

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

ПОГОРЕЛОВ АРТЕМ ВІТАЛІЙОВИЧ

УДК 519.6:004.932

**ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ
У ПРОСТОРІ ЗА ДАНИМИ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Удовенко Сергій Григорович,
Харківський національний економічний
університет ім. С. Кузнеця, завідувач кафедри
інформатики та комп'ютерної техніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Гнатушенко Вікторія Володимирівна,
Національна металургійна академія України
МОН України (м. Дніпро), завідувач кафедри
інформаційних технологій та систем;

доктор технічних наук, професор
Пашенко Руслан Едуардович,
Інститут радіофізики та електроніки
ім. О.Я. Усикова НАН України (м. Харків),
старший науковий співробітник
відділу дистанційного зондування Землі.

Захист відбудеться «11» травня 2021 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14 і на сайті спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02 за електронною адресою: <http://nure.ua/branch/d-64-052-02>.

Автореферат розісланий «09» квітня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Л.В. Колесник

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час простежується тенденція до інтенсивного розвитку методів обробки цифрових зображень і їх використання в різних галузях науки і техніки. У ряді випадків обробка зображень застосовується для визначення локаційних даних по зображенню. За даними зображень проводиться визначення даних про стан об'єктів на зображенні і в просторі. В астрономії прикладами таких об'єктів є зірки, супутники, астероїди або комети, які зближуються з Землею. При їх виявленні та спостереженні виникають певні складнощі (через розмір, віддаленість або швидкість зазначених об'єктів) при обробці результатів спостереження.

Науковий напрямок автоматичної обробки цифрових кадрів астрономічних зображень є відносно новим і продовжує розвиватись разом із вдосконаленням технічних та програмних засобів цифрових спостережень. Різним аспектам обробки цифрових кадрів з метою визначення положення астрономічних об'єктів присвячено роботи В.В Купріянова, В.Є. Саваневича, Д.П. Думи, А.В. Міронова, В.С. Сидорової, А. Bovik, L. Elkins-Tanton, L. Zhang, J. Nakamura, S. Birchfield, J. Charles, інших учених.

Визначення кутового положення об'єктів у просторі за результатами спостережень з їх попередньою сегментацією на цифрових зображеннях обумовлює потенційну точність кінцевих результатів комп'ютерної обробки астрономічних даних. При цьому, існуючі методи сегментації зображень об'єктів на цифрових зображеннях не враховують специфічні особливості астрономічних зображень, що не завжди дозволяє досягнути потрібної точності визначення поточного положення об'єктів.

Це обумовлює актуальність науково-технічної задачі розробки ефективних обчислювальних методів сегментації та оцінки кутового положення астрономічних об'єктів у просторі за результатами аналізу цифрових зображень, що враховували б специфічні умови астрономічних спостережень та особливості формування цифрових кадрів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота пов'язана з міжнародною програмою «Захист планети» (Planetary Defense) від Міжнародної Академії Астронавтики (International Academy of Astronautics – IAA); міжнародним проектом «The Space Emergency System» програми трансграничного співробітництва Угорщина – Словаччина – Румунія – Україна (European Neighbourhood and Partnership Instrument – ENPI); програмами спостережень астероїдів під егідою Центру малих планет (Minor Planet Center – MPC) Міжнародного Астрономічного Союзу; міжнародною програмою Gaia-FUN-SSO (Gaia Follow-Up Network for Solar System Objects); НДР №307 «Динамічний інтелектуальний аналіз послідовностей нечіткої інформації за умов суттєвої невизначеності на основі гібридних систем обчислювального інтелекту» (№ДР 0116U002539).

У рамках даної тематики дисертантом розроблено обчислювальні методи сегментації зображень одиночних, яскравих, протяжних і компактних груп об'єктів на цифрових астрономічних зображеннях; запропоновано оцінки

параметрів зображення фонові підкладки на цифрових зображеннях при наявності аномальних пікселів; розроблено метод оцінки кутового положення об'єктів в просторі при прямій і зворотній координатній редукції дискретних зображень.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає в підвищенні точності оцінки положення об'єктів в просторі за даними цифрових зображень за рахунок розробки нових і вдосконалення відомих обчислювальних методів сегментації та оцінки кутового положення об'єктів в просторі, які враховують умови астрономічних спостережень та особливості формування цифрових кадрів.

Для досягнення поставлені такі завдання:

- аналіз існуючих методів визначення положення об'єктів в просторі за даними цифрових зображень;
- розробка обчислювальних методів сегментації зображень одиночних та яскравих об'єктів з попереднім виділенням стартових пікселів;
- розробка обчислювальних методів сегментації протяжних зображень та зображень компактних груп об'єктів на цифрових астрономічних зображеннях;
- розробка методу оцінювання параметрів фонові підкладки цифрового зображення об'єкта при наявності аномальних пікселів для покращення показників точності оцінки положення об'єктів у просторі;
- розробка методу оцінки кутового положення об'єктів у просторі при прямій та зворотній координатній редукції дискретних зображень;
- експериментальне дослідження та впровадження розроблених методів.

Об'єкт дослідження – процес визначення положення об'єктів за зображеннями, що сегментовані на цифрових кадрах.

Предмет дослідження – обчислювальні методи сегментації зображень об'єктів на цифровому кадрі та визначення кутового положення об'єктів у просторі за допомогою сегментованих зображень.

Методи досліджень. Основні результати роботи отримані на основі використання теорії чисельних методів, морфологічної обробки зображень, теорії математичної статистики, параметричного оцінювання та теорії оптимізації, що дозволили розробити: обчислювальні методи сегментації зображень одиночних, яскравих, протяжних і компактних груп об'єктів на цифрових астрономічних зображеннях; оцінки параметрів зображення фонові підкладки на цифрових зображеннях при наявності аномальних пікселів; метод оцінки кутового положення об'єктів в просторі при прямій і зворотній координатній редукції дискретних зображень.

Наукова новизна отриманих результатів. В рамках вирішення завдань дисертаційного дослідження отримані такі наукові результати:

- вперше запропоновано обчислювальний метод сегментації зображень одиночних об'єктів на цифрових зображеннях з попереднім використанням згладжуваючого цифрового фільтру низьких частот та вирівнюванням яскравості цифрового кадру, а також здійсненням операції розмикання з додатковою морфологічною реконструкцією, що дозволило зменшити кількість

помилкових виявлень об'єктів та маловимірних артефактів при обчислювальних витратах, близьких до мінімальних;

– вперше запропоновано обчислювальний метод сегментації протяжних зображень об'єктів на цифрових зображеннях, що дозволяє здійснювати сегментацію вхідних протяжних зображень, де присутні різні типи зображень локальних об'єктів (одиначних, компактної групи, протяжних) при обчислювальних витратах, близьких до мінімальних;

– удосконалено метод оцінювання параметрів фонові підкладки цифрового зображення об'єкта при наявності аномальних пікселів, що дозволяє враховувати умови астрономічних спостережень для покращення показників точності оцінки положення об'єктів у просторі;

– отримали подальший розвиток обчислювальні методи оцінки кутового положення об'єктів в просторі з використанням прямої та зворотної координатної редукції дискретних зображень, що дозволило поліпшити якість апроксимації аберації для короткофокусних та довгофокусних оптичних систем спостереження та підвищити загальну точність визначення координат об'єктів.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів забезпечувалась коректним використанням основних положень відомого та апробованого математичного апарату. Нові наукові результати підтверджуються експериментальними дослідженнями та застосуванням даних спостережень і обробки зображень за програмою автоматичного пошуку астероїдів та комет на серії цифрових кадрів CoLiTec, яка впродовж декількох років успішно використовується в обсерваторіях світу для виявлення відомих та відкриття нових астероїдів.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені обчислювальні методи апробовані на практиці і впроваджені в блоці внутрішньокадрової обробки програмного комплексу автоматизованого виявлення астероїдів і комет CoLiTec, одним з розробників якого є здобувач. Розроблені методи та програмне забезпечення (ПЗ) CoLiTec, що їх реалізує, були використані в Одеській астрономічній обсерваторії Odessa-Mayaki (с. Маяки, Одеська обл., Україна), в лабораторії космічних досліджень при Ужгородському національному університеті, в Західноукраїнському центрі космічних досліджень Державного космічного агентства України (м. Мукачєво, Україна). Впровадження розроблених дисертантом методів підтверджується відповідними актами (акт від 12.02.2020, акт від 28.01.2020).

Розроблені обчислювальні методи сегментації зображень дозволили здійснювати виділення всіх типів об'єктів на цифрових астрономічних кадрах з обчислювальними витратами, близькими до мінімальних. Запропоновані в роботі обчислювальні методи прямої і зворотної координатної редукції дозволили значно підвищити показники точності визначення кутових положень об'єктів. Наприклад, отримані значення середньоквадратичного відхилення екваторіальних координат опорних зірок (RA і DE) відповідають вимогам Центру малих планет до точності оцінки кутових положень астероїдів на цифрових зображеннях. Розроблені обчислювальні методи можуть бути

використані в різних програмних комплексах обробки цифрових зображень для сегментації і визначення кутових положень об'єктів з високою точністю (зокрема, в програмних комплексах для зоряної фотометрії, автоматизованого виявлення астероїдів і комет, ПЗ для контролю космічного простору). Крім того, запропоновані методи можуть бути використані для сегментації і визначення кутових положень об'єктів будь-якої природи (наприклад, споруд на супутникових цифрових знімках).

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові і практичні результати, представлені в дисертаційній роботі, здобувач отримав самостійно. Особистий внесок автора в спільно опублікованих роботах такий: в [1, 3, 8] розроблено та досліджено обчислювальні методи оцінки кутового положення об'єктів в просторі з використанням прямої та зворотної координатної редукції дискретних зображень; в [15, 17] розроблено обчислювальний метод оцінки параметрів фонові підкладки зображення об'єкта на цифрових кадрах; в [18] розроблено обчислювальний метод сегментації зображень одиночних об'єктів на цифрових астрономічних зображеннях; в [5, 16, 19] розроблено обчислювальний метод сегментації зображень компактних груп об'єктів на цифрових астрономічних зображеннях; в [6, 7, 20] розроблено обчислювальний метод сегментації протяжних зображень на цифрових зображеннях; в [9, 21] розроблено обчислювальний метод сегментації зображень яскравих об'єктів на цифрових зображеннях; в [12] запропоновано метод калібровки астрономічних зображень; в [22] запропоновано підхід до автоматичної редукції даних фотометричних спостережень; розроблено в [2, 4, 8-11, 13, 14, 21] запропоновано методи виділення та сегментації об'єктів на ПЗС-кадрах та здійснено розрахунки за програмами CoLiTec.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні результати дисертації обговорено на 20 науково-технічних конференціях: 18-му міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» (Харків, 2014); International meeting on variable stars research «KOLOS 2014», «KOLOS-2016», KOLOS-2016», «KOLOS-2015» (Словаччина, Стакчін, 2014, 2015, 2016, 2017); 15-й українській конференції з космічних досліджень» (Одеса, 2015); міжнародній школі-семінарі «Теорія прийняття рішень» (Ужгород, 2016); міжнародному науковому семінарі «Радіометеори, метеори и міжпланетна складова» (Харків, 2016); всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених «Теоретичні та прикладні аспекти застосування інформаційних технологій в галузі природничих наук» (Одеса, 2016); 16-th and 17-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School (Одеса, 2016, 2017); // 8-й та 9-й міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні проблеми та досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (Запоріжжя, 2016, 2018), 48th Conference on Variable Stars Research (Czech R, Prague, 2016); науково-практичній конференції «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи» (Київ, 2017); 8-th International Workshop on Astronomy and Relativistic Astrophysics – IWARA2018 (Cusco, Peru, 2018); 2nd International Conference on Data Stream Mining & Processing, DSMP 2018 (Львів,

2018); міжнародній науково-практичній конференції «Інтелектуальні системи та інформаційні технології» (Одеса, 2019).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 22 статті (з них 10 статей у наукових фахових виданнях України, 6 статей у виданнях, що індексуються у базі Scopus, та 6 статей в інших виданнях) та 20 тез доповідей конференцій (1 конференція індексується у базі Scopus).

Здобувач є також співавтором 12 авторських прав на програмний код.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 206 сторінок (з них 175 сторінок основного тексту), що містить 70 рисунків, 9 таблиць, список використаних джерел із 229 найменувань на 21 сторінці та 3 додатки на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету досліджень, викладено короткий зміст дисертації та отриманих у ній результатів, виділено їх наукову новизну та практичну значимість.

У **першому розділі** викладено огляд та проведено аналіз літератури за темою дисертації, досліджено відомі методи сегментації та визначення положення об'єктів в просторі за даними цифрових зображень. Розглянуто особливості умов спостереження, що впливають на формування цифрових зображень астрономічних об'єктів.

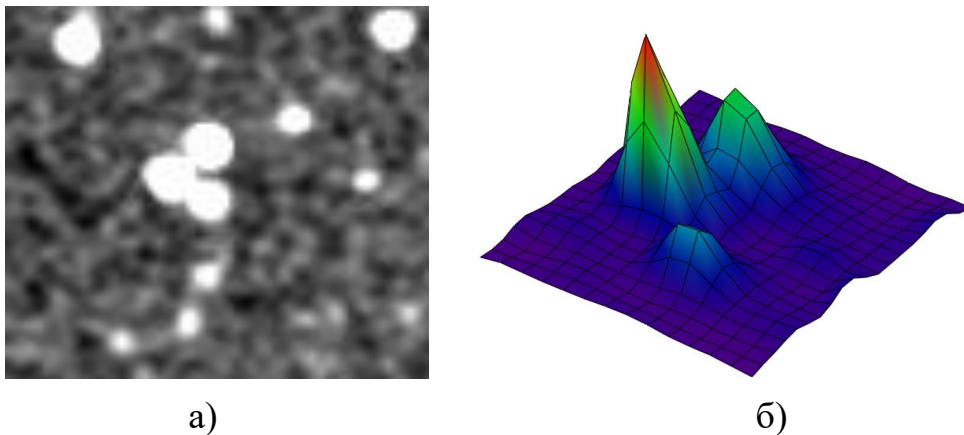
В більшості сучасних телескопічних пристроїв спостереження використовуються CCD-камери, реєструючим елементом в яких є матриця із зарядним зв'язком (Charge Coupled Devices – CCD). Визначення кутового положення об'єктів в просторі за результатами спостережень з їх попередньою сегментацією і на цифрових зображеннях обумовлює потенційну точність кінцевих результатів обробки астрономічних даних. При цьому, існуючі методи сегментації зображень об'єктів на цифрових зображеннях не враховують специфічні особливості астрономічних зображень, що не завжди дозволяє досягнути потрібної точності визначення положення об'єктів.

Сформульована мета роботи полягає в підвищенні точності оцінки положення об'єктів в просторі за даними цифрових зображень, за рахунок розробки нових і вдосконалення відомих обчислювальних методів сегментації. Згідно з цією метою на основі проведеного аналізу визначено завдання досліджень.

У **другому розділі** пропонуються такі методи: обчислювальний метод сегментації зображень одиночних об'єктів на цифрових зображеннях з попереднім використанням згладжуваючого цифрового фільтру низьких частот та вирівнюванням яскравості цифрового кадру; обчислювальний метод сегментації протяжних зображень об'єктів на цифрових зображеннях, де присутні різні типи зображень локальних об'єктів (одиночних, компактної

групи, протяжних) при обчислювальних витратах, близьких до мінімальних. На цифровому кадрі можливим є перетин зображень декількох близьких об'єктів, тобто об'єктів з близькими кутовими координатами (рис. 1). Іншими словами, зображення близьких об'єктів на цифровому кадрі є статично залежною групуваною вибіркою подій, які полягають в попаданні фотонів в пікселі CCD - матриці.

Рішення про поділ потенціалів (яскравостей) пікселів статистично залежних зображень між об'єктами (джерелами випромінювання) приймається на етапі оцінки параметрів розташування об'єктів на CCD-кадрі. Однак передбачається, що прийняття попереднього рішення про належність пікселя до одного з зображень об'єктів є можливим при сегментації. Найчастіше для статистично залежних зображень близьких об'єктів граничні пікселі зображень сусідніх об'єктів є сусідніми пікселями. У свою чергу на етапі оцінки стану близьких об'єктів на статистично залежних зображеннях виділені сегменти об'єднуються з сусідніми пікселями і надалі використовуються спільно.



а – на цифровому кадрі; б – 3D-представлення
Рисунок 1 – Приклад перетину зображень близьких об'єктів

Крім того, проблему сегментації цифрових зображень об'єктів на CCD-кадрі ускладнюють наступні фактори: внаслідок впливу турбулентності атмосфери на формування цифрового кадру кордони зображень, що сегментуються, є розмитими; на цифровому зображенні можуть бути присутні зображення об'єктів, яскравість яких незначно відрізняється від яскравості фонові підкладки. Зображення, сформоване об'єктом з ненульовим видимим переміщенням, будемо називати протяжним зображенням, а відповідний об'єкт – протяжним об'єктом. Часто зображення протяжного об'єкта на цифровому кадрі фрагментовано. Яскравість пікселів кордону між фрагментами значно перевищує яскравість пікселів фонові підкладки.

Для проведення сегментації в зазначених умовах найбільш доцільно застосування методів сегментації областей, заснованих на застосуванні послідовності морфологічних операцій ерозії і дилатації, а також морфологічної реконструкції. Однак, реалізація зазначених операцій вимагає попередньої обробки цифрового кадру.

В пропорованих надалі методах сегментації використано надпиксельну Гауссову модель зображень компактної групи об'єктів, де форма зображення задається сукупністю двовимірних гауссіан.

В рамках розроблюваних методів сегментації як координати стартового пікселя пропонується використовувати координати піку зображення досліджуваного об'єкта. Множина стартових пікселів (піків) для зображень, що сегментуються, визначається в процесі попереднього виявлення зображень об'єктів. Для кожного піку зображення об'єкту відомі його координати в системі координат CCD-кадру. Згідно з завданням дисертаційної роботи необхідно розробити методи сегментації астрономічних цифрових зображень, які дозволяють за описаних вище умов сегментувати зображення таких типів об'єктів: зображення одиночного об'єкту, що знаходиться на значній відстані від зображень інших об'єктів; протяжне зображення (наприклад, зображення астероїда, змазане його власним рухом), фрагментоване на сукупність близько розташованих зображень; компактна група статистично залежних зображень близьких об'єктів; зображення яскравих об'єктів, які перетинають зображення сусідніх зірок.

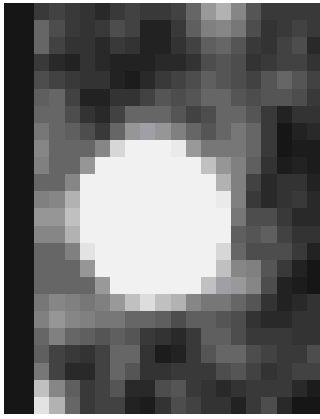
Метод сегментації зображень одиночних об'єктів передбачає реалізацію таких послідовних операцій: попередня обробка цифрового кадру з використанням низькочастотного фільтру; виявлення множини Ω_{detimg} одиночних об'єктів на цифровому кадрі; формування бінарних зображень областей сегментування; сегментація бінарних зображень одиночних об'єктів з застосуванням операцій ерозії, морфологічної реконструкції та дилатації.

Попередня обробка цифрового кадру здійснюється для зменшення кількості помилкових піків перед початком сегментації з використанням згладжуючого цифрового фільтра низьких частот:

$$A_{fik} = \sum_{m=1}^{n_m} \sum_{l=1}^{n_m} M_p(m, l) A_s(i - m, k - l), \quad (1)$$

де $A_s(i - m, k - l)$ – яскравість ik -го пікселя вихідного (невідфільтрованого) цифрового кадру; A_{fik} – яскравість ik -го пікселя відфільтрованого цифрового кадру; M_p – квадратна матриця розмиття розміром $n_m \times n_m$; m, l – індекси елементів матриці розмиття, $m = \overline{-n_m, n_m}, l = \overline{-n_m, n_m}$.

Стартовим пікселем сегментації зображення j -го об'єкта визначається пік даного зображення, який характеризується координатами (x_{pj}, y_{pj}) . В околі цих координат формується прямокутна область сегментування Ω_{imgj} з кутовими розмірами R_{cx}, R_{cy} (рис. 2). Дані розміри задаються з припущень про розмір зображень об'єктів на досліджуваному типі цифрових кадрів і однакові для всіх сегментованих зображень гіпотетичних об'єктів.



а)

3390, 3396, 3401, 3408, 3404, 3394, 3405, 3417, 3407, 3397, 3397, 3398, 3400, 3404, 3397)
3391, 3394, 3392, 3396, 3393, 3394, 3409, 3418, 3410, 3396, 3394, 3398, 3408, 3415, 3403)
3377, 3381, 3388, 3391, 3392, 3408, 3431, 3440, 3428, 3406, 3397, 3396, 3406, 3411, 3397)
3362, 3369, 3381, 3393, 3418, 3467, 3534, 3564, 3520, 3455, 3416, 3398, 3401, 3405, 3388)
3362, 3364, 3374, 3409, 3481, 3634, 3882, 4021, 3889, 3651, 3491, 3420, 3406, 3402, 3384)
3367, 3377, 3393, 3450, 3605, 4047, 4825, 5331, 4984, 4207, 3679, 3478, 3422, 3400, 3387)
3370, 3392, 3417, 3490, 3767, 4669, 6396, 7713, 7082, 5266, 3996, 3554, 3442, 3397, 3383)
3378, 3396, 3423, 3515, 3867, 5054, 7537, 9761, 9153, 6412, 4341, 3620, 3451, 3396, 3373)
3385, 3392, 3415, 3504, 3808, 4815, 7067, 9392, 9175, 6584, 4419, 3632, 3442, 3389, 3367)
3382, 3383, 3405, 3462, 3641, 4206, 5481, 6933, 6989, 5491, 4112, 3572, 3428, 3382, 3365)
3383, 3375, 3393, 3422, 3499, 3725, 4178, 4701, 4762, 4248, 3726, 3488, 3413, 3388, 3374)
3396, 3382, 3384, 3401, 3435, 3506, 3617, 3733, 3749, 3639, 3514, 3436, 3399, 3390, 3388)
3397, 3397, 3391, 3400, 3416, 3433, 3460, 3476, 3468, 3448, 3436, 3423, 3400, 3386, 3389)
3385, 3396, 3399, 3402, 3406, 3405, 3405, 3401, 3390, 3392, 3414, 3420, 3398, 3380, 3382)
3380, 3385, 3393, 3394, 3388, 3377, 3373, 3382, 3383, 3382, 3403, 3409, 3384, 3368, 3374)

б)

а – на цифровому зображенні; б – у вигляді значень яскравості пікселів
Рисунок 2 – Зображення області сегментування об'єкту

Для зменшення кількості оброблюваної інформації і обчислювальних витрат методу сегментації зображень об'єктів доцільно застосувати бінаризацію зображення. Головним параметром перетворення зображення області сегментування Ω_{imgj} в бінарне зображення області $\Omega_{binimgj}$ є граничний коефіцієнт відбору пікселів k_c . Одиницями в бінарному зображенні заповнюються пікселі, яскравість яких задовольняє правилу бінаризації (рис. 3):

$$A_{ik} > k_c \cdot \sigma_{noi} + \hat{\Delta}_{noi}, \quad (2)$$

де A_{ik} – яскравість ik -го пікселя цифрового кадру; σ_{noi} – оцінка середньоквадратичного відхилення (СКВ) яскравості фонові підкладки; $\hat{\Delta}_{noi}$ – оцінка середнього значення яскравості пікселів фонові підкладки.

3390, 3396, 3401, 3408, 3404, 3394, 3405, 3417, 3407, 3397, 3397, 3398, 3400, 3404, 3397)	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0
3391, 3394, 3392, 3396, 3393, 3394, 3409, 3418, 3410, 3396, 3394, 3398, 3408, 3415, 3403)	0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1
3377, 3381, 3388, 3391, 3392, 3408, 3431, 3440, 3428, 3406, 3397, 3396, 3406, 3411, 3397)	0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0
3362, 3369, 3381, 3393, 3418, 3467, 3534, 3564, 3520, 3455, 3416, 3398, 3401, 3405, 3388)	0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0
3362, 3364, 3374, 3409, 3481, 3634, 3882, 4021, 3889, 3651, 3491, 3420, 3406, 3402, 3384)	0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0
3367, 3377, 3393, 3450, 3605, 4047, 4825, 5331, 4984, 4207, 3679, 3478, 3422, 3400, 3387)	0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0
3370, 3392, 3417, 3490, 3767, 4669, 6396, 7713, 7082, 5266, 3996, 3554, 3442, 3397, 3383)	0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0
3378, 3396, 3423, 3515, 3867, 5054, 7537, 9761, 9153, 6412, 4341, 3620, 3451, 3396, 3373)	0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0
3385, 3392, 3415, 3504, 3808, 4815, 7067, 9392, 9175, 6584, 4419, 3632, 3442, 3389, 3367)	0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0
3382, 3383, 3405, 3462, 3641, 4206, 5481, 6933, 6989, 5491, 4112, 3572, 3428, 3382, 3365)	0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0
3383, 3375, 3393, 3422, 3499, 3725, 4178, 4701, 4762, 4248, 3726, 3488, 3413, 3388, 3374)	0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0
3396, 3382, 3384, 3401, 3435, 3506, 3617, 3733, 3749, 3639, 3514, 3436, 3399, 3390, 3388)	0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0
3397, 3397, 3391, 3400, 3416, 3433, 3460, 3476, 3468, 3448, 3436, 3423, 3400, 3386, 3389)	0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0
3385, 3396, 3399, 3402, 3406, 3405, 3405, 3401, 3390, 3392, 3414, 3420, 3398, 3380, 3382)	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0
3380, 3385, 3393, 3394, 3388, 3377, 3373, 3382, 3383, 3382, 3403, 3409, 3384, 3368, 3374)	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0

а)

б)

Рисунок 3 – Вхідне зображення (а) та результат його бінаризації (б)

Ефективність бінаризації зображення з нерівномірним фоном визначається в тому числі точністю оцінки параметрів фону в околі сегментованого зобра-

ження об'єкта. Розглянемо деякі особливості морфологічної обробки бінарного зображення області сегментування. Яскравість пікселів зображень об'єктів, зазвичай, перевищує яскравість фонові підкладки. На сформованому бінарному зображенні області сегментування j -го зображення об'єкта $\Omega_{binimgj}$ пікселі з яскравістю, що перевищує задану, відзначаються одиницями. Очевидно, що зображення j -го сегментованого об'єкта є зв'язною областю, що представляє собою множину пікселів, між будь-якими двома з яких існує шлях, тобто існує неповторювана послідовність пікселів зі значеннями яскравості $A_{ik} = 1$, які також належать даній області. За рахунок ряду факторів, включаючи апіорне завдання розмірів області сегментування, її бінарне зображення $\Omega_{binimgj}$ може містити пікселі, які не належать зображенню j -го сегментованого об'єкта. На зображенні також часто присутні паразитні лінії і інші артефакти, які іноді порушують форму сегментованого зображення. Для виключення паразитних пікселів в обробці бінарних зображень доцільно використовувати операцію розмикання. У загальному випадку, операція розмикання видаляє паразитні лінії і інші артефакти, товщина яких менше, ніж використовуваний структуроутворюючий елемент B_{srt} . Операція розмикання виконується шляхом послідовного проведення операцій ерозії і дилатації з тим же структуроутворюючим елементом. Відповідно до теорії множин, операція розмикання бінарного зображення $\Omega_{binimgj}$ структуроутворюючим елементом B_{srt} задається виразом:

$$\Omega_{binimgj} \circ B_{srt} = (\Omega_{binimgj} - B_{srt}) \oplus B_{srt}. \quad (3)$$

Слід зазначити, що сегментація проводиться послідовно для всіх областей сегментування. У кожній області сегментування виділяється тільки один сегмент, центр якого збігається з центром області сегментування і одночасно є піком сегментованого зображення об'єкта. Таким чином, операція морфологічної реконструкції зводиться до операції виділення зв'язкових компонент. Операція ерозії бінарного зображення області сегментування (перша частина операції розмикання) є процесом переміщення структуроутворюючого елемента по зображенню і фіксації положень його якоря, в яких цей елемент цілком складається з пікселів зображення. Іншими словами, ерозія множини $\Omega_{binimgj}$ по структуроутворюючому елементу B_{srt} є множиною всіх таких точок z , при зсуві в які елемент B_{srt} є підмножиною множини $\Omega_{binimgj}$ ($B_{srt} \subseteq \Omega_{binimgj}$). На очищеному після операції ерозії бінарному зображенні Ω_{eimgj} відновлюється тільки зображення j -го об'єкта сегментації.

Стартовим пікселем для подальшого проведення операції морфологічної реконструкції є пік зображення j -го сегментованого об'єкта з координатами (x_{pj}, y_{pj}) . В результаті зазначеної операції формується реконструйоване бінарне зображення $\Omega_{binrecj}$ ($\Omega_{binrecj} \subseteq \Omega_{binimgj}$), на якому залишаються пікселі зі

значеннями яскравості, зв'язані з піком сегментованого зображення. Елементи зображення, що складають окремі локальні області одиничних пікселів і не пов'язані із зображенням j -го об'єкту сегментації, виключаються з зображення бінарної області сегментування $\Omega_{binrecj}$. Пікселі, зв'язкові з піком зображення j -го об'єкту сегментації, залишаються на бінарному зображенні області сегментування. Далі проводиться друга частина операції розмикання – операція дилатації реконструйованого зображення області сегментування $\Omega_{binrecj}$ структуроутворюючим елементом B_{srt} згідно з наступним рівнянням:

$$\Omega_{binrecj} \oplus B_{srt} = \{z \mid (\hat{B}_{srt})_z \cap \Omega_{binrecj} \neq \emptyset\}, \quad (4)$$

де \hat{B}_{srt} – центральне відображення множини B_{srt} .

В результаті дилатації відновлюються пікселі, пов'язані із зображенням j -го об'єкту сегментації, але видалені при проведенні операції ерозії.

На досліджуваному типі цифрових кадрів можлива наявність зображень об'єктів, що становлять компакту групу об'єктів зі статистично залежними зображеннями. Іншими словами, в області сегментування Ω_{imgj} може бути присутнім зв'язане, статистично залежне зображення компактної групи об'єктів, що має бути поділене на зображення окремих об'єктів. Для поділу зображень компактної групи об'єктів виникає необхідність враховувати перепад яскравості пікселів в зображенні виділеного сегмента Ω_{sobjj} . У зв'язку з цим відновлюється напівпівтонове зображення j -го виділеного сегмента Ω_{sobjj} за даними вихідного кадру. На рис. 4 представлений приклад області, що містить зображення компактної групи з двох об'єктів. Зображення компактної групи об'єктів може бути представлено як сукупність двовимірних гауссіан.

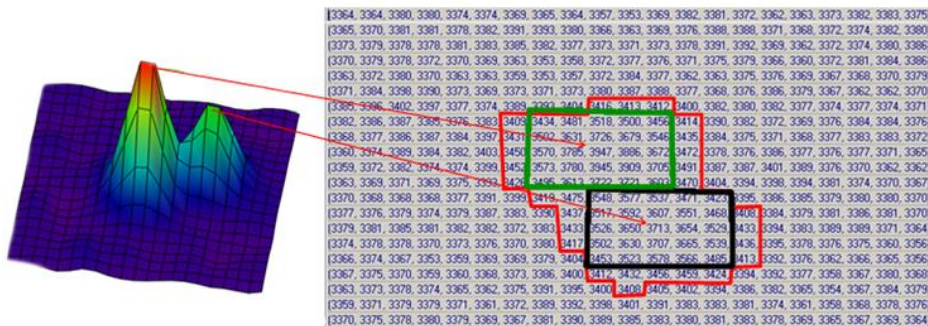


Рисунок 4 – Приклад зображення компактної групи, що складається з двох об'єктів

Кожний піксель зображення компактної групи об'єктів може містити фотони від всіх джерел випромінювання, які формують зображення компактної групи об'єктів. Це дозволяє ввести критичне значення зростання яскравості μ_{fbr} , при якому приймається рішення про віднесення пікселя до j -го об'єкта

сегментації. Розглянемо послідовність операцій, необхідних для реалізації методу сегментації компактних груп зображень близьких об'єктів.

1. Проводиться сегментація бінарних зображень об'єктів з формуванням множини сегментів, кожен з яких характеризується координатами піку, як стартового пікселя сегмента, і містить сукупність пікселів виділеного в процесі сегментації зображення об'єкта або компактної групи об'єктів. Для цього використовується метод сегментації зображень одиночних об'єктів.

2. Формується множина піків, як стартових пікселів сегментів, координати яких входять в j -й сегмент.

3. У кожному сегменті зображення визначається кількість піків, як стартових пікселів сегмента.

4. Якщо для j -го сегмента кількість піків, як стартових пікселів сегментів, більше 1, то j -й сегмент є зображенням компактної групи об'єктів і проводиться поділ зображення компактної групи на сукупність зображень одиночних об'єктів. В іншому випадку, здійснюється перехід до наступного сегменту кадру.

5. Для всіх стартових пікселів $N(\Omega_{sbobjj})$, що належать j -му сегменту Ω_{sbobjj} , буде сформовано сегмент Ω_{sbobjj} . Отже, $N(\Omega_{sbobjj})$ сегментів будуть дублюватися в зальній множині. Для зменшення обчислювальних витрат дублікати сегмента Ω_{sbobjj} виключаються з розгляду.

6. Відновлюється напівпівтонове зображення j -го сегмента за даними вхідного кадру в зв'язку з відсутністю на бінарному зображенні Ω_{sbobjj} інформації про перепади яскравості пікселів.

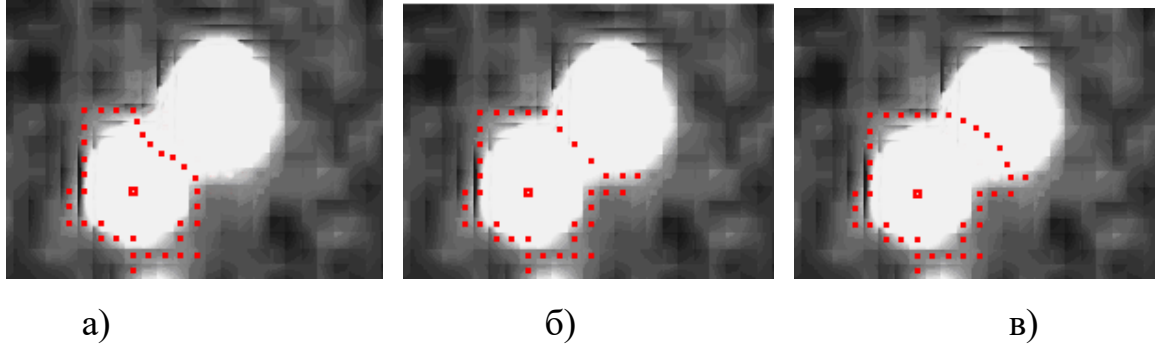
7. Для кожного з j -го стартових пікселів сегмента, що належать j -му сегменту Ω_{sbobjj} , аналізуються його пікселі для поділу зображення компактної групи на сукупність зображень одиночних об'єктів. Здійснюється вибір поточного ik -го пікселя напівпівтонового зображення j -го сегмента Ω_{sbobjj} . Вибраний піксель повинен бути сусіднім з пікселем попередньої $(n-1)$ ітерації і мати менше значення яскравості. При відсутності такого пікселя процес закінчується. Для першої ітерації $(n=1)$ в якості ik -го пікселя вибирається l -й стартовий піксель j -го сегмента Ω_{sbobjj} . Для ik -го пікселя приймається рішення про віднесення його до зображення l -го об'єкта, якщо значення його яскравості на напівтоновому зображенні Ω_{sbobjj} менше значення яскравості сусіднього пікселя з попередньої $(n-1)$ ітерації:

$$A_{ikjn} < A_{ikjn-1}. \quad (5)$$

В іншому випадку перевіряється, чи зростає значення його яскравості відносно сусіднього пікселя з попередньої ітерації:

$$\frac{A_{ikjn-1} - A_{ikjn}}{A_{ikjn-1}} < \mu_{fbr}. \quad (6)$$

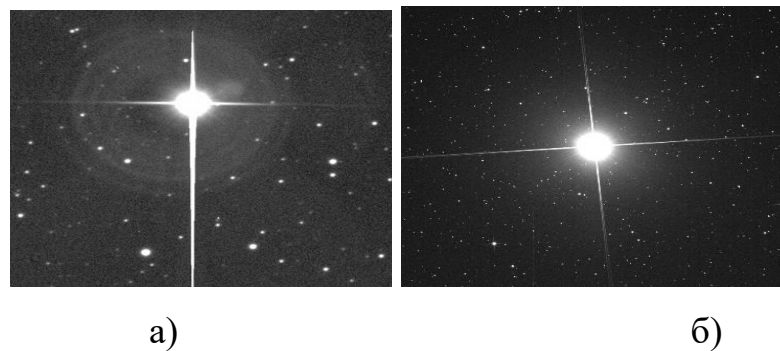
Якщо умова (6) виконується, приймається рішення про віднесення ik -го пікселя до l -го зображення об'єкта (рис. 5).



а) $\mu_{fbr} = 0$; б) $\mu_{fbr} = 0.15$; в) $\mu_{fbr} = 0.4$

Рисунок 5 – Приклад сегментації зображення компактної групи при різних значеннях μ_{fbr}

На цифровому кадрі можуть бути присутніми зображення об'єктів, розміри яких іноді в кілька разів перевершують розміри зображень інших зірок на кадрі. Яскравість даних об'єктів може виходити за динамічний діапазон яскравості використовуваної CCD-матриці. Будемо називати яскравими зображення об'єктів, з відношенням сигнал / шум $q_{peak(j)}$ в стартовому пікселі більш наперед заданої константи. Зазвичай, зображення яскравих об'єктів містять різного роду артефакти, наприклад, «хвости» (blooming spikes) (рис. 6 (а)) або «дифракційні промені» (рис. 6 (б)), які можуть бути присутніми і на бінарному зображенні області сегментування.



а) – хвости; б) – дифракційні промені

Рисунок 6 – Артефакти зображення яскравого об'єкта

Значний розмір зображень яскравих об'єктів і наявність зазначених артефактів можуть призводити до їх перетину дифракційними променями та хвостами з зображеннями сусідніх об'єктів на цифровому кадрі. При перетині з зображеннями сусідніх об'єктів в область сегментування яскравої зірки входить більше одного піку. Внаслідок перевищення динамічного діапазону використовуваної CCD-матриці, на зображенні яскравої зірки формується

множина пікселів зі значеннями яскравості, близькими до гранично допустимих. У ряді випадків це призводить до виділення декількох аномальних піків на зображенні, що можуть стати стартовими точками сегментації. Для сегментації з прийнятною точністю зображень яскравих об'єктів виникає необхідність видалення надлишкових сегментів, виділених зі стартовим пікселем в аномальних піках. Пікселі, віднесені до вказаних сегментів, мають бути розподілені між іншими сегментами, в тому числі сегментом, що відповідає зображенню яскравої зірки. Зображення об'єктів, які перетинають артефакти яскравої зірки, не повинні бути видалені. Інакше кажучи, після попереднього виділення піків отримується стартовий піксель для сегментації зображення яскравої зірки. Існує множина виділених піків θ_{npeak} , що входять в зображення об'єкта Ω_{sbobj} , частина піків з яких формується джерелами випромінювання. Сегменти, отримані в результаті сегментації зі стартовим пікселем в зазначених піках, мають бути виключені з результатів сегментації. Пікселі зазначених сегментів розподіляються між іншими сегментами. Через можливий перетин артефактів зображення яскравої зірки з зображеннями кількох близько розташованих об'єктів в зображенні об'єкта може бути присутнім статистично залежне зображення компактної групи об'єктів. У зв'язку з цим, перед виключенням помилкових сегментів яскравої зірки необхідно провести розділення зображення компактної групи об'єктів з використанням раніше розглянутого методу сегментації зображень компактної групи об'єктів. В результаті зображення об'єкта Ω_{sbobj} поділяється на множину дочірніх сегментів. Зображення ℓ -го виділеного сегмента з цієї множини може бути як сегментом зображення розглянутої яскравої зірки, так і зображенням довколишнього об'єкта. При виділенні зображення довколишнього об'єкта з зображення компактної групи, до нього відносимо пікселі зображення, що виділяється, а також незначну частину пікселів, що належать зображенню яскравої зірки. При виділенні зображення зі стартовим пікселем в хибному піку, практично всі пікселі, що відносяться до виділеного зображення, належать зображенню яскравої зірки. Як критерій віднесення виділеного сегмента до зображення яскравої зірки використовується відношення l_{brsg} між загальною кількістю пікселів в отриманому сегменті і кількістю пікселів отриманого сегменту, які перетинають зображення яскравої зірки, яка перевищує задане критичне значення:

$$l_{brsg} = \frac{N_{pixl}}{N_{pixobj}} > \mu_{brsg}, \quad (7)$$

де N_{pixobj} – кількість пікселів, віднесених до сегменту яскравого об'єкта; N_{pixl} – кількість пікселів ℓ -го сегмента ω_{pixl} ; μ_{brsg} – граничний коефіцієнт віднесення ℓ -го сегмента ω_{pixl} до зображення яскравого об'єкта.

В результаті реалізації запропонованого методу сегментації зображення

яскравого об'єкта, з одного боку проводиться поділ зображення компактної групи об'єктів, з іншого – виключаються сегменти зображення яскравої зірки, сформовані зі стартовими пікселями в помилкових піках. Пікселі виключених сегментів додаються до сегменту зображення яскравого об'єкта. На досліджуваних цифрових кадрах можуть бути присутніми зображення об'єктів з ненульовим видимим переміщенням протягом часу експозиції. За рахунок переміщення об'єкта, його зображення на цифровому кадрі стає протяжним (втягнутим) вздовж напрямку видимого руху. Протяжне зображення на цифровому кадрі, зазвичай, фрагментовані. Кількість і розмір фрагментів залежать як від умов спостереження, так від шляху, який проходить об'єкт за час експозиції. За рахунок рівномірного переміщення об'єкта протягом часу експозиції, перепади яскравості між пікселями фрагментів протяжного зображення, в більшості випадків, незначні.

Перед сегментацією протяжного зображення для кожного його фрагмента на цифровому кадрі попередньо виділяється пік. На етапі виділення зображень одиночних об'єктів, для кожного виділеного піку протяжного зображення буде отримано сегмент, який є частиною протяжного зображення. У зв'язку з цим, виникає необхідність об'єднання сусідніх фрагментів зображення в єдине протяжне зображення. Під фрагментом зображення розуміється частина протяжного зображення, яскравість якого монотонно зменшується від піку фрагмента до його країв. Під сегментом протяжного зображення розуміється сукупність об'єднаних зображень фрагментів. На етапі виділення окремого кадру до бінарного зображення об'єкта відносять пікселі, яскравість яких на зображенні області сегментування перевищує заздалегідь задане критичне значення. Для більшості фрагментів протяжного зображення на етапі виділення одиночного зображення буде отримано загальний сегмент Ω_{sbobjj} . На етапі сегментації інформація про тип зображення, що сегментується зі стартовим пікселем в піку j -го зображення об'єкта, відсутня. Виділений на кадрі пік може належати до одного з трьох типів зображень об'єктів: одиночного, зображення компактної групи, протяжного зображення. У зв'язку з цим, прийняття рішення про тип зображення, що сегментується, пропонується проводити за оцінкою відмінності між результатами сегментації обох типів зображень об'єктів. Таким чином, для піку j -го зображення об'єкта, який увійшов в сегмент Ω_{sbobjj} , сегментація проводиться двічі ((в припущенні, що це протяжне зображення і що це зображення компактної групи). При сегментації фрагмента як протяжного зображення виникає необхідність провести об'єднання суміжних фрагментів в єдине протяжне зображення. Для можливості порівняння результатів сегментації зображення в припущенні про компактну групу і протяжене зображення сегментацію фрагмента як протяжного зображення доцільно проводити також з кожного виділеного піку. Сегментація фрагмента як протяжного зображення, в цілому, аналогічна сегментації зображення об'єкта компактної групи. Для об'єднання фрагментів протяжного зображення пропонується задати критичне значення допустимого зростання яскравості. При

незначних перепадах яскравості між фрагментами зображення, до j -го сегментованого фрагменту приєднуються пікселі сусідніх фрагментів, що входять в сегмент Ω_{sbobjj} . Різниця між кількістю пікселів, віднесених до сегменту в припущенні про протяжне зображення і зображення компактної групи, залежить від особливостей сегментованого зображення об'єкта на цифровому кадрі. У зв'язку з цим, як ознаку сегментації протяжного зображення введемо відношення між кількістю пікселів l_{nbsm} , віднесених до зображення компактної групи і протяжного зображення, сегментованих зі стартовим пікселем в одному піку (рис. 7):

$$l_{nbsm} = \frac{|N_{pixsm}|}{|N_{pixobj}|} > \mu_{nbsm}, \quad (8)$$

де N_{pixsm} – кількість пікселів множини Ω_{pixsm} ; N_{pixobj} – кількість пікселів множини Ω_{pixobj} ; μ_{nbsm} – граничний (мінімально допустимий) коефіцієнт відношення кількості пікселів для сегментації протяжного зображення.

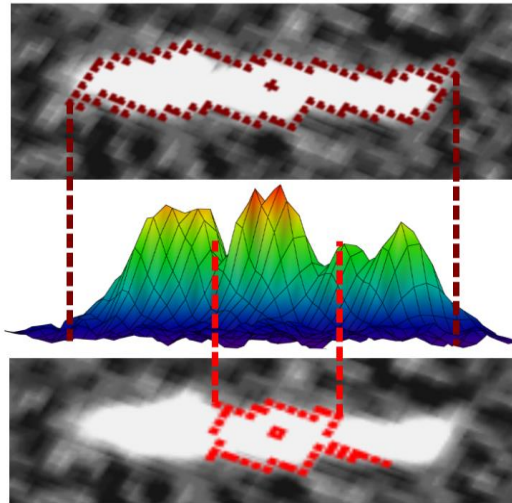


Рисунок 7 – Приклад сегментації фрагменту зображення як зображення компактної групи та як протяжного зображення

Зображення об'єктів з ненульовим видимим переміщенням в плинні часу експозиції змазуються власним рухом і мають зображення, форма якого витягнута вздовж напрямку його видимого руху. У той же час, одиночні об'єкти, а також компактні групи об'єктів залишаються нерухомими в плинні часу експозиції. Форма таких зображень компактних груп об'єктів найчастіше, близька до кругової. Для оцінки ступеня витягнутості зображення об'єкта в роботі використовується оцінка значення ексцентриситету $\hat{\epsilon}$. Найчастіше цифрові астрономічні зображення використовуються одночасно для вирішення відразу декількох наукових завдань – астрометрії, фотометрії, виявлення об'єктів з ненульовим видимим рухом (астероїдів, метеоритів), спостереження та оцінки параметрів руху штучних супутників землі (ШСЗ). У зв'язку з цим,

ефективним може бути тільки спільне використання всіх раніше розглянутих методів сегментації зображень об'єктів. Обчислювальний метод виділення зображень одиночних об'єктів можна розглядати і як самостійний метод, і як метод попередньої обробки, щоб позначити зображення об'єктів, відмінних від одиночних. Наприкінці розділу розглянуто особливості спільного використання розроблених методів.

У третьому розділі пропонуються обчислювальні методи оцінки параметрів фонові підкладки та кутового положення об'єктів за цифровими зображеннями, що дозволяють забезпечувати необхідну точність оцінки положення об'єкта на цифровому кадрі.

Припустимо, що параметри фонові підкладки не змінюються як в виділеному зображенні гіпотетичного об'єкта, так і в його околі. Для підвищення потенційної точності оцінки стану об'єкта на цифровому кадрі будемо оцінювати параметри фонові підкладки на множині $\Omega_{SIFP(n)}$, що складається з $N_{SIFP(n)}$ пікселів, які знаходяться в околі виділеного зображення $\Omega_{SIFP(s)}$. Множина Ω_{SIFP} містить обидві введені множини пікселів $\Omega_{SIFP(s)}$ і $\Omega_{SIFP(n)}$, тобто $N_{SIFP} = N_{SIFP(s)} + N_{SIFP(n)}$. Іншими словами, вважається, що існує можливість поділу пікселів Ω_{SIFP} на пікселі, що містять або не містять зображення об'єкта. Розглянемо задачу оцінювання параметрів фонові підкладки на основі зазначених вище припущень. При цьому слід враховувати, що серед пікселів Ω_{SIFP} можуть бути присутніми аномальні пікселі, тобто пікселі, яскравість яких не відповідає моделі зображення небесного об'єкта або моделі його фону. Для вирішення цієї задачі в дисертаційній роботі використано модель зображень на цифровому кадрі та модель фонові підкладки. Піксельна модель кругового зображення j -го об'єкта має такий вигляд:

$$A_{ikj} = A_{noise}x_{ik} + B_{noise}y_{ik} + C_{noise} + \frac{A_{Gjt}}{2\pi\sigma_{Gjt}} \times \exp\left\{\frac{1}{2\pi\sigma_{Gjt}}\left[(x_i - x_j(\Theta_{SH}))^2 + (y_k - y_j(\Theta_{SH}))^2\right]\right\}, \quad (9)$$

де A_{ik} – теоретична яскравість ik -го пікселя цифрового зображення; $A_{noise}, B_{noise}, C_{noise}$ – параметри фонові підкладки; $x_j(\Theta_{SH}), y_j(\Theta_{SH})$ – значення координат j -го гіпотетичного об'єкта на цифровому кадрі; σ_{Gj} – параметр форми моделі зображення j -го гіпотетичного об'єкта на цифровому кадрі; x_i, y_k – координати прив'язки центру ik -го пікселя на цифровому кадрі; Θ_{SHj} – вектор оцінюваних параметрів зображення j -го гіпотетичного об'єкта: $\Theta_{SHj} = (A_{noise}, B_{noise}, C_{noise}, x_j, y_j, A_{Gj}, \sigma_{Gj})$. Форма зображення в моделі і відповідні яскравості пікселів мають форму Гауссіана. Як критерій оцінки параметрів кругового зображення j -го об'єкта зазвичай використовується

мінімум суми квадратів відхилень між експериментальними A_{ikj}^* і теоретичними A_{ikj} яскравостями пікселів зображення j -го об'єкта:

$$F_{\Delta AGj}(\Theta_{SH}) = \sum_{i,k} (A_{ikj}^* - A_{ikj}(\Theta_{SH}))^2 \xrightarrow{\Theta_{SH}} \min. \quad (10)$$

Оцінюваними параметрами зображення j -го об'єкта є: положення $x_j(\Theta_{SH})$, $y_j(\Theta_{SH})$, модельна амплітуда гаусіани A_{Gj} , параметр форми σ_{Gj} , значення яскравості A_{noise} , B_{noise} , C_{noise} фонові підкладки. Мінімізація квадратичної форми (10) здійснюється за допомогою методу Левенберга-Марквардта з математичного пакета ALGLIB, призначеного для оптимізації параметрів нелінійних моделей. При спостереженні об'єкта зі слабким блиском в околі яскравого об'єкта залишки зображення останнього можуть сприйматися як зашумлення (фон). За таких умов адекватною моделлю фонові підкладки в локальному околі досліджуваних зображень гіпотетичних об'єктів є площина з довільним нахилом з невідомими параметрами:

$$\hat{A}_{iknoise}^*(\theta_{noise}) = A_{noise}x_{ik} + B_{noise}y_{ik} + C_{noise}, \quad (11)$$

де $\hat{A}_{iknoise}^*$ – модельна яскравість ik -го пікселя, що відповідає зображенню фонові підкладки; $\theta_{noise} = \{A_{noise}, B_{noise}, C_{noise}\}$ – параметри похилої фонові підкладки; x_{ik}, y_{ik} – значення координат ik -го пікселя множини Ω_{SIFP} .

Відзначимо, що спостережуваний об'єкт може бути одиночним, тобто мати зображення, яке не перетинається з зображеннями інших об'єктів. Для визначення параметрів $A_{noise}, B_{noise}, C_{noise}$ моделі фонові підкладки (11) без урахування аномальних пікселів будемо використовувати МНК-оцінку. Для виключення впливу аномальних пікселів застосуємо багатопроходовий МНК. Таким чином, завдання визначення екваторіальних координат об'єкту при відомих його прямокутних координатах в системі координат цифрового кадру можна звести до оцінки залежності між координатами об'єктів в двох прямокутних системах координат (СК): СК кадру (x, y) і ідеальній СК (ξ, η) . Процес розрахунку коефіцієнтів постійних пластинок виконується ітераційно, з уточненням на кожній k -й ітерації екваторіальних координат центру цифрового кадру $(\alpha_{0k}, \delta_{0k})$ за коефіцієнтами постійних пластинок, отриманими на попередній ітерації. За отриманими постійними пластинки і заданим в СК цифрового кадру координатам оптичного центру кадру (x_0, y_0) , з використанням кубічної моделі або моделі вищого ступеня, розраховується новий центр кадру в ідеальній системі координат (ξ_{0k}, η_{0k}) . Далі визначаються його координати в екваторіальній СК $(\alpha_{0k}, \delta_{0k})$. Ітераційний процес закінчується при досягненні заданої максимальної кількості ітерацій N_{iter} . Відзначимо, що у розглянутому методі передбачається, що основний внесок в

помилку редукції моделі походить від екваторіальних координат в каталозі. Це твердження вірне лише для довгофокусних оптичних систем спостереження, адже в них з-за малого масштабу поля зору можна знехтувати похибкою в вимірних координатах. Для короткофокусних оптичних систем спостереження похибка вимірювання істотно більше похибки каталогу. В цьому випадку доцільним є застосування запропонованого в дисертації метода з використанням зворотної моделі редукції:

$$\begin{cases} x_i = a_0 + a_1\xi_i + a_2\eta_i; \\ y_i = a_0 + a_1\xi_i + a_2\eta_i. \end{cases} \quad (12)$$

Коефіцієнти системи рівнянь (12) задають залежність між СК цифрового кадру і ідеальної СК. Отримані координати оптичного центру цифрового кадру в ідеальній СК (ξ_{0k}, η_{0k}) з використанням формул сферичної тригонометрії перетворюються в екваторіальні координати $(\alpha_{0k}, \delta_{0k})$. При досягненні заданої кількості ітерацій N_{iter} координати $(\alpha_{0k}, \delta_{0k})$ приймаються як уточнені екваторіальні координати оптичного центру кадру (α_0, δ_0) .

У четвертому розділі розглядаються результати аналізу показників якості оцінки кутових положень об'єктів в просторі з використанням редукційних поліномів свідчить, що використання зворотної моделі редукції дає переваги в короткофокусних оптичних системах. Так, використання зворотної моделі редукції підвищило кількість опорних зірок з 6510 до 6701. У той же час, в класі зірок, ототожнених із зоряним каталогом UCAC4, знизилася квантиль модулів відхилень по екваторіальним координатам на рівні 0.99. Для довгофокусних телескопів кращі результати досягнуті з застосуванням прямої редукційної моделі. Реалізовані методи в рамках ПЗ CoLiТес були застосовані в 4 обсерваторіях. Обсерваторії-користувачі ПЗ CoLiТес мають одні з кращих в світі показників точності по виявленню об'єктів в просторі. Науково-практичні результати, отримані з використанням ПЗ CoLiТес, визнані на міжнародному рівні.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-технічну задачу розробки ефективних обчислювальних методів сегментації та оцінки кутового положення астрономічних об'єктів в просторі за результатами аналізу цифрових зображень, що враховують специфічні умови астрономічних спостережень та особливості формування цифрових кадрів.

В результаті досліджень було отримано такі нові наукові результати.

1. Вперше запропоновано обчислювальний метод сегментації зображень одиночних об'єктів на цифрових зображеннях з попереднім використанням згладжуваючого цифрового фільтру низьких частот та вирівнюванням яскравості цифрового кадру, а також здійсненням операції розмикання з додатковою морфологічною реконструкцією, що дозволило зменшити кількість

помилкових виявлень об'єктів та маловимірних артефактів при обчислювальних витратах, близьких до мінімальних.

2. Вперше запропоновано обчислювальний метод сегментації протяжних зображень об'єктів на цифрових зображеннях, що дозволяє здійснювати сегментацію вхідних протяжних зображень, де присутні різні типи зображень локальних об'єктів (одиначних, компактної групи, протяжних) при обчислювальних витратах, близьких до мінімальних.

3. Досліджено можливість спільного використання розглянутих методів сегментації зображень об'єктів. Для сегментації зображень яскравих зірок, компактних груп об'єктів та протяжних зображень проводиться аналіз зміни яскравості пікселів цифрового зображення. Обчислювальний метод виділення зображень одиначних об'єктів можна розглядати і як самостійний метод, і як метод попередньої обробки, щоб позначити зображення об'єктів, відмінних від одиначних.

4. Розроблено метод оцінювання параметрів фонові підкладки цифрового зображення об'єкта при наявності аномальних пікселів, що дозволяє враховувати умови астрономічних спостережень для покращення показників точності оцінки положення об'єктів у просторі.

5. Розроблені обчислювальні методи оцінки кутового положення об'єктів в просторі з використанням прямої та зворотної координатної редукції дискретних зображень, що дозволило поліпшити якість апроксимації аберації для короткофокусних та довгофокусних оптичних систем спостереження.

6. Аналіз показників якості оцінки кутових положень об'єктів в просторі з використанням редукційних поліномів свідчить, що використання зворотної моделі редукції дає переваги в короткофокусних оптичних системах. Так, використання зворотної моделі редукції підвищило кількість опорних зірок з 6510 до 6701. У той же час, в класі зірок, ототожнених із зоряним каталогом UCAC4, знизилася квантілі модулів відхилень по екваторіальним координатам на рівні 0.99. Для довгофокусних телескопів кращі результати досягнуті з застосуванням прямої редукційної моделі.

7. Аналіз оцінки показників якості оцінки положення об'єктів на цифрових зображеннях свідчить, що операція відбраковування аномальних пікселів значно покращує показники точності оцінки стану об'єктів із зображенням, що характеризується малим відношенням сигнал/шум. Так, використання методів з видаленням аномальних пікселів майже удвічі зменшує середньоквадратичне відхилення оцінок прямого сходження і схилу.

8. Розроблені обчислювальні методи виділення і сегментації зображень об'єктів на цифрових зображеннях, а також метод оцінки параметрів зображень об'єктів на цифрових зображеннях успішно використовуються в рамках програмного комплексу автоматизованого виявлення астероїдів і комет CoLiTec. Використання ПЗ CoLiTec в обсерваторіях дозволило отримати одні з кращих показників точності по виявленню астрономічних об'єктів в світі. Ефективність роботи ПЗ CoLiTec з застосуванням запропонованих в дисертації методів визнано на міжнародному рівні.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Исследование точности оценки местоположения небесных объектов на ПЗС-кадрах / М.М. Безкровный В.Е. Саваневич, Н.С. Соковикова, Я.С. Мовсесян, А.В. Погорелов, А.Н. Дашкова, Н.Ю. Дихтярь, А.Б. Брюховецкий, Л.О. Михайлова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 4/2(70). С. 16–22.

2. The estimation of the object position on the digital CCD frame using the pixel model of the object image / N.S. Sokovikova, V.E. Savanevych, M.M. Bezkrvniy, A.V. Pogorelov, S.V. Khlamov // Scholars Journal of Engineering and Technology. 2015. Т. 3(2a).С. 153–165.

3. A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinates / V.E. Savanevych, O.B. Briukhovetskyi, N.S. Sokovikova, M.M. Bezkrvny, I.B. Vavilova, Yu.M. Ivashchenko, L.V. Elenin, S.V. Khlamov, Ia.S. Movsesian, A. M. Dashkova, A.V. Pogorelov // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2015. Т. 451 (3). С. 3287–3298. (Входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

4. Comparative analysis of the positional accuracy of CCD measurements of small bodies in the solar system software CoLiTec and Astrometrica / V.E. Savanevych, A.B. Briukhovetskyi, Yu.N. Ivashchenko, I.B. Vavilova, M.M. Bezkrvniy, E.N. Dikov, V.P. Vlasenko, N.S. Sokovikova, Ia.S. Movsesian, N.Yu. Dikhtyar, L.V. Elenin, A.V. Pohorelov, S.V. Khlamov // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. 2015. Т. 31 (6). Р. 302–313. (Входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

5. Метод исследования показателей точности оценок положения опорных звезд CCD-кадров / Я.С. Мовсесян, А.Н. Дашкова, В.Е. Саваневич, Н.Ю. Дихтярь, А.В. Погорелов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Вып. 69. 2015. С. 189–199.

6. Метод автоматического исследования статистических характеристик оценок параметров объектов, неподвижных на серии цифровых кадров одной серии / Н.Ю. Дихтярь, Я.С. Мовсесян, С.В. Хламов, А.В. Погорелов, В.Е. Саваневич // Всеукр. межведомств. научно-техн. сб. «Радиотехника». 2016. №184. С. 37–44.

7. Погорелов А.В., Саваневич В.Е. Оценка экваториальных координат объектов на цифровом кадре для длиннофокусных и короткофокусных телескопов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2016. № 25 (1197). С. 147–157.

8. Pohorelov, A., Savanevych V., Udovenko S. An Investigation Of The Reduction Model Power Influence On The Accuracy Of The Object's Position Assessment Using Relative Method // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 4/4(82). 2016. Pp. 42–49. (Входить до міжн. наукометричної бази Scopus).

Scopus).

9. Яркое выравнивание астрономических изображений с использованием медианного фильтра / В.П. Власенко, В.Е. Саваневич, А.В. Погорелов, А.Б. Брюховецкий // Всеукр. межведомств. научно-техн. сб. «Радиотехника». 2016. №185. С. 70–80.

10. Virtual observatory and CoLiTec software: modules, features, methods / A.V. Pohorelov, S.V. Khlamov, V.E. Savanevych, A.B. Briukhovetskyi, V.P. Vlasenko // Odessa Astronomical Publications. Vol. 29 (2016). P. 136–140.

11. CoLiTec software—detection of the near-zero apparent motion / S. Khlamov, V. Savanevych, O. Briukhovetskyi, A. Pohorelov // Proceedings of the International Astronomical Union: Cambridge University Press. 2017. Vol. 12. Issue S325 (Astroinformatics). P. 349–352. (Входит до міжн.ї наукометричної бази Scopus).

12. FrameSmooth software – new tool for the calibration of astronomical images / P.A. Dubovský, O.B. Bryukhovetskiy, S.V. Khlamov, I. Kudzej, Š. Parimucha, A.V. Pohorelov, V.E. Savanevych, V.P. Vlasenko // Open European Journal on Variable Stars. 2017. Vol. 180. P. 16–23.

13. CoLiTecVS - new tool for automated reduction of photometric observations / V. E. Savanevych, O.B. Briukhovetskyi, S.V. Khlamov, A.V. Pohorelov, V.P. Vlasenko, E.N. Dikov, P.A. Dubovský, I. Kudzej, Š. Parimucha // Odessa Astronomical Publications. 2017. Vol. 30. P.194–197.

14. Ukrainian database and atlas of light curves of artificial space objects / N.I. Koshkin, V. Savanevich, A. Pohorelov, L. Shakun, V. Zhukov, E. Korobeynikova, S. Strakhova, S. Moskalenko, V. Kashuba, A. Krasnoshchokov // Odessa Astronomical Publications. 2017. Vol. 30. P.226–229.

15. A method of immediate detection of objects with a near-zero apparent motion in series of CCD-frames / V.E. Savanevych, S.V. Khlamov, I.B. Vavilova, A.B. Briukhovetskyi, A.V. Pohorelov, D.E. Mkrtichian, V.I. Kudak, L.K. Pakuliak, E.N. Dikov, R.G. Melnik, V.P. Vlasenko, D.E. Reichart // Astronomy & Astrophysics. 2018. Vol. 609. A54. 11 p. (Входит до міжн. наукометричної бази Scopus).

16. Метод максимально правдоподобной оценки местоположения объектов компактной группы на ПЗС-кадре / Л.О. Михайлова, В.Е. Саваневич, Н.С. Соковикова, М.М. Безкровный, С.В. Хламов, А.В. Погорелов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 5/4(71). С. 16–22.

17. Погорелов А.В., Удовенко С.Г. Оценка параметров фоновой подложки изображения объекта на цифровых кадрах // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сборник научных трудов Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». 2016. № 72. С. 208–218.

18. Погорелов А.В., Саваневич В.Е., Брюховецкий А.Б. Сегментация изображений одиночных объектов на цифровых астрономических изображениях // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». 2017. № 76. С. 170–191.

19. Вычислительный метод сегментации изображений компактных групп

объектов на цифровых астрономических изображениях / А.В. Погорелов, В. Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий, С.Г. Удовенко // Біоніка інтелекта: науково-технічний журнал. 2017. Вып. 2(89). С. 133–141.

20. Погорелов А.В., Саваневич В.Е., Брюховецкий А.Б. Вычислительный метод сегментации протяженных изображений на цифровых изображениях // Радіоелектронні і комп'ютерні системи: науково-технічний журнал. 2017. № 4(84). С. 4–16.

21. Погорелов А.В., Саваневич В.Е., Брюховецкий А.Б. Вычислительный метод сегментации изображений ярких объектов на цифровых изображениях / А.В. Погорелов, В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сборник научных трудов Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». 2017. № 78. С. 228–242.

22. CoLiTecVS – A new tool for the automated reduction of photometric observations / I. Kudzej, V.E. Savanevych, O.V. Briukhovetskiy, S.V. Khlamov, A.V. Pogorelov, V.P. Vlasenko, P.A. Dubovsky, S. Parimucha // Astronomische Nachrichten. 2019. V. 340. P. 68–70. (Входить до міжн. наукометричної бази Scopus).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

23. Погорелов А.В., Безкровный М.М., Хламов С.В. Вычислительные и компьютерные методы открытия сверхновых // Сб. матер. 18-го междунауч. форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Т. 5. Харьков. 2014. С. 166–167.

24. CoLiTec – multifunction software for the CCD image processing [Електронний ресурс] / V. Savanevych, O. Bryukhovetskiy, N. Sokovikova, I. Movsesian, M. Dihtyar, A. Pogorelov // «International scientific and methodological conference Kolos 2014»: сб. материалов междунауч. научн. конф. Стасчин. Словакия. 2014. Режим доступа: http://www.astrokolonica.sk/joomla15/files/kolos2014/kolos2014_pdf.

25. Сравнительный анализ показателей точности ПЗС-измерений малых тел Солнечной системы программными обеспечениями CoLiTec и Astrometrica / В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий, Ю.Н. Иващенко, И.Б. Вавилова, М.М. Безкровный, Е.Н. Диков, В.П. Власенко, Н.С. Соковикова, Я.С. Мовсесян, А.В. Погорелов, С.В. Хламов // «15-та українська конференція з космічних досліджень»: сб. матер. конф. Одеса. 2015. С. 167.

26. Программа для автоматизированного открытия астероидов и комет CoLiTec: исследования и разработки / В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий, Н.С. Соковикова, С.В. Хламов, А.В. Погорелов, Я.С. Мовсесян, Н.Ю. Дихтяр // Міжн. наук. семінар «Радіометеори, метеори і міжпланетна складова: поблизу та на відстані»: сб. матер. семінару. Харків. 2016. С. 36–37.

27. Виртуальные обсерватории и автоматизированное открытие астероидов и комет CoLiTec: исследования и разработки. / В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий, В.П. Власенко, Н.С. Соковикова, С.В. Хламов, А.В. Погорелов, Я.С. Мовсесян, Н.Ю. Дихтяр // Всеукр. науч.-практ. конф. молодых ученых «Теоретичні та прикладні аспекти застосування інформаційних технологій в галузі природничих наук»: сб. матер. конф. Одеса. 2016. С. 94–95.

28. The brightness aligning of astronomical images with a use of median filter / V.P. Vlasenko, V.E. Savanevych, A.V. Pohorelov, O.B. Briukhovetskiyi // 16-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology»: сб. матер. научн. конф. Одесса. 2016. С.46–47.

29. Development of virtual observatories software / V.E. Savanevych, A.V. Pohorelov, O.B. Briukhovetskiyi, V.P. Vlasenko // 16-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology»: сб. матер. научн. конф. Одесса. 2016. С. 27–28.

30. CoLiTec – Обнаружение околонулевого видимого движения / В.Е. Саваневич, С.В. Хламов, А.Б. Брюховецкий, А.В. Погорелов // Праці VIII міжн. школи-семінару «Теорія прийняття рішень». Ужгород. 2016. С. 232–233.

31. CoLiTec – вычислительные методы обнаружения околонулевого видимого движения на серии CCD-кадров / В.Е. Саваневич, С.В. Хламов, А.Б. Брюховецкий, А.В. Погорелов, Я.С. Мовсесян, В.П. Власенко // VIII межд. научн.-практ. конф. «Современные проблемы и достижения в отрасли радиотехники, телекоммуникаций и информационных технологий»: сб. матер. конф. Запорожье. 2016. С. 176–178.

32. Softvér FrameSmooth – nový nástroj na kalibráciu astronomických snímok [Электронный ресурс] / P.A. Dubovský, O.B. Bryukhovetskiy, S.V. Khlamov, I. Kudzej, Š. Parimucha, A.V. Pohorelov, V.E. Savanevych, V.P. Vlasenko // 48th Conference on Variable Stars Research Prague. Czech Republic. 2016. Режим доступа к публ.: <http://var2.astro.cz/conference/2016/#abstrakta>.

33. CoLiTecVS – new tool for automated reduction of photometric observations / V.E. Savanevych, O.B. Briukhovetskiyi, S.V. Khlamov, A.V. Pohorelov, V.P. Vlasenko, E.N. Dikov, P.A. Dubovský, I.Kudzej, Š.Parimucha // 17- th Gamow Conference–School «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology»: сб. матер. конф. Одесса. Украина. 2017. С. 20.

34. Ukrainian database and atlas of light curves of artificial space objects /N. Koshkin, V. Savanevych, A. Pohorelov, V. Zhukov, S. Strakhova, S. Moskalenko, V. Kashuba, A. Krasnoshchokov //17-th Gamow Conference-School «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology»: зб. матер. конф. Одеса. 2017. С. 38.

35. Саваневич В.Є., Погорелов А.В., Хламов С.В. Портал для збереження та публікації фотометричних даних про космічні об'єкти // Наук.-практ. конф. «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи»: тези доповідей. Київ, 2017. С. 32–33.

36. Colitec – програмне забезпечення виявлення космічних об'єктів на серії CCD-кадрів / В.Є. Саваневич, О.Б. Брюховецький, В.П. Власенко, А.В. Погорелов, С.В. Хламов // Науко.-практ. конф. «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи»: тези доповідей. Київ. 2017. С. 96–97.

37. Pohorelov A. Object's image segmentation on astronomical digital images

observations // "International scientific and methodological conference Kolos 2017». 2017. Slovakia. Stakcin. P. 28.

38. Pohorelov A. The inverse median filter as a new approach to the CCD-frames calibration and processing of the big data-sets in automatic mode [Електронний ресурс] / A. Pohorelov, O. Briukhovetskyi, S. Khlamov, V. Vlasenko, V. Savanevych, P. Dubovský, I. Vavilova // European Week of Astronomy and Space Science, June 26–30, 2017: сб. матер. конф. Prague. Czech Republic. 2017.

39. CoLiTecVS – new tool for automated reduction of photometric observations / V. E. Savanevych, O. B. Briukhovetskyi, S. V. Khlamov, A. V. Pohorelov, V. P. Vlasenko, P. A. Dubovský, I. Kudzej, Š. Parimucha // 8th International Workshop on Astronomy and Relativistic Astrophysics, IWARA2018. 8–15 September. 2018: сб. матер. конф. Peru, USA. 2018. С. 41.

40. CoLiTec software for the astronomical data sets processing / S. V. Khlamov, V. E. Savanevych, O. B. Briukhovetskyi, A. V. Pohorelov, V. P. Vlasenko, E. N. Dikov // Proceedings of the 2nd International Conference on Data Stream Mining & Processing, DSMP 2018. Lviv. Ukraine. 2018. P. 227–230. (Входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

41. Программное обеспечение обработки данных оптических локаторов CoLiTec и результаты его апробации в астрономии / В. Е. Саваневич, С. В. Хламов, А. Б. Брюховецкий, Е. Н. Диков, А. В. Погорелов, В. П. Власенко // IX междунауч.-практ. конф. «Современные проблемы и достижения в отрасли радиотехники, телекоммуникаций и информационных технологий»: сб. матер. конф. Запорожье. 2018. С. 63–64.

42. Удовенко С. Г., Погорелов А. В., Дудінова О. Б. Модифікований метод сегментації бінаризованих зображень // Інтелектуальні системи та інформаційні технології: праці міжн. наук.-практ. конф. Одеса. 2019. С. 247–248.

АНОТАЦІЯ

Погорелов А. В. Обчислювальні методи визначення положення об'єктів у просторі за даними цифрових зображень. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертація присвячена підвищенню точності оцінки положення об'єктів в просторі за даними цифрових зображень за рахунок розробки нових і вдосконалення відомих обчислювальних методів сегментації та оцінки кутового положення об'єктів в просторі. Вперше запропоновано обчислювальний метод сегментації зображень об'єктів на цифрових зображеннях, що дозволяє здійснювати сегментацію різних типів зображень локальних об'єктів (одиначних, компактної групи, протяжних). Удосконалено метод оцінювання параметрів фонові підкладки цифрового зображення об'єкта при наявності

аномальних пікселів, що сприяє показників точності оцінки положення об'єктів у просторі. Отримали подальший розвиток обчислювальні методи оцінки кутового положення об'єктів в просторі, що дозволило поліпшити якість апроксимації аберації та підвищити загальну точність визначення координат об'єктів. Розроблені обчислювальні методи апробовані на практиці і впроваджені в програмному комплексі автоматизованого виявлення астероїдів і комет CoLiTec.

Отримані в дисертації результати можуть бути використані в різних програмних комплексах обробки цифрових зображень для сегментації і визначення кутових положень об'єктів з високою точністю (наприклад, в програмних комплексах для зоряної фотометрії, автоматизованого виявлення астероїдів і комет, контролю космічного простору).

Ключові слова: обробка зображень, сегментація об'єктів на цифрових зображеннях, оцінка кутового положення об'єктів у просторі, програмний комплекс CoLiTec.

АННОТАЦІЯ

Погорелов А.В. Вычислительные методы определения положения объектов в пространстве по данным цифровых изображений. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2021.

Диссертация посвящена повышению точности оценки положения объектов в пространстве по данным цифровых изображений за счет разработки новых и совершенствования известных вычислительных методов сегментации и оценки углового положения объектов в пространстве. Впервые предложен вычислительный метод сегментации изображений на цифровых изображениях, позволяющий осуществлять сегментацию различных типов изображений объектов (одиночных, компактной группы, протяженных). Усовершенствован метод оценивания параметров фоновой подложки цифрового изображения объекта при наличии аномальных точек, что позволяет повысить показатели точности оценки положения объектов в пространстве. Получили дальнейшее развитие методы оценки углового положения объектов в пространстве, что позволило улучшить качество аппроксимации аберации и повысить общую точность определения координат объектов. Разработанные методы апробированы на практике и внедрены в программном комплексе автоматизированного обнаружения астероидов и комет CoLiTec. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в различных программных комплексах обработки цифровых изображений для сегментации и определения угловых положений объектов с высокой точностью (например, в программных

комплексах для звездной фотометрии, автоматизированного обнаружения астероидов и комет, контроля космического пространства).

Ключевые слова: обработка изображений, сегментация объектов на цифровых изображениях, оценка углового положения объектов в пространстве, программный комплекс CoLiTec.

ABSTRACT

Pogorelov A.V. Computational methods for determining the position of objects in space using digital image data. – As manuscript.

The dissertation offers a solution to the current scientific and practical problem of developing effective computational methods for segmentation, fitting and estimation of the angular position of astronomical objects in space based on the results of digital image analysis, which would take into account specific conditions of astronomical observations and digital frames.

The scientific direction of automatic processing of digital frames of astronomical images is relatively new and continues to develop along with the improvement of hardware and software for digital observations. Determining the angular position of objects in space based on the results of observations with their preliminary segmentation on digital images determines the potential accuracy of the final results of astronomical data processing. However, the existing methods of segmenting images of objects in digital images do not always achieve the desired accuracy in determining the position of objects. The object of research in this work is the process of determining the position of objects on images that are segmented in digital frames, and the subject of research – computational methods of segmenting images of objects in a digital frame and determining the angular position of objects in space using segmented images.

Research methods are based on the use of the theory of rural methods, morphological image processing, the theory of mathematical statistics, parametric estimation and optimization theory, which allowed to develop: computational methods of image segmentation of single, bright, long and compact groups of objects on digital astronomical images; evaluation of the image parameters of the background substrate on digital images in the presence of abnormal pixels; method of estimating the angular position of objects in space with direct and inverse coordinate reduction of discrete images.

The paper proposes a computational method of segmentation of images of single objects on digital images with the prior use of a smoothing digital low-pass filter and equalization of the brightness of the digital frame, as well as the opening operation with additional morphological reconstruction, which reduced the number of erroneous measurements at computational costs close to the minimum. Segmentation of images of single objects is performed sequentially for all areas of segmentation. In each segmentation segment, only one segment is selected, the center of which coincides with the center of the segmentation area and at the same time is the peak of the

segmented image of the object. Thus, the operation of morphological reconstruction is reduced to the operation of isolating the connecting components.

A computational method of segmentation of long images of objects on digital images is proposed, which allows segmentation of input long images, where there are different types of images of local objects (single, compact group, long) at computational costs close to the minimum. To separate images of a compact group of objects, it is necessary to take into account the difference in brightness of the pixels in the image of the selected segment. In this regard, the halftone image of the selected segment is restored according to the original frame. The image of a compact group of objects in the proposed method is represented as a set of two-dimensional Gaussians, and the peak image of the selected segmentation object is used as a starting pixel to divide the images of the compact group. The method of estimating the parameters of the background substrate of a digital image of an object in the presence of anomalous pixels has been improved, which allows to take into account the conditions of astronomical observations to improve the accuracy of estimating the position of objects in space. It is assumed that the brightness of anomalous pixels does not correspond to either the model of the image of the object or the model of its background. To solve the problem of estimating the parameters of the background, the paper proposes a model of images in a digital frame and a model of the background substrate. The paper further developed computational methods for estimating the angular position of objects in space using direct and inverse coordinate reduction of discrete images, which improved the quality of aberration approximation for short-focus and long-focus optical observation systems and increase the overall accuracy of object coordinates. It is assumed that the main contribution to the model reduction error comes from the equatorial coordinates in the catalog. This statement is true only for long-focus optical observation systems, because in them due to the small scale of the field of view can be neglected error in the measured coordinates. For short-focus optical surveillance systems, the measurement error is significantly greater than the catalog error. In this case, it is advisable to use the method proposed in the dissertation using the inverse model of reduction.

The practical significance of the work is that the obtained theoretical results are implemented in practice and implemented in the block of intra-frame processing of the software complex of automated detection of asteroids and comets CoLiTec, one of the developers of which is the applicant. The developed methods and software that implements them were used in the Odessa Astronomical Observatory Odessa-Mayaki (Mayaki, Odessa region, Ukraine), the space research laboratory at Uzhgorod National University, the Western Ukrainian Center for Space Research Space Agency of Ukraine (Mukachevo, Ukraine). The implementation of the methods developed by the dissertation is confirmed by the relevant acts.

Keywords: image processing, segmentation of objects on digital images, estimation of the angular position of objects in space, CoLiTec software.

Підп. до друк 09.04.21. Формат 60x84 1/16. Умов. друк. арк. 1,6.
Тираж 100 прим. Ціна договірна. Зам. 09/04

Віддруковано в типографії ФОП Андреев К.В.
61157, Харків, вул. Богомольця, 9, кв. 50
Свідоцтво про державну реєстрацію
№24800170000045020 від 30.05.2003р.
ep.zakaz@gmail.com
тел. 063-993-62-73