

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

СОКОВІКОВА НАТАЛІЯ СЕРГІЇВНА



УДК 519.6:004.932

**ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ
ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТІВ, ЩО ЗМАЗАНІ
ВЛАСНИМ РУХОМ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Саваневич Вадим Євгенович,
професор кафедри інформаційних управляючих систем
та технологій ДВНЗ «Ужгородський національний
університет»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Михальов Олександр Ілліч,
Національна металургійна академія України, завідувач
кафедри інформаційних технологій та систем;

кандидат технічних наук, доцент
Григорова Тетяна Альбертівна,
Кременчуцький національний університет імені Михайла
Остроградського, доцент кафедри інформатики і
вищої математики.

Захист відбудеться “07” червня 2016 р. о 13:00 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 “06” травня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Л.В. Колесник

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Об'єкти із зображеннями, що змазані власним рухом, мають різне походження. Прикладами таких техногенних об'єктів є літаки, штучні супутники Землі, безпілотні літальні апарати. Такими об'єктами природного походження є астероїди, які зближуються із Землею, комети, метеори, птахи. При виявленні та спостереженні таких об'єктів виникають певні складнощі (через розмір, віддаленість або швидкість зазначених об'єктів) при обробці результатів їх спостереження.

Найбільш явно дана проблематика помітна в області оглядових, наприклад, астероїдних, спостережень. При цьому кругова форма зображень притаманна більшій частині об'єктів астероїдних оглядів. Спостереження і визначення астероїдів, як правило, проводиться за допомогою телескопів з порівняно невеликими апертурами. З огляду на це, виникає необхідність підвищення точності оцінки положення об'єктів.

Науковий напрямок автоматичної обробки цифрових кадрів є досить новим і продовжує розвиватись разом із вдосконаленням засобів цифрових спостережень. Методам обробки цифрових кадрів із зображеннями об'єктів (як кругових, так і змазаних власним рухом) присвячено роботи Купріянова В., Бауера Т. (Bauer T.), Чайя Ч. (Zhai C.), Вереса П. (Vereš P.). Однак описані методи визначення параметрів зображень кругових і протяжних об'єктів не завжди відповідають заданим вимогам, особливо точності оцінки координат об'єктів. Тому актуальною є науково-технічна задача розробки ефективних обчислювальних методів обробки цифрових зображень для оцінки положення об'єктів з круговими зображеннями і зображеннями, що змазані власним рухом.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота була проведена у рамках міжнародної програми «Проект об'єктів, що швидко рухаються» (FMO (Fast moving object) project), «Космічна варта» (Spaceguard), програмою «Інформованість про ситуацію в космосі» Європейського космічного агентства (ESA Space Situational Awareness), програм спостережень астероїдів під егідою Центру малих планет (Minor Planet Center – MPC) Міжнародного Астрономічного Союзу, НДР №273 «Нейро-фаззі системи для поточної кластеризації та класифікації послідовностей даних за умов їх викривленості відсутніми та аномальними спостереженнями» (№ДР 0113U000361, 2013–2015 рр.): розділ №273-2 «Адаптивні методи та моделі класифікації даних і прогнозування часових рядів за умов їх викривленості відсутніми та аномальними спостереженнями на основі штучних імунних систем».

У рамках даної тематики автор брала участь як виконавець, нею розроблено обчислювальні методи обробки зображень для оцінки місця розташування об'єктів з малим (кругові зображення) і великим (зображення, що змазані власним рухом) часом експозиції.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає у підвищенні точності оцінки параметрів об'єктів з круговими зображеннями та об'єктами, із зображеннями, що змазані власним рухом, за рахунок розробки нових та удосконалення існуючих обчислювальних методів обробки цифрових зображень.

Досягнення даної мети забезпечується вирішенням таких завдань.

1. Удосконалення методу оцінки положення об'єктів з круговими зображеннями за рахунок розробки субпіксельної моделі кругових зображень об'єктів.

2. Удосконалення методу оцінки положення об'єктів із зображеннями, що змазані власним рухом, за рахунок розробки субпіксельної моделі зображень цих об'єктів.

3. Розробка методу виділення зображень об'єктів, що змазані власним рухом.

Об'єкт дослідження – зображення об'єктів з ненульовою швидкістю видимого руху.

Предмет досліджень – моделі зображень об'єктів з великою швидкістю видимого руху.

Методи досліджень. Основні результати роботи отримані на основі теорії обчислювальних методів, теорії математичної статистики, теорії оптимізації, що дозволили розробити: обчислювальний метод оцінки параметрів зображення небесних об'єктів на цифрових кадрах з використанням субпіксельної моделі зображення об'єктів; обчислювальний метод оцінки параметрів зображення небесних об'єктів на цифрових кадрах, згідно з критерієм мінімуму суми квадратів відхилень; обчислювальний метод максимально правдоподібної оцінки положення об'єктів із зображенням, що змазані власним рухом; теорії цифрової обробки зображень; теорії статистичного моделювання та обробки експериментальних даних.

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

– вперше запропоновано **трьохетапний обчислювальний метод виявлення зображень об'єктів, що змазані власним рухом.** Його використання максимізує ймовірність виявлення об'єктів з високою швидкістю видимого руху;

– вдосконалено **ітераційний метод оцінки положення об'єкта з круговим зображенням на цифровому кадрі, на основі субпіксельної моделі.** Метод дозволяє зменшити середньоквадратичне відхилення оцінки положення об'єкта з круговим зображенням в порівнянні з традиційними методами, що засновані на апроксимації зображення об'єкта гаусовою моделлю;

– вдосконалено **обчислювальний метод оцінки положення об'єкта з цифровим зображенням, що змазане власним рухом,** за рахунок субпіксельної моделі зображення об'єктів. Використання даного метода дозволяє розширити межі достовірних вимірювань на область зображень з малим відношенням сигнал-шум.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів забезпечувалась коректним використанням основних положень відомого та апробованого математичного апарату. Нові наукові результати підтверджуються експериментальними дослідженнями та їх застосуванням у програмі 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 полягає у підвищенні ймовірності виявлення об'єктів з високою швидкістю видимого руху та підвищенні точності оцінки положення об'єктів з круговим зображенням у

порівнянні з традиційними методами. Запропоновані автором обчислювальні методи були використані у програмному забезпеченні (ПЗ) CoLiTec, одним із розробників якого є дисертант. Розроблені методи та ПЗ CoLiTec було використано в Головній астрономічній обсерваторії НАНУ України, Андрушівській астрономічній обсерваторії (Житомир, А50); Уссурійській астрономічній обсерваторії ISON-Ussuriysk (С15), обсерваторіях ISON-NM (Нью-Мексико, США, Н15), ISON-Кисловодськ (D00), а також в рамках навчального процесу, що підтверджується відповідними актами впровадження (додаток А). У результаті впровадження розроблених обчислювальних методів, вимірювання обсерваторії ISON-NM мають один з найменших у світі показників середнього модуля відхилень. Використання ПЗ CoLiTec дозволяє на однакових кадрах отримати на 11% вимірів більше, ніж при використанні однієї з найпоширеніших програм обробки даних астероїдних оглядів Astrometrica.

Розроблені обчислювальні методи можуть бути використані у ПЗ обробки цифрових зображень для попередньої селекції та оцінки положення об'єктів із круговими зображеннями та зображеннями, що змазані власним рухом, наприклад у програмах автоматизованого виявлення малих тіл Сонячної системи на серії цифрових кадрів. Крім того, запропоновані методи можуть бути використані для спостереження та виявлення рухомих об'єктів будь-якої природи (наприклад, літаки, безпілотні літальні апарати, супутники, автомобілі).

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи отримані особисто дисертантом та опубліковано в роботах [1–35]. Особистий внесок автора у спільно опублікованих роботах: у [1, 4] розроблено та досліджено обчислювальні методи оцінки положення об'єкта з цифровим зображенням, що змазане власним рухом; у [7] досліджено характеристики розробленого ітераційного методу оцінки положення об'єкта з круговим зображенням на цифровому кадрі; у [8] розроблено та досліджено ітераційний метод оцінки положення об'єкта з круговим зображенням на цифровому кадрі на основі субпіксельної моделі; у [10] розроблено та досліджено трьохетапний обчислювальний метод виявлення зображень об'єктів, що змазані власним рухом; у роботах [2, 3, 6, 11] досліджено обчислювальні методи оцінки положення об'єкта на цифровому зображенні, що базуються на піксельній та субпіксельній моделях зображень; у [9] запропоновано метод дослідження точності оцінок положення та блиску об'єктів зі зображеннями, що змазані власним рухом; у роботах [5, 12, 13] досліджено показники точності оцінок положення об'єктів у ПЗ CoLiTec, у тому числі за результатами спостережень астероїдів тридцяти найпродуктивніших обсерваторій світу, а також порівняльний аналіз даних показників у ПЗ CoLiTec та Astrometrica.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні результати дисертації обговорено на: «Astronomy Space Physics Annual International Conference» (Ukraine, Kyiv, May 21–24, 2013) [14]; «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (Україна, Харків, 2013–2015 р.) [15, 16, 22, 23]; «Современные направления развития информационно-коммуникационных технологий и средств» (Україна, Харків 11–12 квітня 2013 р.) [17, 18]; Всеукраїнська наукова конференція «Математичне моделювання та математична фізика» присвячена 90-річчю від дня народження В.М. Глушкова (Україна, Кременчук 23–27 вересня 2013 р.) [19, 20]; XI Міжнародна науково-практична конференція «Математич-

не та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2013)» (Україна, Дніпропетровськ 20–22 листопада 2013 р.) [21]; «Інформація комунікація і суспільство 2014» 3-тя Міжнарод. наукова конференція (Україна, Львів 21–24 травня 2014 р.) [24]; «Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях» (Україна, Харків 28–31 травня 2014 р.) [25]; «Asteroids, Comets, Meteors 2014» 12-та міжнародна конференція, (Фінляндія, Хельсинки 30 червня – 4 липня 2014 р.) [26]; «40th COSPAR Scientific Assembly» (Russia, Moscow 2–10 August 2014) [27]; «14-та українська конференція з космічних досліджень» (Україна, Ужгород 8–12 вересня 2014 р.) [28]; «International scientific and methodological conference KOLOS 2014» (Словаччина, Стакчин 4–6 грудня 2014 р.) [29, 30]; «Gaia-FUNSSO-3 International Workshop 2014» (Франція, Париж 24–26 листопада 2014 р.) [31].

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 8 статтях у фахових наукових виданнях України, 1 стаття – в журналі «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society» (Англія, входить до наукометричної бази «Scopus» impact factor 5.107), 1 стаття – у «Kinematics and Physics of Celestial Bodies», що відноситься до фізико-математичних наук (входить до наукометричної бази «Scopus» impact factor 0.361), 1 стаття у журналі «Scholars Journal of Engineering and Technology» (Індія), а також у матеріалах і збірниках тез 19 науково-технічних конференцій. Здобувач є співавтором 3 авторських прав [33–35] на твір.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 166 сторінок (з них 142 – основного тексту), містить 39 рисунків (19 с.), 32 таблиці (12 с.), список використаних літературних джерел із 149 найменувань (16 с.) та 2 додатки (8 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** викладено огляд, та проведено аналіз літератури за темою дисертації, досліджено відомі системи автоматизованого виявлення об'єктів з круговими і змазаними власним рухом зображеннями (рис. 1) та обчислювальні методи обробки таких зображень. Умови спостереження об'єктів, що досліджуються, є складними: слабо-контрастне зображення об'єктів; нерівномірно розподілений фон на кадрах; розмиття зображення об'єктів через турбулентність атмосфери; спотворення зображення об'єктів внаслідок аберацій оптичної системи; порушення добового ведення; висока швидкість видимого руху та інші. В розділі наведено критичний аналіз відомих методів і систем обробки зображень об'єктів, що досліджуються. Також вказані фактори та умови, які необхідні для створення методів оцінки положення об'єктів з круговими та змазаними власним рухом зображеннями, що мають точність, яка є близькою до потенційної. На основі матеріалів, що наведено у розділі, сформульовано завдання дослідження.

У **другому розділі** розроблено обчислювальні методи обробки цифрових

кадрів для оцінки параметрів об'єктів із круговими зображеннями та наведено аналіз точності цих методів.

У розділі вдосконалено ітераційний метод оцінки положення об'єкта з круговим зображенням на цифровому кадрі на основі субпіксельної моделі. Метод засновано на оцінці положення об'єкта за критерієм мінімуму квадратів відхилень між експериментальним і модельним зображеннями.

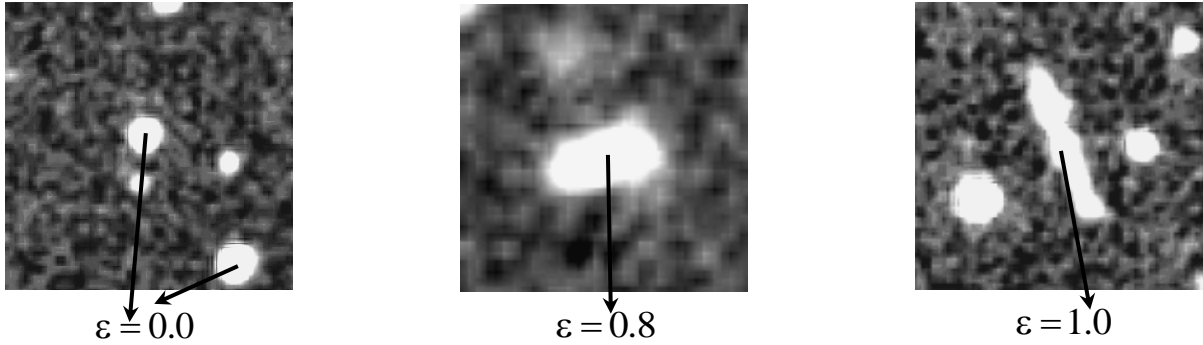


Рисунок 1 – Приклади зображень кругових та протяжних об'єктів

Зображення об'єкта знаходиться в області внутрішньокадрової обробки (ОВКО), що є множиною Ω_{Nobj} пікселів N_{IPS} , в яких передбачається наявність зображення об'єкта. Спостереженню доступні яскравості A_{ikt}^* пікселів ОВКО, які можна привести до дослідних відносних частот попадання фотонів в ik -й піксель зображення на t -му кадрі v_{ikt}^* :

$$v_{ikt}^* = A_{ikt}^* / \sum_{i,k} A_{ikt}^* \quad (1)$$

В якості моделі форми зображення об'єкта використовується субпіксельна гаусова модель, якою, з точністю до констант, вважається функція, подібна щільності розподілу координат падіння фотонів від цього об'єкта в ОВКО. Відмінність моделі від зазначеної щільності полягає у відсутності нормуючої константи:

$$f_{G2noise}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_{sh}^{sub}) = A_{noise}^{sub} x_{it} + B_{noise}^{sub} y_{kt} + C_{noise}^{sub} + \frac{A_{subGt}}{2\pi\sigma_{subGt}^2} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{subGt}^2} \left[(x_{it} - x_t(\Theta_{sh}^{sub}))^2 + (y_{kt} - y_t(\Theta_{sh}^{sub}))^2\right]\right\}, \quad (2)$$

де A_{noise}^{sub} , B_{noise}^{sub} , C_{noise}^{sub} – параметри підінтегральної фонової підкладки; A_{subGt} – підінтегральна амплітуда піка зображення об'єкта на t -му кадрі; σ_{subGt} – параметр форми підінтегральної моделі зображення об'єкта на t -му кадрі.

Адекватною моделлю фонової підкладки в рамках ОВКО є похила площина довільним нахилом з невідомими параметрами:

$$G_{noise}^{sub}(x_{it}, y_{kt}) = A_{noise}^{sub} x_{it} + B_{noise}^{sub} y_{kt} + C_{noise}^{sub}. \quad (3)$$

В рамках субпіксельної гаусової моделі відносна яскравість A_{ikt} пікселів зображення може бути представлена:

$$A_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub}) = \int_{x_{bi}}^{x_{ei}} \int_{y_{bk}}^{y_{ek}} f_{G2n}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_{sh}^{sub}) dx_{it} dy_{kt}. \quad (4)$$

При цьому вектор параметрів, що оцінюються, має вигляд:

$$\Theta_{sh}^{sub} = (A_{noise}^{sub}, B_{noise}^{sub}, C_{noise}^{sub}, x_t(\Theta_{sh}^{sub}), y_t(\Theta_{sh}^{sub}), A_{subGt}, \sigma_{subGt} = (\theta_1, \dots, \theta_n, \dots, \theta_7), \quad (5)$$

де θ_n – n -ий оцінюваний параметр.

Критерієм найкращої оцінки положення об'єкта на кадрі обрано мінімум суми квадратів відхилень між модельною та експериментальною яскравістю пікселів:

$$F_{\Delta AGsub}(\Theta_{sh}^{sub}) = \sum_{i,k}^{N_{SIFP}} \Delta A_{subm(i,k)}^2 \xrightarrow{\Theta_{sh}^{sub}} \min, \quad (6)$$

де $\Delta A_{subm(i,k)} = A_{ikt}^* - A_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub})$.

Розв'язання оптимізаційної задачі з мінімізації суми квадратів відхилень (6) здійснюється за допомогою алгоритму Левенберга-Марквардта (АЛМ).

Для реалізації АЛМ використовується матриця Якобі $J_{\Delta AG}$ (7), елементами якої є часткові похідні відхилень $\Delta A_{subm(i,k)}$ між модельною та експериментальною яскравістю пікселя за оцінюваними параметрами в кожному пікселі множини Ω_{SIFP} .

$$J_{\Delta AG}^{sub} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta A_{ns_1(1,1)}^{sub}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{ns_1(1,1)}^{sub}}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{ns_1(1,1)}^{sub}}{\partial \theta_8} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}}{\partial \theta_8} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta A_{ns_N_{SIFP}(i,k)}^{sub}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{ns_N_{SIFP}(i,k)}^{sub}}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{ns_N_{SIFP}(i,k)}^{sub}}{\partial \theta_8} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Елементи матриці Якобі мають вигляд:

$$\frac{d\Delta A_{subm(i,k)}}{dA_{noise}^{sub}} = -\Delta_{CCD}^2 y_{kt}; \quad \frac{d\Delta A_{subm(i,k)}}{dB_{noise}^{sub}} = -\Delta_{CCD}^2 x_{it}; \quad \frac{d\Delta A_{subm(i,k)}}{dC_{noise}^{sub}} = -\Delta_{CCD}^2; \quad (8)$$

$$\frac{d\Delta A_{subm(i,k)}}{dx_t(\Theta_{sh}^{sub})} = -\frac{A_{subGt} F_{yk}(y_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) F_{xi}(x_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} (m_{x_{it}}^{loc} - x_t(\Theta_{sh}^{sub})); \quad (9)$$

$$\frac{d\Delta A_{subm(i,k)}}{dy_t(\Theta_{sh}^{sub})} = -\frac{A_{subGt} F_{xi}(x_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) F_{yk}(y_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} (m_{y_{kt}}^{loc} - y_t(\Theta_{sh}^{sub})); \quad (10)$$

$$\frac{d\Delta A_{subm(i,k)}}{d\sigma_{subGt}} = -\frac{A_{subGt} F_{yk}(y_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} ((x_{ei} - x_t(\Theta_{sh}^{sub})) N_{x_{ei}}(x_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) - (x_{bi} - x_t(\Theta_{sh}^{sub})) N_{x_{bi}}(x_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2)) - \frac{A_{subGt} F_{xi}(x_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} \times ((y_{ei} - y_t(\Theta_{sh}^{sub})) N_{y_{ei}}(y_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) - (y_{bi} - y_t(\Theta_{sh}^{sub})) N_{y_{bi}}(y_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2)); \quad (11)$$

$$\frac{d\Delta A_{subm(i,k)}}{dA_{subGt}} = -F_{xi}(x_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) F_{yk}(y_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2). \quad (12)$$

де $m_{z_i}^{loc} = \sigma^2 / F_{zi}(m_z; \sigma^2) \int_{z_{bi}}^{z_{ei}} z N_z(m_z; \sigma^2) dz$ – локальне математичне очікування випадкової величини z на інтервалі $[z_{bi}, z_{ei}]$ при використанні вірогідного трактування та просто позначення в іншому випадку;

$$N_z(m_z; \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(z - m_z)^2\right); \quad (13)$$

$$F_{zi}(m_z; \sigma^2) = \int_{z_{ei}}^{z_{bi}} N_z(m_z; \sigma^2) dz. \quad (14)$$

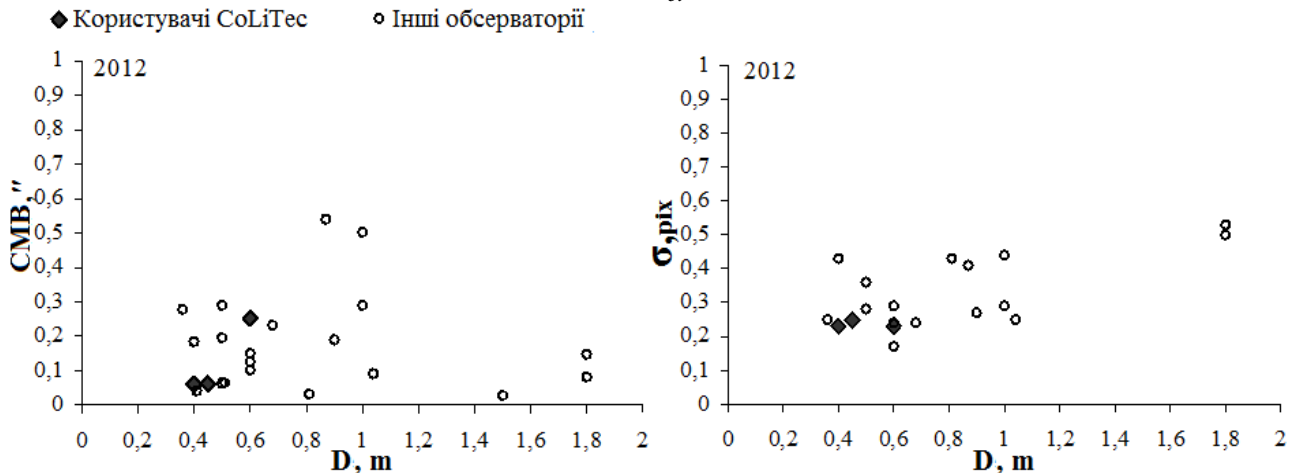


Рисунок 2 – Провідні астероїдні огляди світу за даними 2012 року: а) середній модуль відхилень вимірювань, в кутових секундах; б) СКВ вимірювань σ_{pix} , в пікселях

Розроблені обчислювальні методи обробки цифрових кадрів для оцінки параметрів кругових об'єктів було впроваджено в рамках ПЗ CoLiTec. Значні досягнення користувачів CoLiTec призвели до розрахунку та публікації показників точності ПЗ CoLiTec Центром малих планет у Гарварді (Minor Planet Center, MPC). За середнім модулем відхилень обсерваторії-партнери CoLiTec займають одні з перших позицій у своєму класі телескопів (рис. 2а) серед ТОП-30 обсерваторій світу. Так в 2012 році модуль середніх відхилень на обсерваторіях H15 і A50 дорівнював 0.06". За середньоквадратичним відхиленням (СКВ) вимірювань σ_{pix} , в пікселях, обсерваторії-користувачі CoLiTec є одними з кращих

у переліку ТОП-30 обсерваторій світу і кращими серед обсерваторій, що використовують телескопи з малою апертурою. Обсерваторії-партнери CoLiTec мають практично однакові СКВ (в пікселях): H15 – 0.25 pixel, A50 – 0.23 pixel, D00 – 0.23 pixel.

Також проводився порівняльний аналіз показників точності ПЗ CoLiTec та ПЗ Astrometrica за результатами обробки одних і тих самих кадрів. При малих відношеннях сигнал-шум (ВСШ) (табл. 1) вимірювання ПЗ Astrometrica мають СКВ на 30 – 50% більше, ніж ПЗ CoLiTec (рис. 3). CoLiTec має меншу частоту критичних відхилень. Середні відхилення ПЗ CoLiTec та Astrometrica у загальному випадку приблизно однакові.

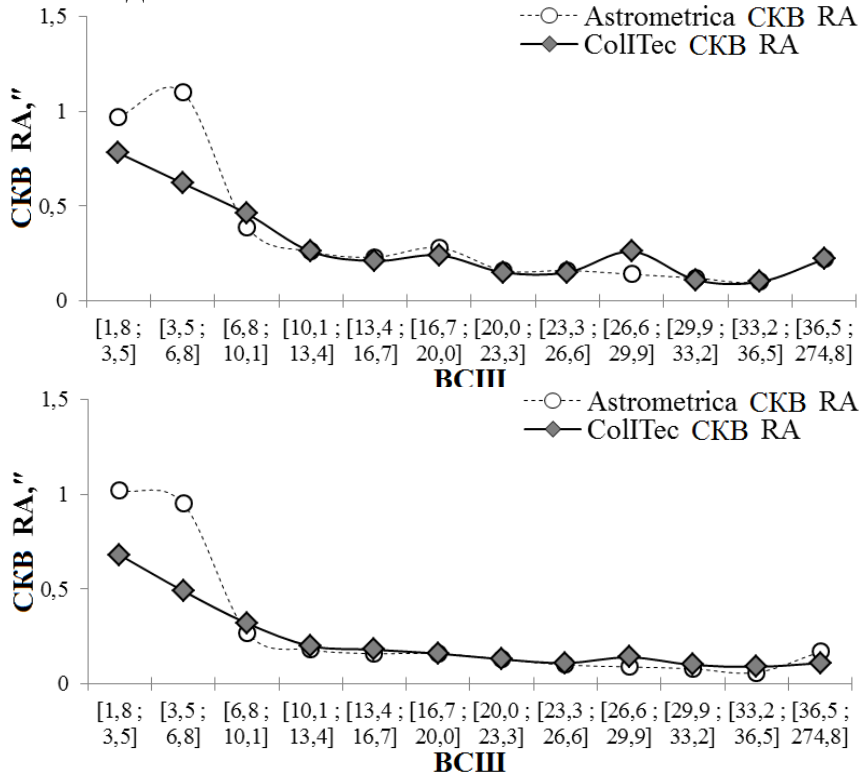


Рисунок 3 – Графіки залежності СКВ оцінок екваторіальних координат від ВСШ

Основні результати розділу опубліковано в [5, 7, 9, 16, 18, 19, 22–25, 27–30].

У **третьому розділі** запропоновано обчислювальні методи оцінки положення об'єкта з цифровим зображенням, що змазане власним рухом (рис. 4), на цифрових кадрах на основі субпіксельної моделі зображення об'єктів, які використовують критерій мінімуму суми квадратів відхилень між експериментальною та модельною яскравостями пікселів та критерій максимальної правдоподібності.

Використання запропонованих методів дозволяє розширити межі достовірних вимірювань на область зображень з малими ВСШ. Також в третьому розділі вперше запропоновано метод виділення зображень об'єктів, що змазані власним рухом.

При значному часі експозиції Δ_t зображення об'єкта, що змазане його власним видимим рухом, має форму пагорба, що простягається вздовж напрямку його видимого руху. Таке зображення об'єкта можна назвати протяжним, іноді й сам об'єкт називають протяжним в цьому контексті.

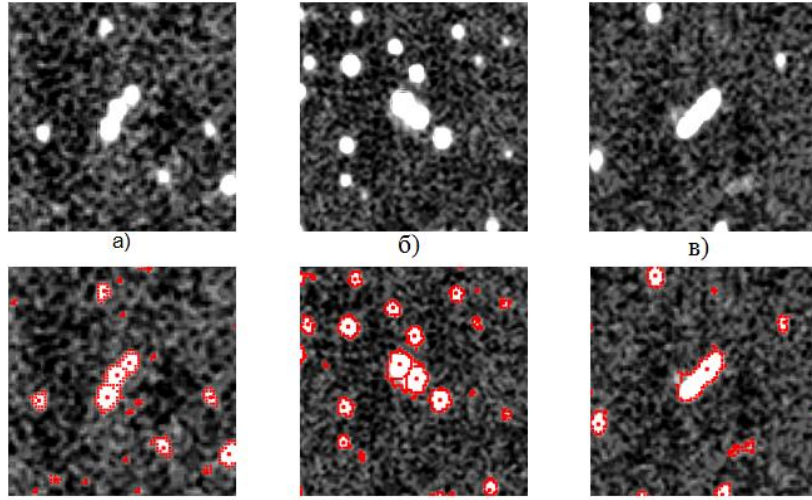


Рисунок 4 – Зображення об'єктів, що змазані власним рухом

Таблиця 1 – Розподіл відхилень за ВСШ (ПЗ Astrometrica та CoLiTec)

ВСШ		Вимірювання	Astrometrica		CoLiTec	
min	max		СКВ RA	СКВ DE	СКВ RA	СКВ DE
1,8	3,5	119	0,97	1,02	0,78	0,68
3,5	6,8	804	1,10	0,95	0,62	0,49
6,8	10,1	397	0,39	0,27	0,46	0,32
10,1	13,4	215	0,26	0,18	0,26	0,20
13,4	16,7	130	0,23	0,16	0,21	0,18
16,7	20,0	69	0,28	0,16	0,24	0,16
20,0	23,3	65	0,16	0,13	0,15	0,13
23,3	26,6	49	0,16	0,10	0,15	0,11
26,6	29,9	36	0,14	0,09	0,26	0,14
29,9	33,2	26	0,12	0,08	0,11	0,10
33,2	36,5	13	0,10	0,06	0,10	0,09
36,5	274,8	79	0,22	0,17	0,22	0,11
Всього		2002	0,77	0,67	0,50	0,39

При проведенні досліджень вважалося, що в фокальній площині телескопа об'єкт рухається рівномірно уздовж кожної координати (рис. 5):

$$\begin{aligned} x_{\tau}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) &= x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{xit}(\tau - \tau_t); \\ y_{\tau}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) &= y_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{ykt}(\tau - \tau_t), \end{aligned} \quad (15)$$

де τ – час; τ_t – час прив'язки t -го кадра (як правило, τ_t відповідає моменту половини часу експозиції); $x_{\tau}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}})$, $y_{\tau}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}})$ – координати об'єкта на час τ ; $x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}})$, $y_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}})$ – координати об'єкта на момент прив'язки кадру τ_t (як правило, половина часу експозиції); V_{xit} , V_{ykt} – швидкість об'єкта за координатами і від-повідно; $\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}$ – вектор параметрів моделі зображення об'єкта.

Вважається, що при оцінці положення протяжного об'єкта за його зображенням досліджується тільки область зображення гіпотетичного об'єкта Ω_{IPSS} (ОЗГО). ОЗГО є частиною області внутрішньокадрової обробки Ω_{IPSS} , в яку

входить N_{IPSt} пікселів, що містять зображення об'єкта. Експериментальні яскравості A_{ikt}^* зводяться до відносних яскравостей v_{ikt}^* (1). При цьому результатом спостережень є сукупність відносних яскравостей $\tilde{U} = (v_{11t}^*, \dots, v_{ikt}^*, \dots, v_{N_{IPSt}}^*)$.

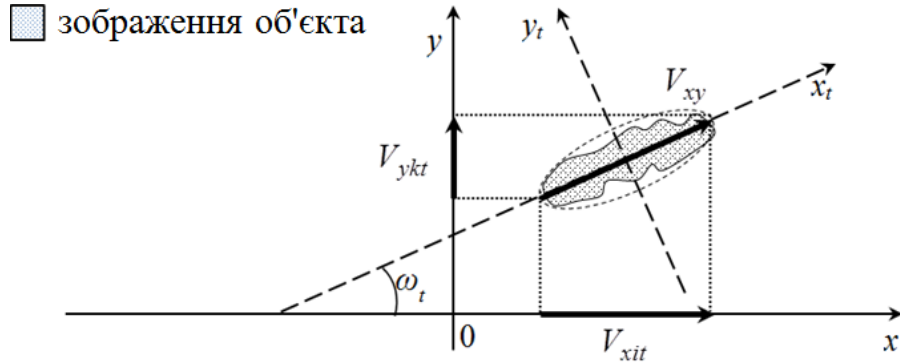


Рисунок 5 – Зображення об'єкту та його рух

В рамках субпіксельної гауссової моделі модельна яскравість $A_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ пікселя цифрового зображення об'єкта, що змазане власним рухом (протяжного зображення об'єкта), може бути представлена виразом:

$$A_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) = \int_{x_{bi}}^{x_{ei}} \int_{y_{bk}}^{y_{ek}} \int_{\tau_t - \Delta/2}^{\tau_t + \Delta/2} f_{G2}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_{\tau noise}^{sub}) dx_{it} dy_{kt}. \quad (16)$$

У роботі обрано два критерії якості оцінок положення зображення об'єкта. Одним з них є мінімум суми квадратів відхилень між експериментальною A_{ikt}^* та модельною $A_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ яскравістю пікселів ОВКО (аналогічно 6).

Для мінімізації першого використовується АЛМ. При цьому матриця Якобі формується з часткових похідних від відхилення за параметрами вектора $\Theta_{\tau noise}^{sub}$ і виглядає аналогічно матриці (7).

Похідні від відхилення $\Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}$ між експериментальною і модельною яскравістю пікселя, за параметрами фонові підкладки мають вигляд аналогічний (8).

Елементи матриці Якобі для відхилення $\Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}$ мають вигляд:

$$\frac{d\Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}}{dx_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})} = -\frac{1}{N_G} \sum_{n=0}^{N_G} (m_{x_{it}}^{loc} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \cos \omega_t) \times \frac{A_{Gt}^{sub} F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} \times F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2); \quad (17)$$

$$\frac{d\Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}}{dy_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})} = -\frac{1}{N_G} \sum_{n=0}^{N_G} (m_{y_{kt}}^{loc} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \sin \omega_t) \times \frac{A_{Gt}^{sub} F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} \times F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2); \quad (18)$$

$$\frac{d\Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}}{d\sigma_{subGt}} = -\frac{1}{N_G} \sum_{n=0}^{N_G} \frac{A_{Gt}^{sub} F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} \times$$

$$\begin{aligned}
& \times ((x_{ei} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \cos \omega_t) N_{x_{ei}}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2) - \\
& - (x_{bi} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \cos \omega_t) N_{x_{bi}}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2)) - \\
& - \frac{A_{Gt}^{sub} F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} \times \\
& \times ((y_{ei} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})) N_{y_{ei}}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2) - \\
& - (y_{bi} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})) N_{y_{bi}}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2)); \quad (19)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d\Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}}{dA_{Gt}^{sub}} &= -\frac{1}{N_G} \sum_{n=0}^{N_G} F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2) \times \\
& \times F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2); \quad (20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d\Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}}{d\omega_t} &= -\frac{1}{N_G} \sum_{n=0}^{N_G} A_{Gt}^{sub} \ell_n F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2) \times \\
& \times F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2) (\cos \omega (m_{ykt}^{loc} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \sin \omega_t) - \\
& - \sin \omega_t (m_{xit}^{loc} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \cos \omega_t)), \quad (21)
\end{aligned}$$

де ω_t – кут між напрямком руху об'єкту і віссю абсцис в системі координат кадра; $\ell_n = -\frac{d}{2} + n \cdot \frac{d}{N_G - 1}$ – положення об'єкта на n -й момент часу (враховуючи, що вся експозиція представлена розділеною на моменти часу, кількість яких дорівнює N_G) або положення n -ої гаусіани з N_G , що використовуються для апроксимації зображення об'єкта, що змазане власним рухом; d – довжина шляху (в пікселях), що пройдена об'єктом за час експозиції, яка також є довжиною зображення об'єкта.

Іншим критерієм оцінки положення протяжного об'єкта в роботі використовується критерій максимальної правдоподібності. При цьому функція правдоподібності $L(\Theta_{mlm}^{sub})$ відповідає умовній, за параметрами зображень об'єктів і фоновій підкладці, ймовірності формування нормованого зображення, що спостерігається. Враховуючи вірогідний характер розподілу координат сигнальних фотонів в пікселях зображення вираз для ймовірності попадання сигнальних фотонів в ik -й піксель зображення має вигляд, аналогічний (16). Функція правдоподібності $L(\Theta_{mlm}^{sub})$ є добутком ймовірностей $v_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ попадання сигнальних фотонів в пікселі зображення на момент часу, зведених у ступінь, що пропорційна кількості фотонів, які потрапили в дані пікселі.

Загальний вигляд рівнянь системи рівнянь максимальної правдоподібності для оцінки положення об'єктів зі змазаним зображенням можна подати у вигляді:

$$\sum_{i,k}^{N_{IPS}} \frac{v_{ikt}^*}{v_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})} \frac{\partial v_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})}{\partial \theta_n} = 0. \quad (22)$$

Система рівнянь максимальної правдоподібності з використанням субпіксельної моделі має вигляд:

$$\begin{cases} \hat{x}_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) = \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \frac{\upsilon_{ikt}^*}{N_G} \lambda_{ikt} m_{xi}^{loc} / \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \frac{\upsilon_{ikt}^*}{N_G} \lambda_{ikt}; \\ \hat{y}_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) = \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \frac{\upsilon_{ikt}^*}{N_G} \lambda_{ikt} m_{yk}^{loc} / \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \frac{\upsilon_{ikt}^*}{N_G} \lambda_{ikt}, \end{cases} \quad (23)$$

де $\lambda_{ikt} = \sum_{n=0}^{N_G} \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} g_{1iktn} / \sum_{n=0}^{N_G} \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} g_{2iktn}$ – апостеріорні ймовірності приналежності фотонів ik -го пікселя t -го кадру об'єкту;

$$g_{1iktn} = p_1(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma^2)(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma^2); \quad (24)$$

$$g_{2iktn} = \frac{p_0}{N_G N_{IPSS}} + \sum_{n=0}^{N_G} p_1(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma^2)(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma^2); \quad (25)$$

$$p_1 = \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \lambda_{ikt} \upsilon_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) / \left(\lambda_0 + \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \lambda_{ikt} \upsilon_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) \right) - \text{оцінка відносної}$$

ваги фотонів від об'єкта; $\upsilon_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) = p_0 / N_G N_{IPSS} + \sum_{n=0}^{N_G} p_1 F_{ik}$ – вірогідність попадання сигнальних фотонів в i -й піксель зображення на t -му кадрі;

$$F_{ik} = F_{xi}(m_x, \sigma^2) F_{yk}(m_y, \sigma^2), \quad (26)$$

$N_z(m_z; \sigma^2)$ – значення щільності нормального розподілу з математичним

очікуванням m_z та дисперсією σ^2 у точці z ; $p_0 = \lambda_0 / \lambda_0 + \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \lambda_{ikt} \upsilon_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ – вираз для оцінки відносного ваги фонових фотонів у області Ω_{IPSS} ;

$\lambda_0 = \frac{1}{N_{IPSS}} \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} (p_0 \upsilon_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})) / \left(\frac{p_0}{N_G N_{IPSS}} + p_1 F_{ik} \right)$ – апостеріорні ймовірності приналежності фотонів у області Ω_{IPSS} фоновій підкладці; $\hat{x}_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ – оцінка координати об'єкта.

Рівняння максимальної правдоподібності для оцінки СКВ має вигляд:

$$\hat{\sigma}_{subGt}^2 \approx \left(\sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \upsilon_{ikt}^* \lambda_{ikt} \left((m_{xi}^{loc} - \hat{x}_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}))^2 + (m_{yk}^{loc} - \hat{y}_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}))^2 \right) \right) / \left(2 \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \upsilon_{ikt}^* \lambda_{ikt} \right). \quad (27)$$

Метод виділення зображень об'єктів, що змазані власним рухом, включає в себе три етапи: виділяються зображення з ознаками протяжних; з виділених на першому етапі зображень виключаються ті, які визнані відповідними об'єктам з нульовим видимим рухом на серії кадрів; перевіряється узгодженість положень виділених протяжних зображень на різних кадрах.

На етапі виявлення використовується лінійна модель незалежного видимого руху об'єкту уздовж кожної координати (15) (рис.6).

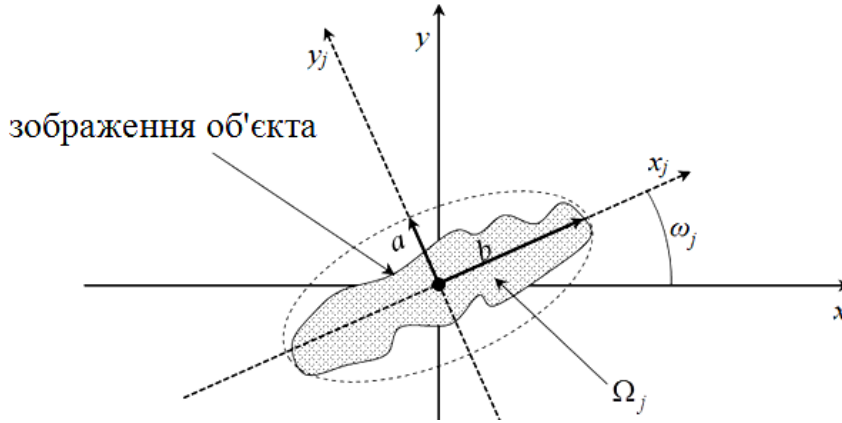


Рисунок 6 – Напрямок осей витягнутості зображення об'єкта

Обчислювальний метод виділення (виявлення) зображення об'єктів, що змазані власним рухом, включає наступні етапи.

Етап 1. З множини зображень об'єктів на кадрі вибираються зображення, які мають ознаки протяжних (ексцентриситет $\varepsilon_{kr} \geq 0.7$, ВСШ $q_{kr} \geq 50$):

$$\hat{\varepsilon} > \varepsilon_{kr}; \quad (28)$$

$$\hat{q} > q_{kr}, \quad (29)$$

де $\hat{q} = A_{\Omega_j} / \hat{\sigma}_{noise}$ – оцінка ВСШ; $\hat{\sigma}_{noise}$ – оцінка СКВ яскравості фону.

Етап 2. Виключення з протяжних вимірювань кадру тих вимірювань, що належать каталогу об'єктів, нерухомих на серії кадрів.

Етап 3. Протяжні зображення (по одному на кожному кадрі) об'єднуються в серію протяжних зображень одного об'єкта.

3.1 Перевірка поточних протяжних зображень на відповідність уже сформованим стробам:

$$x_{\min et} < \hat{x}_t < x_{\max et}; \quad (30)$$

$$y_{\min et} < \hat{y}_t < y_{\max et}.$$

У разі потрапляння чергового зображення в один із зазначених стробів з використанням методу найменших квадратів уточнюються параметри даного строба відповідно до уточнених параметрів видимого руху об'єкта уздовж кожної координати (\hat{x}_0 положення на базовому кадрі і \hat{V}_x – швидкість):

$$\hat{x}_0 = \frac{D \cdot A_x - C \cdot B_x}{T \cdot D - C^2}; \quad \hat{V}_x = \frac{T \cdot B_x - C \cdot A_x}{T \cdot D - C^2}, \quad (31)$$

$$\hat{y}_0 = \frac{D \cdot A_y - C \cdot B_y}{T \cdot D - C^2}; \quad \hat{V}_y = \frac{T \cdot B_y - C \cdot A_y}{T \cdot D - C^2}, \quad (32)$$

де $A_x = \sum_{t=1}^{N_{mea}} \hat{x}_t$; $B_x = \sum_{t=1}^{N_{mea}} \Delta_{tfr} \hat{x}_t$; $A_y = \sum_{t=1}^{N_{mea}} \hat{y}_t$; $B_y = \sum_{t=1}^{N_{mea}} \Delta_{tfr} \hat{y}_t$; $C = \sum_{t=1}^{N_{mea}} \Delta_{tfr}$;

$D = \sum_{t=1}^{N_{mea}} \Delta_{tfr}^2$; Δ_{tfr} – час між поточним і базовим кадрами $\Delta_{tfr} = (\tau_t - \tau_0)$.

3.2 Для кожного ізольованого протяжного зображення (що не потрапило у вже існуючі строби) формується новий строб з параметрами (положенням і

розмірами).

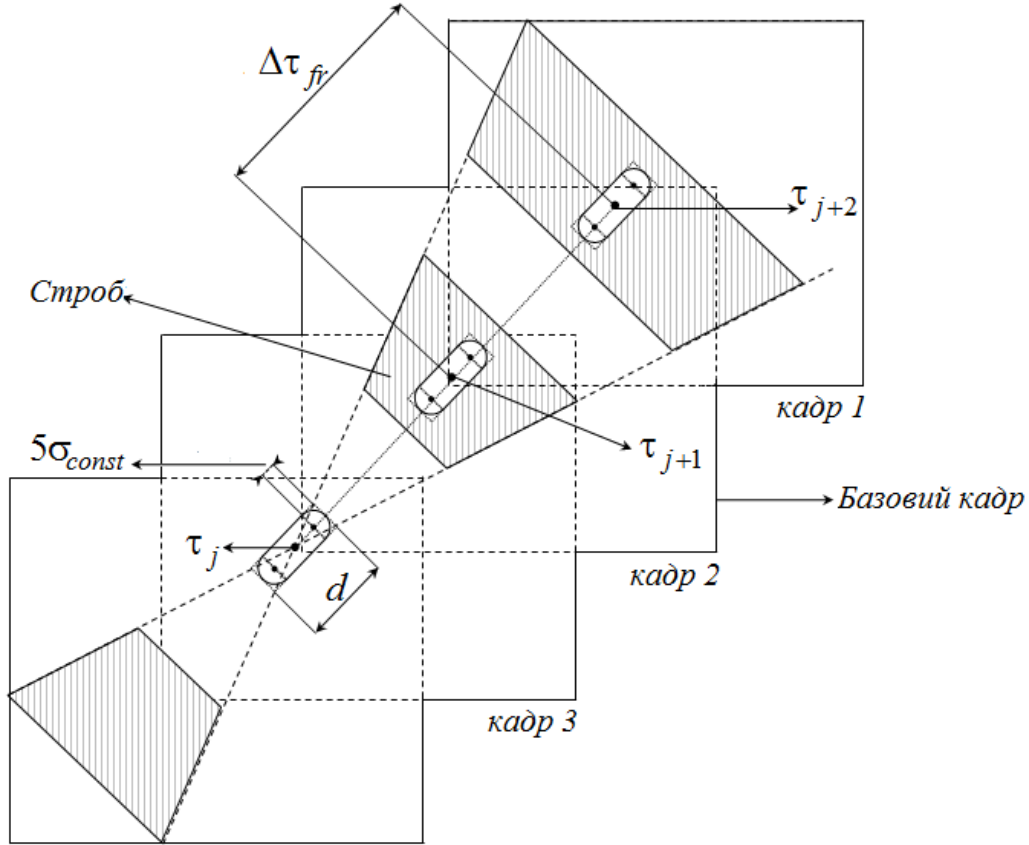


Рисунок 7 – Серія кадрів з протяжним зображенням об'єкта

Положення стробів (екстрапольоване положення об'єкта) визначаються відповідно до лінійної моделі видимого руху об'єкта:

$$\hat{x}_{et} = \hat{x}_0 + \hat{V}_x(\tau - \tau_0); \quad \hat{y}_{et} = \hat{y}_0 + \hat{V}_y(\tau - \tau_0). \quad (33)$$

Межі стробів визначаються виразами:

$$x_{\min t}^* = \hat{x}_0 + \hat{V}_{\min x} \Delta_{\tau fr}; \quad x_{\max t}^* = \hat{x}_0 + \hat{V}_{\max x} \Delta_{\tau fr}; \quad (34)$$

$$y_{\min t}^* = \hat{y}_0 + \hat{V}_{\min y} \Delta_{\tau fr}; \quad y_{\max t}^* = \hat{y}_0 + \hat{V}_{\max y} \Delta_{\tau fr}, \quad (35)$$

де $\hat{V}_{\min x}, \hat{V}_{\max x}, \hat{V}_{\min y}, \hat{V}_{\max y}$ – оцінки мінімальної та максимальної швидкості протяжного об'єкта за координатами x та y відповідно: $\hat{V}_{\min} = (d - 10\sigma_{cont})/\Delta_{\tau}, \hat{V}_{\max} = (d + 10\sigma_{cont})/\Delta_{\tau}$; σ_{cont} – СКВ координат меж зображення (СКО радіуса зображення); d – довжина шляху (в пікселях), що пройдена об'єктом за час експозиції, яка також є довжиною зображення об'єкта; Δ_{τ} – час експозиції.

3.3 Об'єкт з великим видимим рухом вважається виявленим, якщо на N_{fr} кадрах у відповідні строби потрапило m вимірювань, сформованих за протяжними зображеннями.

Дослідження даного метода представлені за результатами обробки 8 кадрів розміру 3056x3056 пікселів. Кадри отримані з обсерваторії ISON-NM. В середньому на кожному кадрі було сформовано близько 42 тисяч вимірювань.

Після першого етапу запропонованого методу з 42 тисяч вимірювань залишається близько 3,5% вимірів, які можуть відповідати протяжним зображенням. Після виключення об'єктів внутрішнього каталогу об'єктів, що нерухомі на серії кадрів, з усієї кількості вимірювань кадру залишається тільки 1% вимірів, які можуть відповідати протяжним зображенням. Після використання третього етапу метода помилкового виявлення об'єктів з високою швидкістю видимого руху при експериментальних дослідженнях виявлено не було.

Основні результати розділу опубліковано в роботах [4, 5, 7–10, 15].

У четвертому розділі розглядається використання розроблених обчислювальних методів оцінки параметрів об'єктів з зображеннями, що змазані власним рухом, в системах автоматизованого виявлення астероїдів. Реалізовані методи в рамках ПЗ CoLiТес були застосовані в 4 обсерваторіях. Обсерваторії-користувачі ПЗ CoLiТес мають одні з кращих показників точності по виявленню в світі. Досягнення ПЗ CoLiТес визнані на міжнародному рівні.

Основні результати розділу опубліковано в роботах [7, 8, 26–30].

ВИСНОВКИ

Для підвищення точності оцінки положення об'єктів з круговими та змазаними власним рухом зображеннями на цифрових кадрах отримано розв'язання науково-технічної задачі розробки ефективних обчислювальних методів обробки цифрових зображень для оцінки положення вказаних небесних об'єктів з круговими зображеннями та зображеннями, що змазані власним рухом.

В результаті досліджень було отримано такі нові наукові результати.

1. Розроблено обчислювальний метод обробки цифрових кадрів для оцінки параметрів кругових об'єктів, який дозволяє з точністю, близькою до потенційної, оцінювати місцезнаходження об'єктів з круговим зображенням на цифровому кадрі. В якості моделі форми зображення об'єкта використана субпіксельна гауссова модель, яка описує розподіл попадання фотонів в пікселі цифрового кадру (при наявності в ньому зображення кругового об'єкта) із заданими параметрами. У тому числі запропонована модель враховує наявність фонові підкладки та дозволяє оцінювати її параметри, а у разі її попереднього вирахування – параметри залишкової фонові складові. Субпіксельна гауссова модель також враховує основні особливості процесу формування зображення на цифровому кадрі. Завдання щодо мінімізації суми квадратів відхилень між модельною та експериментальною яскравістю пікселів вирішується за допомогою стандартного алгоритму Левенберга-Марквардта.

2. Розроблено обчислювальні методи оцінки параметрів цифрових зображень об'єктів, змазаних власним рухом, на цифрових кадрах. Методи дозволяють з точністю, близькою до потенційної, оцінювати розташування протяжних об'єктів на цифровому кадрі. В якості моделі форми зображення об'єкта використана субпіксельна гауссова модель, яка описує розподіл координат падіння фотонів в області кадру (у будь-який момент часу τ), відповідної зображенню протяжного об'єкта. У тому числі запропонована модель враховує наявність фонові підкладки і дозволяє оцінювати її параметри, а у разі її попереднього

вирахування – параметри залишкової фонові складові. Методи використовують критерій мінімуму суми квадратів відхилень між експериментальною та модельною яскравостями пікселів та критерій максимальної правдоподібності. Використання даних методів дозволяє розширити прибудови достовірних вимірювань на область зображень з малим відношенням сигнал-шум.

3. Розроблено метод виділення зображень об'єктів, що змазані власним рухом. Даний метод складається з трьох етапів. На першому етапі виділяються зображення, відповідні селективним ознаками протяжних зображень. На другому етапі виключаються сформовані випадковим чином кластери об'єктів з круговими зображеннями. На третьому етапі методом, що належить до класу стробових, перевіряється узгодженість положень виділених протяжних зображень на різних кадрах. Використання даного метода максимізує ймовірність виявлення об'єктів з високою швидкістю видимого руху при практичному виключенні виявлення подібних помилкових об'єктів.

Результати дослідження даного метода показали, що після вилучення об'єктів внутрішнього каталогу з усієї кількості вимірювань кадру залишається тільки 1% вимірів, які гіпотетично можуть відповідати протяжним зображенням. Також використання третього етапу метода помилкових виявлень об'єктів з високою швидкістю видимого руху при експериментальних дослідженнях знайдено не було.

4. Наведено аналіз обчислювального методу обробки цифрових кадрів для оцінки параметрів кругових об'єктів у рамках ПЗ CoLiTec. Дослідження підтвердили високу точність вимірювань ПЗ CoLiTec (розділ 2.4).

5. Порівняння статистичних характеристик вимірювань ПЗ CoLiTec і Astrometrica по одному і тому ж набору тестових кадрів свідчить, що межі достовірних вимірювань ПЗ CoLiTec ширше, ніж у ПЗ Astrometrica, та це розширення відповідає області гранично малих ЗСШ, в результаті чого знаходяться об'єкти, які не помічає око. При ЗСШ, що перевищує 6, результати приблизно однакові.

6. Розроблені обчислювальні методи успішно використовуються в рамках ПЗ CoLiTec. Реалізовані методи в рамках ПЗ CoLiTec було застосовано на наступних обсерваторіях: Андрушівській астрономічній обсерваторії, в Російській віддаленій обсерваторії ISON-NM (Mayhill, New Mexico, USA), а також в обсерваторіях ISON-Кисловодськ і ISON-Уссурійськ. Обсерваторії, що використовують ПЗ CoLiTec мають одні з кращих показників точності по виявленню у світі. Результати роботи програми визнані на міжнародному рівні.

7. Програмний комплекс, що використовує розроблені обчислювальні методи, може бути корисний іншим астрономічним обсерваторіям України та світу для виявлення астероїдів і комет з круговими і протяжними зображеннями.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Безкровный М.М. Оценка местоположения объекта на ПЗС-кадре при среднем времени экспозиции / Безкровный М.М., А.М. Кожухов, В.Е. Саваневич, А.Б. Анненков, Соковикова Н.С. // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Харків: ХУПС, 2012. – Вип. 7 (105). – С. 44 – 50.

2. Соковикова Н.С. Оценка координат близких астероидов на ПЗС-

изображении / Н.С. Соковикова, В.Е. Саваневич, М.М. Безкровный, С.В. Хламов // Восточно-Европейского журнала передовых технологий. – 2013. – Т. 4/4 (64). – С. 41 – 45.

3. Соковикова Н.С. Подпиксельный метод оценки местоположения близких астероидов на дискретном изображении / Н.С. Соковикова, В.Е. Саваневич, М.М. Безкровный, С.В. Хламов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2013. – №. 3 (62). – С. 32 – 38.

4. Безкровный М.М. Пиксельный метод оценки местоположения объектов с изображением, смазанным собственным движением / М.М. Безкровный, С.В. Хламов, В.Е. Саваневич, Н.С. Соковикова // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2013. – №. 3 (12). – С. 128 – 131.

5. 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.

6. Михайлова Л. О. 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 // Восточно-Европейского журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 5/4 (71). – С. 16 – 22.

7. 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. Bezkrorny, 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.

8. Sokovikova N. S. 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. Bezkrorny, A. V. Pogorelov, S. V. Khlamov // Scholars Journal of Engineering and Technology. – 2015. – Т. 3 (2a). – С. 153-165.

9. Безкровный М. М. Методы исследования статистических характеристик CCD-измерений положений и блеска объектов солнечной системы / М. М. Безкровный, А. Н. Дашкова, Н. С. Соковикова, В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий // Восточно-Европейского журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 2/2 (22). – С. 26 – 37.

10. Саваневич В. Е. Метод выделения изображений небесных объектов, смазанных собственным движением / В. Е. Саваневич, Н. С. Соковикова, М. М. Безкровный, А. Б. Брюховецкий // Вестник НТУ ХПИ. – 2015. – Т. 39 (1148). – С. 83 – 92.

11. Безкровный М.М. Метод выбора начальных приближений для оценки координат объектов со статистически зависимыми цифровыми изображениями / М.М. Безкровный, Н.С. Соковикова, В.Е. Саваневич, С.В. Хламов, А.Н. Дашкова. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 68. – Х., 2015. – С. 173-188

12. Savanevych, V. E. Comparative analysis of the positional accuracy of CCD measurements of small bodies in the solar system software CoLiTec and Astrometrica [Текст] / V. E. Savanevych, A. B. Briukhovetskyi, Yu. N. Ivashchenko, I. B. Vavilova,

M. M. Bezkrivnyy, 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). – С. 302-313

13. Саваневич, В.Е. Сравнительный анализ показателей точности позиционных ПЗЗ-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, Н.Ю. Дихтяр, Л.В. Еленин, А.В. Погорелов, С.В. Хламов // *Кинематика и физика небесных тел* – 2015. – 31, № 6 – С. 55-69.

14. Savanevych V. E. Estimating the astronomical object parameters through CCD-frames in CoLiTec project: the current state perspectives / V. E. Savanevych, A. V. Bryukhovetskiy, M.M. Bezkrivnyy, N.S. Sokovikova, S.V. Khlamov, K. S. Smelyakov, I.B. Vavilova, L. Elenin, Yu. N. Ivashenko // *Astronomy Space Physics Annual International Conference, May 21-24, 2013.: book of abstracts.* – Kyiv, Ukraine. – С. 89–90.

15. Безкровный М. М. Оценка местоположения объекта на ПЗС-кадре при среднем времени экспозиции / М. М. Безкровный, Н. С. Соковикова // *Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 17-й Междунар. молодеж. форум, 22–24 апреля 2013 г. : сб. матер. форума.* – Т. 5. – Харьков, 2013. – С. 176 – 177.

16. Соковикова Н. С. Оценка координат астероида на дискретном изображении (многоцелевой случай) / Н. С. Соковикова, М. М. Безкровный // *Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 17-й Междунар. молодеж. форум, 22–24 апреля 2013 г. : сб. матер. форума.* – Т. 5. – Харьков, 2013. – С. 242 – 243.

17. Безкровный М. М. Оценка координат протяженных объектов на ПЗС-кадре при среднем времени экспозиции / М. М. Безкровный, Н. С. Соковикова // *Современные направления развития информационно-коммуникационных технологий и средств. Материалы третьей международной научно-технической конференции, 11–12 апреля 2013 г.: сб. матер. конф.* – Харьков, Украина, 2013. – С. 40.

18. Соковикова Н. С. Оценка местоположения близких объектов на ПЗС-кадре / Н. С. Соковикова, М. М. Безкровный // *Современные направления развития информационно-коммуникационных технологий и средств. Материалы третьей международной научно-технической конференции, 11–12 апреля 2013 г.: сб. матер. конф.* – Харьков, Украина, 2013. – С. 41.

19. Соковікова Н. С. Оцінка координат близьких об'єктів на ПЗЗ-кадрі / Н.С. Соковікова, В. Є. Саваневич, М. М. Безкровний // *Усеукраїнська наукова конференція «Математичне моделювання та математична фізика» присвячена 90-річчю від дня народження В.М. Глушкова, 23–27 вересня 2013 р.: матеріали конференції.* – Кременчуг, Україна, 2013. – С. 72–73.

20. Безкровний М.М. Оцінка координат протяжних об'єктів на ПЗЗ-кадрі при середньому часі експозиції / М. М. Безкровний, В. Є. Саваневич, Н.С. Соковікова // *Усеукраїнська наукова конференція «Математичне моделювання та математична фізика» присвячена 90-річчю від дня народження В.М. Глушкова, 23–27 вересня 2013 р.: матеріали конференції.* – Кременчуг, 2013. – С. 38–39.

21. Безкровный М. М., Саваневич В.Е., Соковикова Н.С. Пиксельные методы оценки местоположения объектов компактной группы с возможным смазом изображений собственным движением отдельных объектов [Электронный ресурс] / М. М. Безкровный, В.Е. Саваневич, Н.С. Соковикова // *XI Міжнародна науково-*

практична конференція «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2013)», 20–22 ноября 2013 г.: сб. матер. конф. – Днепропетровск, Украина, 2013. – Режим доступа к публ.: <http://uk.xlibx.com/4ekonomika/1250210-3-institut-kibernetiki-im-glushkova-nan-ukraini-institut-prikladnogo-sistemnogo-analizu-ntuu-kpi-mon-ukraini.php>

22. Безкровный М. М. Методы определения статистических свойств оценок положения и блеска небесных объектов с использованием Интернет-ресурсов/ М. М. Безкровный, А. Н. Дашкова, Н. С. Соковикова // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 18-й Междунар. молодеж. форум, 14–16 апреля 2014 г.: сб. матер. форума. – Т. 5. – Харьков, Украина, 2014. – С. 158–159.

23. Безкровный М. М. Методы оценки местоположения объектов компактных групп на цифровом изображении/ М. М. Безкровный, Н. С. Соковикова, Р. Ю. Кулик // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 18-й Междунар. молодеж. форум, 14–16 апреля 2014 г.: сб. матер. форума. – Т. 5. – Харьков, Украина, 2014. – С. 160–161.

24. Безкровний М. М. Інформаційні технології оцінки точності визначення оцінок місцезнаходження небесних об'єктів на цифрових кадрах / М. М. Безкровний, А.Н. Дашкова Н. С. Соковікова, В.Є. Саваневич, О.Б. Брюховецький // "Інформація комунікація і суспільство 2014" 3-тя Міжнарод. наукова конференція, 21–24 травня 2014 г.: сб. матер. конф. – Львів, Україна, 2014. – С. 316–317.

25. Соковикова Н. С. Оценка координат объектов компактной группы на изображении ПЗС-кадра / Н. С. Соковикова, В. Е. Саваневич, М. М. Безкровный // Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях. Труды третьей международной научно-технической конференции, 28–31 мая 2014 г.: сб. матер. форума. – Харьков, Украина, 2014. – С. 363–364.

26. 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, Финляндия, 2014. – С. 491.

27. 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. – Москва, Россия, 2014. – В0.4-0061-14.

28. Саваневич В. Є. Методы оценки местоположения небесных объектов на серии ПЗС-кадров / В. Є. Саваневич, С. В. Хламов, Н. С. Соковікова, М. М. Безкровний // «14-та українська конференція з космічних досліджень», 8–12 вересня 2014 р.: сб. матер. конф. – Ужгород, Україна, 2014. – С. 116.

29. Savanevych V. CoLiTec – multifunction software for the CCD image processing [Электронный ресурс] / V. Savanevych, O. Bryukhovetskiy, N. Sokovikova, I. Movsesian, M. Dihtyar, A. Rogorelov // "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.

30. Savanevych V. Precision of astrometry measurements for asteroids survey made using the CoLiTec software [Электронный ресурс] / V. Savanevych, O.

Bryukhovetskiy, N. Sokovikova, S. Khlamov, M. Bezkrivniy, A. Dahskova // "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.

31. Соковикова Н. С. Методы оценки местоположения объектов с изображениями, смазанным собственным движением / Н. С. Соковикова, А. В. Погорелов // Радиоелектроніка та молодіж у ХХІ ст: 19-й Міжнар. молодіж. форум, 20–22 квітня 2015 р.: сб. матер. форуму. – Т. 5. – Харків, Україна, 2015. – С. 219–220.

32. Саваневич В.Е. Сравнительный анализ показателей точности ПЗЗ-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», 24–28 серпня 2015 р.: сб. матер. конф. – Одеса, Україна, 2015. – С. 167.

33. Свід. авторського права на твір №54900 / Програма обробки і отображення астрономічних кадрів LookSky-CoLiTec (LookSky-CoLiTec) / Діков Є.М., Брюховецький О.Б., Хламов С.В., Саваневич В.Є., Власенко В.П., Єленін Л.В., Герасименко О.В., Безкровний М.М., Соковікова Н.С., Мовсесян Я.С., Погорелов А.В.; дата реєстрації. 25.05.2014.

34. Свід. авторського права на твір № 60021 / Комп'ютерна програма «Програма забезпечення для дослідження статистичних характеристик CCD-вимірювань положення і блиску об'єктів Сонячної системи SSOAnSe» / М.М. Безкровний, А.М. Дашкова, В. Е. Саваневич, О. Б. Брюховецький, С.В. Хламов, А.В. Погорелов, Н.С. Соковікова, Я.С. Мовсесян ; дата реєстрації. 04.06.2015.

35. Свід. авторського права на твір №60581 / Комп'ютерна програма «Програма вирівнювання фону астрономічних кадрів FlatSky-CoLiTec» / Власенко В.П., Саваневич В.Є., Брюховецький О.Б., Соковікова Н.С., Хламов С.В., Погорелов А.В.; дата реєстрації. 09.07.2015.

АННОТАЦІЯ

Соковікова Н.С. Обчислювальні методи обробки цифрових зображень для виявлення та оцінки параметрів об'єктів, що смазані власним рухом. – 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, 2016.

Дисертація присвячена підвищенню точності оцінки положення об'єктів з круговими і смазаними власним рухом зображеннями за рахунок розробки нових та уточнення відомих обчислювальних методів обробки цифрових зображень. Вперше запропоновано метод виділення зображень об'єктів, що смазані власним рухом. Спочатку виділяються зображення, що відповідають селективним ознаками протяжних зображень. Потім вилучаються випадково утворені кластери об'єктів з круговими зображеннями. На третьому етапі перевіряється узгодженість положень виділених протяжних зображень на різних кадрах. Удосконалено ітераційний метод оцінки положення об'єкта з круговим зображен-

ням на цифровому кадрі на основі субпіксельної моделі зображення об'єкта. Метод дозволяє з точністю, близькою до потенційної, оцінювати місце розташування об'єктів з круговим зображенням на цифровому кадрі. В якості моделі форми зображення об'єкта використана субпіксельна гауссова модель, яка описує розподіл попадання фотонів у пікселі цифрового кадру. Запропоновано обчислювальні методи оцінки положення об'єкта із зображенням, що змазане власним рухом, на цифрових кадрах на основі субпіксельної моделі зображення об'єктів, які використовують критерії найменших квадратів та максимальної правдоподібності.

Реалізовані методи у рамках ПЗ CoLiTec було застосовано у Андрушівській астрономічній обсерваторії, обсерваторії ISON-NM (Mayhill, New Mexico, USA), обсерваторіях ISON-Кисловодськ та ISON- Уссурійськ. Програмний комплекс, що використовує розроблені обчислювальні методи, може бути корисний іншим астрономічним обсерваторіям України та світу для виявлення астероїдів та комет з круговими та протяжними зображеннями.

Ключові слова: обробка зображень, об'єкти з протяжними зображеннями, об'єкти з круговими зображеннями, оцінка положення.

АННОТАЦІЯ

Соковикова Н.С. Вычислительные методы обработки цифровых изображений для обнаружения и оценки параметров объектов, смазанных собственным движением. – 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, 2016.

Диссертация посвящена повышению точности оценки положения объектов с круговыми и смазанными собственным движением изображениями за счет разработки новых и уточнения известных вычислительных методов обработки цифровых изображений.

Проблема астероидно-кометной опасности признана ООН в качестве мировой проблемы. Упавший 15 февраля 2013 года метеорит в Челябинске является ярким примером актуальности и необходимости развития науки в данном направлении.

Наблюдение астероидов может затрудняться рядом факторов: слабо-контрастным изображением астероидов; неравномерным распределением фона на кадрах; размытием изображения астероида из-за турбулентности атмосферы; искажением изображения астероида вследствие аберраций оптической системы; нарушением суточного ведения; высокой скоростью видимого движения и других. Большинство существующих автоматизированных программных средств обработки цифровых ПЗС-кадров для обнаружения небесных объектов не имеют возможности тотальной автоматической оценки местоположения объектов со смазанными изображениями.

В диссертационной работе впервые предложен метод обнаружения изображений объектов, смазанных собственным движением. На первом этапе выделяются протяженные изображения, соответствующие селективным признакам

протяженных изображений. На втором этапе исключаются случайным образом образованные кластеры объектов с круговыми изображениями. На третьем этапе проверяется согласованность положений выделенных протяженных изображений на разных кадрах.

Усовершенствован итерационный метод оценки положения объекта с круговым изображением на цифровом кадре, на основе субпиксельной модели изображения объекта. Метод позволяет с точностью, близкой к потенциальной, оценивать местоположение объектов с круговым изображением на цифровом кадре. В качестве модели формы изображения объекта использована субпиксельная гауссова модель, которая описывает распределение попадания фотонов в пиксели цифрового кадра. Приведен анализ показателей точности вычислительного метода обработки цифровых кадров для оценки параметров круговых объектов в рамках ПО автоматического поиска астероидов на серии ПЗС-кадров CoLiTec. Исследования подтвердили высокую точность измерений ПО CoLiTec.

Разработан вычислительный метод оценки параметров цифровых изображений объектов, смазанных собственным движением, на цифровых кадрах. Метод позволяет с точностью, близкой к потенциальной, оценивать местоположение протяженных объектов на ПЗС-кадре. В качестве модели формы протяженного изображения объекта использована субпиксельная гауссова модель, которая описывает распределение координат падения фотонов в области кадра (в любой момент времени), соответствующей изображению протяженного объекта. В том числе предлагаемая модель учитывает наличие фоновой подложки и позволяет оценивать ее параметры, а в случае ее предварительного вычитания – параметры остаточной фоновой составляющей. Субпиксельная гауссова модель также учитывает основные особенности процесса формирования изображения на ПЗС-кадре.

Метод использует критерий минимума суммы квадратов отклонений между экспериментальной и модельной яркостями пикселей и критерий максимального правдоподобия. Использование данного метода позволяет расширить пределы достоверных измерений на область изображений с малыми отношениями сигнал-шум.

Сравнение статистических характеристик измерений ПО CoLiTec и Astrometrica по одному и тому же набору тестовых кадров свидетельствует, что пределы достоверных измерений ПО CoLiTec шире, чем у ПО Astrometrica, а это расширение соответствует области предельно малых ОСШ, в результате чего находятся объекты, которые не замечает глаз. При ОСШ, превышающем 6, результаты примерно одинаковы.

Реализованные методы в рамках ПО CoLiTec были применены в Андрушевской астрономической обсерватории, обсерватории ISON-NM (Mayhill, New Mexico, USA), обсерваториях ISON-Кисловодск и ISON- Уссурийск. Разработанные вычислительные методы и использующий их программный комплекс, могут быть полезны другим астрономическим обсерваториям Украины и мира для выявления астероидов и комет с круговыми и протяженными изображениями.

Ключевые слова: обработка изображений, объекты с протяженными изображениями, объекты с круговыми изображениями, оценка положения.

ABSTRACT

Sokovikova N.S. Computational methods of digital image processing for detection and evaluation of parameters of objects, trailed by own movement. – As manuscript.

Dissertation for the candidate's degree of technical science in a specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. – Kharkiv National University of Radio Electronics, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2016.

Dissertation is devoted to improving the accuracy of estimates of the parameters of objects with circular images and objects with images trailed by own movement, through the development of new methods and refining of known computational methods of digital image processing. For the first time provided a method for isolation of images of objects, trailed by its own movement. At the first stage allocated trailed images that correspond to the selective features of trailed images. In the second stage are eliminated randomly formed in circular clusters of objects with the images. The third step is checked the consistency of the provisions allocated to trailed images on different frames. In the second stage are eliminated randomly formed clusters of objects with the circular images. The third step is checked the consistency of the provisions allocated to trailed images on different frames. The iterative method for estimating the position of an object with a circular image on a digital frame based on the sub-pixel model of the object image is improved. The method allows with a precision close to potential, evaluate the location of objects with a circular image on a digital frame. As the model of the image shape of the object is used the sub-pixel Gaussian model, which describes the distribution of the photons hitting in the pixels of the digital image. Proposed computational methods of an estimation the position of the object with the image trailed by its own motion, on a digital frame, based on the sub-pixel model of the object image that uses the criteria of least squares and maximum likelihood.

Implemented methods within the CoLiTec were applied in Andrushivka Astronomical Observatory, the observatory ISON-NM (Mayhill, New Mexico, USA), observatory ISON-Kislovodsk and ISON-Ussuriysk. The software package, designed using computational methods can be useful to other astronomical observatories of Ukraine and the world for the detection of asteroids and comets with circular and trailed images.

Keywords: image processing, objects with trailed images, objects with circular images, position estimation.