

Русанов Андрій Вікторович – член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, заступник директора ІПМаш НАН України з наукової роботи, м. Харків; тел.: (057) 349-47-95; e-mail: rusanov@ipmach.kharkov.ua.

Русанов Андрей Викторович – член-кореспондент НАН Украины, доктор технических наук, профессор, заместитель директора ИПМаш НАН Украины по научной работе, г. Харьков; тел.: (057) 349-47-95; e-mail: rusanov@ipmach.kharkov.ua.

Rusanov Andrey Viktorovich – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director IPMach NAS of Ukraine for Science, Kharkiv; tel.: (057) 349-47-95; e-mail: rusanov@ipmach.kharkov.ua.

Хорєв Олег Миколайович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, ІПМаш НАН України, м. Харків, старший науковий співробітник, м. Харків; тел.: (057) 349-47-91; e-mail: khorev@ipmach.kharkov.ua.

Хорев Олег Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ИПМаш НАН Украины, г. Харьков, старший научный сотрудник, г. Харьков; тел.: (057) 349-47-91; e-mail: khorev@ipmach.kharkov.ua.

Khoryev Oleg Nikolayevich – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Research Fellow, IPMach NAS of Ukraine, Kharkiv, Senior Researcher, Kharkiv; tel.: (057) 349-47-91; e-mail: khorev@ipmach.kharkov.ua.

Косьянов Дмитро Юрійович – кандидат технічних наук, докторант, ІПМаш НАН України, м. Харків; тел.: (057) 349-47-91; e-mail: kosyanov@ipmach.kharkov.ua.

Косьянов Дмитрий Юрьевич – кандидат технических наук, докторант, ИПМаш НАН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 349-47-91; e-mail: kosyanov@ipmach.kharkov.ua.

Kosyanov Dmitry Yurievich – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), doctorate, IPMach NAS of Ukraine, Kharkiv; tel.: (057) 349-47-91; e-mail: kosyanov@ipmach.kharkov.ua.

Рябова Світлана Олександрівна – інженер-конструктор гідротурбін ПАТ «Турбоатом», м. Харків; тел.: (057) 349-28-59; e-mail: office@turboatom.com.ua.

Рябова Светлана Александровна – инженер-конструктор гидротурбин ПАО «Турбоатом», г. Харьков; тел.: (057) 349-28-59; e-mail: office@turboatom.com.ua.

Riabova Svetlana Aleksandrovna – Design engineer of hydro turbines of PJSC «Turboatom», Kharkiv; tel.: (057) 349-28-59; e-mail: office@turboatom.com.ua.

Сухорєбрий Петро Миколайович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, ІПМаш НАН України, м. Харків; тел.: (0572) 94-17-06; e-mail: sukhor@ipmach.kharkov.ua.

Сухорєбрий Петр Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ИПМаш НАН Украины, г. Харьков; тел.: (0572) 94-17-06; e-mail: sukhor@ipmach.kharkov.ua.

Sukhorebryi Petr Nikolayevich – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Research Fellow, IPMach NAS of Ukraine, Kharkiv; tel.: (0572) 94-17-06; e-mail: sukhor@ipmach.kharkov.ua.

УДК 519.23: 004.932.72'1

С. В. ХЛАМОВ, В. Е. САВАНЕВИЧ, А. Б. БРЮХОВЕЦКИЙ, С. С. ОРЫШИЧ

МЕТОД НАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ОКОЛОНУЛЕВОГО ВИДИМОГО ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА НА СЕРИИ CCD-КАДРОВ

Розроблено метод натурального моделювання дослідження показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта на серії CCD-кадрів. У якості натурних даних використовуються вимірювання положення об'єктів, включених у внутрішній каталог (ВК) об'єктів, нерухомих на серії кадрів. Даний метод враховує основні особливості процесу формування CCD-вимірювань положення об'єктів на кадрах і особливості натурального моделювання при використанні різних методів виявлення близьконульового видимого руху досліджуваного об'єкта на серії CCD-кадрів. Так само в роботі наведені результати дослідження показників якості виявлення об'єктів з близьконульовим видимим рухом розробленим методом натурального моделювання.

Ключові слова: серія CCD-кадрів, натурне моделювання, внутрішній каталог об'єктів, нерухомих на серії CCD-кадрів, показники якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта, МНК-оцінка параметрів видимого руху об'єкта, вимірювання положення об'єкта, f – критерій Фішера.

Разработан метод натурального моделирования исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии CCD-кадров. В качестве натуральных данных используются измерения положения объектов, включенных во внутренний каталог (ВК) объектов, неподвижных на серии кадров. Данный метод учитывает основные особенности процесса формирования CCD-измерений положения объектов на кадрах и особенности натурального моделирования при использовании различных методов обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров. Так же в работе приведены результаты исследования показателей качества обнаружения объектов с околонулевым видимым движением разработанным методом натурального моделирования.

Ключевые слова: серия CCD-кадров, натурное моделирование, внутренний каталог объектов, неподвижных на серии CCD-кадров, показатели качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта, МНК-оценка параметров видимого движения объекта, измерение положения объекта, f – критерий Фишера.

A method of natural modeling of research of quality indicators of detection of the object's near-zero apparent motion on a series of CCD-frames is developed. Measurements of the positions of the objects included in the internal catalog (IC) of objects fixed on the frame series are used as input data for the method of natural modeling. This method takes into account the main features of the formation of the measurement position of an object and the features of natural modeling when using various methods of detection of near-zero apparent motion of an object on a series of CCD-frames. Natural modeling can be used for detecting the actual distribution of measurement errors of the object position on a series of CCD-frames. The results of the research of quality indicators of detection of objects with near-zero apparent motion by the developed natural modeling method are also provided in this article.

Key words: series of CCD-frames, natural modeling, internal catalog of objects fixed on the frame, quality indication, near-zero apparent motion, OLS parameter estimation, f – test.

Введение. Осознание человечеством астероидно-кометной опасности [1] в настоящее время продолжает расти. Вместе с этим растет и интерес к методам автоматической обработки кадров астероидных обзоров [2, 3]. Небесные объекты Солнечной системы (ССО), как правило, имеют ненулевую скорость видимого движения, а объекты, не принадлежащие Солнечной системе (звезды, галактики), имеют нулевую скорость видимого движения. Большое количество потенциально опасных объектов [4] могут являться астероидами с околонулевым видимым движением. За счёт этого существенно снижаются показатели качества обнаружения таких объектов с помощью традиционных методов обнаружения.

Актуальным является исследование показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта с помощью натурального моделирования. Исследование позволяет определить, какой из существующих вычислительных методов [5, 6, 7] обнаружения обладает наибольшей условной вероятностью правильного обнаружения (при заданной условной вероятности ложного обнаружения) околонулевого видимого движения объекта на серии CCD-кадров. При этом натурное моделирование позволяет использовать при моделировании процесса обнаружения реальные распределения ошибок измерений положения объектов на кадрах.

Цель работы. Целью статьи является разработка метода натурального моделирования исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии CCD-кадров.

Данный метод должен учитывать основные особенности процесса формирования CCD-измерений положения объектов на кадрах и условия натурального моделирования при исследовании различных методов обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии CCD-кадров [5, 6].

Постановка задачи. Показателями качества обнаружения принято считать условную вероятность ошибок первого α (условная вероятность ложной тревоги, УВЛТ, $F_{false} = \alpha$) и второго β (пропуск объекта с заданными свойствами, в данном случае – объекта с ненулевым (околонулевым) видимым движением) рода [8, 9]. В работе вместо условной вероятности пропуска объекта с ненулевым (околонулевым) видимым движением (ошибки второго β рода) будет использоваться условная вероятность D_{true} правильного обнаружения (УВПО), дополняющая до единицы условную вероятность ошибки второго рода $D_{true} = 1 - \beta$.

Так как обнаружение ненулевого видимого движения исследуемого объекта производится на серии N_{fr} CCD-кадров, то характеристики показателей качества обнаружения исследуются на серии кадров, а не на одном кадре.

Необходимо провести исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров методом натурального моделирования при использовании известных методов обнаружения ненулевого (околонулевого) видимого движения астероида [5, 6].

Исследуются как подстановочные методы максимально правдоподобного обнаружения [5], так и двухкоординатные методы с использованием критерия значимости общей скорости видимого движения на основе f – критерия Фишера [6].

Часто на практике не известно аналитическое представление закона распределения входных параметров используемых вычислительных методов. В исследуемом случае не возможно полностью восстановить реальный закон распределения ошибок измерений. В этой связи уместен метод натурального моделирования.

Множество объектов с практически нулевым видимым движением в рамках проекта CoLiТес [10] названо

внутренним каталогом (ВК) объектов, неподвижных на серии кадров. Для исследования в качестве натуральных данных были выбраны именно объекты, включённые в ВК объектов, неподвижных на серии кадров [11].

Поскольку объекты ВК имеют неизменное положение, то возможно отклонения оценок положений объектов ВК от их среднего значения считать реализациями ошибок этих оценок и использовать эти реализации в натурном моделировании. При этом к реализациям отклонений оценок положений объектов ВК, полученным из натуральных данных, необходимо добавлять детерминированные значения перемещений объектов в соответствии с исследуемыми значениями скоростей их видимого движения.

Таким образом, с помощью натурального моделирования появляется возможность использования реальных законов распределения ошибок измерений положения объектов при исследовании их обнаружения с использованием различных вычислительных методов.

Анализ литературы. Известны методы обнаружения движущихся объектов на серии CCD-кадров [5, 6, 8, 12] с проверкой гипотез о нулевом (H_0) и околонулевом (H_1) видимом движении исследуемого объекта. Данные методы делятся на две группы. Большая часть известных методов основана на использовании критерия *максимального правдоподобия* [8, 13] или какого-либо другого *критерия байесовской группы* [14]. Вторая группа методов обнаружения околонулевого видимого движения объекта [6] в решающих правилах использует *критерии согласия* для проверки значимости скорости как параметра регрессионной модели [15].

Исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров уже проводилось с помощью метода статистического моделирования [16]. Однако наибольший интерес представляет исследование закона распределения натуральных данных (измерений положения исследуемого объекта), полученных с телескопов на серии CCD-кадров.

Известны методы для формирования внутреннего каталога объектов, неподвижных на серии кадров [11]. Среди них метод взаимного отождествления кадров серии и метод рекуррентного отождествления кадров серии [11]. При использовании любого из указанных методов на первом шаге формируются группы близких объектов каждого кадра. Вычислительный метод формирования данных групп изложен в статье [17].

Процедуре формирования внутреннего каталога объектов, неподвижных на серии кадров, предшествуют процедуры отождествления [18, 19] измерений (звезд кадра) и формуляров каталога (звезд каталога). В результате этого формируются постоянные пластинки [20] и с их использованием координаты объектов в системе координат (СК) любого CCD-кадра могут быть пересчитаны в СК любого другого CCD-кадра серии.

При формировании внутреннего каталога объектов, неподвижных на серии кадров, все измерения серии кадров пересчитываются в СК одного кадра, который можно назвать *базовым кадром*.

Исследуемые методы обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров методом натурального моделирования. При неизвестной дисперсии измерений положения объекта на кадрах подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения ненулевого видимого движения исследуемых объектов [5] имеет вид:

$$\frac{R_0^2 - R_1^2}{R_0^2 \cdot R_1^2} \geq \frac{\ln(\lambda_{cr})}{A \cdot N_{mea}}, \quad (1)$$

где

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

$$R_1^2 = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \left((x_k - \hat{x}_k(\hat{\theta}_x))^2 + (y_k - \hat{y}_k(\hat{\theta}_y))^2 \right) \quad (3)$$

– остаточные суммы квадратов отклонений [21] положения исследуемого объекта в предположении истинности гипотез о нулевом (H_0) и ненулевом (H_1) видимом движении соответственно на данной серии измерений; x_k , y_k – неизвестные значения истинного положения исследуемого объекта на время τ_k привязки измерений;

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k(\hat{\theta}_x) = \hat{x}_0(\hat{\theta}_x) + \hat{V}_x(\hat{\theta}_x) \cdot (\tau_k - \tau_0); \quad (4)$$

$$\hat{y}_k = \hat{y}_k(\hat{\theta}_y) = \hat{y}_0(\hat{\theta}_y) + \hat{V}_y(\hat{\theta}_y) \cdot (\tau_k - \tau_0) \quad (5)$$

– интерполированные оценки координат положения исследуемого объекта на k – м кадре серии [8];

$$\hat{x}_0 = \frac{D \cdot A_x - C \cdot B_x}{N_{mea} \cdot D - C^2}; \quad (6)$$

$$\hat{y}_0 = \frac{D \cdot A_y - C \cdot B_y}{N_{mea} \cdot D - C^2} \quad (7)$$

– МНК-оценки положения исследуемого объекта на момент τ_0 привязки базового кадра [8];

$$\hat{V}_x = \frac{N_{mea} \cdot B_x - C \cdot A_x}{N_{mea} \cdot D - C^2}; \quad (8)$$

$$\hat{V}_y = \frac{N_{mea} \cdot B_y - C \cdot A_y}{N_{mea} \cdot D - C^2} \quad (9)$$

– МНК-оценки скоростей видимого движения исследуемого объекта вдоль каждой координаты [8];

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

$\Delta_{\tau k} = (\tau_k - \tau_0)$ – разница между временем привязки τ_0 базового кадра и временем τ_k кадра, на котором сформировано k – е измерение;

$$\hat{x} = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \hat{x}_k / N_{mea}, \hat{y} = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \hat{y}_k / N_{mea}$$

– средние значения оценок координат неизменного положения объекта с нулевым видимым движением; $A = 2(N_{mea} - m)$; $m = 2$ – количество оцениваемых параметров видимого движения исследуемого объекта вдоль каждой координаты на серии измерений; λ_{cr} – заданное предельно допустимое (критическое) значение оценки отношения правдоподобия для обнаружения ненулевого видимого движения исследуемого объекта; N_{mea} – количество измерений положения исследуемого объекта на N_{fr} кадрах.

При известной дисперсии σ^2 измерений положения объекта на кадрах подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения ненулевого видимого движения исследуемых объектов [5] имеет вид:

$$R_0^2 - R_1^2 \geq 2\sigma^2 \cdot \ln(\lambda_{cr}). \quad (10)$$

Если в этом используется внешняя оценка дисперсии $\hat{\sigma}_{out}^2$ измерений положения объекта на кадрах, то неравенство (10) имеет вид [5]:

$$\frac{R_0^2 - R_1^2}{\hat{\sigma}_{out}^2} \geq 2 \ln(\lambda_{cr}). \quad (11)$$

Например, внешняя (относительно выборки, используемой для обнаружения видимого движения объекта) оценка дисперсии оценок положения может быть получена на других измерениях каталогизированных объектов исследуемых кадров. Тогда значение искомой оценки является, например, значением оценки дисперсии всех измерений положения объектов астрометрического каталога на CCD-кадре.

Также существуют методы обнаружения околонулевого видимого движения объекта [6], которые основаны на использовании критериев согласия [15]. Например, двухкоординатный вычислительный метод проверки статистической значимости фактора скорости видимого движения объекта на исследуемой серии измерений с использованием f – критерия Фишера $f(\Omega_{set})$ [6] приводит к неравенству:

$$\frac{R_0^2 - R_1^2}{R_1^2} \geq \frac{w f_{cr}}{N_{mea} - r}, \quad (12)$$

где w – количество исследуемых факторов линейной регрессионной модели (в исследуемом случае этим фактором является скорость видимого движения); r – ранг матрицы частных производных F_x ($rang F_x = r \leq \min(m, N_{mea})$) [6]; f_{cr} – предельно допустимое (критическое) табличное значение [6, 21] статистики распределения Фишера с $(w, N_{mea} - r)$ степенями свободы.

Также известен эвристический вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объектов на серии CCD-кадров [7], который включает в себя использование предельно допустимых значений для оценок параметров движения, а также f – критерий Фишера $f(\Omega_{set})$ [6]. Данный метод формально можно представить следующим образом:

$$\left[\hat{V} > \hat{V}_{\min} \right] \& \& \left\{ \left(\left[\hat{\sigma}_{resx}^2 < \hat{\sigma}_{resx\max}^2 \right] \& \& \left[\hat{\sigma}_{resy}^2 < \hat{\sigma}_{resy\max}^2 \right] \& \& \left[\hat{\sigma}_{resxy}^2 < \hat{\sigma}_{resxy\max}^2 \right] \& \& \left[f(\Omega_{set}) > f_{cr} \right] \right) \right\} \parallel \left(\left(\left[\hat{\sigma}_{resxy}^2 < \hat{\sigma}_{resxy\max}^2 \cdot k_{\sigma\min} \right] \& \& \left[f(\Omega_{set}) > f_{\min} \right] \right) \parallel \left(\left[\hat{\sigma}_{resxy}^2 < \hat{\sigma}_{resxy\max}^2 \cdot k_{\sigma\max} \right] \& \& \left[f(\Omega_{set}) > f_{\max} \right] \right) \right\}, \quad (13)$$

где $\hat{V} = \sqrt{\hat{V}_x^2 + \hat{V}_y^2}$ – оценка модуля скорости видимого движения объекта (оценки скоростей \hat{V}_x и \hat{V}_y видимого движения исследуемого объекта вдоль координат x и y определяются согласно выражений (8) и (9) соответственно); \hat{V}_{\min} – предел минимальной допустимой оценки скорости видимого движения околонулевого видимого движения у исследуемого объекта;

$$\hat{\sigma}_{resx}^2 = \sum_{k=1}^{N_{mea}} (x_k - \hat{x}_k(\hat{\theta}_x))^2, \quad \hat{\sigma}_{resy}^2 = \sum_{k=1}^{N_{mea}} (y_k - \hat{y}_k(\hat{\theta}_y))^2$$

– остаточные дисперсии оценок координат x и y исследуемого объекта; $\hat{\sigma}_{resxy}^2 = \hat{\sigma}_{resx}^2 + \hat{\sigma}_{resy}^2$ – суммарная остаточная дисперсия оценки положения исследуемого объекта; $\hat{\sigma}_{resx\max}^2, \hat{\sigma}_{resy\max}^2$ – заданные предельно допустимые значения остаточных дисперсий оценок координат x и y исследуемого объекта; $\hat{\sigma}_{resxy\max}^2$ – заданное предельно допустимое значение суммарной остаточной дисперсии оценки положения исследуемого объекта; $k_{\sigma\min}, k_{\sigma\max}$ – минимальный и максимальный множители, определяющие предельно допустимые значения остаточных дисперсий оценок координат исследуемого объекта в условиях больших и малых значений критерия Фишера (12), соответственно; f_{\min}, f_{\max} – минимальное и максимальное допустимые значения f – критерия Фишера значимости общей скорости видимого движения.

Исследуемый эвристический вычислительный метод (13) обнаружения околонулевого видимого движения объектов на серии CCD-кадров подробно изложен, а значения его констант приведены в работе [7].

Таким образом, в работе проводится исследование показателей качества некоторых методов обнаружения околонулевого видимого движения астероида:

1. подстановочного вычислительного метода максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объектов при следующих дополнительных условиях:

- неизвестной дисперсии измерений положения объекта на кадрах с помощью выражения (1);
- известной дисперсии измерений положения объекта на кадрах с помощью выражения (10);
- использовании внешней оценки дисперсии измерений положения объекта на кадрах с помощью выражения (11);

2. двухкоординатного вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения астероида с применением f – критерия Фишера из выражения (12);

3. эвристического вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения объектов на серии CCD-кадров из выражения (13).

Условия наблюдения объектов с околонулевым видимым движением. Наблюдение ССО осуществляется с помощью телескопа, оснащенного CCD-матрицей [24]. В качестве натуральных данных (измерения положений исследуемых объектов) были выбраны серии CCD-кадров, полученные в обсерваториях ISON-NM (код MPC H15) [25] и ISON-Kislovodsk (код MPC D00) [26]. Обсерватория ISON-NM находится на *горе Джой (Мейхилл), Нью-Мексико, США* и использует 40-см телескоп SANTEL-400AN и CCD-матрицу FLI ML09000-65 (3056×3056 пикселей, размер пикселя 12 мкм). Время экспозиции составляло 150 с. Обсерватория ISON-Kislovodsk расположена в 20 км от *города Кисловодска (плато Шаджатмаз), РФ* и использует 19,2-см. широкопольный телескоп GENON (VT-78) [27] и CCD-матрицу FLI ML09000-65 (4008×2672 пикселей, размер пикселя 9 мкм). Время экспозиции составляло 180 с.

Небесные объекты, не принадлежащие Солнечной системе, имеют нулевую скорость видимого движения (проекции траектории объекта на фокальную плоскость телескопа). Результатом наблюдений является серия цифровых кадров, содержащая изображения небесных объектов, сформированных в фокальной плоскости телескопа. Один из кадров серии называется базовым со временем привязки τ_0 .

В работе используется прямоугольная система координат (СК) CCD-кадра с центром в левом верхнем углу CCD-кадра. Считается, что все измерения положения исследуемого объекта предварительно приведены в СК базового CCD-кадра. Моделью видимого движения любого ССО за время формирования исследуемой серии измерений достоверно считать модель прямолинейного и равномерного движения объекта вдоль каждой координаты

независимо:

$$x_n(\theta_x) = x_0 + V_x(\tau_n - \tau_0); \quad (14)$$

$$y_n(\theta_y) = y_0 + V_y(\tau_n - \tau_0), \quad (15)$$

где x_0, y_0 – координаты положения исследуемого объекта на момент привязки базового кадра τ_0 ; $x_n(\theta_x), y_n(\theta_y)$ – координаты положения исследуемого объекта в момент времени τ_n ; V_x, V_y – скорости видимого движения исследуемого объекта по соответствующим координатам; $\theta_x = (x_0, V_x)^T, \theta_y = (y_0, V_y)^T$ – параметры видимого движения исследуемого объекта по каждой координате.

В процессе внутрикадровой обработки [28] исследуемых кадров выявлено изображение объекта. Результаты внутрикадровой обработки по одному объекту одного кадра представляются в виде измерения Y_{in} (i – измерение n_{fr} – го кадра). В общем случае i – измерение n_{fr} – го кадра содержит оценки координат $Y_{Kin} = \{x_{in}; y_{in}\}$ и блеска A_{in} объекта: $Y_{in} = \{Y_{Kin}; A_{in}\}$. Измерения положения исследуемого объекта могут формироваться не на всех N_{fr} кадрах, а лишь на N_{mea} , где $N_{mea} \leq N_{fr}$. При этом серия измерений (не более чем по одному с кадра) исследуемого объекта, гипотетически принадлежащих одному объекту, примет следующий вид:

$$\Omega_{set} = (Y_{K1(i,1)}, \dots, Y_{Kk(i,n)}, \dots, Y_{KNmea(i,Nfr)}) = ((x_1, y_1), \dots, (x_k, y_k), \dots, (x_{Nmea}, y_{Nmea})), \quad (16)$$

где $k(i, n) = k$ – номер измерения в серии измерений исследуемого объекта, которое является i – м измерением n_{fr} – го кадра серии, гипотетически принадлежащего исследуемому объекту; x_k, y_k – измерение положения объекта, оценка положения объекта, содержащаяся в k – м измерении серии.

При наблюдении объектов с околонулевым видимым движением считается, что за время наблюдения исследуемого объекта условия наблюдения практически неизменны. Соответственно, отношение сигнал/шум изображения небесного объекта на кадрах серии практически не меняется, а СКО оценок координат на разных кадрах практически одинаковы. Таким образом, оценки координат небесного объекта на исследуемых кадрах можно считать равноточными. Считается, что отклонения оценок различных координат объекта, содержащиеся в измерениях, независимы между собой как внутри одного измерения, так и между измерениями разных кадров. Отклонения оценки координаты x объекта распределены по нормальному закону [8] с неизвестной дисперсией σ_x^2 и нулевым математическим ожиданием.

Предпосылки, используемые при исследовании показателей качества обнаружения ненулевой (околонулевой) скорости видимого движения объекта методом натурального моделирования. Дополнительно к предпосылкам, которые используются при синтезе решающих правил обнаружения околонулевой скорости видимого движения объекта, при исследовании показателей качества обнаружения методом натурального моделирования используются следующие.

1. Считается, что предварительно в процессе внутрикадровой обработки для всех N_{fr} кадров исследуемой серии (не более одного на каждом кадре) выявлено изображение объекта. Для данного изображения исследуемого объекта со всех N_{fr} кадров сформированы измерения, составляющие серию Ω_{set} (16), с координатами в системе координат (СК) базового кадра.

2. В соответствии с количеством N_{fr} кадров исследуемой серии определено количество N_{mea} измерений положения исследуемого объекта на серии кадров по формуле $N_{mea} = 2N_{fr}$ (положение объекта задаётся двумя координатами x и y).

3. Также считается, что все объекты N_{VK} , принадлежащие ВК объектов, неподвижных на серии кадров, имеют нулевое видимое движение ($V = 0$), что соответствует условиям гипотезы H_0 . Таким образом, измерения положения данных объектов могут учитываться при натурном моделировании в условиях гипотезы H_0 .

4. Значение модуля приведенной скорости V видимого движения задается в относительных величинах – оценке СКО $\hat{\sigma}$ отклонений измерений положения исследуемого объекта, полученной по ВК объектов, неподвижных на серии CCD-кадров ($V = k\hat{\sigma}$), где k – коэффициент, который задаётся при моделировании. Выражение для модуля приведенной скорости V видимого движения исследуемого объекта имеет следующий вид:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}. \quad (17)$$

5. Также при моделировании задаётся угол γ видимого движения исследуемого объекта. Используя его значение и значение модуля скорости V видимого движения, определяются проекции скорости V_x и V_y видимого движения исследуемого объекта по соответствующим координатам:

$$V_x = V \sin \gamma, \quad (18)$$

$$V_y = V \cos \gamma. \quad (19)$$

Для исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта с использованием всех перечисленных подстановочных методов (1), (10), (11) максимально правдоподобного обнаружения используются соответствующие им предельно допустимые (критические) значения λ_{cr} .

Данные значения определяются в соответствии с наперед заданным уровнем значимости α при моделировании гипотезы H_0 ($V = 0$). Для этого все полученные для N_{VK} объектов ВК значения оценок отношений правдоподобия $\hat{\lambda}(\Omega_{set})$ для каждого синтезированного подстановочного метода максимально правдоподобного обнаружения отдельно заносятся во множество $\Omega_{\hat{\lambda}}$. Элементы данного множества упорядочиваются по возрастанию. Соответствующие предельно допустимые (критические) значения решающей статистики λ_{cr} для каждого метода определяются как элементы упорядоченного множества $\Omega_{\hat{\lambda}}$, находящиеся на позиции с номером $N_{VK} - N_{VK} * \alpha$:

$$\lambda_{cr} = \Omega_{\hat{\lambda}} [N_{VK} - N_{VK} * \alpha]. \quad (20)$$

В процессе натурального моделирования исследования показателей качества обнаружения с использованием двухкоординатного метода (12) обнаружения околонулевого видимого движения астероида с применением f -критерия Фишера использовалось табличное критическое значение f_{cr} для распределения Фишера с (w , $N_{mea} - r$) степенями свободы [6, 21], где w – количество исследуемых факторов линейной регрессионной модели (в исследуемом случае этим фактором является скорость видимого движения), гипотеза о которых проверяется, а r – ранг матрицы частных производных F_x [5, 6]. В качестве альтернативного варианта критическое значение f_{cr} Фишера также определялось в соответствии с наперед заданным уровнем значимости α при моделировании гипотезы H_0 ($V = 0$).

Используемые описанные выше методы обнаружения околонулевого видимого движения астероида были исследованы на одних и тех же выборках натуральных данных.

Константы метода натурального моделирования. При проведении исследований процесса обнаружения околонулевой скорости видимого движения объекта использовались следующие значения констант вычислительного метода. Количество N_{fr} кадров исследуемой серии CCD-кадров равно $N_{fr} = 4$. Количество исследуемых факторов w линейной регрессионной модели (в исследуемом случае этим фактором является скорость видимого движения), гипотеза о которых проверяется, равно $w = 1$ [6]. Ранг r матрицы частных производных F_x [5] равен $r = 4$. Количество оцениваемых параметров движения исследуемого объекта равно $m = 2$ (рассматриваемая модель видимого движения имеет два параметра – начальное положение и скорость). При $\alpha = 10^{-3}$ предельно допустимое (критическое) табличное значение статистики распределения Фишера с (1, 4) степенями свободы составляет $f_{cr} = 74.13$, а при $\alpha = 10^{-4}$ – $f_{cr} = 241.62$ [6, 22]. Также в качестве альтернативного варианта при моделировании гипотезы H_0 ($V = 0$) в соответствии с наперед заданным уровнем значимости $\alpha = 10^{-3}$ было определено критическое значение f_{cr} Фишера.

Метод натурального моделирования исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров. В данной работе проводится натурное моделирование, в котором в качестве натуральных данных используются измерения положений исследуемых объектов ВК, неподвижных на серии CCD-кадров.

Метод натурального моделирования заключается в следующей последовательности операций.

1. Задаются параметры эксперимента. Для каждого кадра рассматриваемой серии выбираются координаты x_k и y_k положения исследуемого объекта ВК объектов, неподвижных на серии CCD-кадров.

2. Каждый исследуемый объект ВК объектов является реализацией эксперимента в условиях гипотезы H_0 о нулевом видимом движении исследуемого объекта ($V = 0$). Для данного эксперимента выполняется следую-

щая последовательность операций.

2.1. Производится МНК-оценка положения \hat{x}_0 и \hat{y}_0 исследуемого объекта на базовом кадре и скорости \hat{V}_x и \hat{V}_y его видимого движения (оценка параметров $\hat{\theta}_x$ и $\hat{\theta}_y$ видимого движения исследуемого объекта) вдоль каждой координаты с помощью выражений (6) – (9).

2.2. Определяются интерполированные оценки координат \hat{x}_k и \hat{y}_k исследуемого объекта на моменты привязки всех кадров исследуемой серии с помощью выражений (4) и (5).

2.3. Определяются значения остаточных сумм R_0^2 и R_1^2 квадратов отклонений положения исследуемого объекта в предположении истинности гипотез о нулевом (H_0) и околонулевом (H_1) видимом движении соответственно на данной серии измерений с помощью выражений (2) и (3).

2.4. Определяются значения оценок отношений правдоподобия для всех исследуемых подстановочных методов максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объектов. Для этого используются: выражение (1) – при неизвестной дисперсии измерений положения объекта на кадрах; выражение (10) – при известной дисперсии; выражение (11) – при использовании внешней оценки дисперсии измерений положения исследуемого объекта.

2.5. Определяется значение f – критерия Фишера $f(\Omega_{set})$ значимости общей скорости видимого движения с помощью выражения (12).

3. На основе заданного уровня значимости (*условной вероятности ложной тревоги*, УВЛТ) α обнаружения определяются (20) предельно допустимые (критические) значения ℓ_{cr} , которые соответствуют всем исследуемым (1), (10) и (11) подстановочным методам максимально правдоподобного обнаружения. Также определяется критическое значение f_{cr} Фишера в соответствии с наперед заданными уровнями значимости $\alpha = 10^{-3}$ и $\alpha = 10^{-4}$.

4. Задаётся модуль приведенной скорости V и направление γ видимого движения исследуемого объекта, определяются значения скоростей V_x и V_y видимого движения исследуемого объекта с помощью выражений (18) – (19). Также задаётся оценка СКО $\hat{\sigma}$ отклонений измерений положения исследуемого объекта, полученная по ВК объектов, неподвижных на серии CCD-кадров.

Для каждого исследуемого объекта ВК с учётом заданного значения времени между кадрами, модуля приведенной скорости и направления видимого движения определяются координаты положения $x_k(\theta_x)$ и $y_k(\theta_y)$ исследуемого объекта в момент времени τ_k в соответствии с выражениями (14) и (15).

5. С учётом рассчитанных в блоке 4 координат x_k и y_k положения для каждого исследуемого объекта ВК выполняется последовательность операций, описанная в пунктах **2.1** – **2.5** этого перечня.

6. Полученные в блоке 5 значения оценок отношений правдоподобия для всех синтезированных подстановочных методов максимально правдоподобного обнаружения сравниваются с полученными в блоке 3 предельно допустимыми (критическими) значениями λ_{cr} , которые соответствует им.

7. Полученные в блоке 5 значения f – критерия Фишера $f(\Omega_{set})$ значимости общей скорости видимого движения сравниваются с предварительно заданным табличным предельно допустимым (критическим) значением статистики распределения Фишера с $(w, N_{mea} - r)$ степенями свободы [6, 22]. Также полученные значения f – критерия Фишера $f(\Omega_{set})$ сравниваются с полученным на основе натуральных данных в блоке 3 критическим значением f_{cr} Фишера в соответствии с наперед заданными уровнями значимости $\alpha = 10^{-3}$ и $\alpha = 10^{-4}$.

8. Основываясь на результатах экспериментов, определяется условная вероятность правильного обнаружения (УВПО) [21]. Она дополняет до единицы условную вероятность ошибки второго рода β (пропуска объекта с околонулевым видимым движением при условии справедливости гипотезы H_1).

УВПО также является оценкой вероятности по частоте превышения предельно допустимого (критического) значения λ_{cr} полученными в блоке 5 значениями оценок отношений правдоподобия $\hat{\lambda}(\Omega_{set})$ для всех синтезированных подстановочных методов максимально правдоподобного обнаружения:

$$D_{true} = N_{exc} / N_{VK}, \quad (21)$$

где N_{exc} – количество превышений критического значения λ_{cr} для подстановочных методов максимально правдоподобного обнаружения или f_{cr} для двухкоординатного вычислительного метода обнаружения с примени-

ем f – критерия Фишера.

УВПО определяется для разных значений модуля приведенной скорости V видимого движения исследуемого объекта и количества N_{fr} кадров. Исследования проводились с использованием ПО CoLiTec [10, 12, 29].

Результаты исследований методом натурального моделирования. На рис. 1,2 приведены кривые обнаружения при использовании подстановочного метода максимально правдоподобного обнаружения с применением внешней оценки СКО (11) (кривая № 1), двухкоординатного метода обнаружения с применением f – критерия Фишера (12) (кривая № 2) и эвристического вычислительного метода обнаружения (13) (кривая № 3).

Основываясь на данном исследовании, самым чувствительным к изменениям значения модуля скорости видимого движения методом обнаружения является двухкоординатный вычислительный метод обнаружения с применением f – критерия Фишера (12). Так, например, при четырех кадрах в исследуемой серии уже при $V = 0.5\sigma$ (σ – СКО ошибок оценок координат небесных объектов) значение УВПО для данного метода начинает возрастать, когда для других методов обнаружения для этого необходимо значение модуля скорости видимого движения не менее $V = 1.25\sigma$.

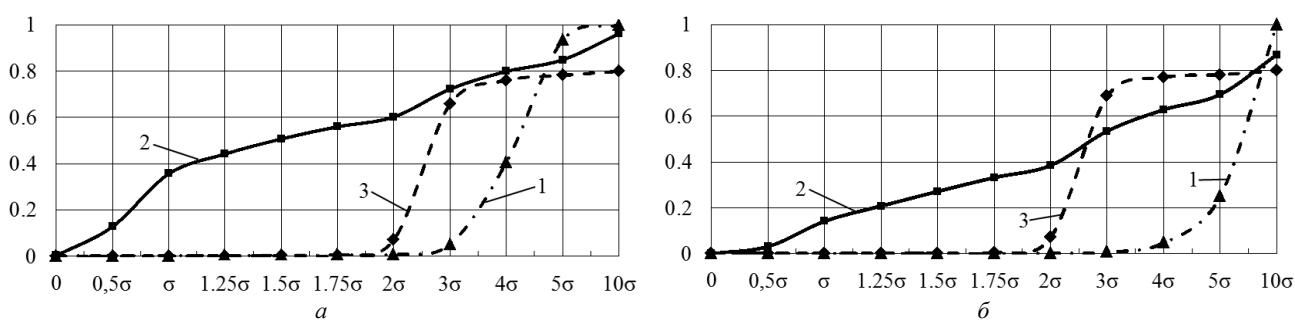


Рис. 1 – Кривые обнаружения телескопа SANTEL-400AN: a – УВЛТ $\alpha = 10^{-3}$; b – УВЛТ $\alpha = 10^{-4}$.

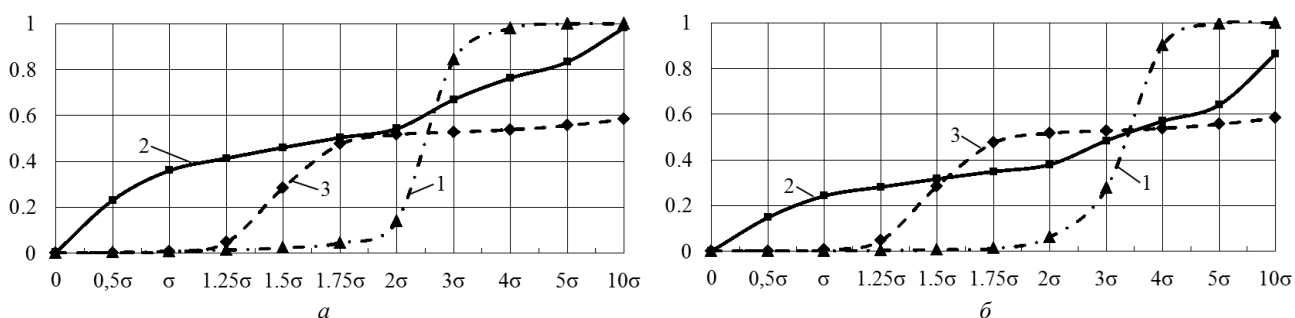


Рис. 2 – Кривые обнаружения телескопа GENON (VT-78): a – УВЛТ $\alpha = 10^{-3}$; b – УВЛТ $\alpha = 10^{-4}$.

Исследования показали, что эвристический вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объектов на серии CCD-кадров (13) является не достаточно эффективным по данным натурального моделирования. Кроме того, с использованием данного метода невозможно стабилизировать УВЛТ на заданном уровне.

Очевидно, что идею одновременного использования статистик остаточных дисперсий измерений положения объекта на CCD-кадрах и f – критерия Фишера следует считать непродуктивной. Кроме того, данная идея не вытекает из каких-либо теоретических построений; тем самым она не является теоретически обоснованной.

Во время исследований для двухкоординатного вычислительного метода обнаружения с применением f – критерия Фишера (12) использовались предварительно заданные табличные предельно допустимые (критические) значения статистики распределения Фишера с $(w, N_{mea} - r)$ степенями свободы [6, 22]. Определение по результатам натурального моделирования критических значений f_{cr} Фишера в соответствии с наперед заданными уровнями значимости $\alpha = 10^{-3}$ и $\alpha = 10^{-4}$ приводит практически к тем же критическим значениям решающей статистики.

Кроме того, рис. 3 свидетельствует, что двухкоординатный вычислительный метод обнаружения с применением f – критерия Фишера (12) устойчив к смене оборудования, в данном случае, телескопа. Следовательно, нет необходимости принимать дополнительные меры для выбора критического значения решающей статистики при смене оборудования и условий наблюдения.

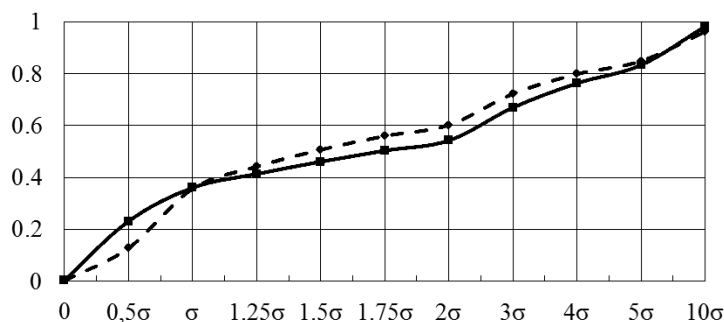


Рис. 3 – Кривые обнаружения при использовании двухкоординатного метода с применением f – критерия Фишера ($\alpha = 10^{-3}$) телескопов GENON (VT-78) (сплошная линия) и SANTEL-400AN (штрих).

С другой стороны, при использовании других описанных выше методов обнаружения возникают трудности при определении критического значения (рис. 4, 5). Прежде всего, не ясно как разделить смесь звёзд и объектов с околонулевым видимым движением для определения критического значения используемой решающей статистики. Так же сам по себе процесс определения предельно допустимого значения является очень трудоёмким, ресурсно-затратным и методически не простым в условиях быстрой смены условий наблюдения, характерных для современных астероидных обзоров.

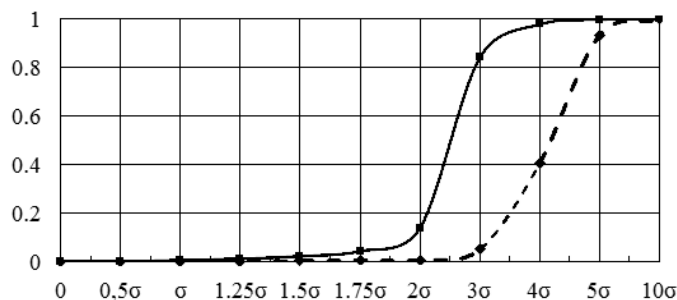


Рис. 4 – Кривые обнаружения при использовании подстановочного метода максимально правдоподобного обнаружения с применением внешней оценки СКО ($\alpha = 10^{-3}$) телескопов GENON (VT-78) (сплошная линия) и SANTEL-400AN (штрих).

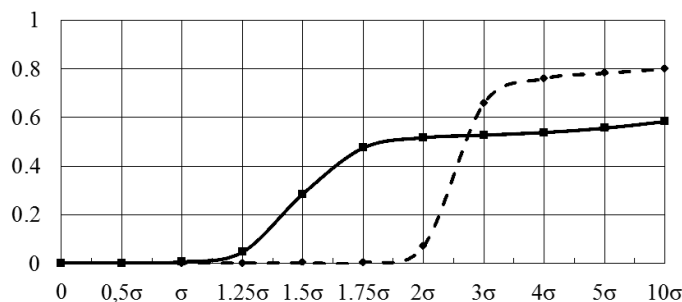


Рис. 5 – Кривые обнаружения при использовании эвристического вычислительного метода ($\alpha = 10^{-3}$) телескопов GENON (VT-78) (сплошная линия) и SANTEL-400AN (штрих).

Выводы. В статье разработан метод натурального моделирования исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии CCD-кадров. В качестве натуральных данных использовались измерения положения представителей внутреннего каталога объектов, неподвижных на серии CCD-кадров [23]. Проведенное натурное моделирование позволило определить зависимость условной вероятности правильного обнаружения от используемого вычислительного метода обнаружения, его параметров и условий наблюдения исследуемых объектов.

Самым эффективным методом обнаружения околонулевого (когда скорость не превышает 3 СКО ошибок определения координат за кадр) видимого движения при малом количестве кадров (рис. 1 – 3) является двухкоординатный вычислительный метод обнаружения с применением f – критерия Фишера (12). Однако при снижении УВЛТ (рис. 1, б, 2, б) предпочтительность данного метода обнаружения падает. Но в этом случае предпочтительность всех других описанных выше методов также неочевидна.

В свою очередь, для обнаружения ненулевого видимого движения рекомендуется использовать подстано-

вочный метод максимально правдоподобного обнаружения с применением внешней оценки СКО (11) (рис. 4). У данного метода при больших значениях модуля скорости видимого движения значение УВПО больше по сравнению с другими методами обнаружения (рис. 1 – 2).

Так же установлено, что двухкоординатный вычислительный метод обнаружения с применением f – критерия Фишера (12) устойчив к смене оборудования, в данном случае, телескопа (рис. 3), чего нельзя сказать о других исследованных методах (рис. 4, 5).

Дальнейшие исследования целесообразно сконцентрировать на исследовании показателей качества обнаружения объектов при длинных сериях наблюдений.

Список литературы

1. Dearborn D. P. S., Miller Paul L. Defending Against Asteroids and Comets // Springer International Publishing. Handbook of Cosmic Hazards and Planetary Defense. – 2014. – С. 1 – 18.
2. LSST The Large Synoptic Survey Telescope / LSST // LSST. – 01 серпня 2014. – Режим доступу: <http://www.lsst.org>. – Дата звертання: 13 липня 2016.
3. Ory M., Daassou A., Colas F., et.al. THE MOROCCO OUKAIMEDEN SKY SURVEY, THE MOSS TELESCOPE // Asteroids, Comets, Meteors. – 2012. – С. 76 – 77.
4. Kortencamp Steve Asteroids, Comets, and Meteoroids // Capstone Press. – Mankato, MN. – 2012. – 65 с.
5. Хламов С. В., Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б., Орьшич С. С. Разработка подстановочных вычислительных методов максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объектов на серии CCD-кадров // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 4/3 (30). – С. 19 – 26. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.75793.
6. Khlamov S. V., Savanevych V. E., Briukhovetskiy O. B., Oryshych S. S. Development of computational method for detection of the object's near-zero apparent motion on the series of CCD-frames // EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Volume 2, Issue 9 (80). – pp. 41 – 48.
7. Хламов С. В., Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б. Эвристический вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объектов на серии CCD-кадров // Вестник ХНУ. Серия: «Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления». – 2016. – Выпуск 29. – С. 21 – 34.
8. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С. З. Кузьмин. – К.: Издательство КвіЦ, 2000. – 428 с.
9. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с. – ISBN 5-9221-0707-0.
10. Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б., Кожухов А. М., Диков Е. Н., Власенко В. П. Программа CoLiTec автоматизированного обнаружения небесных тел со слабым блеском // Космічна наука і технологія. – 2012. – Т. 18 (1). – С. 39 – 46.
11. Саваневич В. Е., Мовсесян Я. С., Дихтяр Н. Ю. Метод формирования внутреннего каталога объектов, неподвижных на серии кадров // Системы обработки інформації. – 2016. – Вып. 14 (179). – С. 45 – 58.
12. Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б., Кожухов А. М., Диков Е. Н. Метод обнаружения астероидов, основанный на накоплении сигналов вдоль траекторий с неизвестными параметрами // Системы обработки інформації. : 36. науч. прашь. Харків. – 2011. – Вып. 2. – С. 137 – 144.
13. Myung I. J. Tutorial on maximum likelihood estimation // Journal of Mathematical Psychology. – 2003. – Vol. 47. – С. 90 – 100.
14. Masson M. E. J. A tutorial on a practical Bayesian alternative to null-hypothesis significance testing // Behavior Research Methods. – 2011. – Vol. 43. – С. 679 – 690.
15. Draper N. R., Smith H. Applied regression analysis // Business & Economics. – 1998. – Vol. 1. – С. 706. – ISBN 0-471-17082-8.
16. Хламов С. В., Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б., Орьшич С. С. Метод статистического моделирования исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров // Радиоэлектронные и компьютерные системы : науч.-техн. журнал Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». – X., 2016. – Вып. 76 (2). – С. 51 – 61.
17. Дихтяр Н. Ю., Мовсесян Я. С., Саваневич В. Е., Диков Е. Н. Декомпозиция общей задачи отождествления астрономических кадров со звездными каталогами на совокупность частных задач // Системы обработки інформації. – 2015. – Вып. 9 (134). – С. 24 – 29.
18. Дихтяр Н. Ю., Мовсесян Я. С., Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б. Метод отождествления астрономических измерений CCD-кадра с формулярами звездного каталога // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : Сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». – X., 2015. – Вып. 67. – С. 197 – 215.
19. Lang D., Hogg D. W., Mierle K. et. al. Astrometry.net: Blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images // Astronomical Journal. – 2010. – Vol. 139. – I. 1782. – С. 46.
20. Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б., Кожухов А. М., Диков Е. Н. Оценка экваториальных координат астероида по оценкам его координат на ПЗС-кадре // Системы обработки інформації : 36. науч. пр. – Харків: ХУПС, 2010. – Вып. 6(87). – С. 172 – 179.
21. Ермаков С. М., Жигляевский А. А. Математическая теория оптимального эксперимента. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
22. Phillips P. C. B. The true characteristic function of the F distribution // Biometrika. – № 69. – 1982. – С. 261 – 264.
23. Guy Méléard. On the accuracy of statistical procedures in Microsoft Excel 2010 // Journal of Computational Statistics and Data Analysis. – 2014. – Vol. 29. – I. 5. – С. 1095 – 1128.
24. George E. Smith The invention and early history of the CCD // Rev. Mod. Phys. – 2010. – V. 3, № 82. – С. 2307 – 2312.
25. Молотов И. Е., Аганов В. М., Куприянов В. В. и др. Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове. – 2009. – № 219. – Вып. 1. – С. 233 – 248.
26. Молотов И. Е. Первый свет новой обсерватории под Кисловодском // Новости проекта ISON, Астрономия и телескопостроение. – Astronomer, 12 січня 2012. – Режим доступу : <http://astronomer.ru/publications.php?act=view&id=17>. – Дата звертання (13 липня 2016).
27. Борисов Г. Телескопы Genon // Genon. – 1 січня 2013. – Режим доступу: <http://www.genon.info/ru>. – Дата звертання (13 липня 2016).
28. Savanevych V. E., Briukhovetskiy O. B., Sokovikova N. S., Bezdrovny M. M., Vavilova I. B., Ivashchenko Yu. M., Elenin L. V., Khlamov S. V., Movsesian Ia. S., Dashkova A. M., Pogorelov A. V. A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinates // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – № 451 (3). – 2015. – С. 3287 – 3298.
29. Savanevych V. E., Briukhovetskiy A. B., Ivashchenko Yu. N., Vavilova I. B., Bezdrovny M. M., Dikov E. N., Vlasenko V. P., Sokovikova N. S., Movsesian Ia. S., Dikhtyar N. Yu., Elenin L. V., Pohorelov A. V., Khlamov S. V. Comparative analysis of the positional accuracy of CCD measurements of small bodies in the solar system software CoLiTec and Astrometrica // Kinematics and Physics of Celestial Bodies – 2015. – Т. 31 (6). – P. 302 – 313.

References (transliterated)

1. Dearborn D. P. S., Miller Paul L. Defending Against Asteroids and Comets. Springer International Publishing. *Handbook of Cosmic Hazards and Planetary Defense*, 2014, pp 1–18.
2. LSST The Large Synoptic Survey Telescope. Available at: <http://www.lsst.org>. (accessed 13.07.2016).
3. Ory M., Daassou A., Colas F. et.al. THE MOROCCO OUKAIMEDEEN SKY SURVEY, THE MOSS TELESCOPE. *Asteroids, Comets, Meteors*, 2012, pp. 76–77.
4. Kortencamp Steve. *Asteroids, Comets, and Meteoroids*. Mankato, MN, Capstone Press Publ., 2012. 65 p.
5. Khlamov S. V., Savanevich V. E., Bryukhovetskiy O. B., Oryshich S. S. Razrabotka podstanovochnykh vychislitel'nykh metodov maksimal'no pravdopodobnogo obnaruzheniya okolonulevogo vidimogo dvizheniya ob'ektov na serii CCD-kadrov [Developing wildcard computing methods for detecting near-zero apparent motion of objects on a series of CCD-frames in a way closes to natural]. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva* [Technological audit and production reserves]. 2016, vol. 4/3 (30), pp 19–26.
6. Khlamov S. V., Savanevich V. E., Bryukhovetskiy O. B., Oryshich S. S. Development of computational method for detection of the object's near-zero apparent motion on the series of CCD-frames. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2016, vol. 2, Issue 9 (80), pp. 41–48.
7. Khlamov S. V., Savanevich V. E., Bryukhovetskiy O. B. Yevristicheskiy vychislitel'nyy metod obnaruzheniya okolonulevogo vidimogo dvizheniya ob'ektov na serii CCD-kadrov [Heuristic computing method for detecting near-zero apparent motion of objects on a series of CCD-frames]. *Vestnik KhNU. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie. Informacionnye tekhnologii. Avtomatizirovannye sistemy upravleniya* [Bulletin of the KhNU. Series: Mathematical modeling. Informational technologies. Automatic control systems]. 2016, vol. 29, pp. 21–34.
8. Kuz'min S. Z. *Tsyfrovaya radiolokatsyya. Vvedeniye v teoriyu* [Digital radiolocation. Introduction to the theory]. Kiev, Izdatel'stvo KviTs Publ., 2000. 428 p.
9. Kobzar' A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2006. 816 p. ISBN 5-9221-0707-0.
10. Savanevich V. E., Bryukhovetskiy O. B., Kozhukhov A. M., Dikov E. N., Vlasenko V. P. Programma CoLiTec avtomatizirovannogo obnaruzheniya nebesnykh tel so slabym bleskom [CoLiTech software for automatic detection of faintly shining celestial bodies]. *Kosmichna nauka i tekhnologiya* [Space science and technology]. 2012, vol. 18 (1), pp. 39–46.
11. Savanevich V. E., Movsesyan Ya. S., Dikhtyar N. Yu. Metod formirovaniya vnutrennego kataloga ob'ektov, nepodviznykh na serii kadrov [A method of forming an internal catalog of objects fixed on a series of frames]. *Sistemy obrobky informatsiyi* [Information processing systems]. 2016, vol. 14 (179), pp. 45–58.
12. Savanevich V. E., Bryukhovetskiy A. B., Kozhukhov A. M., Dykov E. N. Metod obnaruzheniya asteroidov, osnovanny na nakoplenii signalov vdol' traektorii s neizvestnymi parametrami [Asteroid detection method based on accumulating signals along the trajectory with unknown parameters]. *Sistemy obrob. Informatsiyi: zb. nauk. prats'* [Information processing systems: collected works]. Kharkiv, 2011, vol. 2, pp. 137–144.
13. Myung, I. J. Tutorial on maximum likelihood estimation. *Journal of Mathematical Psychology*. 2003, vol. 47, pp. 90–100.
14. Masson M. E. J. A tutorial on a practical Bayesian alternative to null-hypothesis significance testing. *Behavior Research Methods*. 2011, vol. 43, pp. 679–690.
15. Draper, N. R., Harry Smith. Applied regression analysis. *Business & Economics*, Vol. 1, 1998, 706 p., ISBN 0-471-17082-8.
16. Khlamov S. V., Savanevich V. E., Bryukhovetskiy O. B., Oryshich S. S. Metod statisticheskogo modelirovaniya dlya issledovaniya pokazatelya kachestva obnaruzheniya okolonulevogo vidimogo dvizheniya issleduemogo ob'ekta na serii CCD-kadrov [A method of statistic modelling the study of quality indicators of detection of near-zero apparent motion of the investigated object on a series of CCD-frames]. *Radioelektronnyye i komp'yuternyye sistemy: nauch.-tehn. zhurnal Nac. ayerokosm. un-ta im. N. E. Zhukovskogo «Khar'kovskiy aviatsionnyy institut»* [Radioelectronic and Computer Systems: Scientific and Technical Journal of the A.Ye. Zhukovskiy National Aerospace University "Kharkov Aerospace Institute"]. Kharkov, 2016, vol. 76 (2), pp. 51–61.
17. Dikhtyar N. Yu., Movsesyan Ia. S., Savanevich, V. E., Dikov E. N. Dekompozitsiya obshhey zadachi otozhdestvleniya astronomicheskikh kadrov so zvezdnymi katalogami na sovokupnost' chastnykh zadach [Decomposing the general problem of identifying astronomical frames with star catalogs into a series of partial problems]. *Sistemy obrobky informatsiyi* [Information processing systems]. 2015, vol. 9 (134), pp. 24–29.
18. Dikhtyar N. Yu., Movsesyan Ia. S., Savanevich, V. E., Briukhovetskiy O. B. Metod otozhdestvleniya astronomicheskikh izmereniy CCD-kadra s formulyarami zvezdnogo kataloga [A method of identifying CCD-frame astronomical measurements with the star catalog logbooks]. *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii: sb. nauch. tr. Nac. ayerokosm. un-ta im. N. E. Zhukovskogo «Khar'kovskiy aviatsionnyy institut»* [Open information and computer integrated technologies : collection of scientific papers of the A.Ye. Zhukovskiy National Aerospace University "Kharkov Aerospace Institute"]. Kharkov, 2015, vol. 67, pp. 197–215.
19. Lang D., Hogg D. W., Mierle K. et. al. Astrometry.net: Blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images. *Astronomical Journal*. 2010, vol. 139, I. 1782, 46 p.
20. Savanevich V. E., Bryukhovetskiy O. B., Kozhukhov A. M., Dikov E. N. Ocenka yekvatorial'nykh koordinat asteroida po otsenkam ego koordinat na PZS-kadre [Estimation of asteroid equatorial coordinates by its coordinates on a CCD-frame]. *Sistemy obrobky informatsiyi: zb. nauk. prats'* [Information processing systems: collection of scientific papers]. Kharkiv, KhUPS Publ., 2010, vol. 6 (87), pp. 172–179.
21. Ermakov S. M., Zhyglyavskyy A. A. *Matematicheskaya teoriya optimal'nogo eksperimenta* [Mathematical theory of optimal experiment]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 320 p.
22. Phillips P. C. B. The true characteristic function of the F distribution. *Biometrika*, 1982, no. 69, pp. 261–264.
23. Guy Mélard. On the accuracy of statistical procedures in Microsoft Excel 2010. *Journal of Computational Statistics and Data Analysis*, 2014, vol. 29, I. 5, pp. 1095–1128.
24. George E. Smith. The invention and early history of the CCD. *Rev. Mod. Phys.* 2010, vol. 3, I. 82, pp. 2307–2312.
25. Molotov I. E., Agapov V. M., Kupriyanov V. V. et. al. Nauchnaya set' opticheskikh instrumentov dlya astrometricheskikh i fotometricheskikh nablyudeniy [Optical instrument scientific network for astrometric and photometric observations]. *Izvestiya Glavnoy astronomicheskoy observatorii v Pulkove* [Proceedings of the Main Astronomic Observatory in Pulkovo]. 2009, vol. 219, I. 1, pp. 233–248.
26. Molotov I. E. Pervyy svet novoy observatorii pod Kislovodskom. *Astronomiya i teleskopostroenie* [The first light of the new observatory near Kislovodsk. Astronomy and telescope building]. Available at: <http://astronomer.ru/publications.php?act=view&id=17>. (accessed 13.07.2016).
27. Borisov G. Teleskopy Genon [Genon Telescopes]. Available at: <http://www.genon.info/ru>. (accessed 13.07.2016).
28. Savanevich V. E., Briukhovetskiy O. B., Sokovikova N. S., Bezkrorny M. M., Vavilova I. B., Ivashchenko Yu. M., Elenin L. V., Khlamov S. V., Movsesian Ia. S., Dashkova A. M., Pogorelov A. V. A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinates. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2015, vol. 451 (3), pp. 3287–3298.
29. Savanevich V. E., Briukhovetskiy A. B., Ivashchenko Yu. N., Vavilova I. B., Bezkrorny M. M., Dikov E. N., Vlasenko V. P., Sokovikova N. S., Movsesian Ia. S., Dikhtyar N. Yu., Elenin L. V., Pohorelov A. V., Khlamov S. V. Comparative analysis of the positional accuracy of CCD measurements of small bodies in the solar system software CoLiTec and Astrometrica. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2015, vol. 31 (6), pp. 302–313.

Поступила (received) 06.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Метод натурального моделювання дослідження показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта на серії CCD-кадрів / С. В. Хламов, В. Є. Саваневич, А. Б. Брюховецький, С. С. Оришич // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 16 (1188). – С. 93 – 105. Бібліогр.: 29 назв. – ISSN 2222-0631.

Метод натурального моделирования исследования показателей качества обнаружения околонульового видимого движения объекта на серии CCD-кадров / С. В. Хламов, В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, С. С. Оришич // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 16 (1188). – С. 93 – 105. Бібліогр.: 29 назв. – ISSN 2222-0631.

The method of natural modeling the research of quality indicators of detection of the close-to-zero apparent motion of an object on a series of CCD-frames / S. V. Khlamov, V. E. Savanevych, O. B. Briukhovetskiy, S. S. Oryshych // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2016. – № 16 (1188). – pp. 93 – 105. Bibliog.: 29 titles. – ISSN 2222-0631.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Хламов Сергій Васильович – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна; тел.: (095) 287-77-19; e-mail: sergii.khlamov@gmail.com.

Хламов Сергей Васильевич – аспирант кафедры электронных вычислительных машин, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, Украина; тел.: (095) 287-77-19; e-mail: sergii.khlamov@gmail.com.

Khlamov Sergii Vasilevich – Postgraduate Student at the Dept. of Electronic computer, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkov, Ukraine; tel.: (095) 287-77-19; e-mail: sergii.khlamov@gmail.com.

Саваневич Вадим Євгенович – доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних управляючих систем та технологій, Ужгородський національний університет, м. Ужгород, Україна; тел.: (095) 829-65-58; e-mail: vadym@savanevych.com.

Саваневич Вадим Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры информационных управляющих систем и технологий, Ужгородский национальный университет, г. Ужгород, Украина; тел.: (095) 829-65-58; e-mail: vadym@savanevych.com.

Savanevych Vadym Evgenievich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Dept. of Informative and Operating Systems and Technologies, Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine; tel.: (095) 829-65-58; e-mail: vadym@savanevych.com.

Брюховецький Олександр Борисович – кандидат технічних наук, інженер, Харківське представництво генерального замовника Державного космічного агентства України, м. Харків, Україна; тел.: (099) 008-67-84; e-mail: izumsasha@gmail.com.

Брюховецкий Александр Борисович – кандидат технических наук, инженер, Харьковское представительство во генерального заказчика Государственного космического агентства Украины, г. Харьков, Украина; тел.: (099) 008-67-84; e-mail: izumsasha@gmail.com.

Briukhovetskiy Olexsander Borisovich – PhD, Engineer of the Kharkiv General Customer Representative of the State Space Agency of Ukraine; tel.: (099) 008-67-84; e-mail: izumsasha@gmail.com.

Оришич Сергій Сергійович – студент кафедри програмного забезпечення систем, Ужгородський національний університет, м. Ужгород, Україна; тел.: (066) 973-29-93; e-mail: oryshych@gmail.com.

Оришич Сергей Сергеевич – студент кафедры программного обеспечения систем, Ужгородский национальный университет, г. Ужгород, Украина; тел.: (066) 973-29-93; e-mail: oryshych@gmail.com.

Oryshych Serhiy Serhievich – student at the Dept. of Software Systems, Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine; tel.: (066) 973-29-93; e-mail: oryshych@gmail.com.