

ОБРОБКА ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ТИПОВОЇ ФОРМИ ОБ'ЄКТІВ

Хламов С.В.

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

Трунова Т.О.

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

***Анотація.** У дослідженні розглянуто методи обробки цифрових зображень з використанням неаналітичних моделей типової форми зображень об'єктів. Основну увагу приділено астрономічним зображенням, де типова форма застосовується для виявлення та аналізу протяжних змазаних об'єктів. Розроблено адаптивні математичні моделі, алгоритми їх застосування та проведено експериментальну верифікацію на матеріалах з кількох телескопів. Оцінено ефективність підходу за критеріями точності відтворення яскравості пікселів. Запропоновані методи інтегровано в автоматизовану систему CoLiTec. Робота має прикладне значення для астрономії, біомедицини та інших галузей обробки зображень.*

***Ключові слова:** ЦИФРОВЕ ЗОБРАЖЕННЯ, ТИПОВА ФОРМА, ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ, МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ, COLITEC.*

Вступ

Обробка цифрових зображень є однією з найважливіших технологій в сучасній науці та техніці, оскільки забезпечує можливість аналізу, інтерпретації та автоматичної класифікації візуальної інформації [1]. Зокрема, вона відіграє ключову роль в астрономії, де аналіз зображень, отриманих з телескопів та супутників, дозволяє ідентифікувати, вимірювати та відстежувати динаміку небесних тіл [2].

Основною проблемою обробки таких зображень є велика варіативність вихідних даних, що спричинена впливом атмосферних і оптичних спотворень, присутністю шумів та артефактів, а також необхідністю роботи з об'єктами, що мають слабку яскравість [3] і складну морфологічну структуру.

Класичні підходи до обробки зображень базуються на методах фільтрації [4, 5], порогової сегментації, морфологічного аналізу та класифікації за текстурними чи колірними характеристиками. Проте ці методи не завжди ефективні у випадку астрономічних зображень, оскільки такі дані часто мають низький рівень сигналу, що ускладнює розпізнавання об'єктів традиційними методами [6]. Тому виникає необхідність використання більш адаптивних алгоритмів, які базуються на апріорних знаннях про форму та морфологію об'єктів, що досліджуються.

Один із перспективних підходів до покращення ефективності автоматизованого аналізу зображень полягає у використанні типової форми об'єктів [7]. У комп'ютерному зорі це поняття означає створення моделей, що описують характерні геометричні параметри об'єктів, які можуть змінюватися в певних межах залежно від умов знімання та спостережень [8]. Такі моделі дозволяють здійснювати зіставлення знайдених об'єктів із наперед визначеними шаблонами, що підвищує точність їх ідентифікації [9] та мінімізує вплив шумів і спотворень.

У загальному випадку підходи до роботи з типовою формою можуть бути реалізовані на основі методів активних контурів, статистичних моделей форми [10] (наприклад, моделі активної форми) та глибоких нейронних мереж, які здатні навчатися на великих вибірках астрономічних зображень.

В астрономії такий метод дає змогу автоматично ідентифікувати зоряні скупчення, галактики, астероїди, комети та інші небесні об'єкти, враховуючи їхні геометричні особливості та морфологічну структуру.

Астрономічні зображення мають низку специфічних характеристик, що значно ускладнюють їх автоматизовану обробку:

- наявність шумів, які виникають унаслідок термічної генерації електронів у ПЗЗ (пристрій із зарядовим зв'язком) матрицях або через випадкові фотони, що потрапляють на сенсор;

- атмосферні спотворення, спричинені турбулентністю повітря та неоднорідностями в розподілі температур, що призводить до варіацій форми об'єктів у реальному часі;

- зміни яскравості та контрасту, обумовлені варіативністю експозиції, наявністю дифракційних ефектів та розсіюванням світла;

- артефакти, викликані конструктивними особливостями оптичних систем, наприклад, віньетуванням, хроматичними аберациями або інтерференційними ефектами [11].

Використання моделей типової форми в аналізі астрономічних зображень дозволяє ефективніше компенсувати вплив перелічених факторів. Наприклад, для розпізнавання галактик застосовуються еліптичні або дископодібні моделі, що враховують варіативність їх структури, а для малих тіл Сонячної системи можуть використовуватися адаптивні моделі, що коригуються залежно від кута огляду та відстані до об'єкта.

Основна наукова новизна полягає у застосуванні адаптивних алгоритмів, що дозволяють автоматично визначати параметри форми об'єктів у процесі аналізу даних [12]. Це забезпечує можливість точного відокремлення астрономічних об'єктів від шумів і фонового випромінювання, що є критично важливим у задачах автоматичного моніторингу космічних тіл.

Практичне значення роботи полягає в можливості використання розроблених методів у таких напрямках:

- автоматизоване виявлення та класифікація небесних тіл на зображеннях із космічних та наземних телескопів;

- підвищення точності та швидкості аналізу великих масивів астрономічних даних у режимі реального часу;
- оптимізація алгоритмів фільтрації, що дозволяє зменшити вплив шумів та артефактів, зберігаючи при цьому природні характеристики об'єктів.

Таким чином, розглянуті методи обробки астрономічних зображень із використанням моделей типової форми можуть знайти широке застосування в сучасній астрономії та автоматизованих системах аналізу даних [13].

Мета та задачі дослідження

Основною метою цього дослідження є розробка нових методів обробки цифрових астрономічних зображень, заснованих на використанні моделей типової форми об'єктів. Цей підхід дозволяє створювати більш точні математичні моделі для виявлення астрономічних об'єктів, таких як галактики, зоряні скупчення, астероїди та інші небесні тіла. Врахування специфічних геометричних характеристик об'єктів у межах заданої точності дозволяє покращити точність їх ідентифікації та класифікації, навіть за умов наявності значного рівня шуму чи спотворень на зображеннях.

Розробка ефективних моделей типової форми дозволяє створити більш адаптивні та універсальні алгоритми для обробки зображень, що дозволить зменшити вплив шуму, покращити виявлення об'єктів на складних астрономічних зображеннях і підвищити точність досліджень в реальному часі. Також важливою метою є інтеграція цих моделей у сучасні системи автоматизованого аналізу астрономічних зображень, що дозволить знизити потребу в ручному втручанні та оптимізувати процеси обробки даних [14].

Задачі цього дослідження зосереджуються на розробці та оптимізації методів обробки астрономічних зображень, заснованих на типових формах об'єктів. Однією з основних задач є вивчення типових геометричних характеристик астрономічних об'єктів, які можуть бути використані для побудови математичних моделей для їх ідентифікації. Необхідно розробити точні математичні моделі, які враховують різні форми, розміри і орієнтацію об'єктів, а також їхні морфологічні властивості, такі як симетрія, звивистість або гладкість контурів. Це дозволить адаптувати алгоритми до реальних умов спостереження, де ці характеристики можуть варіюватися в залежності від умов отримання зображень.

Особливу увагу буде приділено вивченню адаптивних моделей типової форми, які зможуть змінювати свої параметри в залежності від специфічних особливостей зображення. Наприклад, змінюються характеристики об'єкта в залежності від кута огляду, освітленості або рівня шуму. Тому важливо розробити моделі, які здатні коригувати свої параметри в реальному часі і залишатися ефективними при різних умовах спостереження.

Ще однією важливою задачею є створення алгоритмів для автоматизованого виявлення об'єктів на основі цих математичних моделей.

Розроблені алгоритми повинні використовувати типову форму об'єкта як основу для аналізу, що дозволить автоматично виявляти і класифікувати астрономічні об'єкти без потреби в значному кількості ручної обробки. Алгоритми повинні бути здатні працювати з великими масивами даних і бути адаптивними до змінних умов зображення, що особливо важливо для астрономії, де кількість зібраних даних постійно зростає [15].

У результаті розробки цих методів буде проведено експериментальне тестування їх на реальних астрономічних зображеннях, що дозволить оцінити точність і ефективність розроблених підходів [16]. Оцінка впливу моделей типової форми на результат обробки даних дасть можливість порівняти їх з традиційними методами і оцінити переваги використання таких підходів у практичних астрономічних дослідженнях [17].

Однією з важливих задач є також інтеграція моделей типової форми в існуючі автоматизовані системи обробки астрономічних зображень. Це дозволить значно підвищити ефективність аналізу даних і забезпечити високу точність при автоматичному моніторингу небесних тіл. Впровадження таких моделей в реальні системи автоматизації допоможе зменшити час на обробку великих обсягів даних і мінімізувати людський фактор.

Таким чином, основні задачі дослідження зосереджуються на створенні, оптимізації та тестуванні математичних моделей типової форми об'єктів, що дозволяють значно покращити якість обробки астрономічних зображень та забезпечити більш точні результати при їх аналізі [18].

Основна частина

1 Визначення та аналіз поняття «типова форма»

Поняття «типова форма» є основою для розробки методів обробки цифрових зображень у контексті астрономії та інших наукових дисциплін. У загальному розумінні, типова форма об'єкта – це узагальнене, математичне або геометричне уявлення про форму об'єкта, яке відображає його основні характеристики, такі як симетрія, пропорції, контури та інші ключові ознаки. В астрономії типова форма може застосовуватися для моделювання різних небесних тіл, таких як зорі, галактики, планети, астероїди та інші об'єкти, що можуть мати складні й змінні форми в залежності від умов спостереження.

У контексті астрономічних зображень, типова форма є концептуальною основою для створення математичних моделей, які дозволяють спрощено, але точно описати об'єкти на зображенні. Такі моделі використовують обмежену кількість параметрів для опису основних властивостей об'єкта, що дозволяє зменшити складність задачі ідентифікації та класифікації, а також підвищити ефективність обробки великих масивів астрономічних даних.

Типова форма як математичне поняття.

Типова форма об'єкта в математиці може бути представлена через кілька базових характеристик: розмір, форма, симетрія, орієнтація і взаємне розташування різних частин об'єкта. Наприклад, для астрономічних об'єктів типова форма може бути спрощена до математичних моделей, таких як еліпс, коло, спіраль або інші геометричні фігури, що найбільш точно описують характеристики об'єкта на зображенні.

Один із основних принципів при створенні моделей типової форми – це спрощення. Небесні об'єкти, такі як планети або зорі, можуть мати складну структуру, проте для цілей автоматизованого аналізу їх можна апроксимувати як стандартні геометричні фігури, що дозволяє спростити обчислювальні процеси і підвищити ефективність роботи алгоритмів.

Типова форма в контексті астрономії.

У астрономії типова форма стає важливим інструментом для класифікації та аналізу зображень, отриманих з телескопів та інших астрономічних об'єктів спостереження. Оскільки астрономічні об'єкти можуть значно змінювати свій вигляд в залежності від умов спостереження, таких як кут огляду, освітленість, чи наявність атмосферних спотворень, то використання стандартних моделей типової форми допомагає підвищити точність і стабільність результатів.

Типова форма може також включати в себе не тільки геометричні характеристики, а й фізичні характеристики об'єкта, такі як яскравість, спектр випромінювання, або інші властивості, що можуть бути корисними для його ідентифікації. Наприклад, для галактик типовою формою може бути спіральна або еліптична форма, в залежності від типу галактики. Для зір, таких як наше Сонце, типовою формою може бути сфера з певним розподілом яскравості.

Призначення типової форми в автоматизованому аналізі.

Типова форма відіграє важливу роль в автоматизованих системах обробки астрономічних зображень, де необхідно швидко і точно виявляти і класифікувати об'єкти, навіть якщо зображення мають погану якість або значну кількість шуму. Використання моделей типової форми дозволяє скоротити час обробки даних, забезпечити стабільність результатів та знизити вплив помилок, що можуть виникнути через складні умови спостережень.

В астрономії часто стикаються з проблемою того, що зображення можуть бути розмитими або перекошеними, тому важливо, щоб модель типової форми могла адаптуватися до змін у вигляді об'єкта. Наприклад, якщо галактика виглядає розтягнутою або нахиленою, модель типової форми повинна враховувати такі спотворення, коригуючи параметри форми об'єкта.

Типова форма в контексті обробки зображень.

Типові форми використовуються для спрощення задачі обробки зображень. Замість того, щоб обробляти кожен об'єкт як складну і детальну структуру, типова форма дозволяє застосовувати набагато більш прості моделі. Наприклад, для виявлення зоряних скупчень можна використовувати модель кола або еліпса, що

дозволяє автоматично визначати їх положення на зображенні. Це дозволяє створювати алгоритми, які шукають об'єкти певної форми на зображеннях, що значно скорочує час аналізу і дозволяє працювати з великими наборами даних.

Таким чином, поняття типової форми є не тільки математичною абстракцією, але й важливим інструментом для розв'язання конкретних задач в астрономії, що включають ідентифікацію, класифікацію і аналіз астрономічних об'єктів. Використання моделей типової форми дає змогу спростити обробку складних зображень, підвищити ефективність алгоритмів і забезпечити більш точні результати навіть при наявності шуму або спотворень на зображеннях

2 Аналіз геометричних характеристик астрономічних об'єктів

Геометричні характеристики астрономічних об'єктів є критично важливими для їхнього розпізнавання та аналізу в астрономічних зображеннях, оскільки вони безпосередньо визначають вигляд об'єкта в різних умовах спостереження. Ці характеристики можуть бути описані через кілька параметрів, таких як розмір, форма, симетрія, орієнтація та контури, що є основою для розробки математичних моделей та алгоритмів для виявлення і класифікації об'єктів на зображеннях.

У реальних умовах астрономічні об'єкти можуть мати дуже різноманітні геометричні характеристики, залежно від їхнього типу, етапу еволюції та відстані від Землі. Тому для їхнього точного аналізу і моделювання необхідно враховувати безліч параметрів, включаючи фізичні характеристики та структуру об'єкта. Це дозволяє не лише спрощувати процеси обробки зображень, але й підвищувати точність виявлення астрономічних об'єктів в рамках автоматизованих астрономічних систем.

Наведемо основні геометричні характеристики астрономічних об'єктів.

1. *Розмір та масштаб.* Розмір є однією з найбільш очевидних характеристик, що визначають вигляд об'єкта на зображеннях. Наприклад, зірки зазвичай зображуються як точкові джерела світла через свою велику відстань від Землі та малий видимий розмір. Однак, при розгляді галактик, таких як галактика Молочний Шлях або Андромеда, розмір стає значним фактором. Галактика Андромеда (M31) має діаметр близько 220 000 світлових років, що робить її одним із найбільших об'єктів на небі, який можна побачити навіть неозброєним оком у північній півкулі. Розмір об'єкта впливає не тільки на його видимість, але й на процеси обробки зображень. Якщо зірка спостерігається як точка, то велика галактика чи планета займає значну частину зображення, що вимагає застосування специфічних методів для коректного виділення об'єкта серед інших елементів (рис. 2.1).

2. *Форма.* Форма є важливим аспектом, що допомагає відрізнити різні типи астрономічних об'єктів. Спостережувані форми можуть бути дуже різноманітними. Наприклад, зірки є близькими до сферичних об'єктів, але їх точкове зображення часто не дозволяє побачити їх точну форму на зображеннях. Натомість галактики можуть мати різноманітні форми. Спіральні галактики, такі

як галактика M101 (рис. 2.2), мають класичну спіральну форму, з яскравими рукавами, що складаються з газу та зірок.



Рисунок 2.1 – Приклад зображення точкового та шароподібного об'єкту



Рисунок 2.2 – Зображення галактики M101, має спіральну форму

Природа цієї форми виникає внаслідок обертання галактики та гравітаційних взаємодій з іншими об'єктами. Напроти, еліптичні галактики, наприклад, галактика M87, мають більш компактну та еліптичну форму, що визначається їхнім старінням і відсутністю активного формування нових зірок. Це є прикладом того, як різні типи галактик мають свої особливості форми, що можуть бути враховані при розробці математичних моделей.

3. *Симетрія.* Симетрія є важливим аспектом у розпізнаванні астрономічних об'єктів. Високий рівень симетрії характерний для багатьох астрономічних об'єктів, особливо для галактик і зірок. Наприклад, симетрична структура спіральної галактики, такої як NGC 6744, дозволяє розробити моделі, які відображають рівномірне розподілення зірок і газу по її рукавах. У галактиках з високим рівнем симетрії (наприклад, в галактиках типу S0) можна застосовувати спрощені моделі для їхньої візуалізації і класифікації. У свою

чергу, менш симетричні об'єкти, такі як неправильні галактики (наприклад, галактика IC 10), вимагають застосування більш складних моделей, оскільки вони не мають чіткої геометричної структури. Асиметричні об'єкти можуть бути викликані гравітаційними взаємодіями або зіткненнями між галактиками, що породжують нерівномірний розподіл матерії в об'єкті.

4. *Орієнтація*. Орієнтація об'єкта визначає його вигляд на зображенні, а також впливає на методи виявлення і класифікації. Астрономічні об'єкти, що знаходяться в різних точках космосу, можуть бути спостережувані під різними кутами, що створює варіації в їхньому вигляді на зображеннях. Наприклад, обертання спіральних галактик змінює орієнтацію їхніх рукавів на зображеннях. Галактика NGC 4565 (рис. 2.3), яка виглядає як космічна пряма лінія через свій вигляд під певним кутом, є класичним прикладом того, як орієнтація впливає на сприйняття об'єкта.



Рисунок 2.3 – Зображення галактики NGC 4565, має форму лінії

5. *Контури та деталі*. Контури об'єктів є важливими для їхнього виділення на зображеннях, а також для подальшого аналізу. Деякі астрономічні об'єкти, такі як планети, можуть мати чітко визначені межі, в той час як інші, як галактики, можуть мати невиразні контури, особливо через вплив атмосфери або обмеження спостереження. Наприклад, планета Сатурн має яскраво виражені кільця, які є чіткими контурами на зображеннях, отриманих з телескопів, тоді як межі спіральних галактик можуть бути розмитими через їх велику відстань і складну структуру.

6. *Асиметрія*. Асиметрія має значення в аналізі астрономічних об'єктів, оскільки багато з них мають неоднорідні форми. Наприклад, супернові, як SN 1987A, мають асиметричні спалахи, що виникають через нерівномірне викидання матерії при вибуху. Аналіз асиметрії дозволяє виявити важливі фізичні процеси, такі як швидкість розширення об'єкта, напрямок руху та структуру внутрішніх частин.

7. *Розподіл яскравості*. Розподіл яскравості є ще однією геометричною характеристикою, що використовуються для опису астрономічних об'єктів.

Наприклад, галактики, такі як M31 (Андромеда), мають характерний розподіл яскравості, який зменшується від центру до периферії, що може бути використано для створення математичних моделей їхніх форм. Спостереження змін яскравості на різних етапах еволюції об'єкта, таких як зірки в різних стадіях розвитку, дозволяє більш точно моделювати їхні геометричні характеристики.

У контексті обробки астрономічних зображень геометричні характеристики мають важливе значення для вибору методів виділення об'єктів, їх класифікації та оцінки їхніх властивостей. Наприклад, для виявлення спіральних галактик використовуються алгоритми, які орієнтовані на виявлення спіральної симетрії, тоді як для планет з точковими джерелами світла використовуються методи, що спрощують їхню обробку до круглої форми. Таким чином, геометричні характеристики астрономічних об'єктів є основою для розробки алгоритмів, що забезпечують точність виявлення і аналізу.

3 Розробка адаптивних математичних моделей типової форми об'єктів

Розробка адаптивних математичних моделей типової форми об'єктів є одним із ключових етапів у процесі автоматизованої обробки астрономічних зображень. Це складне завдання, оскільки астрономічні об'єкти мають різноманітні форми, від точкових джерел світла, таких як зірки, до великих, складних структур, як галактики чи туманності. Кожен з таких об'єктів має свій унікальний вигляд, визначений різними геометричними характеристиками, зокрема розмірами, симетрією та інтенсивністю світла, що змінюється в залежності від обставин спостереження.

Типова форма об'єкта в астрономії являє собою його стандартний або найбільш загальний вигляд, на основі якого можна класифікувати і виявити цей об'єкт на зображеннях. Урахування цієї форми дозволяє зібрати важливі дані про об'єкт, від його геометричних параметрів до фізичних характеристик. Астрономічні об'єкти зазвичай мають складні форми і розміри, які змінюються в часі та просторі, і математичні моделі повинні мати можливість адаптуватися до цих варіацій.

Для побудови таких моделей необхідно застосовувати математичні інструменти, здатні описати як прості, так і складні форми об'єктів, з урахуванням різних змінних. Проте, створення адаптивних моделей вимагає врахування множини факторів, які можуть спотворювати форму об'єкта – це шум, атмосферні спотворення, а також вплив інших астрономічних об'єктів. Тому основним завданням є створення таких моделей, які б не лише описували типову форму об'єкта, але й могли адаптуватися до специфічних умов спостереження, забезпечуючи високоточне виявлення навіть при наявності таких спотворень.

Адаптивність математичних моделей.

Математичні моделі для типової форми об'єктів, як правило, будуються на основі функцій, що описують геометричні властивості цих об'єктів. Однією з основних складових адаптивної моделі є її здатність змінювати параметри залежно від зовнішніх умов, таких як зміна масштабу, обертання чи зміни форми

об'єкта. Адаптивність до таких змін можна досягти через використання математичних конструкцій, які дозволяють параметричне налаштування моделі.

Один з найбільш поширених підходів до створення адаптивної моделі типових форм – це використання параметричних функцій, що описують основні характеристики об'єкта. Наприклад, спіральні галактики часто моделюються за допомогою рівнянь, що задають спіральну структуру через полярні координати. Але на практиці астрономічні об'єкти можуть мати значно складніші форми, що вимагають застосування більш складних математичних інструментів, таких як фрактальні функції. Фрактальні моделі дозволяють описувати об'єкти з високою ступенем деталізації, що повторюється на різних масштабах. Туманності, зокрема, часто мають складну структуру, яка характеризується самоподібністю, що робить їх ідеальними для моделювання за допомогою фрактальних рівнянь. Одним із фрактальних виразів для таких об'єктів може бути рівняння, що описує форму туманності або інших розгалужених структур.

$$S(r) = r^a, \quad (3.1)$$

де $S(r)$ – це функція, що описує розподіл інтенсивності на різних відстанях r від центру об'єкта;

a – це параметр, який визначає характер фрактальності об'єкта.

Моделювання туманностей за допомогою таких рівнянь дозволяє досягнути більш точної репрезентації їх складної структури.

Після побудови базової моделі на наступному етапі здійснюється оптимізація її параметрів. Це дозволяє адаптувати модель до конкретного об'єкта, враховуючи реальні характеристики зображення. Оптимізація здійснюється за допомогою різних чисельних методів, зокрема методом найменших квадратів (МНК), що дозволяє мінімізувати похибки між теоретичними значеннями, передбаченими моделлю, і реальними даними, отриманими зі зображень. Математичне вираження цього процесу виглядає наступним чином:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k))^2 \rightarrow \min, \quad (3.2)$$

де y_i – спостережувані значення,

$f(x_i, \theta_1, \dots, \theta_k)$ – математична модель, що описує форму об'єкта;

x_i – вхідні дані (наприклад, координати пікселів);

$\theta_1, \dots, \theta_k$ – параметри моделі. Цей процес дозволяє підібрати оптимальні значення параметрів, які мінімізують похибку між передбачуваними й реальними значеннями.

Для галактик, наприклад, процес оптимізації може полягати в налаштуванні параметрів a та b в рівнянні спіралі для найкращого наближення до спостережуваної форми галактики. Водночас для більш складних об'єктів, таких як туманності, оптимізація параметрів a фрактальної моделі дозволяє більш точно відтворити структуру об'єкта, враховуючи його самоподібність на різних масштабах

Використання чисельних методів для корекції моделі.

Коли початкові параметри моделі оптимізовані, наступним кроком є коригування її форми з урахуванням додаткових спостережень або нових даних. Це може включати зміну розміру або форми об'єкта в результаті впливу зовнішніх факторів, таких як ефект червоного зміщення або взаємодія з іншими об'єктами.

Для коригування форми об'єкта можна застосовувати чисельні методи, зокрема методи градієнтного спуску. Наприклад, для адаптивної моделі галактики використовується наступний алгоритм:

$$\theta_{n+1} = \theta_n - \eta \nabla_{\theta} J(\theta), \quad (3.3)$$

де θ_n – поточні параметри моделі на ітерації;

n, η – коефіцієнт навчання (швидкість коригування);

$\nabla_{\theta} J(\theta_n)$ – градієнт функції вартості $J(\theta_n)$, що визначає похибки між моделлю та спостереженнями. За допомогою цього алгоритму параметри моделі коригуються так, щоб мінімізувати похибки й отримати найточніше наближення до реальних даних.

Завершальним етапом процесу адаптації є тестування та верифікація моделі на нових зображеннях. Після коригування моделі її необхідно перевірити на різних наборах даних, щоб оцінити її точність та ефективність. Тестування зазвичай здійснюється шляхом порівняння результатів, отриманих на основі моделі, з реальними спостереженнями. Для оцінки точності використовуються різні методи, зокрема критерії похибки, такі як середньоквадратична помилка (RMS) або коефіцієнт кореляції Пірсона:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (3.4)$$

де y_i – спостережуване значення;

\hat{y}_i – передбачене значення на основі моделі;

n – кількість точок даних.

Високий коефіцієнт кореляції вказує на те, що модель точно відображає форму об'єкта, а низька середньоквадратична помилка вказує на точність результатів. Верифікація дозволяє перевірити, чи здатна модель адаптуватися до різних умов і бути корисною для автоматизованого виявлення астрономічних об'єктів у реальних спостереженнях.

Адаптивні математичні моделі типової форми об'єктів є потужним інструментом для автоматизованої обробки астрономічних зображень. Вони забезпечують точне відновлення форми об'єкта, враховуючи як його геометричні, так і фізичні характеристики. Проте для успішного застосування таких моделей необхідно враховувати варіативність об'єктів, їхню взаємодію та зміни в часі. Використання таких підходів дозволяє значно підвищити точність аналізу астрономічних зображень та зробити обробку даних більш ефективною, що є важливим етапом у розвитку астрономії.

4 Розробка алгоритмів для автоматизованого виявлення об'єктів на основі моделей типової форми

Виявлення об'єктів на астрономічних зображеннях є складною задачею, що потребує високого рівня точності, адаптивності та автоматизації. Одним з перспективних підходів до її вирішення є застосування попередньо визначених моделей типової форми, які описують характерні геометричні та інтенсивнісні властивості певного класу астрономічних структур – галактик, зоряних скупчень, планетарних туманностей тощо. Основна ідея полягає в тому, що замість узагальненого пошуку аномалій або локальних максимумів яскравості, система орієнтується на співпадіння з певними апріорними структурними шаблонами, які математично описують типову форму об'єкта.

Процес побудови такого алгоритму передбачає кілька етапів. На початку здійснюється попередня обробка зображення з метою зменшення шумів, вирівнювання контрасту та нормалізації інтенсивностей. Це дозволяє підвищити стійкість подальших етапів аналізу до артефактів, що характерні для астрономічної зйомки – наприклад, тепловий шум, космічні промені або фонове світіння атмосфери. У якості такого попереднього кроку часто використовується згортка з ядром Гауса або вейвлет-фільтрація, які зберігають контурну інформацію, одночасно пригнічуючи випадкові перешкоди.

Після цього відбувається формалізований процес порівняння підмножин зображення з параметричною моделлю типової форми. Це здійснюється за допомогою методу шаблонного зіставлення, кореляційного аналізу або більш складних машинних методів. Зокрема, одна з найбільш уживаних методик – використання функціоналу схожості між фрагментом зображення та математичною моделлю, який реалізується у вигляді перетворення подібності або крос-кореляції:

$$C(x, y) = \sum_{i, j} I(x+i, y+i) \times T(i, j), \quad (4.1)$$

де $I(x+i, y+i)$ – інтенсивність зображення в області навколо точки (x, y) ;
 $T(i, j)$ – модель типової форми об'єкта у вигляді шаблону.

Максимальні значення функції $C(x, y)$ вказують на ймовірні місця знаходження об'єкта.

Однак такий підхід є ефективним лише для моделей фіксованої форми й масштабу. Для адаптації до об'єктів різного розміру, орієнтації або деформацій доцільно використовувати більш гнучкі методи, наприклад, динамічні моделі форми (Active Shape Models) або моделі з параметрами деформації. У такому випадку алгоритм виявлення реалізує не жорстке накладення шаблону, а ітеративне «припасування» моделі до локального контексту зображення з урахуванням гнучких трансформацій.

Такі моделі часто базуються на оптимізації функції енергії деформації, наприклад:

$$E_{total} = E_{shape} + \lambda E_{image}, \quad (4.2)$$

де E_{shape} – енергія, що описує внутрішні геометричні обмеження типової форми (наприклад, симетрію, згладженість);

E_{image} – енергія, що відображає відповідність між формою моделі та контуром зображення;

λ – ваговий коефіцієнт між ними.

Оптимізація цієї функції дозволяє моделі адаптуватися до об'єкта, зберігаючи загальну структуру.

Для кращого контролю над деформацією, в адаптивних моделях може застосовуватись параметричне представлення межі об'єкта у вигляді кривої Безьє, сплайну або гармонік Фур'є. Це дозволяє точно відтворювати контури навіть сильно витягнутих або складних об'єктів – наприклад, витягнутих лінзоподібних галактик або планетарних туманностей з внутрішньою симетрією.

У контексті обробки астрономічних даних великого обсягу, ключовим елементом є також автоматичність обробки, що вимагає реалізації алгоритмів з високим рівнем узагальнення. Це досягається завдяки використанню сучасних методів машинного навчання, зокрема згорткових нейронних мереж (CNN), які здатні не тільки виявляти шаблонну форму, а й «навчатися» типових варіацій її прояву. CNN можуть бути навчені на великому наборі зображень галактик або інших об'єктів, де на кожному прикладі фіксується маска об'єкта. Після навчання модель здатна виявляти аналогічні структури на нових зображеннях з високою точністю, навіть якщо форма має певні відхилення.

Особливо актуальним є використання архітектури U-Net, яка завдяки своїй симетричній структурі дозволяє точно локалізувати астрономічні об'єкти та відновлювати їх форму на рівні пікселів. Вона успішно застосовується в задачах сегментації небесних тіл у проектах типу Galaxy Zoo або Sloan Digital Sky Survey.

Таким чином, поєднання класичних методів аналізу форми з адаптивною математичною моделю та сучасними глибинними архітектурами дозволяє створювати ефективні алгоритми автоматизованого виявлення астрономічних об'єктів. Ці алгоритми можуть бути інтегровані в астрономічні системи моніторингу, каталоги зображень або телескопічні обчислювальні комплекси для підвищення ефективності аналізу даних у реальному часі.

5 Експериментальна верифікація розроблених методів на реальних астрономічних зображеннях

Для перевірки працездатності та ефективності запропонованих моделей типової форми було проведено експериментальну верифікацію з використанням реальних астрономічних даних, отриманих із телескопів КОС «Сажень-С» (м. Дунаївці), ОМТ-800 (м. Маяки), АЗТ-8 (м. Євпаторія) та Takahashi BRC-250M (м. Ужгород). Зображення містили сліди протяжних об'єктів, що зміщувались під час експозиції, що ускладнювало ідентифікацію та кількісну оцінку їх

характеристик. Особливо це стосується об'єктів з малою яскравістю та високою швидкістю – супутників, астероїдів та уламків космічного сміття.

На рисунках 5.1-5.4, а показано типові зображення таких об'єктів у форматі «як є», тобто в умовах зміщення, розмиття та фонових шумів. На цих же кадрах були застосовані два підходи до побудови моделі зображення – метод типового зображення, побудований на основі усереднення багатьох схожих фрагментів (рис. 5.1-5.4, б), та аналітична модель зображення, сформована згідно з фізичними характеристиками розмиття – напрямком, довжиною та швидкістю (рис. 5.1-5.4, в).

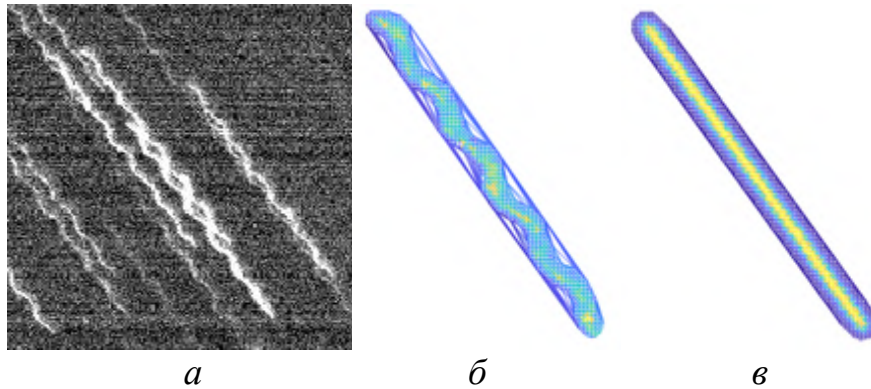


Рисунок 5.1 – Фрагмент кадру телескопа КОС «Сажень-С»: а – початкове зображення; б – сформоване типове зображення; в – аналітична модель зображення

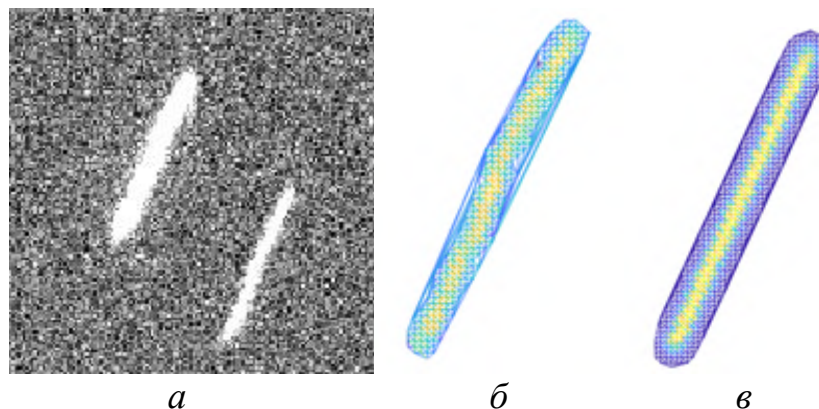


Рисунок 5.2 – Фрагмент кадру телескопа ОМТ-800: а – початкове зображення; б – сформоване типове зображення; в – аналітична модель зображення

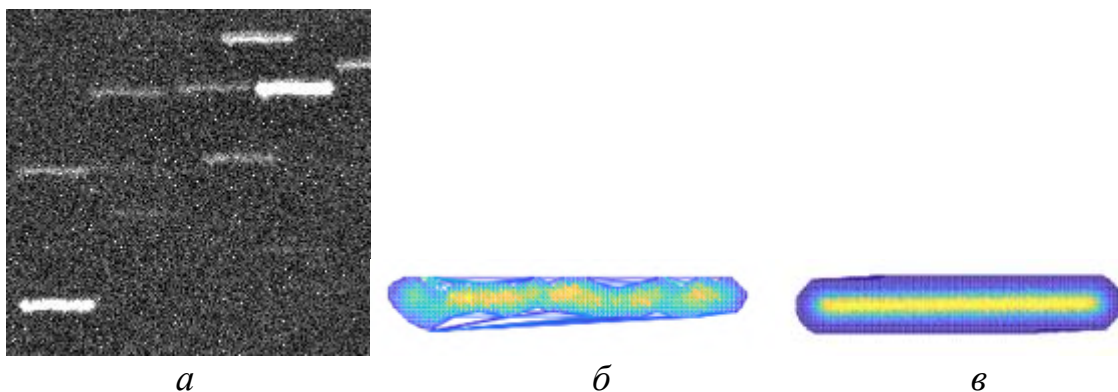


Рисунок 5.3 – Фрагмент кадру телескопа АЗТ8: а – початкове зображення; б – сформоване типове зображення; в – аналітична модель зображення

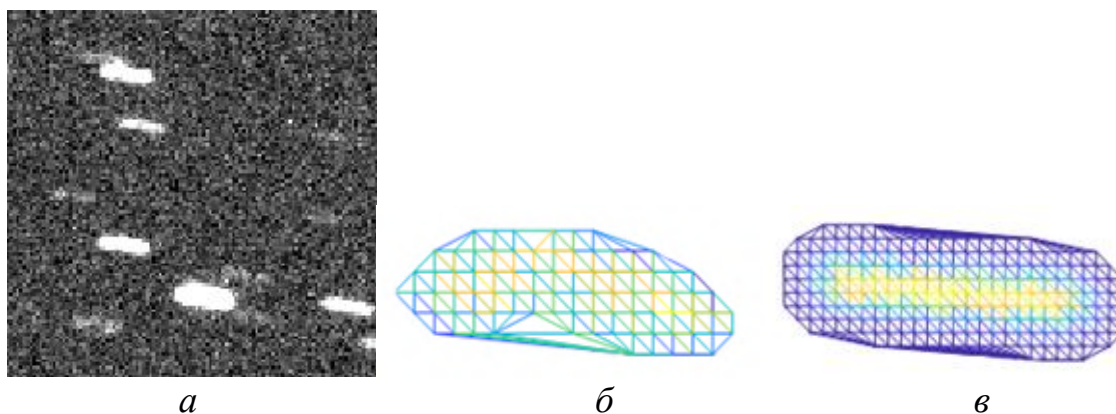


Рисунок 5.4 – Фрагмент кадру телескопа Takahashi BRC-250M: *a* – початкове зображення; *б* – сформоване типове зображення; *в* – аналітична модель зображення

Для об'єктивної кількісної оцінки точності кожного з підходів використовувалося середньоквадратичне відхилення (СКО) різниці яскравостей експериментального та модельного зображень кожного об'єкта. Визначення проводилось за формулою:

$$\sigma \Delta A_j = \sqrt{\frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} (A_i - \tilde{A}_i)^2}, \quad (5.1)$$

де A_i – експериментальна яскравість i -го пікселя;

\tilde{A}_i – модельна яскравість відповідного пікселя (для обраної моделі – типової або аналітичної);

N_j – загальна кількість пікселів у зображенні j -го об'єкта;

$\sigma \Delta A_j$ – СКО для об'єкта j .

Цей критерій дозволив порівняти точність відновлення яскравісної структури зображення на основі різних моделей. Обчислення проводились окремо для кожного об'єкта на кадрах, з подальшою побудовою зведених статистичних показників по кожному з них. У таблиці 5.1 наведено зведені характеристики СКО ($\sigma \Delta A_j$) для кожного кадру. Зокрема, було проаналізовано: середнє значення СКО ($M_{\sigma \Delta A}$), медіану значення ($M_{1/2\sigma \Delta A}$) та максимальне та мінімальне значення СКО на кадрі.

Таблиця 5.1 – Порівняння точності типового зображення і аналітичної моделі змазаного об'єкта за критерієм СКО ($\sigma \Delta A$).

Телескоп	Кіл-ть об'єктів	Модель	$M_{\sigma \Delta A}$	$M_{1/2\sigma \Delta A}$	$Max \sigma \Delta A$	$Min \sigma \Delta A$
КОС «Сажень-С»	149	Типове зображення	62,77	12,86	559,48	2,28
		Аналітична модель	175,28	36,13	1053,61	2,22
ОМТ-800	62	Типове зображення	4,41	2,40	19,29	0,36
		Аналітична модель	7,89	4,41	30,36	0,70
АЗТ-8	123	Типове зображення	23,49	3,21	1357,32	0,23
		Аналітична модель	66,28	5,64	1595,64	0,42
Takahashi BRC-250M	417	Типове зображення	12,06	3,26	242,92	0,33
		Аналітична модель	13,63	3,77	1057,19	1,21

Як видно з таблиці, метод типового зображення стабільно демонструє нижчі значення середнього та медіанного СКО, що свідчить про його вищу точність у відтворенні реального розподілу яскравості змазаного зображення. Наприклад, для КОС «Сажень-С» середнє значення СКО зменшилося більш ніж у 2,7 раза (з 175,28 до 62,77), а для ОМТ-800 – майже вдвічі (з 7,89 до 4,41). Подібні тенденції спостерігаються і для інших телескопів.

Особливо слід відзначити зниження максимального СКО: для Takahashi BRC-250M максимальне значення зменшилося в понад чотири рази (1057,19 проти 242,92), що є критично важливим при роботі з об'єктами низької контрастності.

Для наочності та кращого розуміння ефективності запропонованого підходу на рис. 5.5 подано порівняльний графік значень середньоквадратичного відхилення яскравостей пікселів між експериментальними зображеннями та двома видами моделей: типовим зображенням об'єкта та аналітичною моделлю змазаного об'єкта.

Графік ілюструє, що у всіх випадках використання типової форми забезпечує суттєво нижчі значення СКО, що свідчить про більш точну апроксимацію реальних астрономічних даних.

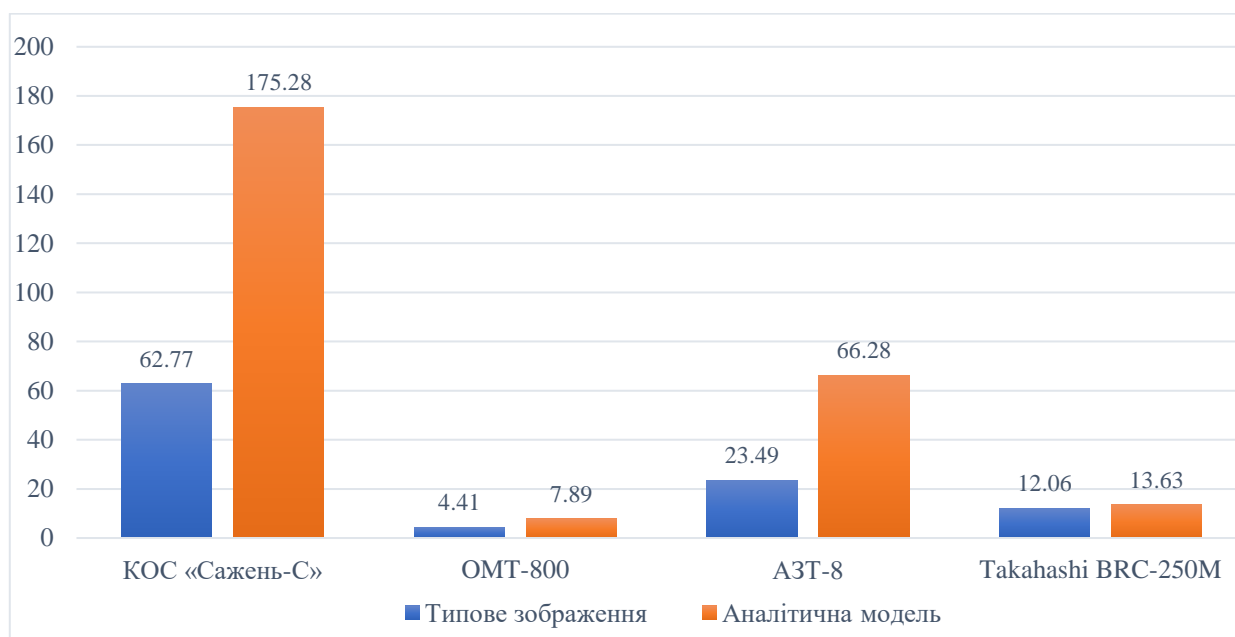


Рисунок 5.5 – Порівняння середнього СКО яскравостей між типовим зображенням та аналітичною моделлю

Наведена гістограма, демонструє порівняння середнього СКО ($M\sigma_{AA}$) яскравостей між типовим зображенням та аналітичною моделлю для кожного телескопа. Як видно, у всіх випадках типове зображення дає суттєво нижчі значення помилок.

Таким чином, експериментальна верифікація підтверджує, що застосування типових форм при моделюванні змазаних об'єктів дозволяє значно підвищити точність обробки зображень. Такий підхід особливо ефективний у задачах автоматизованого виявлення та класифікації рухомих астрономічних об'єктів у складних умовах спостереження.

6 Застосування моделей типової форми в інших наукових сферах

Підходи до моделювання об'єктів на основі їх типової форми знаходять дедалі ширше застосування у міждисциплінарних наукових дослідженнях. У своїй суті типова форма репрезентує середньостатистичну або еталонну геометрію об'єкта, яка виводиться на основі аналізу великої кількості прикладів. Завдяки цьому підходу можливо формалізувати очікувані контури, пропорції та структурні характеристики, що дозволяє застосовувати його у сферах, де спостереження за об'єктами ускладнене через обмеження технічних засобів, умови середовища або властивості самих об'єктів.

У медичній візуалізації, застосування типових форм має критично важливе значення. Наприклад, для автоматизованої сегментації анатомічних структур, таких як серце, легені чи головний мозок, використовуються *statistical shape models (SSM)*, які дозволяють забезпечити сталість та точність розпізнавання навіть у випадках низької якості зображення або присутності артефактів. У кардіології модель типової форми лівого шлуночка серця використовується для побудови тривимірної реконструкції серцевої камери, що дозволяє оцінити функціональні показники без необхідності прямих інвазивних процедур.

У сфері комп'ютерного зору, типові форми застосовуються в алгоритмах виявлення та трекінгу об'єктів у відеопотоці. Наприклад, у системах розпізнавання обличчя типові геометрії обличчя (на кшталт моделі *Active Appearance Model* або *3D Morphable Model*) слугують базисом для виявлення рис обличчя в складних умовах освітлення, поворотів голови чи міміки. Подібний підхід застосовується також у технологіях розширеної реальності (AR), де моделі типових форм допомагають точно зіставити віртуальний контент із реальною геометрією об'єктів сцени.

У геонауках, зокрема в геології та геоморфології, типові форми використовуються для автоматизованого аналізу рельєфу за даними дистанційного зондування Землі. Наприклад, виявлення ударних кратерів базується на відомих параметрах їх морфології – діаметр, глибина, співвідношення центр-периферія – що дозволяє формувати шаблони, стійкі до впливу ерозії або рослинного покриву. Такі методи широко застосовуються в планетології для дослідження поверхонь Місяця, Марса та інших тіл Сонячної системи.

У біометричних системах, де ідентифікація особи здійснюється на основі фізіологічних характеристик, типові форми використовуються для підвищення точності та надійності алгоритмів. Зокрема, у випадку ідентифікації за зображенням райдужної оболонки або сітківки ока, моделі типової геометрії дозволяють компенсувати часткові спотворення та зміну масштабу, викликані зміщенням погляду чи умовами зйомки.

У екологічному моніторингу із застосуванням безпілотних літальних апаратів, моделі типової форми допомагають автоматично виявляти об'єкти природного та антропогенного походження. Наприклад, визначення форм дерев, тварин або навіть окремих видів сміття базується на порівнянні з наперед визначеними шаблонами, що дозволяє здійснювати високоточне зондування з повітря навіть при низькій контрастності сцени.

Не менш важливим є застосування моделей типової форми у машинобудуванні, де точність у розпізнаванні деталей і вузлів із їх зображень, отриманих, наприклад, за допомогою промислових візуальних сенсорів, дозволяє оптимізувати автоматизоване сортування та контроль якості. За рахунок використання типових форм можна виявляти відхилення від норми, навіть якщо частина деталі перекрита або не потрапила в поле зору сенсора повністю.

Таким чином, концепція типової форми виступає не лише як формалізований математичний апарат, але й як універсальний інструмент, що забезпечує підвищену точність, узгодженість та ефективність в аналізі зображень у різних прикладних контекстах.

Завдяки здатності до узагальнення геометричних характеристик об'єктів, моделі типової форми забезпечують стійкість до спотворень, шумів та часткової втрати інформації. Їх використання створює передумови для інтеграції в системи комп'ютерного зору, медичної діагностики, автоматизованого контролю якості та моніторингу природного середовища.

У подальшому розвиток цієї концепції відкриває перспективи для створення нових інтелектуальних систем обробки даних, здатних до адаптації, навчання та узагальнення структурної інформації про об'єкти різної природи.

Результати досліджень

7 Оцінка впливу використання моделей типової форми на точність та ефективність обробки даних

У сучасних системах цифрової обробки зображень, особливо в галузі астрофізики та спостережної астрономії, точність реконструкції об'єктів відіграє вирішальну роль для коректної наукової інтерпретації. Типові форми, як концепція побудови узагальненого зображення об'єкта на основі багатьох його реалізацій, виявились потужним інструментом, що дозволяє значно підвищити якість аналізу навіть у випадках, коли індивідуальні спостереження зазнали спотворень через шум, розмиття, флуктуації освітлення або атмосферні умови.

Під час дослідження було проведено експериментальну перевірку ефективності використання моделей типової форми на наборі астрономічних зображень, отриманих із телескопів різних типів: КОС «Сажень-С», ОМТ-800, АЗТ-8 та Takahashi BRC-250M. У всіх випадках досліджувались кадри, на яких були присутні протяжені об'єкти, що мали помітне власне рухове розмиття. Це створювало типову ситуацію в автоматизованому моніторингу, де необхідно точно локалізувати та охарактеризувати слабкі або швидкоплинні джерела світла на тлі шуму.

Для кількісного вимірювання точності використовувався показник середньоквадратичного відхилення (СКО, $\sigma_{\Delta A_j}$), що обчислювався як різниця між експериментальною яскравістю пікселів зображення j -го об'єкта та модельними значеннями піксельної яскравості. В розрахунках враховувалась не лише абсолютна похибка, але і її розподіл по площині об'єкта, що дозволило

більш повно враховувати локальні відхилення, а також виявляти зони максимальної невідповідності.

Результати виявили чітке домінування моделей типової форми над аналітичними моделями. Наприклад, у випадку телескопа КОС «Сажень-С» середнє значення СКО при використанні типової форми склало лише 62,77 ADU, що майже в три рази менше, ніж аналогічний показник для аналітичної моделі (175,28 ADU). Схожа динаміка спостерігалась і для інших інструментів: ОМТ-800 – 4,41 проти 7,89 ADU, АЗТ-8 – 23,49 проти 66,28 ADU, Takahashi BRC-250M – 12,06 проти 13,63 ADU. Такі результати підтверджують, що типова форма краще відображає узагальнену морфологію об'єкта, зменшуючи вплив одиничних шумових аномалій та випадкових спотворень.

Варто також зазначити, що типовий шаблон зображення дозволяє не лише досягти вищої точності, а й покращити стабільність результатів: медіанні значення СКО для типових форм були послідовно нижчими, а розбіжність між мінімальним і максимальним значенням була значно меншою, ніж у випадку аналітичних моделей. Це свідчить про більшу внутрішню однорідність типових представлень, що, в свою чергу, зменшує ймовірність помилок під час подальшої автоматичної класифікації або виявлення.

З точки зору ефективності обробки, використання типової форми дає ще одну важливу перевагу. Оскільки типова форма може бути попередньо сформована та оптимізована для конкретного класу об'єктів (наприклад, малих тіл Сонячної системи, зірок певної спектральної класифікації або галактик певного типу), її застосування у вигляді шаблонів дозволяє значно знизити навантаження на обчислювальні ресурси в режимі реального часу. Зокрема, для завдань, де обробляються тисячі кадрів на добу (наприклад, у рамках проєктів на кшталт Pan-STARRS чи LSST), можливість використовувати узагальнений опис об'єкта дозволяє суттєво прискорити попередню фільтрацію та пріоритезацію даних для подальшого аналізу.

Отже, оцінка впливу моделей типової форми на точність і ефективність обробки зображень однозначно демонструє доцільність та перспективність цього підходу. Він поєднує в собі адаптивність, стійкість до спотворень, та обчислювальну оптимізацію, що є критично важливим у сучасних умовах збільшення обсягу даних та вимог до їхньої надійної інтерпретації. У майбутньому інтеграція таких моделей у повноцінні системи штучного інтелекту, орієнтовані на розпізнавання складних образів, може стати основою нового покоління аналітичних інструментів в астрономії та суміжних науках.

8 Інтеграція розроблених методів в автоматизовані системи обробки астрономічних зображень

Інтеграція моделей типової форми об'єктів у автоматизовані системи обробки зображень є важливим етапом у розвитку сучасної астрономії, адже дає змогу зменшити навантаження на астрономів, автоматизуючи процеси виявлення, класифікації та аналізу космічних об'єктів. Враховуючи величезний обсяг даних,

що генеруються внаслідок спостережень, а також необхідність максимально швидкої і точної обробки зображень, ефективна автоматизація є необхідною.

Розроблені адаптивні математичні моделі типової форми об'єктів дозволяють автоматично виявляти космічні об'єкти, навіть якщо вони з'являються на зображеннях з невеликою яскравістю або піддаються змазанню через рух. Це значно підвищує ефективність і точність обробки даних. Для реалізації таких моделей використовуються як аналітичні методи, так і емпіричні підходи, що включають попередньо сформовані шаблони типових об'єктів. Комбінація цих методів дозволяє адаптувати систему до різноманітних умов спостереження, таких як різна якість зображень, зміни в атмосферних умовах або навіть варіації в характеристиках телескопів.

Одним з яскравих прикладів інтеграції таких методів є система CoLiTec [19], розроблена для автоматизації обробки астрономічних зображень. CoLiTec поєднує численні інструменти для аналізу зображень, зокрема виявлення і класифікацію космічних об'єктів, таких як астероїди, комети та супутники. У CoLiTec інтегровано методи, засновані на типовій формі об'єктів, які використовуються для порівняння з реально зафіксованими зображеннями та для уточнення їхніх характеристик.

Процес автоматичної обробки зображень у CoLiTec відбувається в кілька етапів [20]. Спочатку система отримує необроблені зображення з телескопів, після чого проходить етап передобробки, включаючи корекцію шумів, геометричну та фотометричну калібровку. Потім на зображення накладаються типові форми, які або генеруються на основі попередніх спостережень, або адаптивно розробляються на основі поточного кадру, якщо об'єкт з'являється вперше. Моделі типової форми включають основні геометричні та фотометричні характеристики, такі як форма, розмір, яскравість та інші атрибути, що дозволяють точно ідентифікувати об'єкти в складних умовах.

Особливістю системи є її здатність адаптувати шаблони до конкретних умов спостережень. Для цього CoLiTec використовує дві основні стратегії: одну – для статичних об'єктів (де форма та розмір не змінюються протягом спостережень), і іншу – для динамічних об'єктів (наприклад, астероїдів або комет, що рухаються). Адаптивний підхід дозволяє автоматично коригувати форму об'єкта в процесі спостереження, що дає змогу зберігати точність аналізу навіть при змінних умовах.

CoLiTec використовує дві основні моделі для порівняння – аналітичну модель змазаного зображення та модель типового зображення, що формується за допомогою статистичних методів. Аналітична модель заснована на теоретичних розрахунках, які описують фізичні процеси, такі як рух об'єкта або дефекти оптики, в той час як типова модель формується емпірично, виходячи з результатів попередніх спостережень. Порівняння цих моделей дозволяє системі вибирати найбільш відповідну для конкретного об'єкта та умов спостереження. Важливим аспектом є те, що ця система дозволяє автоматично оновлювати типові форми на основі нових зображень. Це робить CoLiTec гнучким інструментом, здатним

адаптуватися до нових ситуацій, що постійно змінюються в реальному часі, і підвищує точність виявлення слабких або розмитих об'єктів.

Інтеграція моделей типової форми в систему CoLiTec є важливою складовою автоматизації спостережень. Ці моделі дозволяють підвищити точність виявлення об'єктів, зменшити кількість хибно-позитивних результатів і забезпечити більш ефективно використання ресурсів телескопів, що є критичним для обробки даних у режимі реального часу.

Застосування методів типових форм об'єктів в таких автоматизованих системах, як CoLiTec, значно полегшує роботу астрономів, зменшуючи час, необхідний для аналізу даних, і одночасно підвищуючи ефективність спостережень за об'єктами, що швидко змінюються, такими як комети, астероїди або космічне сміття.

Висновки

У результаті виконаного дослідження було розроблено, теоретично обґрунтовано та експериментально апробовано підхід до обробки цифрових зображень із використанням моделей типової форми об'єктів. Цей підхід виявився ефективним у завданнях автоматизованого виявлення та аналізу протяжних астрономічних об'єктів на зображеннях, отриманих з реальних обсерваторій.

Основна увага у роботі була приділена побудові адаптивних математичних моделей типової форми, які враховують геометричні характеристики об'єктів, змінні умови спостереження, а також спотворення, зумовлені рухом або оптичними ефектами. Запропоновані моделі не лише забезпечують узгодженість з реальними даними, але й демонструють високу точність у порівнянні з традиційними аналітичними методами.

Експериментальна верифікація, проведена на матеріалах з телескопів КОС «Сажень-С», ОМТ-800, АЗТ8 та Takahashi BRC-250M, показала, що використання типових форм дозволяє знизити середньоквадратичне відхилення між експериментальними та модельованими яскравостями пікселів на десятки відсотків. Це свідчить про практичну перевагу емпіричних моделей у реальних умовах спостережень.

Розроблені методи були інтегровані в автоматизовану систему обробки астрономічних зображень CoLiTec [21], що підтвердило їхню функціональність, стабільність та здатність до роботи в режимі реального часу. Система успішно ідентифікує змазані об'єкти, формує типові зображення та забезпечує порівняння з аналітичними моделями, підвищуючи ефективність моніторингу навколоземного простору.

Крім суто астрономічного застосування, моделі типової форми мають потенціал до інтеграції в інші галузі, зокрема біомедицину (наприклад, для аналізу клітинних структур або зображень внутрішніх органів), промислову

візуалізацію (контроль якості на основі повторюваних структур), а також у дистанційному зондуванні Землі (виявлення об'єктів на супутникових знімках).

Загалом, результати дослідження підтверджують доцільність і перспективність використання моделей типової форми як фундаментального підходу в задачах автоматизованої обробки складних цифрових зображень.

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. 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>.
4. Kudzej, I., Savanevych, V.E, Briukhovetskiy, 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>.
5. 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>.
6. 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>.
7. Khlamov, S., Savanevych, V., Vlasenko, V., Briukhovetskiy, 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>.
8. 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://ceur-ws.org/Vol-3384>.
9. 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>.
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. 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>.

12. Khlamov, S., Savanevych, V., Briukhovetskyi, 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>.
13. Khlamov, S., Savanevych, V., Briukhovetskyi, 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>.
14. 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>.
15. 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>.
16. Khlamov, S., Savanevych, V., Vlasenko, V., Trunova, T., Troianskyi, V., Shvedun, V., & Tabakova, I. (2023b). 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>.
17. Savanevych, V., Bryukhovetskiy, A., Sokovikova, N., Bezkrivnyy, 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>.
18. Savanevych, V., Akhmetov, V., Khlamov, S., Dikov, E., Briukhovetskyi, 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.
19. Pohorelov, A. V., Khlamov, S. V., Savanevych, V. E., Briukhovetskyi, 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>.
20. 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>.
21. Khlamov, S., Briukhovetskyi, 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>.