

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

МОВСЕСЯН ЯНА САМВЕЛІВНА

УДК 519.6:004.932

ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ ВІДБОРУ ОПОРНИХ ЗІРОК  
НА ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор  
Саваневич Вадим Євгенович,  
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,  
завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Романова Тетяна Євгеніївна,  
Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного  
НАН України, провідний науковий співробітник відділу  
математичного моделювання та оптимального проекту-  
вання;

доктор технічних наук, професор  
Гороховатський Володимир Олексійович,  
Харківський навчально-науковий інститут  
ДВНЗ «Університет банківської справи», професор  
кафедри інформаційних технологій та вищої математики.

Захист відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розісланий «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Л.В. Колесник

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Обробка цифрових зображень – галузь, яка інтенсивно розвивається та знаходить з кожним роком нові застосування. Одним з таких є визначення положення об'єктів на зображенні та у просторі. Для високих показників точності визначення положення об'єктів у просторі за даними зображень використовується відносний метод. Згідно з ним положення об'єкту у просторі визначається відносно опорних об'єктів на зображенні, положення яких у просторі є відомим.

Вибір опорних об'єктів при реалізації відносного методу разом з точністю визначення положення об'єктів на цифрових зображеннях визначають потенційну точність спостережень. При цьому методи визначення положення об'єктів на цифрових зображеннях описані досить докладно [4]. Також має місце значна кількість статей, присвячених ототожненню кадрів [2, 5, 8]. У свою чергу, методи відбору опорних об'єктів на цифрових зображеннях досліджені та відображені в спеціальній літературі не досить повно. Тому актуальною є **науково-технічна задача** розробки та аналізу обчислювальних методів автоматичного відбору опорних зірок для оцінки кутових положень об'єктів у просторі за даними зображень.

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

У рамках даної тематики автор брав участь як виконавець, ним було розроблено обчислювальний метод автоматичного відбору опорних зірок на цифрових зображеннях та метод дослідження показників точності вимірювання кутового положення опорних зірок у просторі, які використовуються для максимізації показників точності визначення кутових положень об'єктів.

**Мета та завдання дослідження.** Мета роботи полягає у підвищенні показників точності оцінки кутових положень об'єктів у просторі за даними зображень за рахунок розробки та аналізу обчислювальних методів автоматичного відбору опорних зірок на цифровому зображенні.

Досягнення цієї мети забезпечується вирішенням часткових задач.

1. Розробка обчислювального методу автоматичного відбору опорних зірок

рок на цифровому зображенні.

2. Розробка обчислювального методу часткового попереднього ототожнення вимірювань цифрових зображень однієї серії.

3. Розробка обчислювального методу повного попереднього ототожнення цифрових зображень з істотною невизначеністю їх параметрів.

4. Розробка методу дослідження показників точності вимірювання кутового положення опорних зірок у просторі за даними зображень.

*Об'єкт дослідження* – сукупність вимірювань зірок, що сформовані на серії цифрових кадрів.

*Предмет досліджень* – процес відбору опорних зірок та визначення їх кутових положень у просторі за даними зображень.

**Методи досліджень.** Основні результати роботи отримані на основі теорії математичної статистики, статистичної теорії перевірки багатоальтернативних гіпотез та оцінки параметрів, що дозволили удосконалити обчислювальні методи ототожнення вимірювань об'єктів на серії цифрових зображень та ототожнення вимірювань кадру з об'єктами каталогу; розробити обчислювальний метод автоматичного відбору опорних зірок; удосконалити метод дослідження показників точності вимірювання кутового положення опорних зірок у просторі.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У рамках вирішення завдань дисертаційного дослідження отримані такі наукові результати.

1. Вперше запропоновано обчислювальний метод автоматичного відбору опорних зірок на цифрових зображеннях, який використовує розширену сукупність їх селективних ознак та багатоетапне збільшення порядку моделі редукції постійних пластинки з одночасним збільшенням кількості пар для їх розрахунку, що використовуються, та дозволяє з високою точністю визначати кутове положення об'єктів у просторі за даними зображень.

2. Удосконалено обчислювальний метод ототожнення вимірювань об'єктів на серії цифрових зображень у частині визначення початкового наближення параметрів попарної відповідності між двома множинами вимірювань об'єктів за допомогою процедури часткового попереднього ототожнення, що дозволяє підвищити надійність ототожнення об'єктів на серії цифрових зображень.

3. Удосконалено обчислювальний метод ототожнення вимірювань кадрів із об'єктами каталогу у частині визначення початкового наближення в умовах суттєвої невизначеності їх параметрів ототожнення за допомогою процедури повного попереднього ототожнення, що дозволяє підвищити надійність ототожнення вимірювань кадрів з об'єктами каталогу в умовах суттєвої невизначеності їх параметрів.

4. Набув подальшого розвитку метод дослідження показників точності вимірювань кутового положення опорних зірок у просторі за даними зображень, у частині проведення аналізу розширеної множини показників точності вимі-

рювань кутових положень опорних зірок за різними підвбірками даних.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів забезпечуються коректним використанням основних положень відомого та апробованого математичного апарату. Отримані нові наукові результати підтверджуються експериментальними дослідженнями та застосуванням даних результатів у програмному забезпеченні (ПЗ) автоматизованого виявлення астероїдів і комет CoLiTec.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблений у дисертаційній роботі обчислювальний метод автоматичного відбору опорних зірок на цифрових зображеннях дозволив значно підвищити показники точності оцінки кутових положень об'єктів. Так, при масштабі пікселя 2.8" середньоквадратичне відхилення (СКВ) екваторіальних координат опорних зірок по прямому піднесенню (RA) становило 0.08", а по схиленню (DE) – 0.09". Зазначені значення СКВ забезпечують виконання вимог Центру малих планет щодо точності оцінки кутових положень астероїдів у просторі. Крім того, розроблені методи стійкі до різних видів артефактів на цифровому зображенні, а саме: наявність на зображенні яскравого треку штучного супутника Землі (ШСЗ); зображення близьких об'єктів або об'єктів, зображення яких не мають піку.

Дослідження показників точності оцінок кутових положень опорних зірок свідчить про те, що частота критичних помилок при використанні розроблених методів у ПЗ CoLiTec нижча, ніж у існуючих його аналогів, наприклад, ПЗ Astrometrica.

Розроблені обчислювальні методи можуть бути використані в програмних комплексах обробки цифрових зображень для високоточного визначення кутових положень об'єктів, наприклад, у програмах автоматизованого виявлення малих тіл Сонячної системи на серії цифрових кадрів. Крім того, запропоновані методи можуть бути використані для визначення кутових положень об'єктів будь-якої природи при розпізнаванні цих об'єктів.

Розроблені в дисертаційній роботі методи були впроваджені в програмне забезпечення автоматизованого виявлення астероїдів та комет CoLiTec. На даний момент ПЗ CoLiTec використовується в Одеській астрономічній обсерваторії Odessa-Maya (с. Маяки, Одеська обл., Україна, МРС код – 583) та в лабораторії космічних досліджень ДВНЗ «Ужгородський національний університет». Також розроблені методи використовуються в рамках НДР № 307 «Динамічний інтелектуальний аналіз послідовностей нечіткої інформації за умов суттєвої невизначеності на основі гібридних систем обчислювального інтелекту» (№ ДР 0116U002539) в Харківському національному університеті радіоелектроніки та впроваджені в рамках навчального процесу. Документальним підтвердженням впровадження розроблених дисертантом обчислювальних методів є відповідні акти про впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні наукові та практичні результати, отримані в дисертаційній роботі, здобувач отримав самостійно [1 – 31]. Особис-

тий внесок автора в спільно опублікованих роботах такий: у [9] розроблено обчислювальний метод часткового попереднього ототожнення вимірювань цифрових зображень; у [13] розроблено обчислювальний метод повного попереднього ототожнення вимірювань цифрових зображень при значній невизначеності параметрів ототожнення; у [15] розроблено обчислювальний метод автоматичного відбору опорних зірок на цифрових зображеннях; у [7] розроблено метод дослідження показників точності кутового положення опорних зірок у просторі; у [3] запропоновано уточнення виразів для відхилень оцінок екваторіальних координат небесних об'єктів; у [2] отримано вирази для визначення початкового наближення для ототожнення вимірювань на кадрі; у [5, 8, 14] запропонований метод ототожнення вимірювань кадру з формулярами використовуваного зоряного каталогу з визначенням постійних пластинок; у [10, 11] запропоновані вирази для оцінки параметрів видимого руху об'єктів; у [1, 4, 6, 12] досліджені показники точності оцінок положення об'єктів у ПЗ CoLiTec, в тому числі за результатами спостережень астероїдів тридцяти найпродуктивніших обсерваторій світу, а також проведено порівняльний аналіз даних показників у ПЗ CoLiTec і Astrometrica.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Основні результати дисертації обговорено на: 12-тій міжнародній конференції «Asteroids, Comets, Meteors 2014», (Фінляндія, Хельсінкі, 30 червня – 4 липня, 2014 р.) [16]; 14-тій українській конференції з космічних досліджень (Україна, Ужгород, 8 – 12 вересня, 2014 р.) [17]; «40th COSPAR Scientific Assembly» (Росія, Москва, 2 – 10 серпня, 2014 р.) [18]; «Gaia-FUN-SSO-3 International Workshop 2014» (Франція, Париж, 24 – 26 листопада, 2014 р.) [23]; «International scientific and methodological conference KOLOS 2014» (Словаччина, Стакчин, 4 – 6 грудня, 2014 р.) [20]; 18 міжнародному форумі «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» [21]; 19 міжнародному форумі «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» [22]; «IAA Planetary Defense Conference 2015» (Італія, Фраскатті, 13 – 17 квітня, 2015 р.) [19]; 15-тій українській конференції з космічних досліджень (Україна, Одеса, 24 – 28 серпня, 2015 р.) [24]; International meeting on variable stars research «KOLOS 2015» (Словаччина, Стакчин, 3 – 5 грудня, 2015 р.) [25]; Міжнародному науковому семінарі пам'яті Б.Л. Кашеєва до 96-річчя з дня народження «Радіометори, метеори і міжпланетна складова: поблизу та на відстані» (Україна, Харків, 15 березня, 2016 р.) [26]; Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених «Теоретичні та прикладні аспекти застосування інформаційних технологій в галузі природничих наук» (Україна, Одеса, 20 – 22 квітня, 2016 р.) [27]; «16-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School» (Україна, Одеса, 14 – 20 серпня, 2016 р.) [28].

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 13 наукових статтях у профільних періодичних наукових виданнях України, 2 статті [4, 6] – у журналах, що входять до наукометричної бази «Scopus», а також

13 тез у матеріалах та збірниках науково-технічних конференцій. Здобувач є співавтором 2 авторських прав [30, 31] на програмний код.

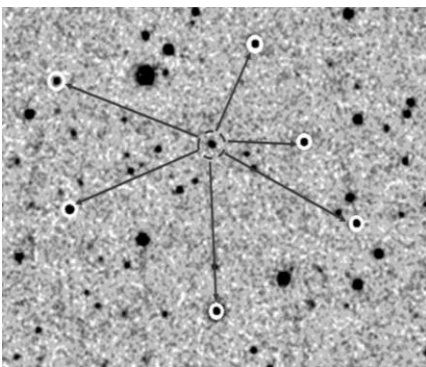
**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаної літератури, трьох додатків. Повний обсяг дисертації становить 190 сторінку тексту, (з них 155 с. – основного тексту), містить 53 рисунка (19 с.), 13 таблиць (10 с.), список використаних літературних джерел із 209 найменувань (22 с.) та 3 додатки (12 с.).

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

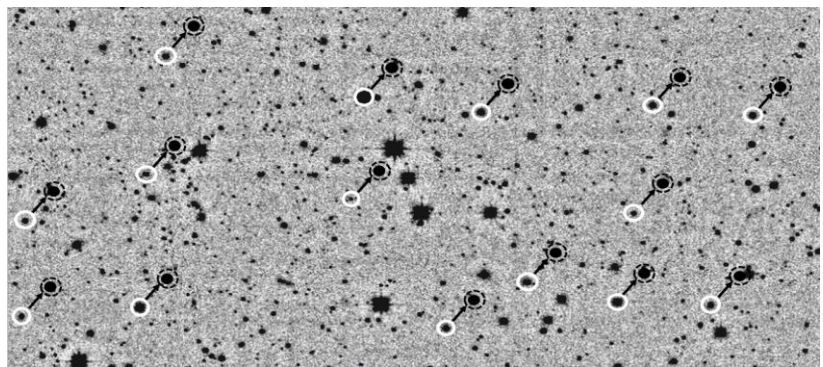
У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету досліджень, викладено короткий зміст дисертації та отриманих у ній результатів, виділено їх наукову новизну та практичну значимість.

У **першому розділі** проведено аналіз літератури за темою дисертації, досліджено існуючі методи визначення кутового положення об'єктів у просторі за даними зображень. Також розглянуто особливості умов формування вимірювань на цифрових зображеннях та наявність на них різних типів артефактів.

У розділі наведено обґрунтування використання в роботі відносного методу (рис. 1а) та необхідності якісного відбору опорних зірок (рис. 1б). Також проведено критичний аналіз відомих методів відбору опорних зірок на цифрових зображеннях та програмних комплексах, що їх реалізують. Зазначено, що методи відбору опорних зірок на цифрових зображеннях у спеціальній літературі відображені досить обмежено. Також проведено аналіз літератури та існуючих методів ототожнення об'єктів на цифрових зображеннях і методів дослідження показників точності оцінок кутових положень опорних зірок у просторі за даними зображень. На основі наведених матеріалів сформульовано задачу дослідження.



а)



б)

Рисунок 1 – Графічне відображення а) відносного методу з використанням опорних об'єктів; б) методу ототожнення об'єктів

У **другому розділі** удосконалено обчислювальний метод **ототожнення вимірювань об'єктів на серії цифрових зображень** шляхом визначення почат-

кового наближення параметрів попарної відповідності між двома множинами вимірювань об'єктів за допомогою використання процедури часткового попереднього ототожнення.

Для формування множини опорних зірок вимірювання кадру та зірки каталогу попередньо ототожнюються. Для цього відповідна задача про призначення вирішується угорським методом. Проте існуючі методи ототожнення не дають очікуваного результату при відсутності або поганому початковому наближенні. Задача ототожнення вимірювань кадру та зірок каталогу в цьому випадку може бути вирішена повним перебором пар «вимірювання-зірка», що ототожнюються. Але при великій кількості вимірювань на кадрі даний метод не може бути реалізованим за прийнятний час. Для ототожнення  $n$  вимірювань кількість гіпотез про сполучення пар «вимірювання-зірка» становить  $n!$ . Тому використовуються різні апріорні відомості, які дозволяють скоротити кількість гіпотез, що перебираються.

Метод часткового попереднього ототожнення застосовується для ототожнення вимірювань на серії кадрів. Тому можна вважати, що зазвичай об'єкти на одній серії кадрів відрізняються лише параметрами зсуву, а поворот та зміна масштабу майже відсутні.

Суть методу часткового попереднього ототожнення полягає у наступному. Висуваються гіпотези про сполучення вимірювань різних кадрів, що належать одному об'єкту. Кожній гіпотезі про сполучення відповідають умовні оцінки зсуву:

$$\Delta_{xi} = x_{1(i)} - x_{2(i)}; \Delta_{yi} = y_{1(i)} - y_{2(i)}, \quad (1)$$

де  $x_{1(i)}, y_{1(i)}, x_{2(i)}, y_{2(i)}$  – координати вимірювань одного й того ж  $i$ -го об'єкта (оцінки координат об'єкта) кадрів у системі координат базового кадру.

При цьому безумовною оцінкою параметрів зсуву між кадрами вважається та умовна оцінка, яка відповідає гіпотезі про сполучення пар вимірювань з найбільшою вагою:

$$\bar{\Delta}_x = \sum_{i=1}^{N_{ident}} \Delta_{xi} / N_{ident}; \bar{\Delta}_y = \sum_{i=1}^{N_{ident}} \Delta_{yi} / N_{ident}, \quad (2)$$

де  $N_{ident}$  – кількість пар, що використовуються для оцінки параметрів зсуву.

У якості ваги гіпотез про сполучення пар вимірювань кадрів, що ототожнюються, використовується кількість підтверджень, тобто кількість кругових областей підтвердження, яким належить не менше одного вимірювання іншого кадру. Пошук параметрів зсуву триває до знаходження першої гіпотези, в якій кількість підтверджень буде вище наперед заданої мінімально допустимої кількості підтверджень.

Проте, для отримання початкового наближення при значній невизначено-



сті параметрів ототожнення метод часткового попереднього ототожнення використовувати неможливо. У зв'язку з цим розроблено метод повного попереднього ототожнення. При невизначеності відносно шести параметрів ототожнення, а саме параметрів зсуву кадру, кута повороту камери та масштабів пікселя в якості початкового наближення необхідно отримати шість параметрів лінійних постійних пластинок. Для цього достатньо три зірки на кадрі, що складають трикутник первинного ототожнення.

Суть методу повного попереднього ототожнення полягає в наступному. Перебираються зірки як вершини трикутників ототожнення на кадрі та в каталозі. Кожній такій парі трикутників відповідає гіпотеза «первинного ототожнення» про відповідність трійок кадру та каталогу, за допомогою якої визначаються умовні оцінки параметрів ототожнення.

Для вибору трійок зі сторони кадру формується множина  $\Omega_{bl50}$  найяскравіших вимірювань, що складається з  $N_{bl50}$  претендентів у трійку первинного ототожнення з урахуванням їх рівномірного розподілу на кадрі.

Також формується множина  $\Omega_{bl100}$  найяскравіших вимірювань кадру, що складається з  $N_{bl100}$  ( $N_{bl100} = k_{blob} \cdot N_{bl50}$ ) елементів з урахуванням їх рівномірного розподілу на кадрі. Множина  $\Omega_{bl100}$  використовується для підтвердження гіпотез первинного ототожнення (формування ваги чергової гіпотези про відповідність трійок кадру та каталогу).

На базі зоряного каталогу формується множина  $\Omega_{star100}$  ( $|\Omega_{star100}| = k_{star} \cdot N_{bl50}$ ) формулярів каталогу з урахуванням їх рівномірного розподілу на ділянці зоряного неба, що досліджується. Також для підтвердження гіпотез первинного ототожнення формується множина  $\Omega_{star200}$ , що складається з  $N_{st200}$  ( $N_{st200} = k_{star} \cdot N_{st100}$ ) формулярів каталогу на ділянці зоряного неба.

Потім перебираються вимірювання даних множин як елементів трійок первинного ототожнення від кадру та каталогу.

Вибір вимірювання як елементів трійок первинного ототожнення від кадру відбувається наступним чином. Вибір першого вимірювання трійки виконується без умов. Чергове вимірювання кадру може бути використано як друга точка трійки первинного ототожнення, якщо його координати відповідають умові:

$$r_{(1)(2)} = \sqrt{(y_{1(k)} - y_{2(k)})^2 + (x_{1(k)} - x_{2(k)})^2} \geq 0.5 k_h (R_{CCD(x)} + R_{CCD(y)}). \quad (3)$$

Третя точка трійки вибирається так, щоб довжина перпендикуляру  $r_{trian}$  на пряму, що проходить через першу та другу точки трійки первинного ототожнення, відповідала умові:

$$r_{trian} \geq h_{trian}, \quad (4)$$

$$\text{де } r_{\text{trian}} = \frac{|(y_{2(k)} - y_{1(k)}) \cdot x_{3(k)} + (x_{1(k)} - x_{2(k)}) \cdot y_{3(k)} + y_{1(k)} \cdot x_{2(k)} - x_{1(k)} \cdot y_{2(k)}|}{\sqrt{(y_{2(k)} - y_{1(k)})^2 + (x_{1(k)} - x_{2(k)})^2}}; \quad (5)$$

$$h_{\text{trian}} = k_{\Delta 12} \sqrt{(x_{2(k)} - x_{1(k)})^2 + (y_{2(k)} - y_{1(k)})^2}. \quad (6)$$

Далі перебираються зірки як елементи трійок первинного ототожнення від каталогу. До зірок, що входять до трійки з боку каталогу, не висуваються ніякі вимоги, окрім того, що в трійку має увійти три різні зірки з множини  $\Omega_{\text{star}100}$ .

Як і трійка вимірювань кадру, трійка зірок каталогу характеризується значеннями кутів відповідних вершин трикутника. Координати положення зірок каталогу представлені в сферичній системі координат, а саме в екваторіальній системі координат.

У роботі використовується площа ідеальної астрофотографії для розрахунку кутів вершин трійки первинного ототожнення з боку каталогу. Для цього визначаються тангенціальні координати зірок каталогу, що використовуються в площині ідеальної астрофотографії з заданими екваторіальними координатами  $(\alpha_0, \delta_0)$  оптичного центру кадру, відповідно до виразів:

$$\xi_{j(k)} = \frac{\cos \delta_{j(k)} \cdot \sin(\alpha_{j(k)} - \alpha_0)}{\cos \delta_0 \cdot \cos \delta_{j(k)} \cdot \cos(\alpha_{j(k)} - \alpha_0) + \sin \delta_0 \cdot \sin \delta_{j(k)}}; \quad (7)$$

$$\eta_{j(k)} = \frac{\cos \delta_0 \cdot \cos(\alpha_{j(k)} - \alpha_0)}{\cos \delta_0 \cdot \cos \delta_{j(k)} \cdot \cos(\alpha_{j(k)} - \alpha_0) + \sin \delta_0 \cdot \sin \delta_{j(k)}}, \quad (8)$$

де  $\alpha_{j(k)}, \delta_{j(k)}$  – кутові координати  $j(k)$ -го об'єкта, що містяться в зоряному каталозі, що використовується.

Після вибору трійок первинного ототожнення зі сторони кадру та каталогу обчислюються кути зазначених трикутників:

$$\sin \gamma_{1fr} = \left( \frac{x_2 y_3 - y_2 x_3}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2} \cdot \sqrt{x_3^2 + y_3^2}} \right); \quad \cos \gamma_{1fr} = \left( \frac{x_2 x_3 + y_2 y_3}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2} \cdot \sqrt{x_3^2 + y_3^2}} \right); \quad (9)$$

$$\sin \gamma_{2fr} = \left( \frac{x_1 y_3 - y_1 x_3}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2} \cdot \sqrt{x_3^2 + y_3^2}} \right); \quad \cos \gamma_{2fr} = \left( \frac{x_1 x_3 + y_1 y_3}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2} \cdot \sqrt{x_3^2 + y_3^2}} \right); \quad (10)$$

$$\sin \gamma_{3fr} = \left( \frac{x_1 y_2 - y_1 x_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2} \cdot \sqrt{x_2^2 + y_2^2}} \right); \quad \cos \gamma_{3fr} = \left( \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2} \cdot \sqrt{x_2^2 + y_2^2}} \right). \quad (11)$$

На основі отриманих тангенціальних координат зірок каталогу по аналогії з виразами (9) – (11) визначаються кути трикутника, з боку зоряного каталогу.

Після обчислення кутів трикутників первинного ототожнення відбувається сполучення зазначених трикутників первинного ототожнення з боку кадру та каталогу. Перш за все, дві трійки первинного ототожнення перевіряються на ідентичність кутів. Зірки двох (кадру і каталогу) трійок вважаються попередньо тотожними, якщо відхилення відповідних кутів у цих трикутниках не перевищують наперед заданого параметру  $\Delta\gamma$ :

$$|\gamma_{1fr} - \gamma_{1cat}| < \Delta\gamma; |\gamma_{2fr} - \gamma_{2cat}| < \Delta\gamma; |\gamma_{3fr} - \gamma_{3cat}| < \Delta\gamma, \quad (12)$$

де  $\gamma_{i fr}$ ,  $\gamma_{i cat}$  – кути трикутника, які відповідають трійці первинного ототожнення з боку кадру та каталогу відповідно;  $\Delta\gamma$  – гранично допустиме відхилення значень відповідних кутів трикутників первинного ототожнення.

Кінцевим етапом обчислювального методу є підтвердження гіпотез про параметри ототожнення кадру та каталогу, для яких використовуються додаткові множини  $\Omega_{bl100}$  та  $\Omega_{star200}$ . Підтвердження відбувається аналогічно до підтвердження в методі часткового попереднього ототожнення. Пошук відповідної трійки первинного ототожнення триває до знаходження першої гіпотези, у якій кількість підтверджень буде вище наперед заданої мінімально допустимої кількості підтверджень.

Основні результати розділу опубліковані в роботах [2, 5, 8, 9, 13].

**У третьому розділі** розроблений обчислювальний метод автоматичного відбору опорних зірок на цифровому зображенні.

Методи часткового попереднього та повного попереднього ототожнення дозволяють отримати лінійні постійні пластинки  $(a_{pl1}, b_{pl1}, c_{pl1})$  та  $(a_{pl2}, b_{pl2}, c_{pl2})$ , що визначають зв'язок між тангенціальною (ідеальною) системою координат і системою координат цифрового кадру:

$$\begin{cases} \xi = a_{pl1} \cdot x + b_{pl1} \cdot y + c_{pl1}; \\ \eta = a_{pl2} \cdot x + b_{pl2} \cdot y + c_{pl2}, \end{cases} \quad (13)$$

де  $\xi$  та  $\eta$  – тангенціальні координати опорних зірок;  $x, y$  – координати опорних зірок у системі координат цифрового кадру.

Проте лінійних постійних пластинок не достатньо для ототожнення вимірювань кадру та зірок каталогу при великих розмірах поля зору. З їх використанням, як правило, ототожнюються лише зірки, які знаходяться в центральній частині кадру. Найчастіше при підсумковому перерахунку координат СК цифрового кадру в екваторіальні координати використовується кубічна модель постійних пластинок, що забезпечує надійне ототожнення та вимірювання положення на всьому кадрі. Для надійного отримання кубічних постійних пластинок необхідно

більше пар «вимірювання-зірка». Однак необхідна для цього кількість пар не може бути ототожнена з використанням лінійних постійних пластинок.

Таким чином, суть методу автоматичного відбору опорних зірок визначається протиріччям між необхідністю використання не менш як кубічної моделі постійних пластинок і малою кількістю ототожнених пар «вимірювання-зірка». Дане протиріччя долається багатоетапним збільшенням порядку постійних пластинок із одночасним збільшенням кількості пар, що використовуються для їх розрахунку.

Для забезпечення практично однакової точності вимірювань координат об'єктів на всьому кадрі доцільно опорні зірки розподілити рівномірно (рис. 2). Концентрація опорних зірок у якійсь ділянці кадру (наприклад, у центрі) підвищує точність вимірювань цієї ділянки за рахунок її зниження в інших.

Крім того, рівномірний розподіл на кадрі кандидатів у опорні зірки допомагає уникнути випадку, при якому в одній області кадру має місце велика кількість «яскравих» зірок або проліт яскравого ШСЗ (рис 3).

Якщо зазначені випадки не виключаються з розгляду, то досить часто виникають помилки при ідентифікації відомих об'єктів та ототожнення цілих кадрів

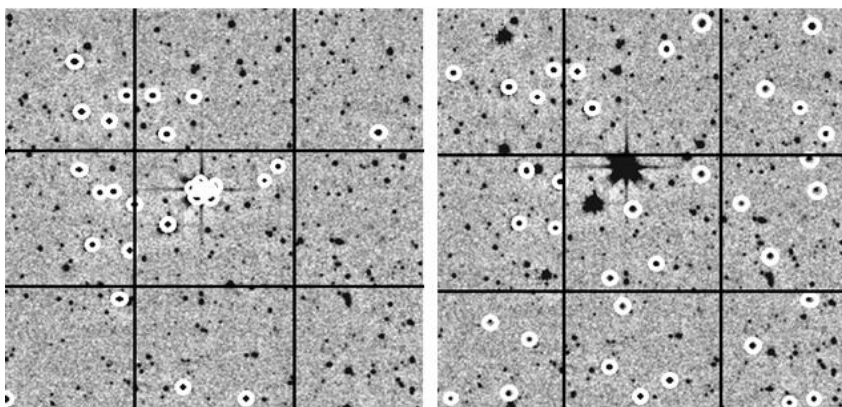
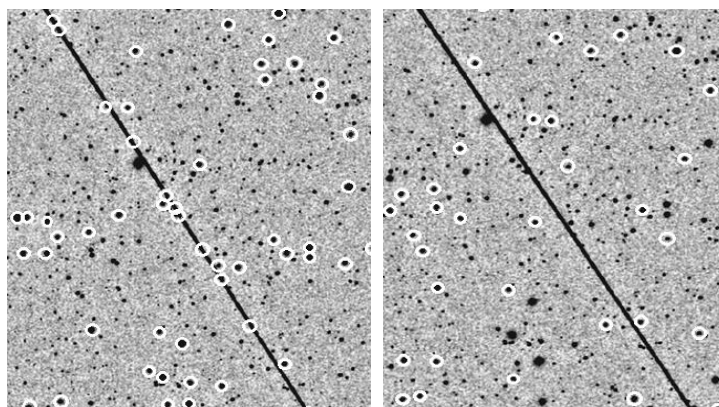


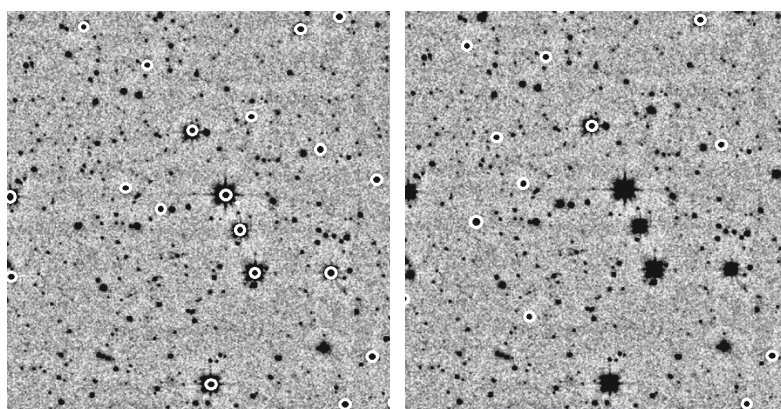
Рисунок 2 – Рівномірний розподіл на цифровому зображенні вимірювань кандидатів в опорні зірки



а)

б)

Рисунок 3 – Зображення на кадрі з ШСЗ  
а) найяскравіших зірок; б) опорних зірок



а)

б)

Рисунок 4 – Зображення на кадрі а) найяскравіших зірок; б) опорних зірок



може стати ненадійним.

Обчислювальний метод автоматичного відбору опорних зірок включає формування множини найяскравіших вимірювань кадру та каталогу відповідно. Однак не всі найяскравіші вимірювання на кадрі є зірками, бувають випадки присутності на зображенні яскравих помилкових вимірювань (рис. 4).

Для покращення показників точності оцінок кутового положення опорних зірок у просторі за даними зображень за рахунок підвищення показників точності визначення постійних пластинок, після ототожнення проводиться відбраковування значної кількості ототожнених пар. Відбраковування проводиться за певними критеріями (рис. 5).

Використання «близьких об'єктів» може призвести до помилок переплутування вимірювань та помилкового ототожнення в цілому (рис. 5б). Щоб уникнути помилок ототожнення для оцінки точності кутового положення об'єктів у просторі за даними зображень, вилучаються вимірювання, що розташовані один до одного ближче, ніж наперед задана гранично допустима відстань:

$$\sqrt{(x_{meainfr} - x_{meamnfr})^2 + (y_{meainfr} - y_{meamnfr})^2} \leq r_{mea\_group}, \quad (14)$$

де  $x_{meainfr}$ ,  $y_{meainfr}$  – координати об'єктів, що містяться у вимірюваннях близьких об'єктів в СК цифрового кадру.

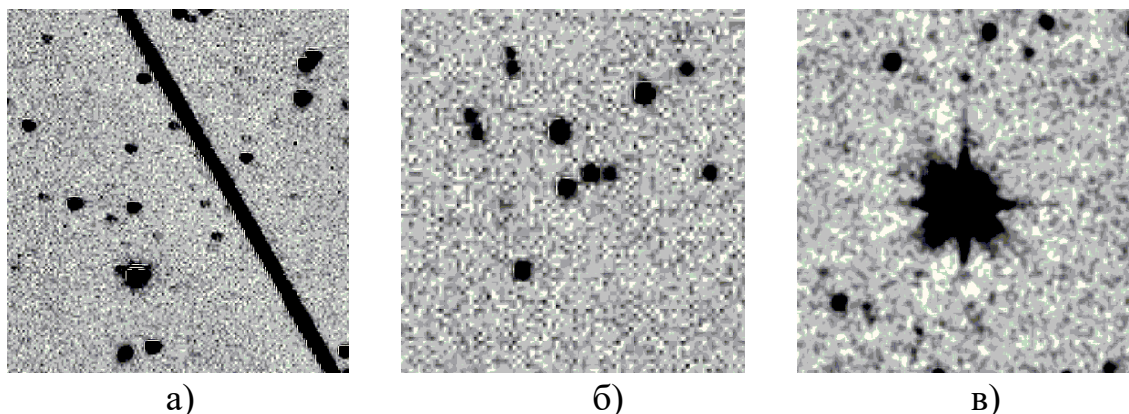


Рисунок 5 – Зображення можливих помилок та артефактів на цифровому кадрі

Зі сторони зоряного каталогу бракуються зірки, що належать компактним групам зірок згідно з даними каталогу, що використовується. Критерієм такої приналежності є наявність поруч із зіркою будь-якої іншої зірки на відстані менше, ніж наперед задане значення  $r_{star\_group}$ :

$$\sqrt{(\alpha_{catj} - \alpha_{catl})^2 + (\delta_{catj} - \delta_{catl})^2} \leq r_{star\_group}. \quad (15)$$

Також бракуються вимірювання об'єктів, зображеннями яких не мають піку (рис. 5в):

$$(A_{peak} - A_{ik}) \leq N_{Apeak} \text{ для } \forall i, k \in \Omega_{peak}, \quad (16)$$

де  $A_{peak}$  – яскравість пікселів області  $\Omega_{peak}$  розміром  $C_{peak} \times C_{peak}$ ;  $A_{ik}$  – яскравість піку;  $N_{Apeak}$  – значення яскравості пікселів від яскравості пікселя піку в області  $C_{peak} \times C_{peak}$ .

У іншому випадку таке вимірювання може бути інтерпретовано як декілька.

Остаточним критерієм для відбракування пар є сумарне відхилення між оцінками екваторіальних координат у парі «вимірювання-зірка»:

$$\Delta_{\alpha\delta jk} = \sqrt{(\alpha_{catj(k)} - \alpha_{meainfr(k)})^2 + (\delta_{catj(k)} - \delta_{meainfr(k)})^2}. \quad (17)$$

Пара відбраковується, якщо значення  $\Delta_{\alpha\delta jk}$  перевищує критичне значення:

$$\Delta_{\alpha\delta jk} > K_{rej} \hat{\Delta}_{\alpha\delta}, \quad (18)$$

$$\text{де } \hat{\Delta}_{\alpha\delta} = \sqrt{\frac{1}{N_{cou}} \left( \left( \sum_{k=1}^{N_{cou}} \alpha_{catj(k)} - \alpha_{meainfr(k)} \right)^2 + \left( \sum_{k=1}^{N_{cou}} \delta_{catj(k)} - \delta_{meainfr(k)} \right)^2 \right)} - \text{середній, на множині вибраних пар, що ототожнюються, модуль відхилення пари в екваторіальних координатах; } N_{cou} - \text{кількість пар «вимірювання-зірка», що використовуються для розрахунку постійних пластинок; } \alpha_{meainfr(k)}, \delta_{meainfr(k)} - \text{оцінки прямого піднесення та схилення об'єкта } i\text{-го вимірювання } n_{fr}\text{-го кадру; } \alpha_{catj(k)}, \delta_{catj(k)} - \text{оцінки прямого піднесення та схилення об'єкта з } j\text{-го формуляру каталогу; } k - \text{номер пари «вимірювання-зірка»; } K_{rej} - \text{коефіцієнт правила відбракування пар «вимірювання-зірка» з множини опорних зірок.}$$

Фінальний розрахунок постійних пластинок проводиться з парами «вимірювання-зірка», які успішно пройшли всі етапи відбракування.

Для підтвердження ефективності та надійності методу автоматичного відбору опорних зірок необхідно проведення аналізу показників точності вимірювань кутових положень опорних зірок на розширеній множині показників точ-

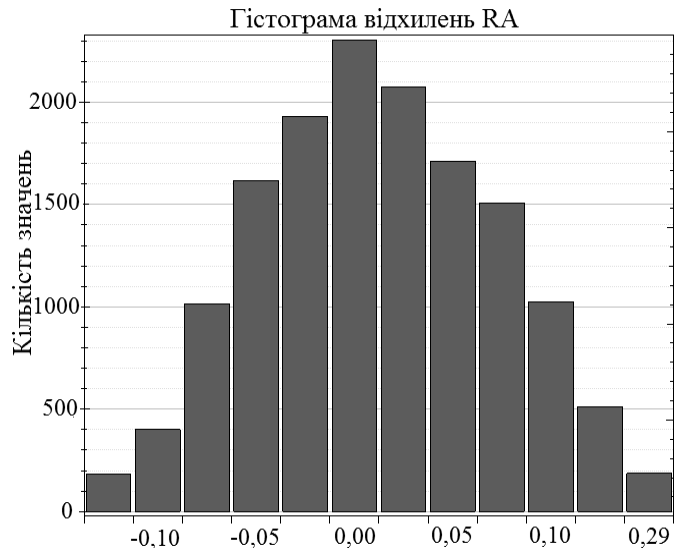


Рисунок 6 – Гістограма розподілу відхилень прямого піднесення вимірювань опорних зірок

ності. Тому в роботі удосконалено метод дослідження показників точності вимірювання кутового положення опорних зірок у просторі за даними зображень. Обчислювальний метод дозволяє знаходити залежності відхилень оцінок кутових положень опорних зірок від положення на кадрі, а також створювати підвібірки за іншими параметрами (рис. 6, 7).

У дисертаційній роботі було досліджено такі показники точності вимірювань опорних зірок: оцінки середнього відхилення оцінок екваторіальних координат між каталожними та значеннями вимірювань  $\bar{\Delta}_\alpha$ ,  $\bar{\Delta}_\delta$ ; СКВ  $\sigma_\alpha$ ,  $\sigma_\delta$ ,  $\sigma_m$  та оцінка середнього відхилення оцінки блиску між каталожними та вимірюваними значеннями  $\bar{\Delta}_m$ . Також було визначено оцінки коефіцієнтів асиметрії та ексцесу вимірювань екваторіальних координат вибраних опорних зірок.

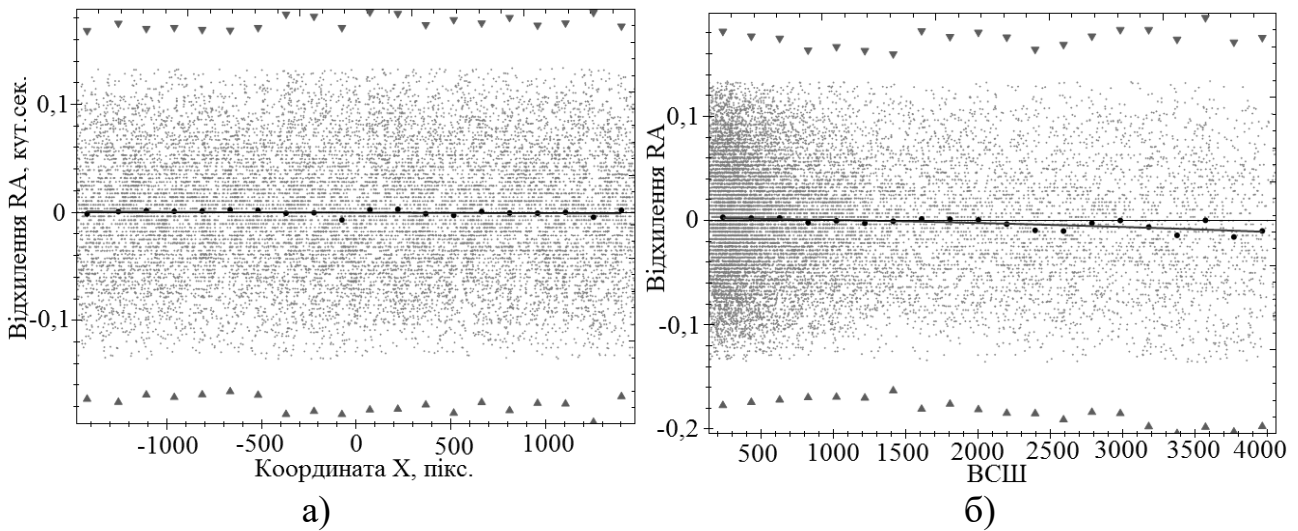


Рисунок 7 – Розподіл відхилень вимірювань опорних зірок за а) координатами на кадрі, б) відношенням сигнал-шум

Відхилення між вимірюваннями та каталожними значеннями оцінок екваторіальних координат (прямого піднесення та схилення) та блиску опорних зірок представляються виразами:

$$\Delta_{\alpha i} = (\alpha_{j_1(i)} - \alpha_{j_2(i)}) * \cos \delta_{j_1(i)}; \quad (19)$$

$$\Delta_{\delta i} = \delta_{j_1(i)} - \delta_{j_2(i)}; \quad (20)$$

$$\Delta_{mi} = m_{j_1(i)} - m_{j_2(i)}, \quad (21)$$

де  $i$  – номер пари «вимірювання-зірка»;  $\alpha_{j_1(i)}$ ,  $\alpha_{j_2(i)}$ ,  $\delta_{j_1(i)}$ ,  $\delta_{j_2(i)}$  – пряме піднесення та схилення  $j_1$ -го вимірювання кадру та  $j_2$ -го формуляру каталогу, які складають  $i$ -у пару ототожнення;  $m_{j_1(i)}$ ,  $m_{j_2(i)}$ ,  $m_{j_{NF}(i)}$  – оцінка блиску  $j_1$ -го вимірювання кадру та  $j_2$ -го формуляру каталогу, що входять до  $i$ -ї пари ототожнення;  $j_1$  – номер вимірювання, що сформоване на кадрі, у внутрішній нуме-

рації вимірювань кадру;  $j_2$  – номер формуляру каталогу, у внутрішній нумерації формулярів каталогу.

Відхилення між вимірюваннями та каталожними значеннями оцінок  $X$  та  $Y$  координат опорних зірок у системі координат кадру (прямокутна система координат кадру з центром в лівому верхньому кутку кадру) обчислюються відповідно до формул:

$$\Delta_{Xi} = X_{j_1(i)} - X_{j_2(i)}; \Delta_{Yi} = Y_{j_1(i)} - Y_{j_2(i)}, \quad (23)$$

де  $X_{j_1(i)}$ ,  $X_{j_2(i)}$ ,  $Y_{j_1(i)}$ ,  $Y_{j_2(i)}$  – координати  $X$  та  $Y$   $j_1$ -го вимірювання кадру та  $j_2$ -го формуляру каталогу, що складають  $i$ -у пару ототожнення.

Прямим підтвердженням ефективності методів ототожнення цифрових кадрів та вибору на них опорних зірок є високі показники точності позиційних вимірювань астероїдів із залученням методів, що розроблені в роботі.

У рамках дисертаційної роботи було проведено дослідження впливу значень коефіцієнта відбракування пар «вимірювання–зірка» на показники точності розробленого методу автоматичного відбору опорних зірок (табл. 1).

Таблиця 1 – Дослідження показників точності оцінок кутового положення опорних зірок у просторі за даними зображень при використанні різних значень коефіцієнта відбракування пар «вимірювання-зірка»

Параметр порівняння	$K_{rej} = 1$	$K_{rej} = 1.5$	$K_{rej} = 2$	$K_{rej} = 2.5$	$K_{rej} = 3$
Відібрано опорних зірок	153	220	252	265	272
Відхилення $> 0.25$ кут.сек.	100%	99.5	93.7	90.2	86%
СКВ по RA, кут.сек.	0.04	0.08	0.12	0.14	0.18
СКВ по DE, кут.сек.	0.05	0.09	0.11	0.15	0.16
Квантиль 0.9 відхилення по RA, кут.сек.	0.082	0.131	0.216	0.247	0.284
Квантиль 0.9 відхилення по DE, кут.сек.	0.082	0.142	0.170	0.229	0.243
Квантиль 0.99 відхилення по RA, кут.сек.	0.094	0.190	0.301	0.352	0.533
Квантиль 0.99 відхилення по DE, кут.сек.	0.125	0.212	0.305	0.487	0.506
Всього зірок UCAC4 на кадрах	339	342	342	342	342
Середнє відхилення по RA, кут.сек.	0.00	-0.01	-0.02	-0.03	-0.03
Середнє відхилення по DE, кут.сек.	-0.03	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02
СКВ по RA, кут.сек.	0.28	0.26	0.26	0.26	0.26
СКВ по DE, кут.сек.	0.26	0.24	0.24	0.24	0.23
Квантиль 0.9 відхилення по RA, кут.сек.	0.468	0.457	0.428	0.450	0.436
Квантиль 0.9 відхилення по DE, кут.сек.	0.333	0.282	0.280	0.299	0.297
Квантиль 0.99 відхилення по RA, кут.сек.	1.105	0.986	0.986	0.965	0.904
Квантиль 0.99 відхилення по DE, кут.сек.	0.786	0.680	0.709	0.701	0.571

Також було проведено порівняльний аналіз показників точності оцінок кутового



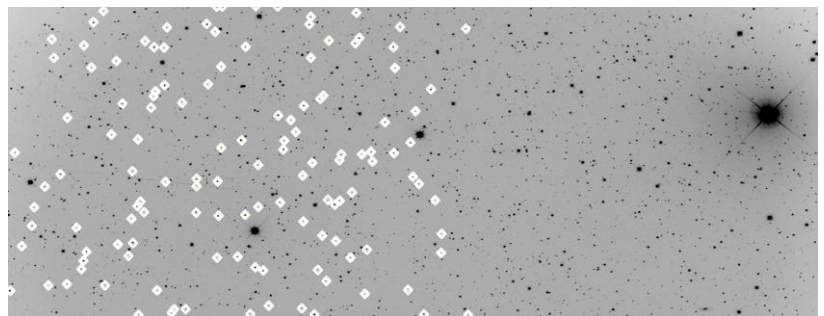
положення опорних зірок у просторі за даними зображень, за результатами обробки однакових тестових кадрів за допомогою ПЗ Astrometrica та CoLiTec. Порівняльний аналіз показників точності оцінки кутового положення опорних зірок у просторі за даними зображень показав практично повний їх збіг для CoLiTec та Astrometrica за умови, що кадри були надійно ототожнені в ПЗ Astrometrica. Всього було проаналізовано 30 391 вимірювання опорних зірок на 19 серіях по 4 кадри.

Однак не всі кадри серій отримали надійне ототожнення з використанням Astrometrica, тобто на кожній серії з чотирьох кадрів був хоча б один кадр, не ототожнений із зоряним каталогом.

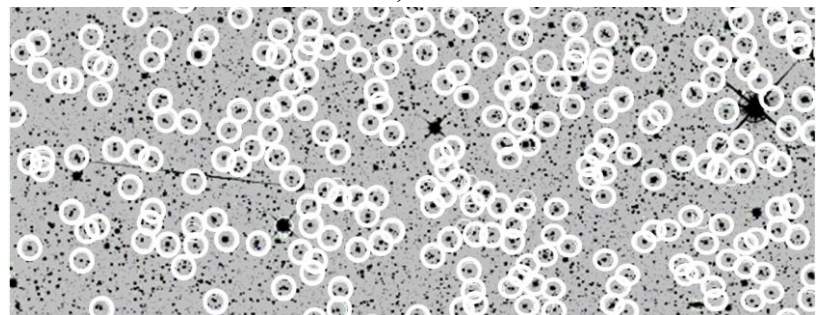
Деякі кадри були відбраковані через те, що ПЗ Astrometrica під час обробки досліджуваних кадрів відібрало лише ті опорні зірки, які розташовані в одній половині кадру (рис 8а). В свою чергу, ПЗ CoLiTec забезпечило рівномірний розподіл опорних зірок на досліджуваних кадрах (рис 8б).

Аналіз показників точності оцінок кутового положення опорних зірок по прямому піднесенню від їх блиску та координат на кадрі свідчать про відсутність впливу цих параметрів на точність вимірювань опорних зірок, що підтверджує ефективність розробленого методу автоматичного відбору опорних зірок.

У розділі також розглядається використання розроблених методів у програмному забезпеченні (ПЗ) CoLiTec та можливість їх використання в інших програмних комплексах обробки цифрових зображень для високоточного визначення кутового положення об'єктів у просторі.



а)



б)

Рисунок 8 – Відображення на кадрі опорних зірок в а) ПЗ Astrometrica, б) ПЗ CoLiTec

Основні результати розділу опубліковані в роботах [1, 3, 4, 6, 7, 10, 11, 12, 14].

## ВИСНОВКИ

Для високоточного визначення кутового положення об'єктів у просторі за даними зображень розв'язана науково-технічна задача розробки та аналізу обчислювальних методів автоматичного відбору опорних зірок для оцінки кутових положень об'єктів у просторі за даними зображень.

У результаті досліджень було отримано такі нові наукові результати.

1. Вперше запропоновано обчислювальний метод автоматичного відбору опорних зірок на цифрових зображеннях. Суть методу автоматичного відбору опорних зірок визначається протиріччям між необхідністю використання не менш як кубічної моделі постійних пластинок і малою кількістю ототожнених пар «вимірювання-зірка» на етапах часткового попереднього та повного попереднього ототожнення. Дане протиріччя долається багатоетапним збільшенням порядку постійних пластинок із одночасним збільшенням кількості для їх розрахунку пар, що використовуються. Розроблений метод стійкий до різних видів артефактів та помилок, що виникають при формуванні цифрового зображення.

2. Удосконалено обчислювальний метод ототожнення вимірювань об'єктів на серії цифрових зображень у частині визначення початкового наближення параметрів попарної відповідності між двома множинами вимірювань об'єктів за допомогою процедури часткового попереднього ототожнення. У частковому попередньому ототожненні висувуються гіпотези про сполучення вимірювань різних кадрів, що належать одному об'єкту. Кожній такій гіпотезі про сполучення відповідають умовні оцінки параметрів зсуву. Безумовною оцінкою параметрів зсуву між кадрами вважається умовна оцінка, що відповідає гіпотезі з найбільшою вагою. У якості зазначених гіпотез використовується кількість підтверджень, тобто кількість кругових областей підтвердження, яким відповідає не менше одного виміру іншого кадру. Пошук параметрів зсуву триває до знаходження першої гіпотези, в якій кількість підтверджень буде більше наперед заданої мінімально допустимої кількості.

3. Удосконалено обчислювальний метод ототожнення вимірювань кадрів із об'єктами каталогу у частині визначення початкового наближення в умовах суттєвої невизначеності їх параметрів ототожнення за допомогою процедури повного попереднього ототожнення. Обчислювальний метод призначений для визначення початкового наближення при ототожненні вимірювань кадру із зірками каталогу в умовах невизначеності шести параметрів ототожнення, а саме параметрів зсуву кадру, кута повороту камери та масштабу пікселя. Початкове наближення отримується у форматі шести параметрів лінійних постійних пластинок. Для цього достатньо мати три точки, зірки на кадрі, які складають трикутник первинного ототожнення. Виходячи з цього, перебираються зірки як вершини трикутників ототожнення на кадрі та в каталозі. Кожній такій парі трикутників відповідає гіпотеза «первинного ототожнення», у рамках якої визначаються умовні оцінки параметрів ототожнення.

4. Набув подальшого розвитку метод дослідження показників точності вимірювання кутового положення опорних зірок у просторі. Обчислювальний метод дозволяє проводити аналіз розширеної множини показників точності оцінок кутових положень опорних зірок і об'єктів, що вимірюються, на розши-

реній множині підвибірок вимірювань та кадрів, що аналізуються. Підтвердженням ефективності розроблених методів, є високі показники точності позиційних вимірювань астероїдів, які виконані із залученням цих методів. За результатами проведених досліджень при масштабі пікселя 2.8" СКВ екваторіальних координат опорних зірок по прямому піднесенню становило 0.08", а по схиленню – 0.09". Зазначені показники СКВ забезпечують виконання вимог Центру малих планет щодо точності оцінки кутових положень астероїдів на цифрових зображеннях.

5. Проведено порівняльний аналіз показників точності оцінок кутового положення опорних зірок у просторі за даними зображень, за результатами обробки однакових тестових кадрів за допомогою ПЗ Astrometrica та CoLiTec. Порівняльний аналіз показників точності оцінки кутового положення опорних зірок у просторі за даними зображень виявив практично повний їх збіг для CoLiTec та Astrometrica за умови, що кадри були надійно ототожнені в ПЗ Astrometrica. Однак не всі кадри серій отримали надійне ототожнення з використанням Astrometrica. На кожній серії з чотирьох кадрів був хоча б один кадр, не ототожнений із зоряним каталогом. Деякі кадри були відбраковані через те, що ПЗ Astrometrica під час обробки досліджуваних кадрів відібрало лише ті опорні зірки, які розташовані в одній половині кадру. В свою чергу, ПЗ CoLiTec забезпечило рівномірний розподіл опорних зірок на досліджуваних кадрах.

Аналіз показників точності оцінок кутового положення опорних зірок у просторі за даними зображень по прямому піднесенню від їх блиску та координат на кадрі свідчать про відсутність впливу цих параметрів на точність вимірювань опорних зірок, що свідчить про ефективність розробленого методу вибору опорних зірок.

6. Розроблені методи були впроваджені в ПЗ автоматизованого виявлення астероїдів і комет на серії кадрів CoLiTec. На даний момент ПЗ CoLiTec використовується в Одеській астрономічній обсерваторії та в лабораторії космічних досліджень ДВНЗ «Ужгородський національний університет». Розроблені методи використовуються в рамках НДР № 307 «Динамічний інтелектуальний аналіз послідовностей нечіткої інформації за умов суттєвої невизначеності на основі гібридних систем обчислювального інтелекту» (№ ДР 0116U002539) в Харківському національному університеті радіоелектроніки.

7. Розроблені обчислювальні методи можуть бути використані в різних програмних комплексах обробки цифрових зображень для високоточного визначення кутового положення об'єктів у просторі за даними зображень, наприклад, у програмах автоматизованого виявлення малих тіл Сонячної системи на серії цифрових кадрів. Крім того, запропоновані методи можуть бути використані для визначення кутових положень об'єктів будь-якої природи при розпізнаванні цих об'єктів.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Безкровный М.М. 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-Европейского журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 4/2 (70). – С. 16–22.
2. Дихтярь Н. Ю. Метод отождествления астрономических измерений CCD-кадра с формулярами звездного каталога / Н.Ю. Дихтярь, Я.С. Мовсесян, В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 67. – Х., 2015. – С. 197–215.
3. Дихтярь Н.Ю. Аналитические выражения отклонений между оценками положений небесных объектов в задаче отождествления ссd-кадра / Н.Ю. Дихтярь, Я.С. Мовсесян, С.В. Хламов, В.Е. Саваневич // Вісник НТУ «ХПІ» – 2015 – Т. 14 (1123) – С. 21–28.
4. Savanevych, V. E 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. Bezkrovny, 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.
5. Дихтярь Н.Ю. Метод иерархического отождествления измерений кадра астрономического телескопа с формулярами звездного каталога / Н.Ю. Дихтярь, В.Е. Саваневич, Я.С. Мовсесян // Вісник НТУ «ХПІ» – 2015 –Т. 46 (1155)–С. 90–97.
6. Savanevych, V. E. 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. Bezkrovniy, 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). – P. 302–313.
7. Мовсесян, Я.С. 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 «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 69. – Х., 2015. – С. 189–199.
8. Дихтярь Н. Ю. Декомпозиция общей задачи отождествления астрономических кадров со звездными каталогами на совокупность частных задач / Н.Ю. Дихтярь, Я.С. Мовсесян, В.Е. Саваневич, Е.Н. Диков // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 9 (134). – С. 24–29.
9. Дихтярь Н.Ю. Метод предварительного отождествления измерений цифровых кадров одной серии / Н.Ю. Дихтярь, Я.С. Мовсесян, В.Е. Саваневич //

Збірник наукових праць. Вісник НТУ «ХП», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях» – 2015. – № 62 (1171) – С. 58–63.

10. Дихтяр Н.Ю. Статистическая модель множества позиционных измерений на серии кадров участка небесной сферы / Н.Ю. Дихтяр, Я.С. Мовсесян, В.Е. Саваневич // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна – 2015. – № 27 – С. 65–77.

11. Дихтяр Н.Ю. Оценка параметров положения и видимого движения объектов по измерениям на серии кадров / Н.Ю. Дихтяр, Я.С. Мовсесян, В.Е. Саваневич // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна – 2015. – № 28 – С. 18–32.

12. Дихтяр Н.Ю. Метод автоматического исследования статистических характеристик оценок параметров объектов, неподвижных на серии кадров цифровых кадров одной серии / Н.Ю. Дихтяр, Я.С. Мовсесян, С.В. Хламов, А.В. Погорелов, В.Е. Саваневич // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника» – 2016. – № 184 – С. 37–44.

13. Дихтяр Н.Ю. Метод аварийного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью их параметров / Н.Ю. Дихтяр, Я.С. Мовсесян, В.Е. Саваневич, С.В. Хламов // Збірник наукових праць. Вісник НТУ «ХП», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях» – 2016. – № 18 (1190) – С. 128 – 139.

14. Саваневич В. Е. Метод формирования внутреннего каталога объектов, неподвижных на серии кадров / В.Е. Саваневич, Я.С. Мовсесян, Н.Ю. Дихтяр // Системи обробки інформації – 2016. – № 8 (145). – С. 44–49.

15. Саваневич В. Е. Вычислительный метод выбора опорных звезд на цифровых изображениях / В. Е. Саваневич, Я. С. Мовсесян, Н. Ю. Дихтяр // Системи обробки інформації – 2016. – № 9 (146). – С. 62–68.

16. Savanevych V. Automated software for CCD-image processing and detection of small Solar System bodies / V. Savanevych, A. Bryukhovetskiy, N. Sokovikova, M. Bezkrivniy, S.Khlamov, L. Elenin, I. Movsesian, M. Dihtyar // «Asteroids, Comets, Meteors 2014» 12-я международная конференция, 30 июня – 4 июля 2014 г.: сб. матер. конф. – Хельсинки, 2014. – С. 491.

17. Хламов С. В. Software for asteroids survey processing. Current status and prospects / С. В. Хламов, В. Є. Саваневич, Я. С. Мовсесян, В. М. Ткачов, Є. М. Діков, О. Б. Брюховецький, А. М. Дашкова // «14-та українська конференція з космічних досліджень», 8–12 вересня 2014 р.: сб. матер. конф. – Ужгород, 2014. – С. 119.

18. Savanevych V. Observation of small Solar System bodies at the review programs observatory ISON-NM and ISON-Kislovodsk / V. Savanevych, A. Bryukhovetskiy, L. Elenin, V. Nevski, I. Molotov, M. Bezkrivniy, N. Sokovikova, Ia. Movsesian, S. Khlamov, M. Dikhtyar // Abstracts of 40th COSPAR Scientific Assembly, 2 - 10 August 2014.: сб. матер. конф – Moscow, Russia, 2014, B0.4-0061-14.

19. Khlamov S. CoLiTec-multifunction software for the CCD image processing [Электронный ресурс] / V. Savanevych, O. Bryukhovetskiy, S. Khlamov, N. Sokovikova, A. Pohorelov, Ia. Movsesian, M. Bezkrivniy, A. Dahskova // "IAA Planetary Defense Conference 2015", 13 – 17 апреля 2015 г.: сб. матер. конф. – Frascati, Italy, 2015. – Режим доступа к публ.: <https://www.wuala.com/IAADrive/IAADrive/-PDC2015/1-7>.

20. Savanevych V. CoLiTec – multifunction software for the CCD image processing [Электронный ресурс] / V. Savanevych, O. Bryukhovetskiy, N. Sokovikova, I. Movsesian, M. Dihtyar, A. Pogorelov // "International scientific and methodological conference KOLOS 2014", 4 – 6 декабря 2014 г.: сб. матер. конф. – Стакчин, Словакия, 2014. – Режим доступа к публ.: [http://www.astrokolonica.sk/joomla15/files/kolos2014/kolos2014\\_abstractbook.pdf](http://www.astrokolonica.sk/joomla15/files/kolos2014/kolos2014_abstractbook.pdf)

21. Мовсесян Я.С. Отождествление измерений объектов на ПЗС-кадрах с объектами каталога / Я. С. Мовсесян, Н. Ю. Дихтяр // 18 Международный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. Материалов форума. Т.3. – Харьков: ХНУРЭ. 2014. – 261-262.

22. Мовсесян Я.С. Метод отбора опорных звезд на ПЗС-кадрах / Я. С. Мовсесян, С.В. Хламов, Н. Ю. Дихтяр // 19 Международный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. Материалов форума. Т.5. – Харьков: ХНУРЭ. 2014. – 227-228.

23. Khlamov S. Precision of astrometry measurements made using Co-LiTec software for asteroids survey [Электронный ресурс] / S. Khlamov, A. Ivantsov, V. Savanevich, A. Bryukhovetskiy, L. Elenin, M. Bezkrivniy, N. Sokovikova, Ia. Movsesian. // «Gaia-FUN-SSO-3 International Workshop 2014», 24 – 26 ноября 2014 г.: сб. матер. конф. – Париж, Франция, 2014. – Режим доступа к публ.: [http://www.imcce.fr/hosted\\_sites/gaiafun2014/com/Khlamov.pdf](http://www.imcce.fr/hosted_sites/gaiafun2014/com/Khlamov.pdf)

24. Саваневич В.Е. 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. Соковицова, Я.С. Мовсесян, А.В. Погорелов, С. В. Хламов // «15-та українська конференція з космічних досліджень», 24–28 серпня 2015 р.: сб. матер. конф. – Одеса, 2015. – С. 167.

25. Movsesian Ia. Methods for identification of the digital frames and selection of reference stars on them [Электронный ресурс] / Ia. Movsesian, V. Savanevych, O. Briukhovetskiy, M. Dikhtyar // « International meeting on variable stars research KOLOS 2015», 3–5 декабря 2015 г.: сб. матер. конф. – Стакчин, Словакия, 2015. – Режим доступа к публ.: [http://www.astrokolonica.sk/joomla15/-files/kolos2015/kolos2015\\_abstractbook.pdf](http://www.astrokolonica.sk/joomla15/-files/kolos2015/kolos2015_abstractbook.pdf).

26. Саваневич В.Е. Программа для автоматизированного открытия астероидов и комет CoLiTec: исследования и разработки / В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, Н.С. Соковицова, С. В. Хламов, А.В. Погорелов, Я. С. Мовсесян, Н.Ю.

Дихтяр // Міжнародний науковий семінар пам'яті Б.Л. Кащеева до 96-річчя з дня народження «Радіометеори, метеори і міжпланетна складова: поблизу та на відстані», 15 березня 2016 р.: зб. матер. конф. – Харків, 2016. – С. 36–37.

27. Саваневич В.Е. Виртуальные обсерватории и автоматизированное открытие астероидов и комет CoLiTec: исследования и разработки. / В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, Власенко В.П., Н.С. Соковикова, С. В. Хламов, А.В. Погорелов, Я.С. Мовсесян, Н.Ю. Дихтяр // Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених «Теоретичні та прикладні аспекти застосування інформаційних технологій в галузі природничих наук» – 2016. – С. 20–22.

28. Movsesian Ia. The computational method of selecting the reference stars on the digital image [Электронный ресурс] / Ia. Movsesian // 16-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology» (Ukraine, Odessa, Chernomorka, 14-20 August, 2016): зб. матер. конф. – Одеса, Україна, 2016. – с.43–44 – Режим доступа к публ.: [http://gamow.odessa.ua/wpcontent/uploads/2016/08/Gamow\\_Abstracts\\_2016.pdf](http://gamow.odessa.ua/wpcontent/uploads/2016/08/Gamow_Abstracts_2016.pdf).

29. Свід. про реєстр. авт. права № 54900. Україна. Комп'ютерна програма «Програма обробки та відображення астрономічних кадрів LookSky-CoLiTec» / Є.М. Діков, О. Б. Брюховецький, С.В. Хламов, В. Є. Саваневич, В.П. Власенко, Л.В. Єленін, О.В. Герасименко, М.М. Безкровний, Н.С. Соковикова, Я.С. Мовсесян, А.В. Погорелов – прийнято 20.05.14.

30. Свід. про реєстр. авт. права № 60021. Україна. Комп'ютерна програма «Програмне забезпечення для дослідження статистичних характеристик CCD-вимірювань положення і блиску об'єктів Сонячної системи SSOAnSe» / М.М. Безкровний, А.М. Дашкова, В. Є. Саваневич, О.Б. Брюховецький, С.В. Хламов, А.В. Погорелов, Н.С. Соковикова, Я.С. Мовсесян – прийнято 04. 06. 15.

## АННОТАЦІЯ

**Мовсесян Я.С. Обчислювальні методи відбору опорних зірок на цифрових зображеннях.** – 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, 2017.

Дисертація присвячена розробці та аналізу обчислювальних методів автоматичного вибору опорних зірок для оцінки кутових положень об'єктів у просторі за даними зображень. У роботі вперше запропоновано обчислювальний метод автоматичного відбору опорних зірок на цифрових зображеннях. Також удосконалено обчислювальні методи ототожнення вимірювань об'єктів на серії цифрових зображень за рахунок використання часткового та повного попередньо-

го ототожнення. Це дозволяє підвищити надійність ототожнення та забезпечення похибок вимірювань на рівні виконання вимог Центру малих планет щодо точності оцінки кутових положень астероїдів та забезпечує середньоквадратичне відхилення (СКВ) вимірювань положення опорних зірок, що не перевищує 5% масштабу пікселя. Також набув подальшого розвитку метод дослідження показників точності вимірювань кутового положення опорних зірок у просторі, що дозволяє в автоматичному режимі аналізувати розширену множину показників їх точності.

Розроблені методи були впроваджені у програмному забезпеченні (ПЗ) автоматизованого виявлення астероїдів і комет на серії кадрів CoLiTec. На даний момент ПЗ CoLiTec використовується в Одеській астрономічній обсерваторії і в лабораторії космічних досліджень ДВНЗ «Ужгородський національний університет». Також розроблені методи впроваджені в рамках науково-дослідної роботи № 307 «Динамічний інтелектуальний аналіз послідовностей нечіткої інформації за умов суттєвої невизначеності на основі гібридних систем обчислювального інтелекту» (№ ДР 0116U002539).

**Ключові слова:** опорні зірки, оцінка кутового положення об'єкта у просторі, показники точності, часткове попереднє ототожнення, повне попереднє ототожнення.

## АННОТАЦІЯ

**Мовсесян Я.С. Вычислительные методы выбора опорных звезд на цифровых изображениях.** – 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, 2017.

Диссертация посвящена разработке вычислительных методов для высокоточного определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений.

В диссертационной работе впервые предложен вычислительный метод автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях. Суть этого метода определяется противоречием между необходимостью использования не менее кубической модели постоянных пластинки и малым количеством отождествленных пар «измерение–звезда» на этапах частного и полного предварительного отождествления. Данное противоречие преодолевается многоэтапным увеличением порядка постоянных пластинок с одновременным увеличением количества используемых для их расчета пар. Разработанный метод устойчив к различным видам артефактов и ошибок, возникающих при формировании цифрового изображения.

Усовершенствован вычислительный метод отождествления измерений объектов на серии цифровых изображений в части определения начального приближения параметров попарного соответствия между двумя множествами



измерений объектов с помощью использования процедуры частного предварительного отождествления. Частное предварительное отождествление используется для отождествления серии кадров. В частном предварительном отождествлении выдвигаются гипотезы о сочетании измерений разных кадров, принадлежащих одному объекту. Каждой такой гипотезе о паросочетании соответствуют условные оценки параметров сдвига. Безусловной оценкой параметров сдвига между кадрами считается условная оценка, соответствующая гипотезе с наибольшим весом. В качестве веса указанных гипотез используется количество подтверждений, то есть количество круговых областей подтверждения, которым соответствует не менее одного измерения другого кадра. Поиск параметров сдвига продолжается до нахождения первой гипотезы, в которой количество подтверждений будет больше наперед заданного минимально допустимого количества.

Усовершенствован вычислительный метод отождествления измерений кадров с объектами каталога в части определения начального приближения в условиях существенной неопределенности их параметров отождествления с помощью использования процедуры полного предварительного отождествления. Полное предварительное отождествление используется в условиях значительной неопределенности параметров отождествления. При неопределенности относительно всех шести параметров (сдвиг кадра, угол поворота камеры и масштаб пикселя) в качестве начального приближения необходимо получить шесть параметров линейных постоянных пластинки. Для этого достаточно иметь три точки звезды на кадре, которые составляют треугольник первичного отождествления. Далее, перебираются звезды как вершины треугольников на кадре и в каталоге. Каждой такой паре треугольников соответствует гипотеза «первичного отождествления», в рамках которой определяются условные оценки параметров отождествления.

Получил дальнейшее развитие метод исследования показателей точности измерения углового положения опорных звезд в пространстве. Метод позволяет проводить анализ расширенного множества показателей точности оценок угловых положений измеряемых объектов на расширенном множестве анализируемых подвыборок измерений и кадров.

Разработанные в диссертационной работе вычислительные методы позволили значительно повысить показатели точности оценки угловых положений объектов, подтверждением чего являются результаты обработки цифровых кадров. По результатам проведенных исследований при масштабе пикселя 2.8" среднеквадратическое отклонение (СКО) экваториальных координат опорных звезд по прямому восхождению составляло 0.08", а по склонению – 0.09". Указанные значения СКО обеспечивают выполнение требований Центра малых планет к точности оценки угловых положений астероидов на цифровых изображениях.

Разработанные в диссертационной работе методы были внедрены в программное обеспечение (ПО) автоматического поиска астероидов и комет на серии

кадров CoLiTec. На данный момент ПО CoLiTec используется в Одесской астрономической обсерватории и в лаборатории космических исследований ГВУЗ «Ужгородский национальный университет». Также разработанные методы используются в рамках научно-исследовательской работы № 307 «Динамический интеллектуальный анализ последовательностей нечеткой информации в условиях существенной неопределенности на основе гибридных систем вычислительного интеллекта» (№ ГР 0116U002539)

**Ключевые слова:** опорные звезды, оценка углового положения объектов в пространстве, показатели точности, частное предварительное отождествление, полное предварительное отождествление.

## ABSTRACT

**Movsesian I.S. Computational methods of the selection of reference stars on the digital images.** – The manuscript.

The dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. - Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2017.

Dissertation is devoted to the development and analysis of the computational methods of automatically selection of the reference stars for the evaluation of the angular position of the objects in space by the image data. In the paper first proposed the computational method for automatically selection of the reference stars on digital images. Also improved computational methods of identifying objects measurement on the series of digital images by the use of private and full preliminary identification. It allows to improve the reliability of identification and provide measurement errors at the level of the requirements of the Minor Planet Center accuracy of estimation of asteroid 's angular positions and provides the standard deviation position measurements of the reference stars, not more than 5% of the pixel scale. The method of research precision indicators of the measurement accuracy of the angular position of the reference stars in space has been further developed. The method allows automatically analyzing an expanded set of accuracy indicators.

Developed in the dissertation methods are implemented in the CoLiTec software for automated asteroids and comets discovery on a series of frames. Currently CoLiTec software is used in the Odessa Astronomical Observatory and space research laboratory of «Uzhhorod National University». Also, the methods are used in the framework of research № 307 «Dynamic mining sequences of fuzzy information by significant uncertainty hybrid systems based on computational intelligence» (№0116U002539).

**Keywords:** reference stars, estimation of the object's angular position in space, precision indicators, private preliminary identification, full preliminary identification.

Підп. до друку 13.12.16.  
Умов. друк. арк. 1,3.  
Зам. № 2-91.

Формат 60×84 1/16.  
Облік. вид. арк. 1,1.  
Ціна договірна.

Спосіб друку – ризографія.  
Тираж 100 прим.

---

ХНУРЕ. Україна. 61166, Харків, просп. Науки, 14

---

Віддруковано в редакційно-видавничому відділі ХНУРЕ  
61166, Харків, просп. Науки, 14