

УДК 519.23 : 004.932.72'1

С.С. Орышич<sup>1</sup>, С.В. Хламов<sup>2</sup>, В.Е. Саваневич<sup>1</sup><sup>1</sup> Ужгородський національний університет, Ужгород<sup>2</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ОКОЛОНУЛЕВОГО ВИДИМОГО ДВИЖЕНИЯ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА НА СЕРИИ ССD-КАДРОВ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В статье проведены исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии ССD-кадров методом статистического моделирования. Данное исследование учитывает особенности применения различных методов обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии ССD-кадров.

**Ключевые слова:** серия ССD-кадров, статистическое моделирование, показатели качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта, МНК-оценка параметров видимого движения объекта, измерение положения объекта, *t*-критерий Стьюдента, *f*-критерий Фишера.

### Введение

В настоящее время в связи с проблематикой астероидно-кометной опасности [1] астероидные обзоры с автоматической обработкой их результатов являются значимым направлением. Большое количество потенциально опасных объектов [2] могут являться астероидами с околонулевым видимым движением. За счет малой скорости видимого движения существенно снижаются показатели качества обнаружения таких объектов с помощью традиционных методов обнаружения. Актуальным является исследование показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта с помощью статистического моделирования. Исследование позволит определить, какой из существующих вычислительных методов обнаружения обладает наибольшей условной вероятностью правильного обнаружения (при заданной условной вероятности ложного обнаружения) околонулевого видимого движения объектов на серии ССD-кадров.

**Анализ литературы.** Известны методы обнаружения движущихся объектов на серии ССD-кадров [3 – 5] с проверкой гипотез о нулевом ( $H_0$ ) и околонулевым ( $H_1$ ) видимом движении исследуемого объекта. Первая группа основана на использовании критерия максимального правдоподобия [6] или какого-либо другого критерия байесовской группы [7]. Вторая группа методов обнаружения околонулевого видимого движения объекта [4] в решающих правилах использует критерии согласия для проверки значимости скорости как параметра регрессионной модели [8].

Существует два метода задания закона распределения входных параметров исследуемых вычислительных методов. Первый из них – аналитический

[9]. Его суть состоит в нахождении аналитических выражений закона распределения на основе заданного закона распределения. В случае, когда аналитические выражения можно получить, их сложность (бесконечные ряды, специальные функции) всё равно не допускает ни символьного анализа, ни точной табуляции путем их программирования.

В работе используется второй метод – метод статистического имитационного моделирования [10]. Данный метод использует статистический ряд выборочных распределений для задания закона распределения входных параметров исследуемых вычислительных методов. При его использовании согласно заданным законам распределения моделируются входные данные вычислительных методов, а их значения согласно определений. Далее вычисляются статистические характеристики значений функции. Как правило, такими характеристиками являются: математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение, значения квантилей и вероятности критических значений функции. Способ оценки подобных параметров изложен в специальной литературе [9].

Метод статистического моделирования для исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии ССD-кадров подробно описан в работе [11].

**Целью статьи** является исследование показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии ССD-кадров методом статистического моделирования. Данное исследование должно учитывать особенности использования различных методов обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии ССD-кадров.

### Постановка задачи

Показателями качества обнаружения считается условная вероятность ошибок первого  $\alpha$  (условная вероятность ложной тревоги, УВЛТ,  $F_{\text{false}} = \alpha$ ) и второго  $\beta$  (пропуск объекта с околонулевым видимым движением) рода [3, 12].

В методе статистического моделирования [11] как и в данной работе вместо условной вероятности пропуска объекта (ошибки второго  $\beta$  рода) используется условная вероятность  $D_{\text{true}}$  правильного обнаружения (УВПО), дополняющая до единицы условную вероятность ошибки второго рода  $D_{\text{true}} = 1 - \beta$ . Обнаружение околонулевого видимого движения исследуемого объекта производится на серии  $N_{\text{fr}}$  CCD-кадров.

Необходимо провести исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров методом статистического моделирования при использовании известных методов обнаружения околонулевого видимого движения астероида [4, 13].

**Исследуемые методы обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров методом статистического моделирования.** При неизвестной дисперсии измерений положения объекта на кадрах подстановочный метод максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения исследуемых объектов [6] имеет вид:

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

где

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

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

– остаточные суммы квадратов отклонений [4] положения исследуемого объекта в предположении истинности гипотез о нулевом ( $H_0$ ) и ненулевом ( $H_1$ ) видимом движении соответственно на данной серии 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 [3];

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

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

– МНК-оценки положения исследуемого объекта на момент  $\tau_0$  привязки базового кадра [3];

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

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

– МНК-оценки скоростей видимого движения исследуемого объекта вдоль каждой координаты [3];

$$C = \sum_{k=1}^{N_{\text{mea}}} \Delta_{\text{tk}}; \quad D = \sum_{k=1}^{N_{\text{mea}}} \Delta_{\text{tk}}^2;$$

$\Delta_{\text{tk}} = (\tau_k - \tau_0)$  – разница между временем привязки  $\tau_0$  базового кадра и временем  $\tau_k$  кадра, на котором сформировано  $k$ -ое измерение;

$$A_x = \sum_{k=1}^{N_{\text{mea}}} x_k; \quad A_y = \sum_{k=1}^{N_{\text{mea}}} y_k;$$

$$B_x = \sum_{k=1}^{N_{\text{mea}}} \Delta_{\text{tk}} x_k; \quad B_y = \sum_{k=1}^{N_{\text{mea}}} \Delta_{\text{tk}} y_k;$$

$$\hat{x} = \sum_{k=1}^{N_{\text{mea}}} \hat{x}_k / N_{\text{mea}}, \quad \hat{y} = \sum_{k=1}^{N_{\text{mea}}} \hat{y}_k / N_{\text{mea}} \quad \text{– сред-}$$

ние значения оценок координат неизменного положения объекта с нулевым видимым движением;

$$A = 2(N_{\text{mea}} - m);$$

$m = 2$  – количество оцениваемых параметров видимого движения исследуемого объекта вдоль каждой координаты на серии измерений;

$\ell_{\text{cr}}$  – заданное предельно допустимое (критическое) значение оценки отношения правдоподобия для обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта;

$N_{\text{mea}}$  – количество измерений положения исследуемого объекта на  $N_{\text{fr}}$  кадрах.

При известной дисперсии  $\sigma^2$  измерений положения объекта на кадрах подстановочный метод максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения исследуемых объектов [13] имеет вид:

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

Если в подстановочном методе максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения исследуемых объектов используется внешняя оценка дисперсии  $\hat{\sigma}_{\text{out}}^2$  измерений положения объекта на кадрах, то оно имеет вид [6]:

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

Вторая группа методов обнаружения околонулевого видимого движения объекта [4], основана на использовании критериев согласия [8].

Например, двухкоординатный метод проверки статистической значимости фактора скорости видимого движения объекта на исследуемой серии измерений с использованием  $f$ -критерия Фишера [4] имеет вид:

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

где  $w$  – количество исследуемых факторов линейной регрессионной модели (в исследуемом случае этим фактором является скорость видимого движения);

$r$  – ранг матрицы частных производных  $F_x$  ( $\text{rang } F_x = r \leq \min(m, N_{mea})$ ) [14];

$f_{cr}$  – предельно допустимое (критическое) табличное значение [4, 14, 15] статистики распределения Фишера с ( $w$ ,  $N_{mea} - r$ ) степенями свободы.

Таким образом, в работе исследуются показатели качества следующих методов обнаружения околонулевого видимого движения объекта:

1) подстановочный метод максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объектов при:

1.1) неизвестной дисперсии измерений положения объекта на кадрах; выражение (1);

1.2) известной дисперсии измерений положения объекта на кадрах; выражение (10);

1.3) использовании внешней оценки дисперсии измерений положения объекта на кадрах; выражение (11);

2) двухкоординатный метод обнаружения околонулевого видимого движения астероида с применением  $f$ -критерия Фишера; выражение (12).

Указанные выше методы обнаружения околонулевого видимого движения астероида были исследованы на одних и тех же выборках.

**Предпосылки, используемые при исследовании показателей качества обнаружения околонулевой скорости видимого движения объекта методом статистического моделирования.**

1. Предполагалось, что допустимые значения ошибок экспериментальных частот  $\gamma_{0\text{accept}}$  и  $\gamma_{1\text{accept}}$  должны составлять:

$$\gamma_{0\text{accept}} = \alpha / 10; \quad (13)$$

$$\gamma_{1\text{accept}} = 10^{-3}. \quad (14)$$

2. Зависимость значений указанных в (13) и (14) ошибок экспериментальных частот  $\gamma_{0\text{accept}}$  и  $\gamma_{1\text{accept}}$  от количества экспериментов при справед-

ливости гипотезы  $H_0$  и альтернативы  $H_1$ , определяется эмпирическими формулами:

$$N_{0\text{exp}} = 10^2 / \gamma_{0\text{accept}}; \quad (15)$$

$$N_{1\text{exp}} = 10^2 / \gamma_{1\text{accept}} = 10^6. \quad (16)$$

3. Для проведения статистического моделирования использовались метод нормальной аппроксимации [9] и метод Ziggurat [16]. Моделирование случайной величины, распределенной по нормальному закону  $N_x(m, \sigma^2)$  с математическим ожиданием  $m$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma$ , происходит следующим образом:

$$N_x(m, \sigma^2) = \sigma \cdot N_x(0, 1) + m. \quad (17)$$

4. 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  $\ell_{cr}$ . Данные значения определяются в соответствии с наперед заданным уровнем значимости  $\alpha$  при моделировании гипотезы  $H_0$  ( $V = 0$ ).

5. В процессе статистического моделирования метода обнаружения околонулевого видимого движения астероида при использовании 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 [4, 14]. В качестве альтернативного варианта критическое значение  $f_{cr}$  Фишера определялись в соответствии с наперед заданным уровнем значимости  $\alpha$  при моделировании гипотезы  $H_0$  ( $V = 0$ ).

6. Константы, используемые в методе статистического моделирования для исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии ССД-кадров, описаны в работе [11].

**Анализ показателей качества методом статистического моделирования.** Во время исследований показателей качества методом статистического моделирования определялась оценка УВПО для каждого из описанных выше методов обнаружения околонулевого видимого движения астероида (1), (10), (11) и (12). Данная оценка УВПО определялась для разного количества  $N_{fr} = (4, 6, 8, 10, 15)$  кадров и значений модуля приведенной скорости  $V = (0, 0.5\sigma, \sigma, 1.25\sigma, 1.5\sigma, 1.75\sigma, 2\sigma, 3\sigma, 4\sigma)$  видимого движения исследуемого объекта.

На рис. 1 ÷ 8 приведены кривые обнаружения при использовании:

- двухкоординатного метода обнаружения с применением *F*-критерия Фишера (12) (кривая №1);
- подстановочного метода максимально правдоподобного обнаружения с известной дисперсии измерений положения объекта (10) (кривая №2);
- подстановочного метода максимально правдоподобного обнаружения (11) с применением внешней оценки СКО  $\hat{\sigma}_{out} = 0.15$  (кривая №3) и  $\hat{\sigma}_{out} = 0.25$  (кривая №4).

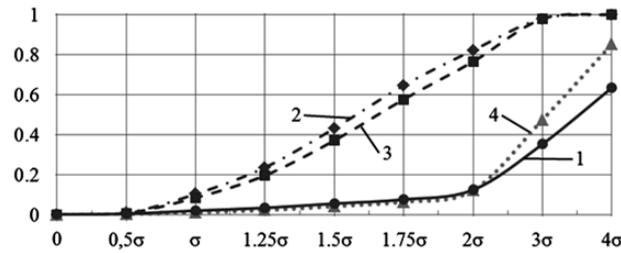


Рис. 1. Кривые обнаружения

для количества кадров  $N_{ff} = 4$  ( $\alpha = 10^{-3}$ )

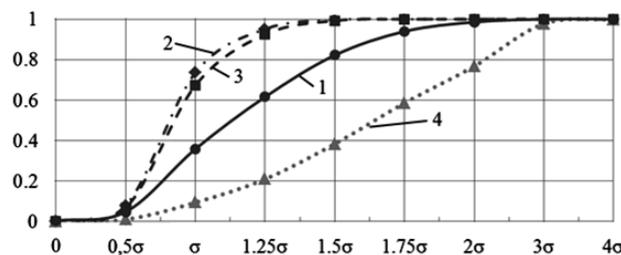


Рис. 2. Кривые обнаружения

для количества кадров  $N_{ff} = 6$  ( $\alpha = 10^{-3}$ )

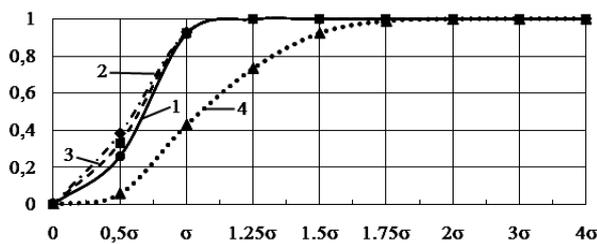


Рис. 3. Кривые обнаружения

для количества кадров  $N_{ff} = 8$  ( $\alpha = 10^{-3}$ )

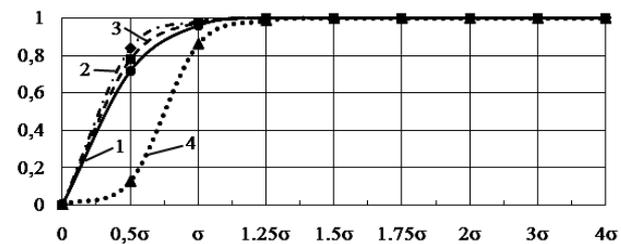


Рис. 4. Кривые обнаружения

для количества кадров  $N_{ff} = 10$  ( $\alpha = 10^{-3}$ )

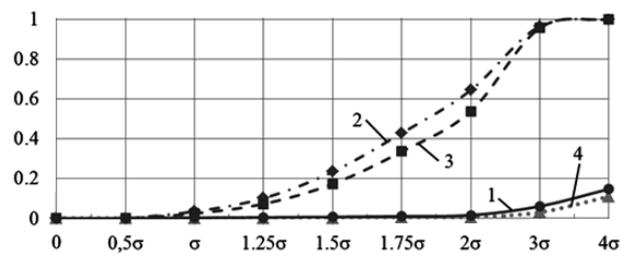


Рис. 5. Кривые обнаружения

для количества кадров  $N_{ff} = 4$  ( $\alpha = 10^{-4}$ )

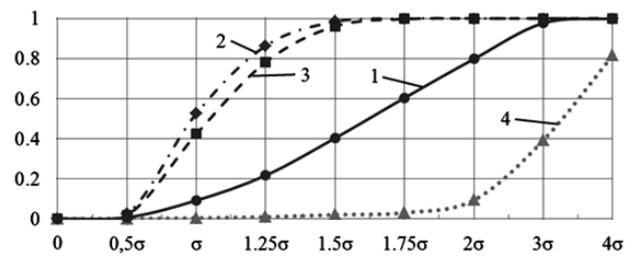


Рис. 6. Кривые обнаружения

для количества кадров  $N_{ff} = 6$  ( $\alpha = 10^{-4}$ )

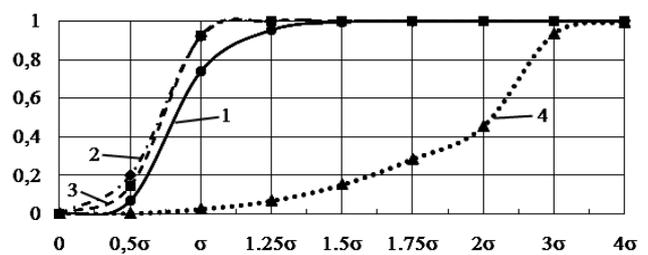


Рис. 7. Кривые обнаружения

для количества кадров  $N_{ff} = 8$  ( $\alpha = 10^{-4}$ )

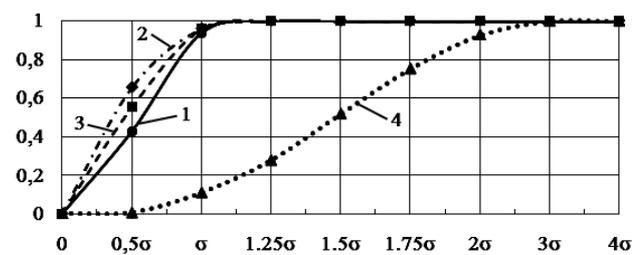


Рис. 8. Кривые обнаружения

для количества кадров  $N_{ff} = 10$  ( $\alpha = 10^{-4}$ )

Основываясь на данном исследовании, самыми чувствительными к изменениям значения модуля скорости видимого движения методами обнаружения являются подстановочные методы максимально правдоподобного обнаружения с известной дисперсии измерений положения объекта (10) – кривая 2, и с применением внешней оценки СКО  $\hat{\sigma}_{out} = 0.15$  (11) – кривая 3.

Так, например, при четырех кадрах в исследуемой серии уже при  $V = 0.5\sigma$  ( $\sigma$  – СКО ошибок оценок координат небесных объектов) значение УВПО

для данных методов начинает возрастать, когда для других методов обнаружения для этого необходимо значение модуля скорости видимого движения не менее  $V = 1.25\sigma$ , а при  $N_{fr} = 6$  необходимо не менее  $V = \sigma$ .

Однако, подстановочный метод максимально правдоподобного обнаружения с известной дисперсии измерений положения объекта (10) не может быть использован на практике и является лишь потенциально допустимым пределом.

Поэтому самым эффективным и гибким является подстановочный метод максимально правдоподобного обнаружения (11) с применением внешней оценки (относительно выборки, используемой для обнаружения видимого движения) СКО – кривая 3. Данная оценка 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 исследования показали, что двухкоординатный метод обнаружения с применением  $f$ -критерия Фишера (12) – кривая 1, является не достаточно эффективным по данным статистического моделирования (рисунки 1, 2, 5, 6) при малом значении количества кадров  $N_{fr}$ . Однако уже при  $N_{fr} = 8$  (рис. 3) данный метод не уступает другим исследуемым методам обнаружения по значению УВПО.

С другой стороны, имеют место практически непреодолимые трудности при определении критического значения при использовании описанных методов максимально правдоподобного обнаружения. Прежде всего, не ясно как разделить совокупность звёзд (объектов с нулевым видимым движением) и объектов с околонулевым видимым движением для определения критического значения используемой решающей статистики.

Также 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.

На рис. 9 ÷ 14 приведены кривые обнаружения для двухкоординатного метода обнаружения с применением  $f$ -критерия Фишера при использовании: предварительно заданного табличного предельно допустимого (критического) значения статистики распределения Фишера с  $(w, N_{mea} - r)$  степенями свободы [4, 15, 17] (сплошная линия) и полученного на основе данных критического значения  $f_{cr}$  Фишера в соответствии с наперед заданным уровнем значимости (штрих).

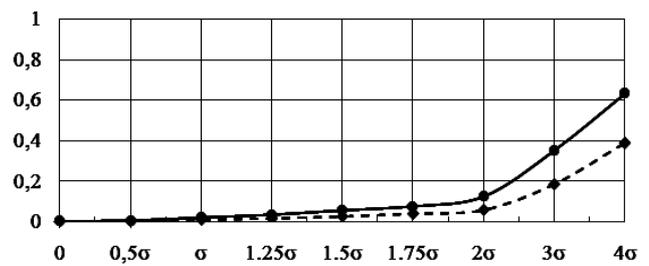


Рис. 9. Кривые обнаружения для количества кадров  $N_{fr} = 4$  ( $\alpha = 10^{-3}$ )

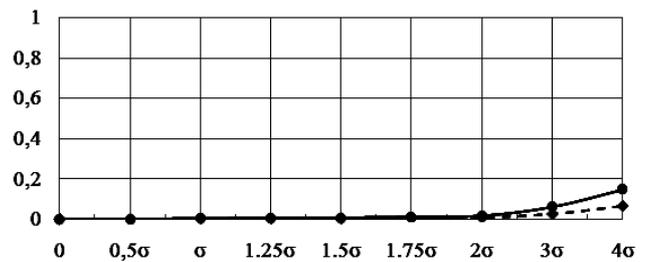


Рис. 10. Кривые обнаружения для количества кадров  $N_{fr} = 4$  ( $\alpha = 10^{-4}$ )

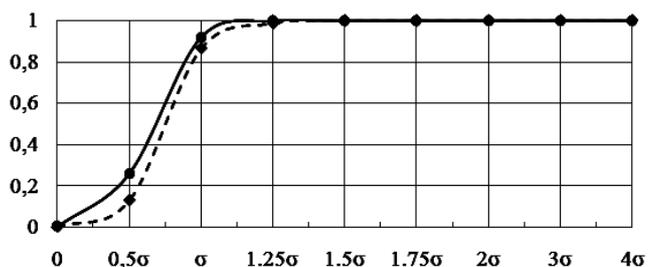


Рис. 11. Кривые обнаружения для количества кадров  $N_{fr} = 8$  ( $\alpha = 10^{-3}$ )

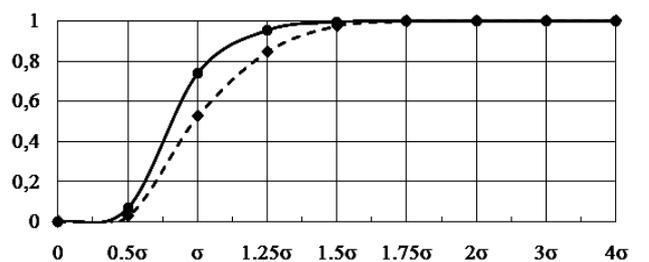


Рис. 12. Кривые обнаружения для количества кадров  $N_{fr} = 8$  ( $\alpha = 10^{-4}$ )

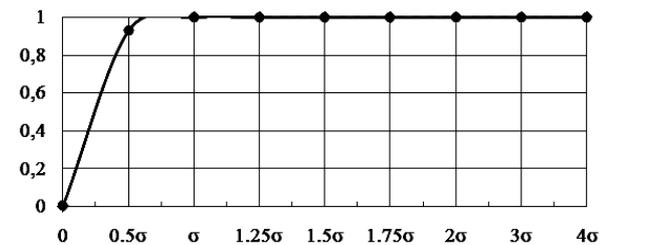


Рис. 13. Кривые обнаружения для количества кадров  $N_{fr} = 15$  ( $\alpha = 10^{-3}$ )

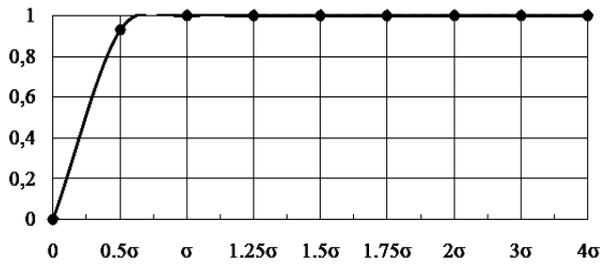


Рис. 14. Кривые обнаружения для количества кадров  $N_{ff} = 15$  ( $\alpha = 10^{-4}$ )

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 [4, 15, 17]. Определение по результатам статистического 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. Результаты исследований (рисунки 9 ÷ 14) являются этому доказательством.

Кроме того, рисунки 9 ÷ 14 свидетельствуют, что схожесть критических значений решающей статистики как табличных [4, 15, 17], так и определённых по результатам статистического моделирования не зависит от количества исследуемых кадров  $N_{ff}$ .

Следовательно, нет необходимости принимать дополнительные меры для выбора критического значения решающей статистики для разного количества исследуемых кадров  $N_{ff}$  и условий наблюдения. Для этого достаточно использовать табличное предельно допустимое значение [4, 15, 17].

На рисунках 15 ÷ 16 приведены кривые обнаружения для двухкоординатного метода обнаружения с применением  $f$ -критерия Фишера при использовании предварительно заданного табличного предельно допустимого (критического) значения статистики распределения Фишера с  $(w, N_{mea} - r)$  степенями свободы [4, 15, 17] для разных значений уровня значимости  $\alpha$  и количества кадров  $N_{ff}$ .

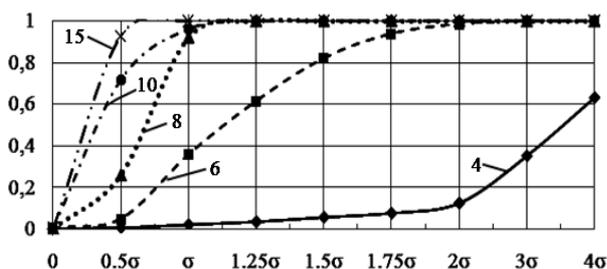


Рис. 15. Кривые обнаружения для уровня значимости  $\alpha = 10^{-3}$

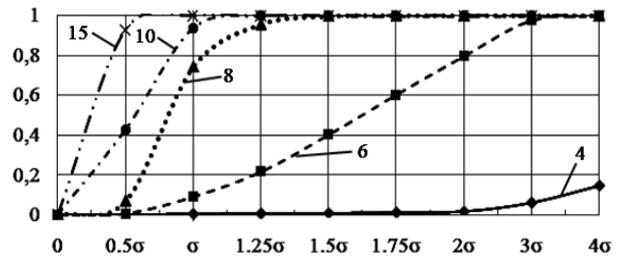


Рис. 16. Кривые обнаружения для уровня значимости  $\alpha = 10^{-4}$

Исследования показали, что использование двухкоординатного метода обнаружения с применением  $f$ -критерия Фишера (12) наиболее эффективно при большом значении количества кадров (рис. 15 ÷ 16).

Также об этом свидетельствуют результаты на рисунках 5 ÷ 8, где значение УВПО достигает большего значения уже при модуле скорости видимого движения  $V = 0.5\sigma$ .

### Выводы

В статье проведены исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии CCD-кадров методом статистического моделирования.

Первая группа этих методов основана на использовании подстановочных решающих правил максимально правдоподобного обнаружения с известной (10) и неизвестной (1) дисперсией измерений положения объекта на CCD-кадре, а также с использованием её внешней оценки (11) [13].

Вторая группа вычислительных методов основана на проверке статистической значимости фактора скорости видимого движения объекта на исследуемой серии измерений с использованием такого критерия проверки значимости факторов как  $f$ -критерия Фишера (12) [4].

Данный метод обнаружения также называется двухкоординатным [4].

Используемый при исследованиях метод статистического моделирования [11] позволил исследовать показатели качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров и определить условную вероятность правильного обнаружения для каждого исследуемого метода обнаружения.

По результатам исследований самым эффективным и гибким является подстановочный метод максимально правдоподобного обнаружения (11) с применением внешней оценки (относительно выборки, используемой для обнаружения видимого движения) СКО (рис. 1 ÷ 8).

Однако сам по себе процесс определения предельно допустимого значения решающей статистики для этого метода является очень трудоёмким,

ресурсно-затратним і не пристосован для швидкої зміни умов спостереження.

Поэтому при значениях количества кадров  $N_{fr}$  равном  $N_{fr} = 8$  или более (рис. 5 ÷ 8) рекомендуется использовать двухкоординатный метод обнаружения с применением  $f$ -критерия Фишера (12). В данном методе используется табличное предельно допустимое значение решающей статистики распределения Фишера с  $(w, N_{mea} - r)$  степенями свободы [4, 15, 17].

Этот подход позволяет исключить трудоёмкую и методически не полностью обоснованную задачу поиска критического значения решающей статистики, полученной на основе данных в соответствии с наперед заданным уровнем значимости  $\alpha$ .

Также данный метод не уступает другим эффективным методам обнаружения по значению УВПО при значимом числе исследуемых кадров.

### Список литературы

1. David, P.S. *Defending Against Asteroids and Comets* [Text] / P.S. David Dearborn, Paul L. Miller // Springer Int. Publishing. *Handbook of Cosmic Hazards and Planetary Defense* – 2014. – P. 1-18.
2. Kortencamp Steve. *Asteroids, Comets, and Meteoroids* [Text] / Kortencamp Steve // Capstone Press. – Mankato, MN. – 2012.
3. Кузьмин С.З. *Цифровая радиолокация. Введение в теорию* [Текст] / С.З. Кузьмин. – К.: Издательство КвИЦ, 2000. – 428 с.
4. *Development of computational method for detection of the object's near-zero apparent motion on the series of CCD-frames* [Text] / S.V. Khlamov, V.E. Savanevych, O.B. Briukhovetskyi, S.S. Oryshych // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 2, I. 9 (80). – С. 41-48.
5. *Метод обнаружения астероидов, основанный на накоплении сигналов вдоль траекторий с неизвестными параметрами* [Текст] / В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий, А.М. Кожухов, Е.Н. Диков // *Системи обробки інформації: Зб. наук. праць*. – Х.: ХУПС, 2011. – Вип. 2. – С. 137-144.
6. Myung I.J. *Tutorial on maximum likelihood estimation* [Text] / I.J. Myung // *Journal of Mathematical Psychology*. – 2003. – Vol. 47. – С. 90-100.
7. Masson M.E.J. *A tutorial on a practical Bayesian alternative to null-hypothesis significance testing* [Text] / M.E.J. Masson // *Behavior Research Methods*. – 2011. – Vol. 43. – С. 679-690.
8. Draper N.R. *Applied regression analysis* [Text] / N.R. Draper, Harry Smith // *Business & Economics*. – 1998. – Vol. 1. – С. 706. – ISBN 0-471-17082-8.
9. Вентцель Е.С. *Теория вероятности и ее инженерные приложения* [Текст] / Е.С. Вентцель Л.А. Овчаров // 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2000. – 480 с.
10. Taha H.A. *Operations Research: An Introduction*. [Text] / H.A. Taha // *Journal of the Operational Research Society*. – Vol. 31(3). – March 1980. – DOI: 10.2307/2581087
11. *Метод статистического моделирования для исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров* [Текст] / С.В. Хламов, В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий, С.С. Оришич // *Радиоэлектронные и компьютерные системы: науч.-техн. журнал Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т»*. – 2016. – Вып. 2. – С. 65-76
12. Трифонов А.П. *Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех* [Текст] / А.П. Трифонов, Ю.С. Шинаков. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.
13. *Підстановочний обчислювальний метод максимально правдоподібного виявлення ненульового видимого руху об'єктів на серії ПЗЗ-кадрів* [Текст] / С.В. Хламов, В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецький, С.С. Оришич // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Комп'ютерні системи та мережі*. – 2016. – № 830. – С. 35-45.
14. Ермаков С.М. *Математическая теория оптимального эксперимента* [Текст] / С.М. Ермаков, А.А. Жиглевский. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
15. Phillips P.C.B. *The true characteristic function of the F distribution* [Text] / P.C.B. Phillips // *Biometrika*. – 1982. – № 69. – С. 261-264.
16. Marsaglia G. *The ziggurat method for generating random variables* [Text] / G. Marsaglia, W.W. Tsang // *Journal of Statistical Software*. – Vol. 5, I. 8. – October, 2000. – P 1-7.
17. Guy Mèlard. *On the accuracy of statistical procedures in Microsoft Excel 2010* [Text] / Guy Mèlard // *Journal of Computational Statistics and Data Analysis*. – 2014. – Vol. 29. – I. 5. – С. 1095-1128.

Надійшла до редколегії 8.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.Г. Удовенко, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ВИЯВЛЕННЯ БЛИЗЬКОНУЛЬОВОГО ВИДИМОГО РУХУ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ОБ'ЄКТА НА СЕРІЇ CCD-КАДРІВ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

С.С. Оришич, С.В. Хламов, В.Е. Саваневич

У статті проведено дослідження показників якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта на серії CCD-кадрів методом статистичного моделювання. Дане дослідження враховує особливості застосування різних методів виявлення близьконульового видимого руху досліджуваного об'єкта на серії CCD-кадрів.

**Ключові слова:** серія CCD-кадрів, статистичне моделювання, показники якості виявлення близьконульового видимого руху об'єкта, МНК-оцінка параметрів видимого руху об'єкта, вимірювання положення об'єкта,  $t$ -критерій Стьюдента,  $f$ -критерій Фишера.

### RESEARCH OF QUALITY INDICATION OF DETECTION OF THE OBJECT'S CLOSE-TO-ZERO APPARENT MOTION ON THE SERIES OF CCD-FRAMES BY STATISTICAL MODELING METHOD

S.S. Oryshych, S.V. Khlamov, V.E. Savanevych

The paper describes the research of quality indication of detection of the object's close-to-zero apparent motion on the series of CCD-frames by statistical modeling method. This research takes into account the main features of using of the different methods for detection of near-zero apparent motion of the object on a series of CCD-frames.

**Keywords:** series of CCD-frames, statistical modeling, quality indication, near-zero apparent motion, OLS parameter estimation,  $t$ -test,  $F$ -test.