Формування типової форми зображення об'єкта на серії цифрових кадрів. *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології*, 1, 119-120. <https://openarchive.nure.ua/handle/document/26665>.
20. Savanevych, V., Akhmetov, V., Khlamov, S., Dikov, E., Briukhovetskiy, A., Vlasenko, V., Khramtsov, V., & Movsesian, I. (2019). Selection of the reference stars for astrometric reduction of CCD-Frames. *Advances in intelligent systems and computing*, 881-895. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_57.
21. Akhmetov, V., Khlamov, S., Khramtsov, V., & Dmytrenko, A. (2019). Astrometric reduction of the Wide-Field images. *Advances in intelligent systems and computing*, 896-909. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_58.
22. Khlamov, S., Savanevych, V., Briukhovetskiy, O., Tabakova, I., & Trunova, T. (2022). Astronomical knowledge discovery in databases by the CoLiTec software. *12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, 583-586. <https://doi.org/10.1109/acit54803.2022.9913188>.
23. Khlamov, S., Savanevych, V., Vlasenko, V., & Hadzhyiev, E. (2024). Automated data mining of the single objects from blurred astronomical CCD frames using the Lucy-Richardson deconvolution. *CEUR Workshop Proceedings*, 3664, 178-191. <https://doi.org/10.31110/colins/2024-1/013>.
24. Khlamov, S., Tabakova, Trunova, T., & Deineko, Zh. (2024). Machine vision for astronomical images using the Canny edge detector. *Proceedings of the IX International Conference «Information Technology and Implementation»*, 1-10. <https://eur-ws.org/Vol-3384>.
25. Pohorelov, A. V., Khlamov, S. V., Savanevych, V. E., Briukhovetskiy, A. V., & Vlasenko, V. P. (2016). Virtual observatory and CoLiTec software: modules, features, methods. *Odessa Astronomical Publications*, 29, 136-140. <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2016.29.85152>.

26. Khlamov, S., Savanevych, V., Briukhovetskyi, O., Pohorelov, A., Vlasenko, V., & Dikov, E. (2018). CoLiTec Software for the Astronomical Data Sets Processing. IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP), 227-230. <https://doi.org/10.1109/dsmp.2018.8478504>
27. Khlamov, S., Savanevych, V., Briukhovetskyi, O., Trunova, T., & Tabakova, I. (2022). CoLiTec Virtual Observatory Platform for the Cloud Computing Analysis of Light Curves for the Variable Stars. IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), 1-4. <https://doi.org/10.1109/picst57299.2022.10238587>.
28. Savanevych, V., Khlamov, S., Briukhovetskyi, O., Trunova, T., & Tabakova, I. (2023). Mathematical methods for an accurate navigation of the robotic telescopes. Mathematics, Special issue «Mathematics in Robot Control for Theoretical and Applied Problems», 11, 10 (2246), 19. <https://doi.org/10.3390/math11102246>.
29. Khlamov, S., Vlasenko, V., Savanevych, V., Briukhovetskyi, O., Trunova, T., Chelombitko, V., & Tabakova, I. (2022). Development of computational method for matched filtration with analytic profile of the blurred digital image. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5, 4(119), 24-32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265309>.
30. Vlasenko, V., Khlamov, S., Savanevych, V., Trunova, T., Tabakova, I., & Mendeleva, M. (2024). High-frequency filtration for the brightness alignment of the astronomical frame background. IEEE 14th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 178-181. <https://doi.org/10.1109/ACIT62333.2024.10712475>.