

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

ХЛАМОВ СЕРГІЙ ВАСИЛЬОВИЧ

Підпис

УДК 519.6:004.932

ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ ДАНИХ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ
ОБ'ЄКТІВ З БЛИЗЬКОНУЛЬОВИМ ВИДИМИМ РУХОМ

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,
завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж,
ДВНЗ «Ужгородський національний університет».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Данилов Валерій Якович,
професор кафедри математичних методів системного
аналізу, Навчальний-науковий комплекс «Інститут
прикладного системного аналізу» НТУУ «Київський
політехнічний інститут» ім. Ігоря Сікорського;

доктор технічних наук, професор
Кіріченко Людмила Олегівна,
професор кафедри прикладної математики,
Харківський національний університет радіоелектроніки.

Захист відбудеться «28» лютого 2017 р. о 14³⁰ 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 «27» січня 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Підпис

Л. В. Колесник

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Існує клас об'єктів, що рухаються. Є сенс введення підкласу об'єктів з близьконульовим видимим рухом. Він включає об'єкти з переміщеннями між кадрами, сумірні з помилками визначення положення. Прикладами об'єктів з близьконульовим видимим рухом є штучні супутники Землі, в момент їх виходу з-під горизонту, снаряди, що наближаються, астероїди або комети, які зближуються із Землею.

В астрономії, наприклад, зазначений підклас об'єктів широко представлений в астероїдних і супутникових оглядах.

Для виявлення об'єктів з близьконульовим видимим рухом на відеоряді раніше не розроблялися спеціальні обчислювальні методи, а використовувалися загальні методи виявлення рухомих об'єктів. Традиційно вони засновані на критерії максимальної правдоподібності і підстановочних вирішальних правилах. Однак, ефективність виявлення об'єктів з близьконульовим видимим рухом традиційними обчислювальними методами мала.

У зв'язку з цим актуальною є **науково-технічна задача** розробки обчислювальних методів виявлення близьконульового видимого руху об'єкта і методів дослідження показників якості виявлення розроблених методів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота була проведена у рамках міжнародної програми «Захист Планети» (Planetary Defense) від Міжнародної Академії Астронавтики (International Academy of Astronautics – IAA), міжнародного проекту “The Space Emergency System” за підтримкою програми трансграничного співробітництва Угорщина - Словаччина - Румунія - Україна (European Neighbourhood and Partnership Instrument – ENPI), програмами спостереження астероїдів під егідою Центра малих планет (Minor Planet Center – MPC) Міжнародного Астрономічного Союзу, міжнародної програми Gaia-FUN-SSO (Gaia Follow-Up Network for Solar System Objects), науково-дослідної роботи № 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 розроблено обчислювальні методи обробки даних для виявлення об'єктів з близьконульовим видимим рухом та методи статистичного і натурного моделювання для дослідження показників якості виявлення об'єктів з близьконульовим видимим рухом.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає у підвищенні показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта за рахунок розробки нових та удосконалення існуючих обчислювальних методів обробки даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати такі задачі:

- розробка підстановочного обчислювального методу максимально правдоподібного виявлення близьконульового видимого руху об'єкта;
- розробка обчислювального методу виявлення близьконульового видимого руху об'єкта, заснованого на критеріях значущості швидкості видимого руху об'єкта;
- розробка методу оцінки показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта на основі статистичного та натурального моделювання.

Об'єкт дослідження – об'єкти з близьконульовою швидкістю видимого руху на серії цифрових кадрів.

Предмет досліджень – процес виявлення близьконульового видимого руху об'єкта.

Методи досліджень. Основні результати роботи отримані на основі теорії математичної статистики, теорії оптимізації, дисперсійного аналізу, статистичної теорії перевірки гіпотез і оцінки параметрів, що дозволили розробити обчислювальні методи виявлення близьконульового видимого руху об'єкта; теорії статистичного і натурального моделювання, що дозволила розробити методи дослідження показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта.

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

1. Вперше запропоновано обчислювальний метод виявлення близьконульового видимого руху об'єкта, що заснований на критеріях значущості швидкості видимого руху об'єкта з вирішальними правилами перевірки статистичної значущості швидкості видимого руху об'єкта, в основі яких застосовуються критерії значущості t-критерій Стьюдента і f-критерій Фішера. Його використання максимізує умовну ймовірність правильного виявлення близьконульового видимого руху об'єкта в умовах спостереження, які постійно змінюються.

2. Удосконалено підстановочний обчислювальний метод максимально правдоподібного виявлення близьконульового видимого руху об'єкта, використання якого обґрунтовано відсутністю апріорних даних щодо параметрів видимого руху об'єкта в частині використання різних значень дисперсії вимірювань положень об'єкта.

3. Удосконалено метод оцінки показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта на основі статистичного та натурального моделювання, використання якого дозволило визначити показники якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта розроблених обчислювальних методів виявлення в частині використання реального закону розподілу помилок вимірювань положення об'єкта.

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів забезпечуються коректним використанням основних положень апробованого математичного апарату та підтверджуються несуперечністю результатів теоретичних і експериментальних досліджень. Отримані нові наукові результати були апробовані і довели свої обґрунтованість і достовірність у процесі експлуатації програми автоматизованого виявлення астероїдів і комет CoLiTec, що реалізує дані результати.

Практичне значення отриманих результатів полягає у підвищенні показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта на серії цифрових кадрів у порівнянні з традиційними методами. Запропоновані обчислювальні методи були апробовані на практиці і впроваджені в блоці виявлення об'єктів з близьконульовим видимим рухом програмного забезпечення (ПЗ) CoLiTec, одним із розробників якого є дисертант. Розроблені методи та ПЗ CoLiTec були використані в Одеській астрономічній обсерваторії Odessa-Mayaکی (с. Маяки, Одеська обл., Україна, МРС код – 583), у лабораторії космічних досліджень ДВНЗ «Ужгородський національний університет» (УжНУ), а також у Харківському національному університеті радіоелектроніки в рамках навчального процесу, що підтверджується відповідними актами впровадження.

З використанням розроблених в дисертації методів відкрита множина об'єктів. Найвідомішим з них стала довгоперіодична навколосонячна комета C/2012 S1 (ISON), яка була відкрита за допомогою ПЗ CoLiTec, і на момент відкриття була об'єктом з близьконульовим видимим рухом. Також ПЗ CoLiTec було рекомендовано всім членам Gaia-FUN-SSO для аналізу спостережень у якості інструмента для виявлення слабких рухомих об'єктів на кадрах.

Розроблені методи можуть бути використані у різних програмних комплексах обробки даних для виявлення об'єктів з близьконульовим видимим рухом на відеоряді, наприклад у програмах автоматизованого виявлення малих тіл Сонячної системи, для спостереження і виявлення рухомих об'єктів будь-якої природи (наприклад, снаряди, ракети, літаки, безпілотні літальні апарати, супутники).

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи отримані особисто дисертантом та опубліковано в роботах [1–35]. Особистий внесок автора у спільно опублікованих роботах: в [1] розроблено та досліджено підстановочний обчислювальний метод максимально правдоподібного виявлення близьконульового видимого руху об'єкта; у [2] розроблено та досліджено обчислювальний метод виявлення близьконульового видимого руху об'єкта, що заснований на критеріях значущості швидкості видимого руху об'єкта; у [3] розроблено і досліджено евристичний обчислювальний метод виявлення близьконульового видимого руху об'єкта; у [4] розроблено метод

оцінки показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта на основі статистичного моделювання; у [5] досліджені показники якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта методом статистичного моделювання; у [6] розроблено метод оцінки показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта на основі натурного моделювання; у роботах [7 – 9] отримано вирази для часткових похідних нев'язок між теоретичними і експериментальними яскравостями пікселя; у [10 – 14] отримані оцінки параметрів видимого руху об'єктів; у [15 – 16] отримані оцінки положень об'єктів у задачі ототожнення; у [17] підготовлені вимірювання об'єктів за допомогою ПЗ CoLiTec для порівняльного аналізу показників точності з ПЗ Astrometrica; у [18] досліджені статистичні характеристики оцінок параметрів об'єктів, нерухомих на серії цифрових кадрів.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні результати дисертації обговорено на: «Astronomy Space Physics Annual International Conference» (Україна, Київ, 21 – 24 травня, 2013 р.) [19]; «NASA's Asteroid Initiative Idea Synthesis Workshop» (США, Х'юстон, 30 вересня – 2 жовтня, 2013 р.) [20]; 12-тій міжнародній конференції «Asteroids, Comets, Meteors 2014», (Фінляндія, Хельсінкі, 30 червня – 4 липня, 2014 р.) [21]; 14-тій українській конференції з космічних досліджень (Україна, Ужгород, 8 – 12 вересня, 2014 р.) [22, 23]; «40th COSPAR Scientific Assembly» (Росія, Москва, 2 – 10 серпня, 2014 р.) [24]; «Gaia-FUN-SSO-3 International Workshop 2014» (Франція, Париж, 24 – 26 листопада, 2014 р.) [25]; International scientific and methodological conference «KOLOS 2014» (Словаччина, Стакчин, 4 – 6 грудня, 2014 р.) [26]; «IAA Planetary Defense Conference 2015» (Італія, Фраскаті, 13 – 17 квітня, 2015 р.) [27]; 15-тій українській конференції з космічних досліджень (Україна, Одеса, 24 – 28 серпня, 2015 р.) [28]; International meeting on variable stars research «KOLOS 2015» (Словаччина, Стакчин, 3 – 5 грудня, 2015 р.) [29, 30]; Міжнародному науковому семінарі пам'яті Б.Л. Кащеєва до 96-річчя з дня народження «Радіометеори, метеори і міжпланетна складова: поблизу та на відстані» (Україна, Харків, 15 березня, 2016 р.) [31]; Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених «Теоретичні та прикладні аспекти застосування інформаційних технологій в галузі природничих наук» (Україна, Одеса, 20 – 22 квітня, 2016 р.) [32]; VI Всеукраїнській школі-семінарі молодих вчених і студентів «АСІТ'2016» (Україна, Тернопіль, 20 – 21 травня, 2016 р.) [33]; «16-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School» (Україна, Одеса, 14 – 20 серпня, 2016 р.) [34], VIII міжнародній школі-семінарі «Теорія прийняття рішень» (Україна, Ужгород, 26 вересня – 1 жовтня, 2016 р.) [35].

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 16 статтях у фахових наукових виданнях України, 1 стаття [9] в журналі, що входить до наукометричної бази «Scopus» з імпаکت фактором 5.107, 1 стаття [17]

в журналі, що відноситься до фізико-математичних наук та входить до наукометричної бази «Scopus» з імпаکت фактором 0.361, 1 стаття [12] у зарубіжному виданні, а також у матеріалах і збірниках тез 16 науково-технічних конференцій. Здобувач є співавтором 3 авторських прав на твір [36–38].

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 182 сторінки (з них 142 – основного тексту), містить 64 рисунка (24 с.), 21 таблицю (5 с.), список використаних літературних джерел із 200 найменувань (22 с.) та 3 додатки (7 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 характеристики та особливості умов спостереження об'єктів з близьконульовим видимим рухом та фактори, які впливають на формування зображення таких об'єктів, а саме: нерівномірно розподілений фон на кадрах; розмиття зображення об'єктів через турбулентність атмосфери; спотворення зображення об'єктів унаслідок аберацій оптичної системи; порушення добового ведення та інші. У розділі наведено аналіз відомих обчислювальних методів обробки даних та систем, які використовуються для автоматизованого виявлення об'єктів з близьконульовим видимим рухом таких як штучні супутники Землі у момент їх виходу з-під горизонту, астероїди або комети, що зближуються з Землею.

У розділі також вказані передумови, які необхідні для вдосконалення традиційних та створення нових обчислювальних методів обробки даних для виявлення об'єктів з близьконульовим видимим рухом. На основі матеріалів, що наведені у розділі, сформульовано мету та задачі дослідження.

У **другому розділі** розроблено обчислювальні методи обробки даних для виявлення об'єктів з близьконульовим видимим рухом.

У розділі вдосконалено підстановочний обчислювальний метод максимально правдоподібного виявлення близьконульового видимого руху об'єкта. Метод заснований на критерії максимальної правдоподібності та підстановочних вирішальних правилах виявлення видимого руху об'єкта. Їх використання обґрунтовано відсутністю апріорних даних щодо параметрів видимого руху об'єкта і дисперсії позиційних вимірювань серії.

Моделлю видимого руху об'єкта з близьконульовим видимим рухом за час формування серії вимірювань достовірно вважати модель прямолінійного та

рівномірного руху об'єкта уздовж кожної координати незалежно:

$$x_n(\theta_x) = x_0 + V_x(\tau_n - \tau_0); y_n(\theta_y) = y_0 + V_y(\tau_n - \tau_0), \quad (1)$$

де x_0, y_0 – координати положення об'єкта на момент часу τ_0 прив'язки базового кадру серії вимірювань; $x_n(\theta_x), y_n(\theta_y)$ – координати положення об'єкта на момент часу τ_n ; $\theta_x = (x_0, V_x)^T$, $\theta_y = (y_0, V_y)^T$ – вектори параметрів видимого руху об'єкта по кожній координаті; швидкості V_x, V_y його видимого руху вздовж кожної координати.

Зображення об'єктів формується в фокальній площині телескопу, результатом чого є CCD-кадр. За результатами спостережень однієї ділянки небесної сфери формується серія з N_{fr} вимірювань з часом прив'язки n_{fr} -го кадру серії τ_n . Один з кадрів серії називається базовим. У процесі внутрішньокадрової обробки n_{fr} -го кадру виявлено зображення об'єкта. Результатом є вимірювання Y_{in} (i -е вимірювання n_{fr} -го кадру), що містить оцінки координат $Y_{Kin} = \{x_{in}; y_{in}\}$ та блиску A_{in} об'єкта: $Y_{in} = \{Y_{Kin}; A_{in}\}$.

В роботі використовується прямокутна система координат (СК) CCD-кадру з центром в лівому нижньому кутку CCD-кадру. Вважається, що всі вимірювання положення об'єкта попередньо зведені в СК базового CCD-кадру.

Серія вимірювань (не більше ніж по одному з кадру), що гіпотетично належать одному об'єкту, матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \Omega_{set} &= (Y_{K1(i,1)}, \dots, Y_{Kk(i,n)}, \dots, Y_{KN_{mea}(i, N_{fr})}) = \\ &= ((x_1, y_1), \dots, (x_k, y_k), \dots, (x_{N_{mea}}, y_{N_{mea}})), \end{aligned} \quad (2)$$

де $k(i, n) = k$ – номер вимірювання у серії вимірювань об'єкта, що є i -м вимірюванням n_{fr} -го кадру серії, яке гіпотетично належить об'єкту; x_k, y_k – вимірювання (оцінка) положення об'єкта, що міститься в k -м вимірюванні серії; N_{mea} – кількість вимірювань положення об'єкта на N_{fr} кадрах.

Вимірювання Y_k серії вимірювань Ω_{set} (2) об'єкта відібрані не більше ніж по одному вимірюванню з кадру. Існує можливість того, що вимірювання положення об'єкта будуть формуватися не на всіх N_{fr} кадрах ($N_{mea} \leq N_{fr}$).

При виявленні об'єкта з близьконульовим видимим рухом вважається, що умови спостереження об'єкта на кадрах серії практично незмінні. Відповідно, відношення сигнал/шум зображення об'єкта на даних кадрах практично не змінюється, а середнє квадратичне відхилення (СКВ) оцінок координат на різних кадрах практично однакові. Таким чином, оцінки координат об'єкта на

кадрах можна вважати рівноточними.

Вважається, що відхилення оцінок різних координат об'єкту, що містяться у вимірюваннях, незалежні між собою в одному вимірюванні і між вимірюваннями. Відхилення оцінки координати x об'єкта розподілені за нормальним законом з невідомою дисперсією σ_x^2 та нульовим середнім.

Видимий рух об'єкта уздовж кожної координати вважається незалежним. Згідно виразів у (1), оцінки векторів параметрів видимого руху містять оцінки координат \hat{x}_0 та \hat{y}_0 положення об'єкта на базовому кадрі та оцінки швидкості \hat{V}_x та \hat{V}_y руху об'єкта за відповідними координатами.

МНК-оцінка вектору параметрів видимого руху об'єкта уздовж координати x має вигляд:

$$\hat{\theta}_x = (F_x^T F_x)^{-1} F_x^T Y, \quad (3)$$

$$\text{де } F_x = \begin{pmatrix} 1 & \Delta_{\tau 1(i,1)} \\ \dots & \dots \\ 1 & \Delta_{\tau k(i,n)} \\ \dots & \dots \\ 1 & \Delta_{\tau N_{mea}(i,N_{fr})} \end{pmatrix} \quad (4)$$

– матриця часткових похідних; $\Delta_{\tau k} = (\tau_k - \tau_0)$ – різниця між часом прив'язки τ_0 базового кадру і часом τ_k кадру, на якому сформовано k -е вимірювання.

МНК-оцінки параметрів видимого руху об'єкту уздовж координат x та y можна представити у скалярному вигляді:

$$\begin{aligned} \hat{x}_0 &= \frac{D \cdot A_x - C \cdot B_x}{N_{mea} \cdot D - C^2}; & \hat{V}_x &= \frac{N_{mea} \cdot B_x - C \cdot A_x}{N_{mea} \cdot D - C^2}; \\ \hat{y}_0 &= \frac{D \cdot A_y - C \cdot B_y}{N_{mea} \cdot D - C^2}; & \hat{V}_y &= \frac{N_{mea} \cdot B_y - C \cdot A_y}{N_{mea} \cdot D - C^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{де } A_x = \sum_{k=1}^{N_{mea}} x_k; \quad A_y = \sum_{k=1}^{N_{mea}} y_k; \quad B_x = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau k} x_k; \quad B_y = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau k} y_k; \quad C = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau k}; \quad D = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau k}^2.$$

Інтерпольовані оцінки координат об'єкта на k -му кадрі серії мають вигляд:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k(\hat{\theta}_x) = \hat{x}_0(\hat{\theta}_x) + \hat{V}_x(\hat{\theta}_x) \cdot (\tau_k - \tau_0); \quad (6)$$

$$\hat{y}_k = \hat{y}_k(\hat{\theta}_y) = \hat{y}_0(\hat{\theta}_y) + \hat{V}_y(\hat{\theta}_y) \cdot (\tau_k - \tau_0). \quad (7)$$

Таким чином, на момент кожного з N_{mea} вимірювань серії мають місце:

- невідоме значення дійсного положення об'єкта $(x_k(\theta_x), y_k(\theta_y))$;
- вимірювання положення об'єкта на кадрі (x_k, y_k) у СК базового кадру;
- інтерпольовані координати об'єкта $(\hat{x}_k, \hat{y}_k) = (\hat{x}_k(\hat{\theta}_x), \hat{y}_k(\hat{\theta}_y))$.

При цьому оцінки дисперсій оцінок координат об'єкта мають вигляд:

$$\hat{\sigma}_x^2 = \sum_{k=1}^{N_{mea}} (x_k - \hat{x}_k(\hat{\theta}_x))^2 / (N_{mea} - m); \quad (8)$$

$$\hat{\sigma}_y^2 = \sum_{k=1}^{N_{mea}} (y_k - \hat{y}_k(\hat{\theta}_y))^2 / (N_{mea} - m). \quad (9)$$

Вирази для умовних оцінок $\hat{\sigma}_0^2$, $\hat{\sigma}_1^2$ дисперсій оцінок положення об'єкта за умови істинності гіпотез про нульовий або близьконульовий видимий рух:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{R_0^2}{2(N_{mea} - m)}; \quad (10)$$

$$\hat{\sigma}_1^2 = \frac{R_1^2}{2(N_{mea} - m)}, \quad (11)$$

$$\text{де } R_0^2 = \sum_{k=1}^{N_{mea}} ((x_k - \hat{x})^2 + (y_k - \hat{y})^2); \quad (12)$$

$$R_1^2 = \sum_{k=1}^{N_{mea}} ((x_k - \hat{x}_k(\hat{\theta}_x))^2 + (y_k - \hat{y}_k(\hat{\theta}_y))^2) \quad (13)$$

– залишкові суми квадратів відхилень положення об'єкта за умови справедливості гіпотез про нульовий або близьконульовий видимий рух.

Загальний вигляд підстановочного вирішального правила для виявлення близьконульового видимого руху об'єкта:

$$\hat{\lambda}(\Omega_{set}) = \frac{\max_{\hat{\theta}} f_1(\hat{\theta}, \hat{\sigma}_1)}{\max_{\hat{x}, \hat{y}} f_0(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\sigma}_0)} \geq \lambda_{cr}, \quad (14)$$

де λ_{cr} – задане гранично дозволене (критичне) значення оцінки відношення правдоподібності для виявлення близьконульового видимого руху об'єкта; $\hat{x} = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \hat{x}_k / N_{mea}$, $\hat{y} = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \hat{y}_k / N_{mea}$ – середні значення оцінок координат положення об'єкта на серії кадрів; $\hat{\theta} = \{\hat{\theta}_x, \hat{\theta}_y\} = \arg \max_{\hat{\theta}} f_1(\hat{\theta}, \hat{\sigma}_1)$ – МНК-оцінки параметрів видимого руху об'єкта, що отримуються відповідно до (6);

$f_0(\bar{x}, \bar{y}, \sigma) = \prod_{k=1}^{N_{mea}} [N_{xk}(\bar{x}, \sigma^2) \cdot N_{yk}(\bar{y}, \sigma^2)]$ – щільність розподілу параметрів

вимірювань положення об'єкта при гіпотезі про відсутність видимого руху;

$f_1(\theta, \sigma) = \prod_{k=1}^{N_{mea}} [N_{xk}(x_k(\theta_x), \sigma^2) \cdot N_{yk}(y_k(\theta_y), \sigma^2)]$ – щільність розподілу

параметрів вимірювань положення об'єкта при гіпотезі про наявність видимого руху; \bar{x}, \bar{y} – координати незмінного положення об'єкта.

В роботі доведено, що підстановочний обчислювальний метод максимально правдоподібного виявлення близьконульового видимого руху об'єкта при невідомій дисперсії вимірювань положення об'єкта має вигляд:

$$\frac{R_0^2 - R_1^2}{R_0^2 \cdot R_1^2} \geq \frac{\ln(\lambda_{cr})}{A \cdot N_{mea}}, \quad (15)$$

де $A = 2(N_{mea} - m)$.

В свою чергу, підстановочний обчислювальний метод максимально правдоподібного виявлення близьконульового видимого руху об'єкта при відомій дисперсії вимірювань положення об'єкта має вигляд:

$$R_0^2 - R_1^2 \geq 2\sigma^2 \cdot \ln(\lambda_{cr}). \quad (16)$$

Підстановочний обчислювальний метод максимально правдоподібного виявлення близьконульового видимого руху об'єкта при використанні зовнішньої оцінки дисперсії вимірювань положення об'єкта має вигляд:

$$\frac{R_0^2 - R_1^2}{\hat{\sigma}_{out}^2} \geq 2 \ln(\lambda_{cr}). \quad (17)$$

Недоліком підстановочного обчислювального методу, що заснований на критерії максимальної правдоподібності, є недостатня обґрунтованість його використання при невизначеності частини параметрів функції правдоподібності. Другим недоліком такого рішення є необхідність постійного підбору граничного значення вирішальної статистики в умовах спостережень, що постійно змінюються.

У розділі вперше запропоновано обчислювальний метод виявлення близьконульового видимого руху об'єкта, що заснований на критеріях значущості швидкості видимого руху об'єкта. Для цього введена лінійна регресійна модель з двома факторами, фізично якими є початкове положення і швидкість об'єкта уздовж кожної з координат. Фактором, значимість якого перевіряється, є наявність близьконульового видимого руху об'єкта на відеоряді.

Тоді гіпотеза про близьконульовий видимий рух об'єкта рівносильна гіпотезі про статистичну значимість швидкості видимого руху об'єкта на серії вимірювань. Дану перевірку можна реалізувати у вигляді одного двокоординатного або двох покоординатних обчислювальних методів.

Покоординатні обчислювальні методи виявлення близьконульового видимого руху об'єкта вздовж координат x і y з застосуванням t -критерію Стьюдента мають такий вигляд:

$$\hat{V}_x / \left(\hat{\sigma}_x \sqrt{\frac{N_{mea}}{N_{mea} D - C^2}} \right) \geq t_{x \max}; \quad \hat{V}_y / \left(\hat{\sigma}_y \sqrt{\frac{N_{mea}}{N_{mea} D - C^2}} \right) \geq t_{y \max}. \quad (18)$$

Рішення про виявлення близьконульового видимого руху, значущості швидкості об'єкта, приймається в разі спрацювання хоча б одного з двох покоординатних обчислювальних методів.

Основою двокоординатного обчислювального методу виявлення близьконульового видимого руху об'єкта є f -критерій Фішера значущості загальної швидкості видимого руху об'єкта:

$$f(\Omega_{set}) = \frac{R_0^2 - R_1^2}{R_1^2} \cdot \frac{N_{mea} - r}{w}, \quad (19)$$

де $w = 1$ – кількість досліджуваних факторів лінійної регресійної моделі (в випадку, що досліджується, цим фактором є швидкість видимого руху), гіпотеза про яких перевіряється; r – ранг матриці часткових похідних (4) F_x ($\text{rang } F_x = r \leq \min(m, N_{mea})$).

Для моделі лінійного видимого руху вздовж однієї координати ранг матриці F_x дорівнює 2, тому що кількість оцінюваних параметрів видимого руху об'єкта дорівнює $m = 2$. При незалежному лінійному видимому русі об'єкта вздовж двох координат кількість оцінюваних параметрів руху дорівнює $m = 4$, тоді ранг матриці F_x буде дорівнювати $r = 4$, тому що $r = m$. Статистика (19) має ймовірнісний розподіл Фішера з $(w, N_{mea} - r)$ ступенями свободи.

Двокоординатний обчислювальний метод виявлення близьконульового видимого руху об'єкта з застосуванням f -критерію Фішера має вигляд:

$$\frac{R_0^2 - R_1^2}{R_1^2} \geq \frac{w f_{cr}}{N_{mea} - r}. \quad (20)$$

Обчислювальний метод виявлення близьконульового видимого руху об'єкта, що заснований на критеріях значущості швидкості видимого руху об'єкта, включає таку послідовність операцій. Згідно виразу (5) проводиться

МНК-оцінка параметрів видимого руху об'єкта. Визначаються інтерпольовані координати об'єкта за допомогою виразів (6) і (7). Після цього відповідно до виразів (12) і (13) визначаються значення залишкових сум квадратів відхилень положення об'єкта за умови справедливості гіпотез про нульовий або близьконульовий видимий рух на серії кадрів. Далі визначаються значення критеріїв значущості швидкості видимого руху об'єкта. Після проведення всіх зазначених операцій приймається рішення про наявність чи відсутність близьконульового видимого руху у об'єкта згідно (18) і (20).

Далі проведено порівняльний аналіз обчислювальних методів виявлення близьконульового видимого руху об'єкта, заснованих на критеріях максимальної правдоподібності та f -критерії Фішера.

Також сформульовано евристичний метод виявлення близьконульового видимого руху об'єкта. У нього закладена ідея одночасного використання залишкових дисперсій вимірювань положення об'єкта і f -критерію Фішера, як критерію значущості загальної швидкості руху об'єкта.

Основні результати розділу опубліковано в роботах [1–4, 8–17, 23, 35–36].

У третьому розділі запропоновано метод оцінки показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта на основі статистичного та натурного моделювання. Використання цього методу дозволило визначити показники якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта на відеоряді для розроблених обчислювальних методів виявлення.

Суть моделювання полягає у використанні моделі видимого руху з додаванням випадкових відхилень положення об'єкта. Після використання розроблених обчислювальних методів виявлення близьконульового видимого руху об'єкта визначаються показники якості виявлення. Даними показниками вважається умовні ймовірності помилкового і правильного виявлення. У розділі наведені усі передумови для дослідження показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта на основі статистичного моделювання. У дисертації для проведення статистичного моделювання із застосуванням розроблених обчислювальних методів виявлення близьконульового видимого руху об'єкта використовуються метод нормальної апроксимації і метод Zigurat.

Для дослідження показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта з використанням розроблених підстановочних методів (15), (16), (17) максимально правдоподібного виявлення використовуються відповідні їм гранично дозволені (критичні) значення λ . Дані значення визначаються відповідно до наперед заданого рівня значущості α при моделюванні гіпотези про нульовий видимий рух об'єкта. При використанні двокоординатного методу (20) виявлення близьконульового видимого руху об'єкта з використанням f -критерію Фішера застосовується табличне критичне значення f_{cr} для розподілу Фішера з $(w, N_{mea} - r)$ ступенями свободи. У якості альтернативного варіанту критичне

значення f_{cr} Фішера також визначається відповідно до наперед заданого рівня значущості α при моделюванні гіпотези про нульовий видимий рух об'єкта.

Метод дослідження показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта на основі статистичного моделювання складається з декількох етапів – моделювання умов гіпотези про нульовий видимий рух об'єкта, розрахунок критичних значень, моделювання умов гіпотези про близьконульовий видимий рух об'єкта, розрахунок умовної ймовірності правильного виявлення.

У розділі проведений аналіз показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта методом статистичного моделювання (рис. 2 – 3).

На осі абсцис відкладені значення модуля наведеної швидкості видимого руху, який задається у відносних величинах – СКВ відхилень вимірювань положення об'єкта. По осі ординат наведені значення умовної ймовірності правильного виявлення.

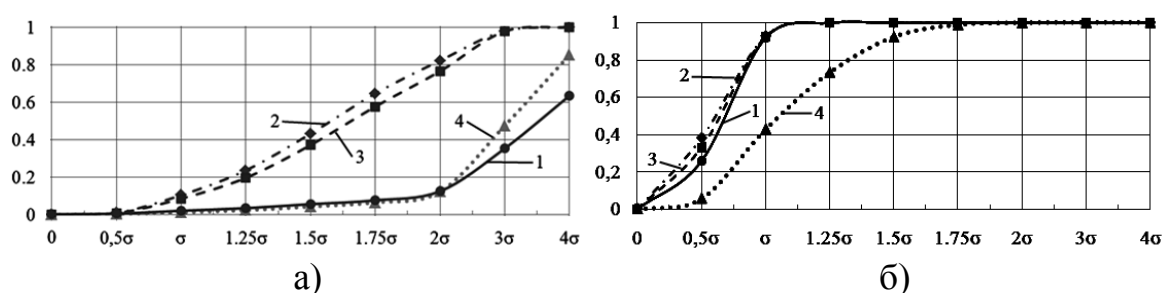


Рисунок 2 – Криві виявлення близьконульового видимого руху при $\alpha = 10^{-3}$ для кадрів: а) $N_{fr} = 4$, б) $N_{fr} = 8$

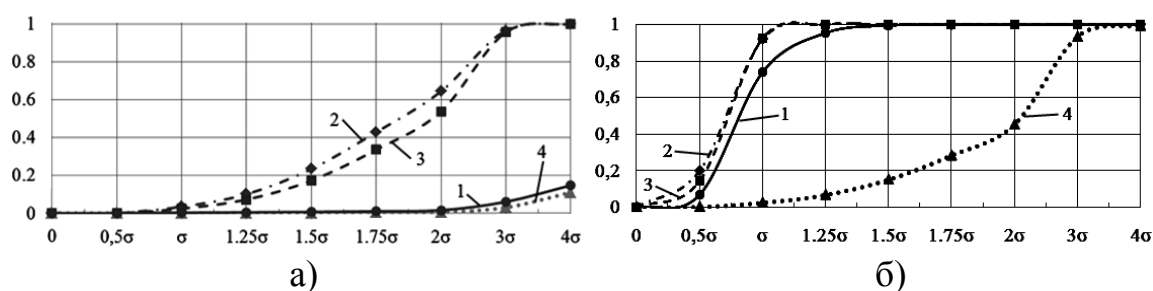


Рисунок 3 – Криві виявлення близьконульового видимого руху при $\alpha = 10^{-4}$ для кадрів: а) $N_{fr} = 4$, б) $N_{fr} = 8$

За результатами дослідження найбільш чутливими до змін значення швидкості видимого руху методами виявлення є підстановочні обчислювальні методи максимально правдоподібного виявлення близьконульового видимого руху об'єкта при використанні відомої дисперсії вимірювань положення об'єкта (16) (крива 2) та зовнішньої оцінки дисперсії вимірювань положення об'єкта (17) (крива 3). Однак підстановочний метод максимально правдоподібного виявлення близьконульового видимого руху об'єкта при відомій дисперсії вимірювань

не може бути використаний на практиці і є потенційно допустимою межею. Двокоординатний обчислювальний метод виявлення близьконульового видимого руху об'єкта із застосуванням f -критерію Фішера (20) (крива 1) (рисунки 2а, 3а), є не досить ефективним при малому значенні кількості кадрів. Однак вже при $N_{fr} = 8$ даний метод не поступається іншим за значенням умовної ймовірності правильного виявлення (рис. 2б, 3б). Для методу дослідження показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта на основі натурального моделювання у якості натурних даних вибираються об'єкти, які включені у внутрішній каталог об'єктів, нерухомих на серії кадрів. Даний каталог містить об'єкти з нульовим видимим рухом. Його створення пов'язане з істотною неповнотою відомих зоряних каталогів при видимій зоряній величині нижче 18. На етапі міжкадрової обробки внутрішній каталог об'єктів, нерухомих на серії кадрів, виконує роль внутрішнього зоряного каталогу. Відхилення вимірювань положення об'єктів внутрішнього каталогу використовуються як реалізації відхилень оцінок положень об'єктів. До цих реалізацій додаються детерміновані значення переміщень об'єктів відповідно до значень швидкостей їх видимого руху.

Натурне моделювання дозволило застосувати реальний закон розподілу помилок вимірювань положення об'єкта. У розділі наведені передумови для дослідження показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта на основі натурального моделювання.

У якості натурних даних (вимірювань положень об'єктів) були обрані серії CCD-кадрів, отримані в обсерваторіях ISON-NM (код MPC H15) та ISON-Kislovodsk (код MPC D00). Обсерваторія ISON-NM використовує 40-см телескоп SANTEL-400AN та ПЗЗ-матрицю FLI ML09000-65 (3056×3056 пікс., розмір пікселя 12 мкм). Час експозиції – 150 с. Обсерваторія ISON-Kislovodsk використовує 19,2-см. широкопольний телескоп GENON (VT-78) та ПЗЗ-матрицю FLI ML09000-65 (4008 x 2672 пікс., розмір пікселя 9 мкм). Час експозиції – 180 с.

За результатами дослідження (рис. 4) найбільш чутливим до змін значення швидкості видимого руху методом виявлення є двокоординатний обчислювальний метод виявлення близьконульового видимого руху об'єкта при використанні f -критерію Фішера (20) (крива 2).

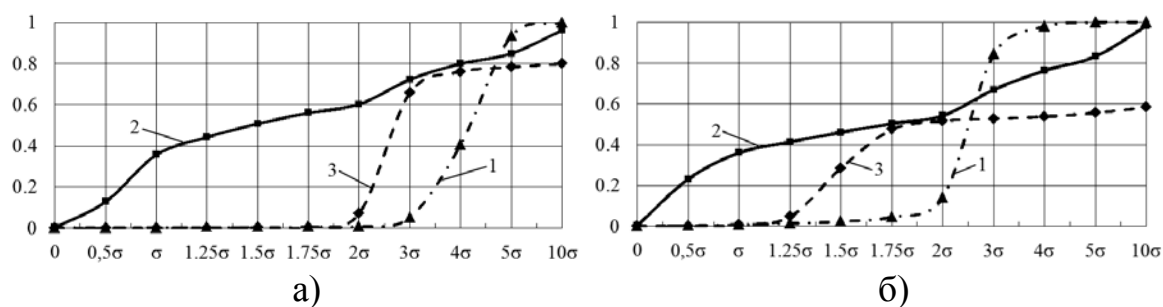


Рисунок 4 – Криві виявлення близьконульового видимого руху при $\alpha = 10^{-3}$ для телескопа: а) SANTEL-400AN, б) GENON (VT-78)

Вже при $N_{fr} = 4$ та $V = 0.5\sigma$ (σ – СКВ помилок оцінок положення) значення умовної ймовірності правильного виявлення близьконульового видимого руху об'єкта для двокоординатного методу виявлення при використанні f-критерію Фішера (20) починає зростати.

А для інших методів виявлення потрібне значення модуля швидкості видимого руху не менш ніж $V = 1.25\sigma$. Також визначення за результатами натурального моделювання критичних значень f_{cr} Фішера відповідно наперед заданому рівню значущості $\alpha = 10^{-3}$ та $\alpha = 10^{-4}$ призводить практично до тих самих критичних значень вирішальної статистики.

Дослідження показали, що евристичний обчислювальний метод виявлення близьконульового видимого руху об'єкта (крива 3) не є досить ефективним за даними натурального моделювання. Крім того, при використанні методу неможливо стабілізувати умовну ймовірність помилкового виявлення на заданому рівні.

В роботі встановлено, що двокоординатний метод виявлення близьконульового видимого руху об'єкта при використанні f-критерію Фішера (20) стійкий до зміни телескопа. Немає необхідності вибирати критичне значення вирішальної статистики при зміні обладнання та умов спостереження.

У розділі розглядається використання розроблених методів обробки даних для автоматизованого виявлення близьконульового видимого руху об'єкта.

Запропоновані обчислювальні методи виявлення близьконульового видимого руху об'єкта були апробовані на практиці і впроваджені в блоці міжкадрової обробки програмного забезпечення (ПЗ) CoLiТес, одним із розробників якого є дисертант. Розроблені методи та ПЗ CoLiТес було використано в Одеській астрономічній обсерваторії Odessa-Maуakі (MPC код – 583), лабораторії космічних досліджень при УжНУ, а також в рамках навчального процесу.

З використанням розроблених в дисертації методів відкрито багато об'єктів. Найвідомішим з них стала довгоперіодична навколосонячна комета C/2012 S1 (ISON), яка була відкрита за допомогою ПЗ CoLiТес. Комета ISON стала відомою кометою 2013 року. На думку авторів відкриття, у разі якщо комета «пережила» б зустріч з Сонцем, вона могла б стати Великою кометою 2013 року, а також найяскравішою кометою першої половини XXI століття.

На момент відкриття видимий блиск комети становив 18 зоряну величину, а швидкість видимого руху C/2012 S1 (ISON) дорівнювала близько 0,8 пікселя за кадр. Розмір зображення комети на кадрі складав приблизно 5 пікселів. За 26 хвилин спостереження на серії з 4 кадрів зображення комети ISON перемістилося на 3 пікселі.

ПЗ CoLiТес було рекомендовано усім членам Gaia-FUN-SSO для аналізу спостережень у якості інструмента для виявлення слабких рухомих об'єктів на кадрах.

Розроблені обчислювальні методи можуть бути також використані у програмних комплексах обробки даних для спостереження та виявлення рухомих об'єктів будь-якої природи (наприклад, снаряди, ракети, літаки, безпілотні літальні апарати, супутники).

Основні результати розділу опубліковано в роботах [5–7, 18–22, 24–34].

ВИСНОВКИ

Для підвищення показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта розв'язана науково-технічна задача розробки обчислювальних методів виявлення близьконульового видимого руху об'єкта і методів дослідження показників якості виявлення розроблених методів.

В результаті досліджень було отримано такі нові наукові результати.

1. Розроблено підстановочний обчислювальний метод максимально правдоподібного виявлення близьконульового видимого руху об'єкта. Його використання обґрунтовано відсутністю апріорних даних про параметри видимого руху об'єкта і дисперсії його позиційних вимірювань. Тому параметри функції правдоподібності замінюються їх оцінками. Розглянуто випадки з невідомою і відомою дисперсіями оцінок положення об'єкта на кадрах, а також з використанням її зовнішньої оцінки. Метод використовуються для порівняльного аналізу ефективності нового підходу з синтезу методів виявлення близьконульового видимого руху, що заснований на критеріях значущості, і методів старого підходу, що засновані на байєсівських критеріях. Розроблений метод є методом з паралельним надходженням даних. Це головна його відмінність від традиційних методів виявлення руху, в яких дані надходять послідовно кадр за кадром.

2. Розроблено обчислювальний метод виявлення близьконульового видимого руху об'єкта, що заснований на критеріях значущості швидкості видимого руху об'єкта. Основною особливістю є використання вирішальних правил перевірки статистичної значущості швидкості видимого руху об'єкта, які базуються на таких критеріях значущості як t -критерій Стюдента і f -критерій Фішера. Його використання максимізує умовну ймовірність правильного виявлення близьконульового видимого руху об'єкта в умовах спостереження, які постійно змінюються.

3. Розроблено та досліджено евристичний метод виявлення близьконульового видимого руху об'єкта. Однак дослідження не виправдали ідею спільного використання залишкових дисперсій вимірювань положення об'єкта та f -критерію Фішера, як критерію значущості загальної швидкості руху об'єкта.

4. Розроблено метод оцінки показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта на основі статистичного та натурального моделювання. У якості натурних даних вибираються вимірювання об'єктів, які включені у внутрішній каталог об'єктів, нерухомих на серії кадрів.

5. Проведено дослідження показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта. За результатами дослідження на основі статистичного моделювання найбільш чутливими до змін значення швидкості видимого руху методами виявлення є підстановочний обчислювальний метод максимально правдоподібного виявлення близьконульового видимого руху об'єкта при використанні зовнішньої оцінки дисперсії вимірювань положення об'єкта. Однак сам по собі процес визначення критичного значення вирішальної статистики для цього методу є дуже ресурсно-витратним і не працездатним при швидких змінах умов спостереження. Тому при значеннях кількості кадрів 4 або більше рекомендується використовувати двокоординатний обчислювальний метод виявлення близьконульового видимого руху об'єкта при використанні f -критерію Фішера. Натурне моделювання дозволило використати реальний закон розподілу помилок вимірювань положення об'єкта. За результатами дослідження найбільш чутливими до змін значення швидкості видимого руху методами виявлення (швидкість не перевищує 3 СКВ помилок визначення координат за кадр) є двокоординатний обчислювальний метод виявлення близьконульового видимого руху об'єкта при використанні f -критерію Фішера. Також встановлено, що двокоординатний обчислювальний метод виявлення близьконульового видимого руху об'єкта при використанні f -критерію Фішера стійкий до зміни обладнання, в даному випадку, телескопа, чого не можна сказати про інші методи.

6. Розроблені обчислювальні методи виявлення близьконульового видимого руху об'єкта впроваджені в блоці виявлення об'єктів з близьконульовим видимим рухом ПЗ автоматизованого виявлення астероїдів і комет CoLiTec та використовуються на практиці. Реалізовані в ПЗ CoLiTec методи було застосовано в обсерваторії Odessa-Maayaki, лабораторії космічних досліджень при Уж-НУ, а також в рамках навчального процесу.

7. За допомогою ПЗ CoLiTec та розроблених обчислювальних методів було відкрито багато малих тіл Сонячної системи, у тому числі комета C/2012 S1 (ISON) — довгоперіодична навколосонячна комета, яка на момент відкриття була об'єктом з близьконульовим видимим рухом. За 26 хвилин спостереження на серії з 4 кадрів зображення комети ISON перемістилося на 3 пікселі при своєму розмірі 5 пікселів.

8. Розроблені обчислювальні методи можуть бути використані у програмах автоматизованої обробки даних для виявлення об'єктів з близьконульовим видимим рухом на відеоряді та корисні обсерваторіям України та світу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Хламов С. В. Разработка подстановочных вычислительных методов максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объектов на серии CCD-кадров / С. В. Хламов, В. Е. Саваневич, А. Б. Брю-

ховецкий, С. С. Орышич // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 4/3 (30). – С. 19–26.

2. Khlamov S. V. Development of computational method for detection of the object's near-zero apparent motion on the series of CCD-frames / S. V. Khlamov, V. E. Savanevych, O. B. Briukhovetskyi, S. S. Oryshych // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 2, Is. 9 (80). – P. 41–48.

3. Хламов С. В. Эвристический вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объектов на серии CCD-кадров / С. В. Хламов, В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий // Вестник ХНУ, серия «Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления». – 2016. – Вып. 30. – С. 14–26.

4. Хламов С. В. Метод статистического моделирования исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров / С. В. Хламов, В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, С. С. Орышич // Радиоэлектронные и компьютерные системы: науч.–техн. журнал Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 76 (2). – Х., 2016. – С. 51–61.

5. Хламов С. В. Метод натурального моделирования исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии CCD-кадров / С. В. Хламов, В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, С. С. Орышич // Вісник НТУ «ХП». – 2016. – № 16 (1188). – 93–105.

6. Орышич С. С. Исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров методом статистического моделирования / С. С. Орышич, С. В. Хламов, В. Е. Саваневич // Системи обробки інформації. – 2016. – № 9(146). – С. 44–50.

7. Соковикова Н. С. Оценка координат близких астероидов на ПЗС-изображении / Н. С. Соковикова, В. Е. Саваневич, М. М. Безкровный, С. В. Хламов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 4/4 (64). – С. 41–45.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

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. авиаци. ин-т». – Вып. 68. – Х., 2015. – С. 173–188.

12. 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. Bezkrivniy, A. V. Pogorelov, S. V. Khlamov // Scholars Journal of Engineering and Technology. – 2015. – Т. 3(2a). – С. 153–165.

13. 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. – №71. – С. 16–22.

14. Хламов С. В. Сигнально-траекторный метод оценки параметров близких объектов с протяженным изображением на серии / С. В. Хламов, В. Е. Саваневич, М. М. Безкровный, Н. С. Соковикова // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Харків: ХУПС, 2013. – Вип. 8 (115). – С. 110–116.

15. Дихтяр Н. Ю. Аналитические выражения отклонений между оценками положений небесных объектов в задаче отождествления CCD-кадра / Н. Ю. Дихтяр, Я. С. Мовсесян, С. В. Хламов, В. Е. Саваневич // Вісник НТУ «ХП», – 2015 – Т. 14 (1123) – С. 21–28.

16. 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 // Збір. наук. праць. Вісник НТУ «ХП», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – 2016. – №18 (1190). – С. 128–139.

17. 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. Bezkrivniy, E. N. Dikov, V. P. Vlasenko, N. S. Sokovikova, Ia. S. Movsesian, N. Yu. Dikhtyar, L. V. Elenin, A. V. Pohorelov, S. V. Khlamov // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2015. – Т. 31 (6). – Р. 302–313.

18. 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.

19. Savanevych V. E. Estimating the astronomical object parameters through CCD–frames in CoLiTec project: the current state and perspectives / V. E. Savanevych, A. B. Bryukhovetskiy, M. M. Bezkrivniy, N. S. Sokovikova, S. V. Khlamov, K. S. Smelyakov, I. B. Vavilova, L. Elenin // Astronomy and Space Physics Annual International Conference, 21–24 May: сб. матер. конф – Kyiv, 2013.

20. Savanevych V. CoLiTec – automated software for the image processing and moving objects detection. Current status and prospects / V. Savanevych, A. Bryukhovetskiy, E. Dikov, I. Vavilova, L. Elenin, M. Bezkrivniy, N. Sokovikova, S. Khlamov, V. Vlasenko, O. Gerasimenko, V. Tkachov // NASA's Asteroid Initiative Idea Synthesis Workshop, Houston, USA, 30.09 – 02.10, 2013, – P. 9–10.

21. 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, Ia. Movsesian, M. Dikhtyar // "Asteroids, Comets, Meteors 2014" 12–я международная конференция, 30 июня – 4 июля 2014 г.: сб. матер. конф. – Хельсинки, 2014. – С. 491.

22. Саваневич В. Є. Методи оцінки местоположення небесних об'єктів на серії ПЗС–кадрів / В. Є. Саваневич, С. В. Хламов, Н. С. Соковікова, М. М. Безкривний // «14–та українська конференція з космічних досліджень», 8–12 вересня 2014 р.: сб. матер. конф. – Ужгород, 2014. – С. 116.

23. Хламов С. В. Software for asteroids survey processing. Current status and prospects / С. В. Хламов, В. Є. Саваневич, Я. С. Мовсеян, В. М. Ткачов, Є. М. Діков, О. Б. Брюховецький, А. М. Дашкова // "14–та українська конференція з космічних досліджень", 8–12 вересня 2014 р. – Ужгород, 2014. – С. 119.

24. 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: сб. матер. конф – Moscow, Russia, 2014, B0.4–0061–14.

25. Khlamov S. Precision of astrometry measurements made using CoLiTec 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

26. 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. – Словакия, 2014. – Режим доступа к публ.:

http://www.astrokolonica.sk/uploads/files/kolos2014/kolos2014_abstractbook.pdf

27. Khlamov S. CoLiTec-multifunction software for the CCD image processing [Электронный ресурс] / V. Savanevych, O. Briukhovetskiy, S. Khlamov, N. Sokovikova, A. Pohorelov, Ia. Movsesian, M. Bezкровnii, A. Dahskova // "IAA Planetary Defense Conference 2015", 13 – 17 апреля 2015 г.: сб. матер. конф. – Frascati, Italy, 2015. – Режим доступа к публ.: <http://iaaweb.org/iaa/Scientific%20Activity/conf/pdc2015/IAA-PDC-15-P-09ab.pdf>

28. 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. Соковикова, Я. С. Мовсесян, А. В. Погорелов, С. В. Хламов // «15-та українська конференція з космічних досліджень», 24–28 серпня 2015 р. – Одеса, 2015. – С. 167.

29. Khlamov S. CoLiTec: research and development [Электронный ресурс] / S. Khlamov, O. Briukhovetskiy, V. Savanevych, N. Sokovikova, M. Bezкровnii // "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/uploads/files/kolos2015/prezentacie/khlamov.ppt>

30. Pohorelov A. Development of software for publication and data retrieval from virtual observatories [Электронный ресурс] / A. Pohorelov, V. Savanevych, S. Khlamov, O. Briukhovetskiy, M. Bezкровnii // "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/uploads/files/kolos2015/prezentacie/pohorelov.ppt>

31. Саваневич В. Е. Программа для автоматизированного открытия астероидов и комет CoLiTec: исследования и разработки / В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, Н. С. Соковикова, С. В. Хламов, А. В. Погорелов, Я. С. Мовсесян, Н. Ю. Дихтяр // «Радіометеори, метеори і міжпланетна складова: поблизу та на відстані», 15 березня: сб. матер. конф. – Харків, 2016. – С. 36–37.

32. Саваневич В. Е. Виртуальные обсерватории и автоматизированное открытие астероидов и комет CoLiTec: исследования и разработки / В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, В. П. Власенко, Н. С. Соковикова, С. В. Хламов, А. В. Погорелов, Я. С. Мовсесян, Н. Ю. Дихтяр // «Теоретичні та прикладні аспекти застосування інформаційних технологій в галузі природничих наук», 20–22 квітня 2016 р.: сб. матер. конф. – Одеса, 2016. – С. 94–95.

33. Орышич С. С. Анализ показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии CCD-кадров методом натурального моделирования / Орышич С. С., Хламов С. В., Саваневич В. Е. // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали VI Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2016, 20–21 травня. – Тернопіль: ТНЕУ, 2016. – С. 78–80.

34. Khlamov S. V. Computational methods of data processing for detection of the object's near-zero apparent motion [Электронный ресурс] / Khlamov S. V. // 16-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School (Ukraine, Odessa, Chernomorka, 14–20 August, 2016): сб. матер. конф. – Одесса, Украина, 2016. – С. 41–42 – Режим доступа к публ.: http://gamow.odessa.ua/wp-content/uploads/2016/08/Gamow_Abstracts_2016.pdf.

35. Саваневич В. Е. CoLiTec – Обнаружение околонулевого видимого движения / В. Е. Саваневич, С. В. Хламов, А. Б. Брюховецкий, А. В. Погорелов. // Праці VIII міжнародної школи–семінару «Теорія прийняття рішень», 26 вересня–1 жовтня. – Ужгород, УжНУ, 2016. – С. 232–233.

36. 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. Соковікова, Я. С. Мовсесян, А. В. Погорелов – дата реєстрації 20. 05. 14.

37. 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. Соковікова, Я. С. Мовсесян – дата реєстрації 04. 06. 15.

38. Свід. про реєстр. авт. права № 60581. Україна. Комп'ютерна програма «Програма вирівнювання фону астрономічних кадрів FlatSky-CoLiTec» / В. П. Власенко, Є. В. Саваневич, О. Б. Брюховецький, Н. С. Соковікова, С. В. Хламов, А. В. Погорелов – дата реєстрації 09.07.2015.

АННОТАЦІЯ

Хламов С. В. Обчислювальні методи обробки даних для виявлення об'єктів з близьконульовим видимим 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, 2017.

Дисертація присвячена підвищенню показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта за рахунок розробки нових та уточнення відомих обчислювальних методів обробки цифрових зображень. Вперше запропоновано обчислювальний метод виявлення близьконульового видимого руху об'єкта, що заснований на критеріях значущості швидкості видимого руху об'єкта. У якості таких критеріїв використовується t-критерій Стьюдента і f-критерій Фішера. Лінійна регресійна модель відповідає прямолінійному рівно-

мірному видимому руху об'єкта. Використання такого методу максимізує умовну ймовірність правильного виявлення близьконульового видимого руху об'єкта в умовах спостереження, які постійно змінюються (швидкість не перевищує 3 СКВ помилок визначення координат за кадр). Удосконалено підстановочний обчислювальний метод максимально правдоподібного виявлення близьконульового видимого руху об'єкта. Удосконалено метод оцінки показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта на основі статистичного та натурального моделювання. Розроблені обчислювальні методи були апробовані на практиці та впроваджені в блоці виявлення об'єктів з близьконульовим видимим рухом програми автоматизованого виявлення астероїдів і комет CoLiTec. За допомогою розроблених обчислювальних методів було відкрито багато малих тіл Сонячної системи, у тому числі комета C/2012 S1 (ISON) — довгоперіодична навколосонячна комета.

Ключові слова: обробка зображень, об'єкти з близьконульовим видимим рухом, оцінка показників якості виявлення.

АННОТАЦІЯ

Хламов С. В. Вычислительные методы обработки данных для обнаружения объектов с околонулевым видимым 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, 2017.

Диссертация посвящена повышению показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта за счет разработки новых и уточнения известных вычислительных методов обработки цифровых изображений.

Впервые предложен вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта, основанный на критериях значимости скорости видимого движения объекта. Он основан на решающих правилах проверки статистической значимости скорости видимого движения объекта с применением таких критериев значимости как t-критерий Стьюдента и f-критерий Фишера. Прямолинейному равномерному видимому движению объекта соответствует линейная регрессионная модель. Разработанный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта является методом с параллельным поступлением данных. Это главное его отличие от традиционных методов обнаружения движения, в которых данные поступают последовательно кадр за кадром. Использование разработанного метода максимизирует условную вероятность правильного обнаружения околонулевого видимого движения объекта в постоянно меняющихся условиях наблюдения (скорость не превышает 3 СКО оши-

бок определения координат за кадр).

Усовершенствован подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта. Рассмотрены случаи с неизвестной и известной дисперсиями оценками положения объекта на кадрах и с использованием её внешней оценки. Данный метод был разработан как метод сравнения, создаваемый для условий решаемой задачи в рамках традиционного подхода. Недостатком подстановочного вычислительного метода, основанного на критерии максимального правдоподобия, является недостаточная обоснованность его использования в ситуации неопределённости части параметров функции правдоподобия. Вторым недостатком такого решения является необходимость постоянного подбора граничного значения решающей статистики в меняющихся условиях наблюдений.

Усовершенствован метод оценки показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на основе статистического и натурального моделирования. Суть моделирования заключается в использовании модели видимого движения с добавлением случайных отклонений положения объекта. После использования разработанных вычислительных методов обнаружения околонулевого видимого движения объекта определяются их показатели качества обнаружения. В качестве натуральных данных выбираются объекты, включённые во внутренний каталог объектов, неподвижных на серии кадров. Отклонения измерений положения объектов ВК используются как реализации отклонений оценок положений объектов. Метод натурального моделирования позволил применить реальный закон распределения оценок положения объектов.

Предложенные вычислительные методы обнаружения околонулевого видимого движения объекта были апробированы на практике и внедрены в блоке обнаружения объектов с околонулевым видимым движением программы автоматизированного обнаружения астероидов и комет CoLiTec, одним из разработчиков которого является диссертант. Разработанные методы и реализующее их ПО CoLiTec были применены в обсерватории Odessa-Mayaki, лаборатории космических исследований при Ужгородском национальном университете, а также в рамках учебного процесса.

С использованием разработанных методов открыто множество малых тел Солнечной системы. Самым известным из них стала долгопериодическая окосолнечная комета C/2012 S1 (ISON), которая была открыта с помощью ПО CoLiTec, и являлась на момент открытия объектом с околонулевым видимым движением. За 26 минут наблюдения на серии из 4 кадров изображение кометы ISON переместилось на 3 пикселя при своём размере 5 пикселей. Разработанные вычислительные методы и использующий их программный комплекс, могут быть полезны другим астрономическим обсерваториям Украины и мира для обнаружения объектов с околонулевым видимым движением.

Ключевые слова: обработка изображений, объекты с околонулевым видимым движением, оценка показателей качества обнаружения.

ABSTRACT

Khlamov S. V. Computational methods of data processing for detection of objects with near-zero apparent motion. – 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, 2017.

Dissertation is devoted to improving the accuracy of quality indication of the detection of objects with near-zero apparent motion, through the development of new methods and refining of known computational methods of digital image processing. For the first time provided a method for detection of the object's near-zero apparent motion. The method is based on checking the statistical significance of the factor of speed of the object apparent motion on the series of measurements using the Student's t-test for coordinate-wise decision rules and F-test for XY-wise decision rules. A linear regression model corresponds to the uniform rectilinear visible apparent motion of the object. The substitutional computational method for maximum-likelihood detection of the object's near-zero apparent motion was improved. It is based on using of maximum-likelihood criterion in the decision rule of detection.

The method for estimation of quality indication of detection of the object's near-zero apparent motion was developed. It is based on statistical and natural modeling, that allow to estimate quality indication of detection for all developed methods of detection of the object's near-zero apparent motion. Also natural modeling was used for detecting process of the actual distribution of measurement errors of the objects position.

The developed computational methods were tested and implemented into the block for interframe processing of CoLiTec software. There are a lot of objects were discovered including the long-period sungrazing comet C/2012 S1 (ISON).

Keywords: image processing, objects with near-zero apparent motion, estimation of the quality indication.

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