

Министерство образования и науки Украины
Харьковский национальный университет радиоэлектроники

На правах рукописи

ХЛАМОВ СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

Підпис

УДК 519.6:004.932

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ
ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ С ОКОЛОНУЛЕВЫМ
ВИДИМЫМ ДВИЖЕНИЕМ

01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Саваневич Вадим Евгеньевич
доктор технических наук,
профессор

Цей примірник дисертаційної роботи
ідентичний за змістом з іншими, пода-
ними до спеціалізованої вченої ради
Д 64.052.02.

Вчений секретар спецради Д 64.052.02

Підпис
Печатка

Л. В. Колесник

Харьков – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень условных обозначений, символов, единиц, сокращений и терминов...	5
Введение.....	12
Раздел 1 Анализ особенностей формирования измерений при наблюдении объектов с околонулевым видимым движением и методов их автоматической обработки	18
1.1 Необходимость наблюдения объектов с околонулевым видимым движением	18
1.2 Характеристика и особенности условий наблюдения объектов с околонулевым видимым движением	22
1.3 Известные вычислительные методы обработки данных и системы автоматизированного обнаружения объектов с околонулевым видимым движением	28
1.3.1 Автоматизированные программные средства обработки цифровых кадров для обнаружения объектов	28
1.3.2 Вычислительные методы обработки данных, используемые для обнаружения объектов с околонулевым видимым движением	29
1.4 Постановка целей и задач исследований	33
Выводы по разделу 1	36
Раздел 2 Разработка вычислительных методов обработки данных для обнаружения объекта с околонулевым видимым движением	38
2.1 Уточненная постановка задачи обнаружения околонулевого видимого движения объекта.....	38
2.2 Разработка подстановочного вычислительного метода максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта.....	44
2.3 Разработка вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта, основанного на критериях значимости скорости видимого движения объекта.....	60

2.4 Эвристический метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта.....	71
Выводы по разделу 2	78
Раздел 3 Исследование показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта	79
3.1 Метод оценки показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на основе статистического моделирования	79
3.2 Исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта методом статистического моделирования	92
3.3 Метод оценки показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на основе натурального моделирования	107
3.4 Исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта методом натурального моделирования	118
3.5 Применение разработанных методов обработки данных для автоматизированного обнаружения околонулевого видимого движения объекта.....	126
3.5.1 Использование разработанных вычислительных методов обнаружения околонулевого видимого движения в программе автоматизированного обнаружения астероидов CoLiTec (CLT)	126
3.5.2 Открытие долгопериодической околосолнечной кометы C/2012 S1 (ISON) с использованием вычислительного метода обнаружения около-нулевого видимого движения объекта, основанного на критериях значимости скорости видимого движения объекта.....	141
Выводы по разделу 3	147
Выводы.....	149
Список использованных источников.....	153
Приложение А Акты использования и внедрения результатов диссертационных исследований.....	176

Приложение Б Диплом за первое место в конкурсе инновационных проектов «IT-KHARKIV»	180
Приложение В Рекомендация ПО CoLiTec от GAIA-FUN-SSO	181

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

АСЗ – астероид, сближающийся с Землей.

ВО – виртуальная обсерватория.

ООН – Организация Объединенных Наций

ОП – отношение правдоподобия.

ОСЗ – объект, сближающийся с Землей.

ММПОИД – подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта с известной дисперсии измерений положения объекта.

ММПОНД – подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта с неизвестной дисперсии измерений положения объекта.

ММПОВОД – подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта при использовании внешней оценки дисперсии измерений положения объекта.

МНК – метод наименьших квадратов.

МОФМ – двухкоординатный вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f -критерия Фишера с использованием предельно допустимого значения, которое было определено в соответствии с заданным значением уровня значимости.

МОФТ – двухкоординатный вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f -критерия Фишера с использованием табличного критического значения.

ПГА – потенциально опасный астероид.

ПЗС – прибор с зарядовой связью.

ПО – программное обеспечение.

РП – решающее правило.

СКО – среднеквадратическое отклонение.

ССО – объект Солнечной системы.

ЭМО – эвристический вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта.

УВЛО – условная вероятность ложного обнаружения.

УВПО – условная вероятность правильного обнаружения.

CCD – англ. Charge-Coupled Device, прибор с зарядовой связью.

CoLiTec – программа автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров.

MPC – англ. Minor Planet Center, Центр малых планет.

TNO – англ. Trans-Neptunian object.

$$A = \frac{1}{2(N_{mea} - m)};$$

A_{in} – фотометрическое измерение (оценка блеска) объекта в i -м измерении на n_{fr} -м кадре;

$$A_x = \sum_{k=1}^{N_{mea}} x_k;$$

$$A_y = \sum_{k=1}^{N_{mea}} y_k;$$

$$B_x = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau k} x_k;$$

$$B_y = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau k} y_k;$$

$$C = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau k};$$

$$D = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau k}^2;$$

$D_{true} = 1 - \beta$ – условная вероятность правильного обнаружения (УВПО), дополняющая до единицы условную вероятность ошибки второго рода β ;

$f(\Omega_{set})$ – f-критерий Фишера значимости фактора общей скорости видимого движения исследуемого объекта;

f_{cr} – табличное предельно допустимое (критическое) значение статистики распределения Фишера;

$f_{xk}(\theta_x, \sigma_x), f_{yk}(\theta_y, \sigma_y)$ – плотность распределения оценок координат x_k и y_k положения исследуемого объекта в k -ом измерении исследуемой серии Ω_{set} ;

$f_0(\bar{x}, \bar{y}, \sigma)$ – плотность распределения измерений положения исследуемого объекта при условии, что объект не является объектом Солнечной системы (является звездой с нулевым видимым движением на серии кадров);

$f_1(\theta, \sigma)$ – плотность распределения измерений положения исследуемого объекта при условии, что объект является объектом Солнечной системы (является астероидом с околонулевым видимым движением на серии кадров);

F_x – матрица частных производных для координаты x положения исследуемого объекта, также называемая матрицей плана или матрицей дифференциальных операторов;

F_{false} – условная вероятность ложного обнаружения (УВЛО);

$H_0 : \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = 0$ – гипотеза о том, что серия измерений Ω_{set} исследуемого объекта соответствует объекту с нулевой скоростью видимого движения;

$H_1 : \sqrt{V_x^2 + V_y^2} > 0$ – альтернатива о том, что исследуемый объект на исследуемой серии кадров имеет ненулевое (околонулевое) видимое движение;

i – номер измерения на кадре;

$k(i, n) = k$ – номер измерения в серии измерений Ω_{set} исследуемого объекта, которое является i -м измерением n_{fr} -го кадра серии, гипотетически принадлежащего исследуемому объекту;

$k_{\sigma \min}, k_{\sigma \max}$ – минимальный и максимальный множители, определяющие

предельно допустимые значения остаточных дисперсий оценок координат исследуемого объекта в условиях больших и малых значений критерия Фишера соответственно;

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

$\hat{\ell}(\Omega_{set})$ – оценка отношения правдоподобия для обнаружения околонулевого видимого движения у исследуемого объекта;

m – количество оцениваемых параметров видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров;

n_{fr} – номер CCD-кадра;

N_{fr} – количество CCD-кадров серии;

N_{mea} – количество измерений положений исследуемого объекта на N_{fr} кадрах;

$N_x(m, \sigma^2)$ – значение одномерного нормального распределения с математическим ожиданием m и дисперсией σ^2 в точке x ;

$N_{0exp} = 10^2 / \gamma_{0accept}$ – количество экспериментов проводимого исследования при условиях справедливости гипотезы H_0 ;

$N_{1exp} = 10^2 / \gamma_{1accept} = 10^6$ – количество экспериментов проводимого исследования при условиях справедливости альтернативы H_1 ;

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

R_0^2 – остаточная сумма квадратов отклонений положения исследуемого объекта в предположении (гипотеза H_0) о принадлежности данной совокупности измерений Ω_{set} объекту с нулевой скоростью видимого движения на данной серии кадров (не является объектом Солнечной системы);

R_1^2 – остаточная сумма квадратов отклонений положения исследуемого

объекта в предположении (гипотеза H_1) о принадлежности данной совокупности измерений Ω_{set} объекту с околонулевой скоростью видимого движения на данной серии кадров (объекту Солнечной системы);

$t_x(\Omega_{set}), t_y(\Omega_{set})$ – t-критерии Стьюдента значимости скорости видимого движения вдоль координат x и y соответственно;

$t_{x\max}, t_{y\max}$ – табличные предельно допустимые (критические) значения статистик t-распределения Стьюдента с $N_{mea} - m$ степенями свободы для координат x и y соответственно;

V_x, V_y – скорости видимого движения исследуемого объекта вдоль соответствующих координат;

\hat{V}_x, \hat{V}_y – МНК-оценки скоростей видимого движения исследуемого объекта вдоль соответствующих координат;

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

x_0, y_0 – координаты положения исследуемого объекта на момент времени τ_0 привязки базового кадра;

\hat{x}_0, \hat{y}_0 – МНК-оценки положения исследуемого объекта на момент τ_0 привязки базового кадра;

x_{in}, y_{in} – координаты положения исследуемого объекта в i -м измерении на n_{fr} -м кадре;

$x_k(\theta_x), y_k(\theta_y)$ – неизвестные значения истинного положения исследуемого объекта на момент времени τ_k ;

$\hat{x}_k = \hat{x}_k(\hat{\theta}_x), \hat{y}_k = \hat{y}_k(\hat{\theta}_y)$ – интерполированные МНК-оценки положения исследуемого объекта на момент времени τ_k ;

\bar{x}, \bar{y} – координаты неизменного положения объекта с нулевым видимым движением (объекта, не являющегося объектом Солнечной системы);

\hat{x}, \hat{y} – средние значения оценок координат неизменного положения объекта с нулевым видимым движением (объекта, не являющегося объектом Солнечной системы);

$Y_{in} = \{Y_{Kin}; A_{in}\}$ – i -е измерение положения исследуемого объекта на n_{fr} -м кадре, которое содержит оценки координат Y_{Kin} и блеска A_{in} объекта;

$Y_{Kin} = \{x_{in}; y_{in}\}$ – i -е позиционное измерение положения исследуемого объекта на n_{fr} -м кадре;

α – значение уровня значимости, вероятность ошибки первого рода (вероятность ложного обнаружения при условии справедливости гипотезы H_0);

β – вероятность ошибки второго рода (вероятность пропуска объекта с околонулевым видимым движением при условии справедливости гипотезы H_1);

γ – угол, под которым осуществляется видимое движение исследуемого объекта;

γ_0 – ошибка (погрешность) экспериментальных частот, которая является оценкой условной вероятности ложной тревоги (моделируется в условиях гипотезы H_0);

γ_1 – ошибка (погрешность) экспериментальных частот, которая является оценкой условной вероятности правильного обнаружения (моделируется в условиях справедливости альтернативы H_1 с использованием критических значений, полученных при моделировании в условиях справедливости гипотезы H_0);

$\gamma_{0accept} = \alpha / 10, \gamma_{1accept} = 10^{-3}$ – допустимые значения ошибок экспериментальных частот;

θ_x, θ_y – векторы параметров видимого движения исследуемого объекта вдоль каждой координаты соответственно;

$\hat{\theta}_x, \hat{\theta}_y$ – МНК-оценки векторов параметров видимого движения исследуемого объекта вдоль каждой координаты соответственно;

$\hat{\theta} = \{\hat{\theta}_x, \hat{\theta}_y\}$ – вектор МНК-оценок параметров видимого движения исследуемого объекта;

σ_x^2, σ_y^2 – дисперсии оценок положения исследуемого объекта;

$\hat{\sigma}_x^2, \hat{\sigma}_y^2$ – оценки дисперсий оценок положения исследуемого объекта;

$\hat{\sigma}_0^2, \hat{\sigma}_1^2$ – оценки дисперсий суммарной оценки положения исследуемого объекта по координатам x_k и y_k включая остаточные суммы квадратов отклонений положения объекта R_0^2 и R_1^2 при условии справедливости гипотез H_0 и H_1 о нулевом и ненулевом видимом движении объекта соответственно;

τ_0 – время привязки базового кадра;

τ_k – время привязки кадра, на котором сформировано k -е измерение;

τ_n – время привязки n_{fr} -го кадра;

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

Ω_{set} – серия (множество) измерений (не более чем по одному с кадра) положений, гипотетически принадлежащих одному объекту.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Существует класс движущихся объектов. Можно ввести подкласс объектов с околонулевым видимым движением. Он включает объекты с перемещениями между кадрами, соизмеримыми с ошибками определения положения. Примерами объектов с околонулевым видимым движением могут быть искусственные спутники Земли, в момент их выхода из-под горизонта, приближающиеся снаряды, астероиды или кометы, сближающиеся с Землей. В астрономии, например, данной тематике соответствует проблематика астероидных и спутниковых обзоров. Для обнаружения объектов с околонулевым видимым движением на видеоряде ранее не разрабатывались специальные вычислительные методы, а использовались общие методы обнаружения движущихся объектов. Традиционно они основаны на критерии максимального правдоподобия и подстановочных решающих правилах. Однако, эффективность обнаружения объектов с околонулевым видимым движением традиционными вычислительными методами мала. В этой связи актуальной является **научно-техническая задача** разработки вычислительных методов обнаружения околонулевого видимого движения объекта и методов исследования показателей качества обнаружения разработанных методов.

Связь работы с научными программами, планами и темами. Диссертационная работа связана с международной программой «Защита Планеты» (Planetary Defense) от Международной Академии Астронавтики (International Academy of Astronautics – IAA) [192], международным проектом “The Space Emergency System” при поддержке программы трансграничного сотрудничества Венгрия – Словакия – Румыния – Украина (European Neighbourhood and Partnership Instrument – ENPI) [127], программами наблюдений астероидов под эгидой Центра малых планет (Minor Planet Center – MPC) Международного Астрономического Союза [129], международной программой Gaia-FUN-SSO (Gaia Follow-Up Network for Solar System Objects) [113], НИР №307 «Динамический

интеллектуальный анализ последовательностей нечёткой информации в условиях существенной неопределенности на основе гибридных систем вычислительного интеллекта».

В рамках данной тематики диссертантом разработаны вычислительные методы обработки данных для обнаружения объектов с околонулевым видимым движением и методы статистического и натурного моделирования для исследования показателей качества обнаружения разработанных методов.

Цель и задачи исследования. Цель работы состоит в повышении показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения за счет разработки новых и усовершенствования известных вычислительных методов обработки данных.

Достижение данной цели обеспечивается решением частных задач:

- разработка подстановочного вычислительного метода максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта;
- разработка вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта, основанного на критериях значимости скорости видимого движения объекта;
- разработка метода исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на основе статистического и натурного моделирования.

Объект исследования – объекты с околонулевой скоростью видимого движения на серии цифровых кадров.

Предмет исследований – процесс обнаружения околонулевого видимого движения объекта.

Методы исследований. Основные результаты работы получены на основе теории математической статистики, теории оптимизации, дисперсионного анализа, статистической теории проверки гипотез и оценки параметров, позволивших разработать вычислительные методы обнаружения околонулевого видимого движения объекта; теории статистического и натурного моделирования

позволили разработать методы исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта.

Научная новизна полученных результатов. В рамках решения задачи диссертационного исследования получены следующие научные результаты.

1. Впервые предложен **вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта, основанный на критериях значимости скорости видимого движения объекта**, с решающими правилами проверки статистической значимости скорости видимого движения объекта, в основе которых применяются такие критерии значимости как t-критерий Стьюдента и f-критерий Фишера. Его использование максимизирует условную вероятность правильного обнаружения околонулевого видимого движения объекта в постоянно меняющихся условиях наблюдения.

2. Усовершенствован **подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта**, основанный на подстановочных решающих правилах обнаружения видимого движения объекта, использование которых обосновано отсутствием априорных данных о параметрах видимого движения объекта в части использования разных значений дисперсии позиционных измерений серии.

3. Усовершенствован **метод оценки показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на основе статистического и натурного моделирования**, использование которого позволило определить показатели качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта разработанных вычислительных методов обнаружения в части использования реального закона распределения ошибок измерений положения объекта.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечиваются корректным использованием основных положений апробированного математического аппарата и подтверждаются непротиворечивостью результатов теоретических и экспериментальных исследований. Полученные новые научные результаты были апробированы и доказали свои обоснованность и дос-

товерность в процессе эксплуатации программы автоматизированного обнаружения астероидов и комет CoLiTec, реализующей данные результаты.

Практическое значение полученных результатов. 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 использованы в Одесской астрономической обсерватории Odessa-Mayaki [194] (с. Маяки, Одесская обл., Украина, МРС код - 583), лаборатории космических исследований при Ужгородском национальном университете, а также были внедрены в рамках учебного процесса, что подтверждается соответствующими актами внедрения (приложение А). С использованием разработанных в диссертации методов открыто множество малых тел Солнечной системы. Самым известным из них стала долгопериодическая околосолнечная комета C/2012 S1 (ISON) [157, 106], которая была открыта с помощью ПО CoLiTec, и являлась на момент открытия объектом с околонулевым видимым движением.

Также ПО CoLiTec было рекомендовано всем членам Gaia-FUN-SSO для анализа наблюдений в качестве инструмента для обнаружения слабых движущихся объектов на кадрах (приложение Д).

Разработанные вычислительные методы могут быть использованы в различных программных комплексах обработки данных для обнаружения объектов с околонулевым видимым движением, например в программах автоматизированного обнаружения малых тел Солнечной системы (астероидов и комет) на серии CCD-кадров. Кроме того, предложенные методы могут быть использованы для наблюдения и обнаружения движущихся объектов любой природы (снаряды, ракеты, самолеты, беспилотные летательные аппараты, спутники).

Личный вклад соискателя. Все основные научные и практические результаты, полученные в диссертационной работе, соискатель получил само-

стоятельно. Личный вклад автора, в совместно опубликованных работах, следующий: в [72] разработан и исследован подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта; в [141] разработан и исследован вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта, основанный на критериях значимости фактора скорости видимого движения объекта; в [74] разработан и исследован эвристический вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта; в [71] разработан метод оценки показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на основе статистического моделирования; в [42] исследованы показатели качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта методом статистического моделирования; в [70] разработан метод оценки показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на основе натурального моделирования; в [5, 60, 61, 178] получены выражения для частных производных невязок между теоретическими и экспериментальными яркостями пикселя; в [4, 34, 73, 189] получены оценки параметров видимого движения объектов; в [12, 13] получены оценки положения объектов в задаче отождествления; в [179] подготовлены измерения объектов с помощью ПО CoLiTec для сравнительного анализа показателей точности с ПО Astrometrica; в [14] исследованы статистические характеристики оценок параметров объектов, неподвижных на серии.

Апробация результатов диссертационной работы. Основные результаты диссертации обсуждены на 17 научно-технических конференциях: «Astronomy Space Physics Annual International Conference» (Украина, Киев, 21 – 24 мая, 2013 г.) [180]; «NASA's Asteroid Initiative Idea Synthesis Workshop» (США, Хьюстон, 30 сентября – 2 октября, 2013 г.) [177]; 12-той международной конференции «Asteroids, Comets, Meteors 2014» (Финляндия, Хельсинки, 30 июня – 4 июля, 2014 г.) [176]; 14-ой украинской конференции космических исследований (Украина, Ужгород, 8 – 12 сентября, 2014 г.) [53, 69]; «40th COSPAR Scientific Assembly» (Россия, Москва, 2 – 10 августа, 2014 г.) [181];

«Gaia-FUN-SSO-3 International Workshop» (Франция, Париж, 24 – 26 ноября, 2014 г.) [139]; International scientific and methodological conference «KOLOS 2014» (Словакия, Стакчин, 4 – 6 декабря, 2014 г.) [182]; «IAA Planetary Defense Conference 2015» (Италия, Фраскатти, 13 – 17 апреля, 2015 г.) [138]; 15-ой украинской конференции космических исследований (Украина, Одесса, 24 – 28 августа, 2015 г.) [54]; International meeting on variable stars research «KOLOS 2015» (Словакия, Стакчин, 3 – 5 декабря, 2015 г.) [137, 170]; «Радиометеоры, метеоры и межпланетная составляющая: рядом и на расстоянии» (Украина, Харьков, 15 марта 2016 г.) [52]; «Теоретические и прикладные аспекты использования информационных технологий в области естественных наук» (Украина, Одесса, 20 – 22 апреля, 2016 г.) [48]; VI Всеукраинской школе-семинаре молодых учёных и студентов «АСІТ'2016» (Украина, Тернополь, 20 – 21 мая, 2016 г.) [41]; «16-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School» (Украина, Одесса, 14 – 20 августа, 2016 г.) [140]; VIII международной школе-семинаре «Теория принятия решения» (Украина, Ужгород, 26 сентября – 1 октября, 2016 г.) [46].

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 16 научных статьях в профильных научных изданиях Украины, 1 статья опубликована в английском журнале, который входит в наукометрическую базу «Scopus» с импакт фактором 5.107, 1 статья в журнале, который относится к физико-математическим наукам и входит в наукометрическую базу «Scopus» с импакт фактором 0.361, 1 статья опубликована в индийском журнале, а также в материалах и сборниках тезисов 16 научно-технических конференций. Соискатель является соавтором 3 авторских прав [56, 57, 58] на программный код.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ОБЪЕКТОВ С ОКОЛОНУЛЕВЫМ ВИДИМЫМ ДВИЖЕНИЕМ И МЕТОДОВ ИХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

1.1 Необходимость наблюдения объектов с околонулевым видимым движением

Существует класс движущихся объектов. Можно ввести подкласс объектов с околонулевым видимым движением. Данный подкласс включает объекты с перемещениями между кадрами, соизмеримыми с ошибками определения положения этих объектов или размерами их изображений.

Для обнаружения объектов с околонулевым видимым движением используется общая теория обнаружения движущихся объектов на серии цифровых кадров. Однако общая теория не даёт нужного результата в постоянно меняющихся условиях наблюдения. Методы, основанные на общей теории обнаружения, не обеспечивают требуемые показатели качества обнаружения околонулевого видимого движения объектов, их использование приводит к лавинообразному росту ложных обнаружений и пропусков объектов с околонулевым видимым движением. Чаще всего, без использования специальных вычислительных методов обнаружения объекты с околонулевым видимым движением ошибочно относятся к классу неподвижных объектов (объектов с нулевой скоростью видимого движения).

Обнаружение движущихся объектов, в том числе и объектов с околонулевым видимым движением, на серии цифровых кадров осуществляется на этапе межкадровой обработки. Для каждого исследуемого объекта формируются множества измерений, которые ему принадлежат (рисунок 1.1). Полученные измерения соответствуют положению исследуемого объекта на фиксированный момент времени (время формирования цифрового кадра). Для выявления дви-

жения у исследуемого объекта анализируется множество измерений, принадлежащих данному объекту на рассматриваемой серии кадров.

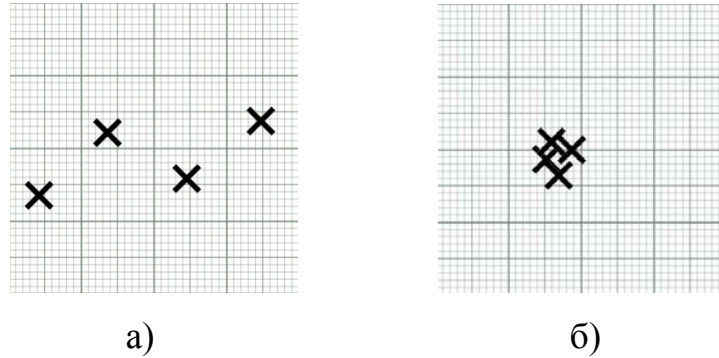


Рисунок 1.1 – Множества измерений, принадлежащих объекту, который имеет: а) значимое видимое движение, б) околонулевое видимое движение

При использовании традиционных вычислительных методов при анализе полученного множества измерений выявляется значимое видимое перемещение исследуемого объекта между кадрами (рисунок 1.1 (а)).

Однако учитывая специфику подкласса объектов с незначимым (околонулевым) видимым движением, перемещения таких объектов между кадрами, соизмеримые с ошибками измерений, не будут выявлены (рисунок 1.1 (б)). Последствием чего объект с околонулевым видимым движением будет пропущен и классифицирован как неподвижный.

Примерами объектов с околонулевым видимым движением могут быть приближающиеся снаряды, пули (рисунок 1.2). Иными словами, снаряды, пули, которые летят в сторону наблюдателя.



Рисунок 1.2 – Изображение пули: а) летящей на наблюдателя (вид спереди), б) летящей перед наблюдателем (вид сбоку)

В астрономии, например, данной тематике соответствует проблематика астероидных и спутниковых обзоров. В ней примерами объектов с околонулевым видимым движением могут быть искусственные спутники Земли, в момент их выхода из-под горизонта (рисунок 1.3), астероиды (рисунок 1.4) или кометы (рисунок 1.5), сближающиеся с Землей.

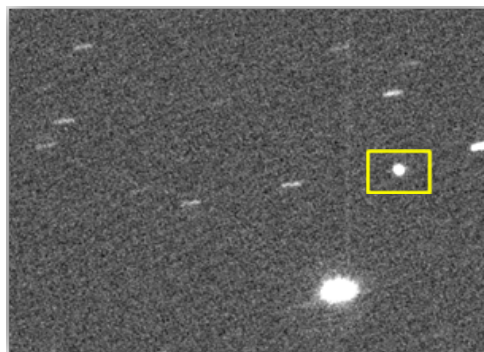


Рисунок 1.3 – Изображение искусственного спутника Земли

Большая часть малых тел Солнечной системы, во время своего нахождения за орбитой Юпитера, включая многие кометы с малыми апогелиями, также имеют околонулевую скорость видимого движения.

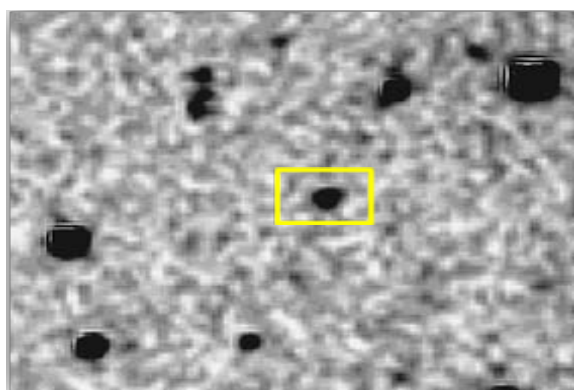


Рисунок 1.4 – Изображение астероида, сближающегося с Землей

Также существует класс транснептуновых объектов (ТНО). Это небесные тела Солнечной системы, которые обращаются по орбите вокруг Солнца, и у которых среднее расстояние до Солнца больше, чем у Нептуна (30 а. е.).

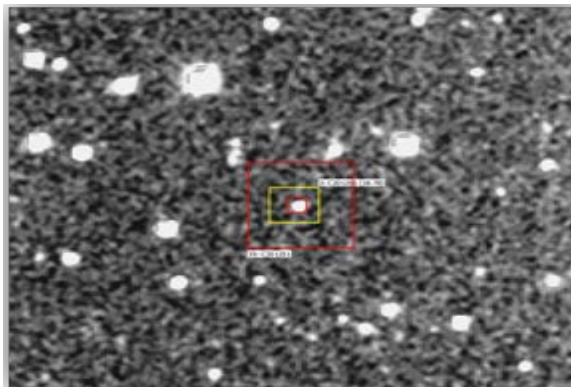


Рисунок 1.5 – Изображение кометы, сближающейся с Землей

В рамках существующей проблематики обнаружения объектов с околонулевым видимым движением не разработано специальных вычислительных методов. А использование общих вычислительных методов обнаружения в случае появления на серии кадров объектов с перемещениями между кадрами, соизмеримыми с ошибками определения положения этих объектов, приводит к пропуску летящих на наблюдателя потенциально опасных объектов.

Например, в астрономии наличие специальных вычислительных методов обнаружения объектов с околонулевым видимым движением увеличит время предупреждения о потенциально опасных небесных объектах, приближающихся к Земле. Также с помощью данных вычислительных методов будет возможно выявление малых тел Солнечной системы во время своего нахождения за орбитой Юпитера.

В связи с проблематикой астероидно-кометной опасности [81, 101, 107, 142, 174, 185, 188] астероидные обзоры с автоматической обработкой их результатов в настоящее время являются значимым направлением использования современных вычислительных методов. За счёт раннего обнаружения потенциально опасных небесных объектов и передачи необходимой информации в ООН [39], время на принятие решения и мер предостережения значительно возрастёт. Комитет ООН по использованию космического пространства примет меры для отклонения (изменения траектории полета) опасного небесного объекта, тем самым отведя его от Земли (например, организовав запуск космиче-

ского корабля в мирных целях).

Приведенные выше примеры являются ярким подтверждением актуальности разработки специальных вычислительных методов обнаружения объектов с околонулевым видимым движением.

Также одним из фактов, подтверждающих научную значимость данной тематики, является программа НАСА «Near-Earth Object Program» по наблюдению объектов сближающихся с Землей (ОСЗ) [162, 163].

1.2 Характеристика и особенности условий наблюдения объектов с околонулевым видимым движением

Видимое движение объектов на фоне звёзд является результатом сложения орбитальных скоростей объекта и Земли (29.78 км/с) [199]. Скорости объектов могут варьироваться в пределах от долей до десятков угловых минут в сутки и самые разнообразные направления. Объекты могут иметь и очень медленное (околонулевое) видимое движение из-за значительного удаления от Земли и незначительной скорости видимого движения на серии CCD-кадров.

В диссертации рассматривается наблюдение объектов с околонулевым видимым движением телескопом с часовым ведением. В этом режиме опорно-поворотное устройство движется со скоростью, которая компенсирует суточное вращение Земли.

В современных условиях для регистрации результатов наблюдений чаще всего используются CCD-матрицы, являющиеся фоточувствительными приборами с зарядовой связью (ПЗС, англ. CCD) [132, 187]. Пиксели CCD-матрицы реализуют прямоугольную систему координат. В картинной плоскости CCD-матрицы формируется цифровое изображение данного участка небесной сферы, называемое CCD-кадром. На нём присутствуют изображения всех небесных объектов, которые относятся к данному участку небесной сферы и были сформированы в фокальной плоскости телескопа [132, 187].

Для обнаружения движущихся с околонулевой скоростью объектов на фоне неподвижных производится последовательная съемка одного и того же участка неба несколько (как правило, 3 – 5) раз с временным интервалом между соседними кадрами – скважностью (например, 5 – 30 мин).

По результатам наблюдений одного участка небесной сферы формируется серия из N_{fr} измерений с временем привязки n_{fr} -го кадра серии τ_n . Один из кадров серии называется базовым, а время его привязки считается равным τ_0 . Естественно базовым кадром считать средний кадр серии или кадр, которому соответствует наибольшее количество измерений.

В процессе наблюдения исследуемого n_{fr} -го кадра находится изображение объекта. Данным объектом может быть либо астероид, либо звезда, неподвижная на серии измерений (с нулевым видимым движением). Изображение небесного объекта может занимать площадь от нескольких пикселей до 50 x 50 (точечный ССО), 20 x 10 (протяжённый ССО) и 100 x 100 (звезда) пикселей. Путем анализа распределения энергии по пикселям положение центра изображения определяется с точностью до 0.25 размера пикселя [23].

По результатам наблюдения изображения объекта формируется измерение Y_{in} (i -е измерение n_{fr} -го кадра), которое является совокупностью оценок параметров исследуемого объекта. В общем случае i -е измерение n_{fr} -го кадра содержит оценки координат $Y_{Kin} = \{x_{in}; y_{in}\}$ и блеска A_{in} объекта: $Y_{in} = \{Y_{Kin}; A_{in}\}$.

Особенности наблюдения объектов с околонулевым видимым движением. При наблюдении объектов с околонулевым видимым движением CCD-кадр формируется не только за счет фонового излучения и излучения от исследуемых объектов, но и за счет излучения объектов с нулевым видимым движением (например, звёзд), попавших в поле зрения телескопа, на фоне которых движется объект. Условия наблюдения объектов с околонулевым видимым движением являются постоянно изменяющимися.

При наблюдении объектов с околонулевым видимым движением основной особенностью наблюдения является то, что перемещения изображений объектов с околонулевым видимым движением между CCD-кадрами серии могут быть соизмеримы с ошибками измерения положения таких объектов. На некоторых участках небесной сферы (например, в окрестности Млечного Пути) количество звёзд может достигать десятков тысяч на квадратный градус.

Изображения объектов с околонулевым видимым движением на одном CCD-кадре имеют форму изображения, которая ничем не отличается от формы изображения неподвижных объектов (объектов с нулевым видимым движением), например, звёзд. Поэтому объекты с околонулевым видимым движением не требуют особых условий наблюдений.

Ошибки измерений. Существует ряд факторов, которые могут затруднять наблюдение объектов с околонулевым видимым движением и быть причинами ошибок измерений их положения: нарушение часового ведения телескопа, смещения экваториальных координат центров кадров серии, атмосферная турбулентность, абберации оптической системы. Например, из-за атмосферы, которая является быстро меняющейся системой, условия наблюдения на участке прохождения отраженного от поверхности объекта света могут значительно измениться за время, прошедшее между кадрами серии.

Поэтому одним из факторов ухудшающих качество изображения объектов с околонулевым видимым движением является атмосферная турбулентность, в результате которой происходит смещение и размытие изображения (рисунок 1.6 (в)) [35, 65, 156].

Также к числу факторов, которые могут влиять на качество формирования CCD-изображения можно отнести абберации оптической системы. Это ошибка или погрешность изображения в оптической системе, вызываемая отклонением луча от того направления, по которому он должен был бы идти в идеальной оптической системе [87, 121]. Например, кома (рисунок 1.6 (а)), дифракционная абберация (рисунок 1.6 (б)). По причине оптических аббераций

точечные изображения объектов с околонулевым видимым движением могут иметь вид «размытых точек» в фокальной плоскости телескопа (рисунок 1.6 (в)). Это вызвано нарушением законов центральной проекции [17, 20].

Точность измерений объектов с околонулевым видимым движением может быть также ухудшена за счет виньетирования (постепенного падения яркости изображения от центра к краям поля зрения системы) [20, 45], которое снижает ОСШ изображений объектов (рисунок 1.6 (г)).

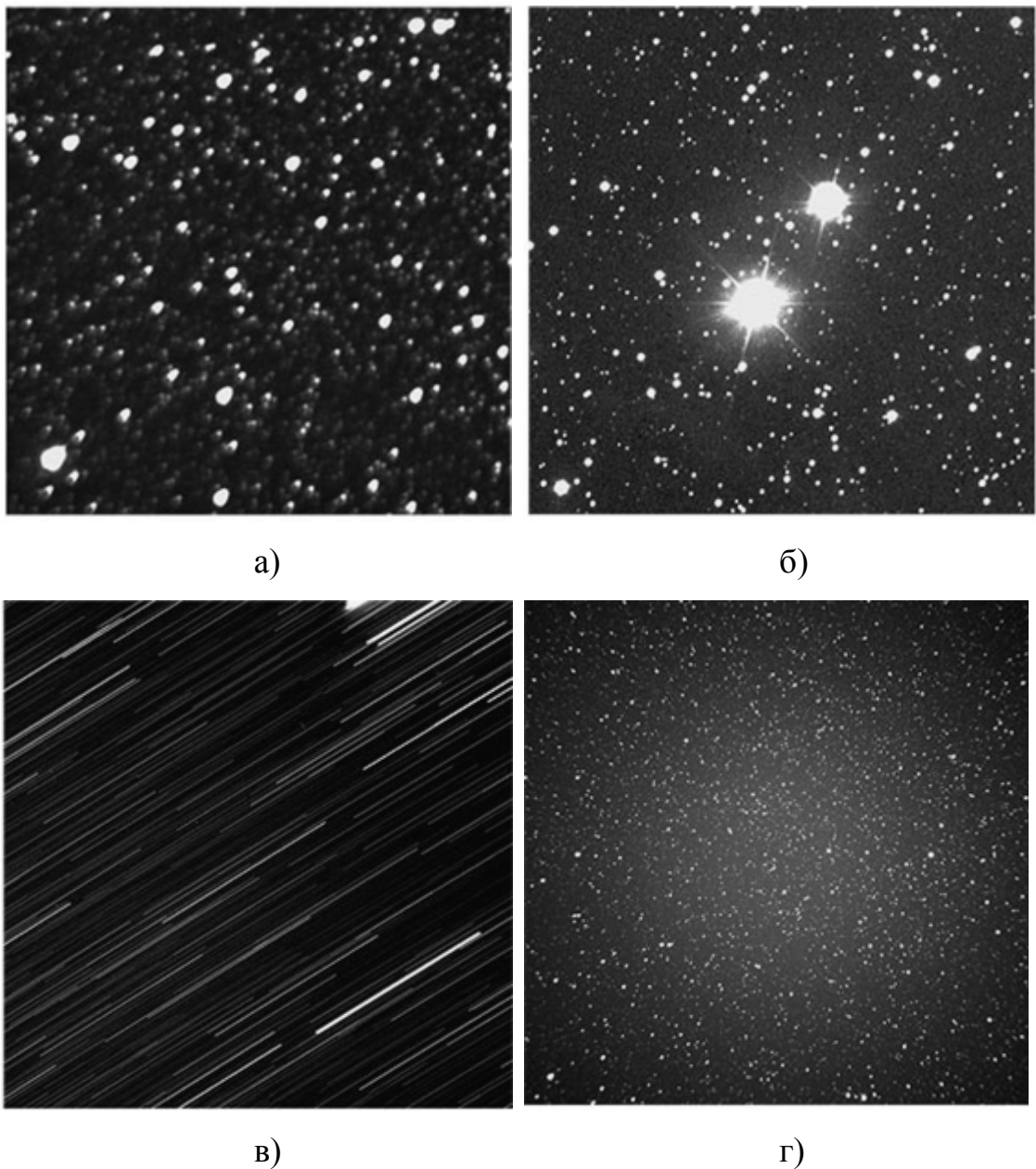


Рисунок 1.6 – Основные виды aberrации оптической системы: кома (а), дифракционные лучи (б), «размытые движением точки» (в), виньетирование (г)

Большое влияние на формирование изображения небесной сферы на CCD-кадре оказывает система управления телескопом в связке с опорно-поворотным устройством.

Нарушение часового ведения телескопа (рисунок 1.7) является причиной смаза изображений объектов на CCD-кадре и смещения экваториальных координат центров кадров.

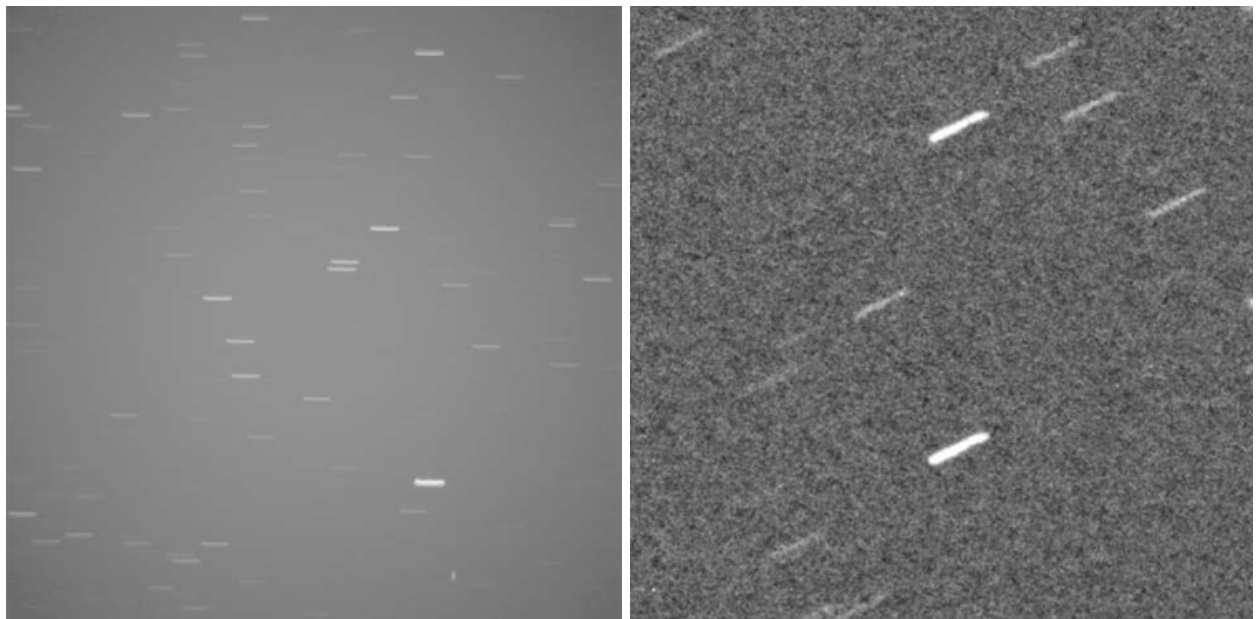


Рисунок 1.7 – Результат астрономических наблюдений без суточного ведения

Все описанные выше факторы также влияют и на получение множеств измерений объектов с околонулевым видимым движением, которые формируются на этапе внутрикадровой обработки.

В работе предполагается, что данные факторы, влияющие на качество формирования измерений, частично убраны операциями внутрикадровой обработки (яркостное выравнивание и др.).

Для выделения объектов с околонулевым видимым движением на фоне объектов с нулевым видимым движением (неподвижных) представляется целесообразным провести предварительное исключение измерений неподвижных объектов из совокупности исследуемых измерений [50].

Данное действие позволит сократить время счёта, а также снизить УВЛО

движущихся объектов. Для этого все измерения каждого кадра предварительно делятся на две совокупности.

Первая из них это совокупность объектов с практически нулевым видимым движением, которое в рамках проекта CoLiTec названо внутренним каталогом (ВК) объектов, неподвижных на серии кадров [50].

Данный каталог на этапе межкадровой обработки выполняет роль внутреннего звёздного каталога.

Вторая совокупность измерений кадра дополняет ВК объектов, неподвижных на серии кадров, до совокупности всех исследуемых измерений кадра. Туда могут попасть измерения, которые можно назвать кандидатами на измерения объектов с околонулевым видимым движением.

В диссертации в качестве входных данных для вычислительных методов обнаружения объектов с околонулевым видимым движением используется ВК объектов, неподвижных на серии кадров [50].

На основании вышеописанного, особенностями условий наблюдения объектов с околонулевым видимым движением, которые влияют на формирование их измерений, являются:

- изображение объекта с околонулевым видимым движением на отдельном цифровом кадре ничем не отличается от изображения объекта с нулевым видимым движением;

- экваториальные координаты центров кадров серии могут быть смещены друг относительно друга из-за ошибок повторного наведения телескопа на один и тот же участок неба или нарушения часового ведения;

- перемещения объектов с околонулевым видимым движением между кадрами соизмеримы с ошибками измерения положения этих объектов;

- объекты с околонулевым видимым движением могут по ошибке быть отнесены к классу объектов с нулевым видимым движением;

- для обнаружения объектов с околонулевым видимым движением используется внутренний каталог объектов, неподвижных на серии цифровых кадров.

1.3 Известные вычислительные методы обработки данных и системы автоматизированного обнаружения объектов с околонулевым видимым движением

1.3.1 Автоматизированные программные средства обработки цифровых кадров для обнаружения объектов

При наличии любого цифрового CCD-изображения возможна его компьютерная обработка [123]. Наблюдательная установка, которая состоит из телескопа с CCD-камерой и компьютером с необходимым программным обеспечением (ПО), может позволить выявить околонулевого видимое движение объектов (астероидов, комет) на фоне объектов с нулевым видимым движением (звёзд).

Astrometrica [76, 80] является одним из самых распространенных автоматизированных ПО обработки CCD-кадров. *Astrometrica* – это программа для обработки CCD-изображений. Основной её задачей является измерение положений малых тел Солнечной системы.

Основные функции ПО *Astrometrica* позволяют выполнять автоматизированный поиск движущихся объектов с последующей визуальной инспекцией автоматически обнаруженных, движущихся объектов. Также выдавать астрометрические измерения в формате MPC с возможностью их отправки.

Основным недостатком ПО *Astrometrica* являются очень низкие показатели качества обнаружения движущихся объектов в автоматическом режиме. Также ПО *Astrometrica* не содержит специальных вычислительных методов обнаружения объектов с околонулевым видимым движением.

CoLiTec – программа автоматического поиска астероидов на серии CCD-кадров [51, 55]. ПО находится в открытом доступе [98] и позволяет автоматически выделять объекты с ненулевым видимым движением. ПО *CoLiTec* выполняет внутрикадровую и межкадровую обработку кадров.

По сравнению с аналогами ПО CoLiTec позволяет выполнять астрометрическую редукцию CCD-кадров с большими полями зрения (2° и более). Также ПО CoLiTec имеет расширенные поисковые возможности, а именно автоматизированный поиск движущихся тусклых объектов ($\text{SNR} \sim 2.5$).

Основным недостатком ПО CoLiTec является фиксированный диапазон допустимых скоростей видимого движения, в который чаще всего не входит значение скорости объектов с околонулевым видимым движением.

PRiSM – программа обработки астрономических изображений [171]. Позволяет делать анализ CCD-кадров, однако в ней отсутствует функция автоматического обнаружения объектов, в частности объектов с околонулевым видимым движением.

С учётом описанных недостатков существующее ПО не может эффективно использоваться для обнаружения объектов с околонулевым видимым движением.

1.3.2 Вычислительные методы обработки данных, используемые для обнаружения объектов с околонулевым видимым движением

Методы обнаружения движущихся объектов. Объекты со значимым видимым движением легко обнаруживаются (выявляются) любыми методами обнаружения траекторий (методами межкадровой обработки) [6, 49, 68, 84, 114, 172]. Известные методы межкадровой обработки данных можно разделить на стробовые и бесстробовые, байесовские и небайесовские, с последовательным и параллельным поступлением данных, основанные на траекторном и сигнально–траекторном подходах.

Простейший стробовый метод состоит в разбиении задачи обнаружения траектории на последовательно решаемые задачи классификации измерений в стробах траекторий. Стробовый метод является методом с последовательным поступлением данных. Теоретическому развитию стробового метода

препятствует принципиальная невозможность введения в его рамках выражения для апостериорного среднего риска. В связи с этим стробовый метод относят к классу небайесовских [29].

Второй метод обнаружения нескольких объектов называют методом ветвлений [3]. Он основан на решении задачи выделения истинных траекторий объектов на фоне древовидного множества ложных траекторий. Основная идея метода заключается в следующем. При получении в стробе более одного измерения траектория разветвляется (каждое измерение считается ее продолжением). Для каждого разветвления считается функция правдоподобия. Далее, путем сравнения вероятностей гипотетических траекторий с предельно допустимым значением, отбрасываются разветвления, не прошедшие сравнение. Использование метода ветвлений приводит к резкому возрастанию трудоемкости вычислений. Также не до конца ясна методика выбора оптимальных предельно допустимых значений. Методу присущ и ряд других недостатков.

Известны вычислительные методы обнаружения движущихся объектов на серии ССD-кадров. Они основаны на проверке гипотез о нулевом (H_0) и ненулевом (H_1) видимом движении исследуемого объекта [49, 148, 155].

Данная группа методов обнаружения видимого движения объектов основана на использовании критерия максимального правдоподобия [85, 94, 111, 161, 184] или какого-либо другого критерия байесовской группы [84, 144, 148] (максимума апостериорной вероятности [150], минимакса [133], минимального среднего риска [86]) или критерия Неймана-Пирсона [30].

Также известен метод обнаружения движущихся объектов, называемый методом собирания света. Данный метод основан на накоплении статистик, пропорциональных энергии изображений, вдоль возможных траекторий движения объекта [49]. Данный метод является ядром ПО CoLiTec [51, 55].

Однако в этом методе обнаружения задается фиксированный диапазон допустимых скоростей исследуемых движущихся объектов. В то время как

чаще всего скорость околонулевого видимого движения объекта не входит в фиксированный диапазон допустимых скоростей, имея скорость ниже допустимой. Попытка снижения минимально допустимой скорости исследуемого объекта в методе собирания света приводит к резкому повышению УВЛО и вычислительных затрат.

Традиционные методы обнаружения движущихся объектов не эффективны при незначительном (околонулевом) видимом движении исследуемых объектов. Этому частному случаю обнаружения движущихся объектов и посвящена данная работа.

Метод формирования внутреннего каталога объектов, неподвижных на серии кадров. Для выделения движущихся объектов с околонулевым видимым движением на фоне неподвижных проводится предварительное исключение измерений объектов с нулевым видимым движением из совокупности исследуемых измерений. Это снижает условную вероятность ложного обнаружения (УВЛО) движущихся объектов и сокращает вычислительные затраты. Для поставленной задачи используется внутренний каталог (ВК) объектов, неподвижных на серии кадров. Метод формирования ВК объектов, неподвижных на серии кадров, представляет собой следующую последовательность операций [15, 50]. Процедуре формирования ВК объектов, неподвижных на серии кадров, предшествуют процедуры отождествления [15, 124, 145, 146] измерений (звезд кадра) и формуляров каталога (звезд каталога).

Считается, что измерения объекта с нулевым видимым движением на серии кадров имеют малые взаимные флуктуации оценок положения. Объясняется это тем, что любые два измерения (по одному с кадра) положения одного объекта с нулевым видимым движением отличаются друг от друга не более чем на радиус неподвижности R_{static} . Для попадания объекта в ВК объектов, неподвижных на серии кадров, количество его измерений должно быть не меньше наперед заданной константы $N_{VK \min}$. При формировании ВК объектов, неподвижных на серии кадров, вводится СК базового кадра, а

координаты всех измерений всех кадров пересчитываются в эту СК. Для этого используются полученные ранее постоянные пластинки [20].

При использовании метода взаимного отождествления кадров [15] измерения каждого кадра серии отождествляются с измерениями всех остальных кадров серии. Для отождествления измерений двух кадров решается задача о наилучшем паросочетании между собой измерений разных кадров [15]. Задача решается венгерским методом [15]. При этом два измерения разных кадров могут быть признаны принадлежащими одному объекту, если расстояние между ними не превышает радиус неподвижности R_{static} .

При использовании метода рекуррентного отождествления кадров [50] не производится отождествление множества измерений каждого кадра серии со всеми множествами измерений других кадров серии. Вместо этого после отождествления первых двух, в общем случае любых, кадров серии формируется совокупность представителей объектов, которая содержит в себе оценки положений объектов в СК базового кадра. В дальнейшем производится отождествление очередного исследуемого кадра серии кадров с совокупностью представителей объектов.

В ряде случаев формирование ВК объектов, неподвижных на серии кадров, может отождествляться без предварительного отождествления измерений кадров и формуляров звездного каталога. При этом измерения всех кадров отождествляются с измерениями базового кадра. А задача формирования постоянных пластинок ставится как задача минимизации суммы квадратов отклонений между координатами выбранных опорных звезд текущего кадра в СК базового кадра и измерений соответствующих звезд базового кадра [15].

Во время формирования ВК объектов, неподвижных на серии кадров, в него могут попасть измерения объектов из введённого подкласса объектов с околонулевым видимым движением. Потому что данные объекты имеют перемещениями между кадрами, соизмеримые с ошибками определения положения этих объектов.

1.4 Постановка целей и задач исследований

Общая постановка задачи. Наблюдение объектов Солнечной системы (ССО) осуществляется с помощью телескопов, оснащенных CCD-матрицами [132, 187]. По результатам наблюдений объектов на одном участке неба формируются цифровые CCD-кадры. Изображение объекта на CCD-кадре формируется за счет попадания фотонов от этого объекта в пиксели CCD-матрицы.

Наряду с изображениями ССО на кадрах наблюдаются изображения звёзд. Небесные объекты, не принадлежащие Солнечной системе, имеют нулевую скорость видимого движения. ССО как правило имеют ненулевую (около-нулевую) скорость видимого движения.

Перемещения между кадрами объектов с околонулевым видимым движением соизмеримы с размерами изображений этих объектов и чаще всего ошибочно относятся к классу объектов с нулевым видимым движением. В работе объектом с околонулевым видимым движением считается объект со скоростью видимого движения, не превышающей значение трёх среднеквадратических отклонений измерений положения объекта.

Характеристики условий наблюдения объектов с околонулевым видимым движением описаны в подразделе 1.2. Также вводится система координат (СК) базового кадра и координаты всех измерений всех кадров пересчитываются в эту СК. Для полученных после внутрикадровой обработки множеств измерений объектов выполняется селекция всех измерений на два множества. Первое – множество объектов внутреннего каталога (ВК), неподвижных на серии кадров [50]. Второе – множество измерений кадра, которое дополняет до совокупности всех измерений кадра ВК объектов, неподвижных на серии кадров.

Существуют различные автоматизированные программные средства обработки цифровых кадров для обнаружения движущихся объектов. В них используются традиционные методы обнаружения траекторий (методы межкадровой обработки) [24, 49, 114, 172]. Характеристики и подробное описание

данных программных средств представлены в подразделе 1.3.1.

Традиционные методы межкадровой обработки делятся на стробовые и бесстробовые, байесовские и небайесовские, с последовательным и параллельным поступлением данных, основанные на траекторном и сигнально-траекторном подходах. Подробное описание данных методов представлено в подразделе 1.3.2. Однако для обнаружения объектов с околонулевым видимым движением не существует специальных вычислительных методов обнаружения, а все перечисленные традиционные программные средства и вычислительные методы обнаружения не обеспечивают необходимые показатели качества обнаружения околонулевого видимого движения объектов.

Поэтому необходимо разработать такую совокупность вычислительных методов обработки данных для автоматизированного обнаружения объектов с околонулевым видимым движением, которые при приемлемых вычислительных затратах, точностных характеристиках и заданной условной вероятности ложного обнаружения (УВЛО) объекта обеспечивают максимальную условную вероятность его правильного обнаружения (УВПО). Данные вычислительные методы должны учитывать основные условия наблюдения объектов с околонулевым видимым движением и особенности формирования их измерений.

Декомпозиция задачи. Согласно вышеописанным особенностям условий наблюдения объектов с околонулевым видимым движением, а также формирования их измерений следует, что показатели качества обнаружения околонулевого видимого движения прямо зависят от выбранного вычислительного метода обнаружения. Для получения приемлемых показателей качества обнаружения при использовании известных вычислительных методов обнаружения [24, 49, 114, 172] необходимо увеличивать накопление данных (количество измерений положения исследуемого объекта). Однако данное накопление данных не всегда может быть возможным, тем самым эффективность таких методов обнаружения падает. Поэтому возникает необходимость обеспечить наилучшие показатели качества обнаружения околонулевого видимого движения за счёт

разработки вычислительных методов обнаружения околонулевого видимого движения объекта, учитывающие основные условия наблюдения исследуемого объекта и особенности формирования его измерений. В этой связи для разработки вычислительных методов обнаружения околонулевого видимого движения выбраны две группы решающих правил. Первая группа основана на критерии максимального правдоподобия. Для этого используются подстановочные решающие правила проверки гипотез [30, 196], называемые часто правилами «обнаружения–измерения» [66, 135, 166]. Вторая группа решающих правил основана на критериях согласия, которые могут быть использованы в методах проверки значимости параметров регрессионных моделей [16, 104] в рамках решения поставленной научно-технической задачи. А именно, f -критерий Фишера [134, 168] и t -критерий Стьюдента [16, 134]. Исходя из общетеоретических соображений эти критерии можно использовать при проверке статистической значимости фактора скорости видимого движения объекта на исследуемой серии измерений. Для этого вводится линейная регрессионная модель с двумя факторами, физически означающими начальное положение и скорость объекта вдоль каждой из координат. Фактором, значимость которого проверяется, является скорость, а его значимость соответствует наличию околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии кадров.

Таким образом, с целью повышения показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения за счет разработки новых и усовершенствования известных вычислительных методов обработки данных, научно-техническую задачу, можно разбить на следующие частные задачи:

– разработка подстановочного вычислительного метода максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта при:

- 1) неизвестной дисперсии измерений положения объекта на серии;
- 2) известной дисперсии измерений положения объекта на серии;
- 3) использовании внешней оценки дисперсии измерений положе-

ния объекта на серии;

– разработка вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта, основанного на критериях значимости скорости видимого движения объекта:

1) t-критерии Стьюдента как критерия значимости скорости видимого движения объекта вдоль каждой координаты;

2) f-критерии Фишера как критерия значимости общей скорости видимого движения объекта;

– разработка метода оценки показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии ССD-кадров на основе статистического и натурального моделирования;

– исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта методами статистического и натурального моделирования.

Выводы по разделу 1

1. В разделе введен подкласс объектов с околонулевым видимым движением. Он включает объекты с перемещениями между кадрами, соизмеримыми с ошибками определения положения объекта. Такие объекты могут по ошибке быть отнесены к классу объектов с нулевым видимым движением.

2. Для обнаружения объектов с околонулевым видимым движением не существует специальных вычислительных методов обнаружения, поэтому используется общая теория обнаружения движущихся объектов на серии цифровых кадров. Однако общая теория не обеспечивает необходимые показатели качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта в постоянно меняющихся условиях наблюдения.

3. Наблюдения объектов с околонулевым видимым движением могут затрудняться рядом факторов: размытием изображения объектов из-за турбулентности атмосферы; искажением изображения объектов вследствие aberrаций оптической системы; нарушением суточного ведения, смещением эквато-

риальных координат центров кадров серии и другими.

4. Существуют автоматизированные программные средства обработки цифровых кадров для обнаружения движущихся объектов. У данных программ есть свой ряд преимуществ, однако основным их недостатком являются низкие показатели качества обнаружения движущихся объектов с околонулевым видимым движением в автоматическом режиме.

5. Разработано достаточно большое количество методов обнаружения объектов со значимым видимым движением. Прежде всего, хотелось бы выделить стробовые методы и метод собирания света. Одним из главных недостатков стробовых методов является лавинообразное увеличение трудоемкости и условной вероятности ложного обнаружения при снижении уровня формирования измерений и минимальной допустимой скорости видимого движения. Метод собирания света имеет главный недостаток – фиксированный диапазон допустимых скоростей исследуемых движущихся объектов. Чаще всего околонулевое видимое движение объекта имеет скорость ниже допустимой, которая не входит в фиксированный диапазон допустимых скоростей. Поэтому при попытке снижения минимально допустимой скорости исследуемого объекта происходит резкое повышение условной вероятности ложного обнаружения и вычислительных затрат. Учитывая описанные недостатки, традиционные методы обнаружения движущихся объектов не могут быть эффективно использованы для обнаружения объектов с околонулевым видимым движением.

6. Для повышения показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения за счет разработки новых и усовершенствования известных вычислительных методов обработки данных сформулирована постановка исследований как решение научно-технической задачи разработки вычислительных методов обнаружения околонулевого видимого движения объекта и методов исследования показателей качества обнаружения данных методов.

Материалы раздела опубликованы в работах [72, 73, 74, 137, 138, 139, 140, 141, 176, 177].

РАЗДЕЛ 2

РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТА С ОКОЛОНУЛЕВЫМ ВИДИМЫМ ДВИЖЕНИЕМ

2.1 Уточненная постановка задачи обнаружения околонулевого видимого движения объекта

Наблюдение объектов Солнечной системы (ССО) осуществляется с помощью телескопа, оснащенного CCD-матрицей [132, 187, 193]. Наряду с изображениями ССО на кадрах наблюдаются изображения звезд и галактик. Небесные объекты, не принадлежащие Солнечной системе (звезды, галактики), имеют нулевую скорость видимого движения, а ССО, как правило, – ненулевую скорость видимого движения. Однако данная скорость для объектов, находящихся за орбитой Юпитера, может лишь немногим превосходить ошибки определения координат объектов на кадрах.

При наблюдении (обнаружении) ССО (объектов с околонулевым видимым движением) считается, что за время наблюдения исследуемого объекта условия наблюдения практически неизменны. Соответственно, отношение сигнал/шум изображения небесного объекта на данных кадрах практически не меняется, а СКО оценок координат на разных кадрах практически одинаковы. Таким образом, оценки координат небесного объекта на исследуемых кадрах можно считать равноточными.

Объекты со значимым видимым движением легко обнаруживаются (выявляются) любыми методами обнаружения траекторий (методами межкадровой обработки) [6, 24, 49, 68, 114, 172].

Проблема существует при обнаружении (выявлении) движущихся объектов с околонулевой скоростью видимого движения. Этому частному случаю

обнаружения движущихся объектов и посвящена диссертация. Кроме того, исходя из практических особенностей решения указанной задачи подвыборка измерений, не более чем по одному с каждого кадра, отнесенных к одному и тому же объекту предварительно уже сформирована. Данная подвыборка соответствует гипотетическому объекту, предварительно отнесенному к классу объектов с околонулевым видимым движением.

Иными словами. Выдвигается гипотеза H_0 о том, что серия измерений соответствует объекту с нулевой скоростью видимого движения:

$$H_0 : \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = 0, \quad (2.1)$$

где V_x, V_y – скорости видимого движения исследуемого объекта по соответствующим координатам.

Также выдвигается сложная (значение скорости видимого движения может быть различным) альтернатива H_1 о том, что исследуемый объект на исследуемой серии измерений Ω_{set} имеет ненулевое (околонулевое) видимое движение:

$$H_1 : \sqrt{V_x^2 + V_y^2} > 0. \quad (2.2)$$

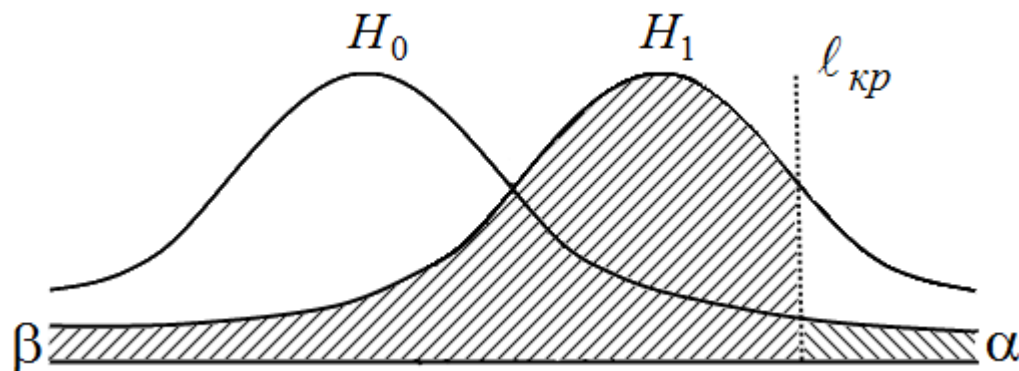


Рисунок 2.1 – Гипотеза H_0 и сложная альтернатива H_1

Вертикальная штриховая линия на рисунке 2.1 обозначает заданное предельно допустимое (критическое) значение ℓ_{cr} отношения правдоподобия (ОП) для обнаружения околонулевого видимого движения у исследуемого объекта [11, 29, 31, 66].

Область принятия гипотезы H_0 (2.1) о нулевом видимом движении исследуемого объекта является допустимой областью, а область отвержения гипотезы H_0 (2.1) (соответственно, область принятия альтернативы H_1 (2.2) о ненулевом видимом движении исследуемого объекта) – критической областью.

Обнаружение ненулевого (околонулевого) видимого движения у исследуемого объекта – это бинарное решение: есть видимое движение или нет [25, 26, 67]. Ложное обнаружение ненулевого (околонулевого) видимого движения у исследуемого объекта при условии справедливости гипотезы H_0 (2.1) считается ошибкой первого α рода и часто называется ложной тревогой. А пропуск объекта с ненулевым (околонулевым) видимым движением при условии справедливости гипотезы H_1 (2.2) называется ошибкой второго β рода [29, 66].

Показателями качества обнаружения принято считать условную вероятность ошибок первого α (условная вероятность ложного обнаружения, УВЛО) и второго β (пропуск объекта) рода [29, 66].

В диссертации вместо условной вероятности пропуска объекта с ненулевым (околонулевым) видимым движением при условии справедливости гипотезы H_1 (ошибки второго β рода) будет использоваться условная вероятность правильного обнаружения (УВПО), дополняющая до единицы условную вероятность ошибки второго рода $(1 - \beta)$.

Используемая модель видимого движения. Моделью видимого движения (проекции траектории движения объекта на фокальную плоскость телескопа) любого объекта за время формирования исследуемой серии измерений достоверно считать модель прямолинейного и равномерного движения объекта вдоль каждой координаты независимо. Неизвестные значения истинных коор-

динат $x_k(\theta_x)$, $y_k(\theta_y)$ положения исследуемого объекта на момент времени τ_k вычисляются согласно данной модели:

$$x_k(\theta_x) = x_0 + V_x(\tau_k - \tau_0); \quad (2.3)$$

$$y_k(\theta_y) = y_0 + V_y(\tau_k - \tau_0), \quad (2.4)$$

где $k(i, n) = k$ – номер измерения в серии измерений Ω_{set} исследуемого объекта, которое является i -м измерением n_{fr} -го кадра серии, гипотетически принадлежащего исследуемому объекту;

x_0, y_0 – координаты положения исследуемого объекта на момент времени τ_0 привязки базового кадра;

τ_0 – время привязки базового кадра серии измерений;

θ_x, θ_y – векторы параметров видимого движения исследуемого объекта вдоль каждой координаты.

Векторы θ_x, θ_y включают в себя координаты x_0, y_0 положения исследуемого объекта на момент времени τ_0 и скорости V_x, V_y его видимого движения вдоль каждой координаты:

$$\theta_x = (x_0, V_x)^T; \quad (2.5)$$

$$\theta_y = (y_0, V_y)^T. \quad (2.6)$$

Измеренные (ожидаемые) положения исследуемого объекта x_k, y_k (соответствуют математическим ожиданиям) в момент времени τ_k также определяются параметрами видимого движения исследуемого объекта и вычисляются согласно выражениям (2.3) и (2.4).

Диссертация посвящена частному случаю обнаружения движущихся объектов с незначительным (околонулевым) видимым движением, и ошибочно мо-

гут быть приняты известными методами за объекты с нулевой скоростью видимого движения.

Предполагается, что подобные исследуемые объекты предварительно организационно сведены во внутренний каталог (ВК) объектов, неподвижных на серии кадров (подраздел 1.3.2). Данный каталог создается для снижения вероятности ложных обнаружений астероидов в программах автоматической обработки кадров астероидных обзоров.

Необходимо разработать вычислительные методы обнаружения околонулевого видимого движения исследуемых объектов, основанных на синтезированных решающих правилах, путём анализа серии измерений Ω_{set} , сформированной на серии кадров, не более чем по одному измерению на одном кадре. Тем самым, проверяются конкурирующие гипотезы о нулевой H_0 (2.1) и околонулевой H_1 (2.2) скорости видимого движения исследуемого объекта.

Основные особенности формирования измерений объектов с околонулевым видимым движением. Изображение небесных объектов формируется в фокальной плоскости телескопа, результатом чего является CCD-кадр. По результатам наблюдений одного участка небесной сферы формируется серия из N_{fr} измерений с временем привязки n_{fr} -го кадра серии τ_n . Один из кадров серии называется базовым, а время его привязки считается равным τ_0 .

В процессе внутрикадровой обработки исследуемого n_{fr} -го кадра выявлено изображение объекта. Данным объектом может быть либо астероид, либо звезда, неподвижная на серии измерений (с нулевым видимым движением).

Изображение астероида на одном n_{fr} -м кадре серии ничем не отличается от изображения звезды, находящейся на данном участке небесной сферы.

Результаты внутрикадровой обработки по одному объекту одного кадра представляются в виде измерения Y_{in} (i -е измерение n_{fr} -го кадра). В общем случае i -е измерение n_{fr} -го кадра содержит оценки координат $Y_{Kin} = \{x_{in}; y_{in}\}$ и блеска A_{in} объекта: $Y_{in} = \{Y_{Kin}; A_{in}\}$. Также Y_{Kin} называют позиционным из-

мерением, а A_{in} – фотометрическим измерением [20, 33].

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.

Серия измерений (не более чем по одному с кадра), гипотетически принадлежащих одному исследуемому объекту, имеет вид:

$$\begin{aligned}\Omega_{set} &= (Y_{K1(i,1)}, \dots, Y_{Kk(i,n)}, \dots, Y_{KNmea(i,Nfr)}) = \\ &= ((x_1, y_1), \dots, (x_k, y_k), \dots, (x_{Nmea}, y_{Nmea})),\end{aligned}\quad (2.7)$$

где $k(i, n) = k$ – номер измерения в серии измерений исследуемого объекта, которое является i -м измерением n_{fr} -го кадра, гипотетически принадлежащего исследуемому объекту;

x_k, y_k – измерение (оценка) положения объекта, содержащееся в k -м измерении серии;

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

Измерения Y_k , принадлежащие серии измерений Ω_{set} (2.7) исследуемого объекта, отобраны не более чем по одному измерению с кадра. Существует возможность того, что измерения положения исследуемого объекта будут формироваться не на всех N_{fr} кадрах. Поэтому, количество измерений, которые принадлежат исследуемому объекту в данной серии измерений в общем случае будет равно N_{mea} , где ($N_{mea} \leq N_{fr}$).

При обнаружении объектов с околонулевым видимым движением считается, что за время наблюдения исследуемого объекта условия наблюдения практически неизменны. Соответственно, отношение сигнал/шум изображения небесного объекта на данных кадрах практически не меняется, а СКО оценок

координат на разных кадрах практически одинаковы. Таким образом, оценки координат объекта на исследуемых кадрах можно считать равноточными.

Считается, что отклонения оценок различных координат объекта, содержащиеся в измерениях серии Ω_{set} , независимы между собой как внутри одного измерения, так и между измерениями, сформированными на разных кадрах. Отклонения оценок координат исследуемого объекта распределены по нормальному закону [8] и имеют нулевые математические ожидания и неизвестные дисперсии σ_x^2 , σ_y^2 .

Ожидаемые положения объектов (соответствуют математическим ожиданиям) определяются параметрами видимого движения исследуемого объекта и вычисляются согласно выражениям (2.3) и (2.4). Тогда плотность распределения оценок координат x_k и y_k (значений координат x и y в k -ом измерении исследуемой серии Ω_{set} (2.7)) будет иметь вид:

$$f_{xk}(\theta_x, \sigma_x) = N_{xk}(x_k(\theta_x), \sigma_x^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{(x_k - (x_0 + V_x(\tau_n - \tau_0)))^2}{2\sigma_x^2}\right]; \quad (2.8)$$

$$f_{yk}(\theta_y, \sigma_y) = N_{yk}(y_k(\theta_y), \sigma_y^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{(y_k - (y_0 + V_y(\tau_n - \tau_0)))^2}{2\sigma_y^2}\right]. \quad (2.9)$$

2.2 Разработка подстановочного вычислительного метода максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта

Критерий максимального правдоподобия. Традиционно гипотезы, подобные гипотезам H_0 (2.1) и H_1 (2.2) [126, 131, 155, 160, 183, 196], проверяются согласно критерию максимального правдоподобия [111, 122, 184] или какого-либо другого критерия байесовской группы [84, 100, 119, 144, 148, 152] (максимума апостериорной вероятности [150], минимакса [133], минимального

среднего риска [86]) или критерия Неймана-Пирсона [30].

Для всех перечисленных критериев [88, 151, 197, 198] достаточной статистикой минимального объема является отношение правдоподобия, которое сравнивается с критическими значениями, выбранными в соответствии с заданным критерием [77, 149]. При выборе критерия из указанного выше списка во главу угла ставится укомплектованность исходными данными (априорные вероятности, функция потерь [30, 96, 102, 195], функция правдоподобия [85]) на этапе разработки решающего правила проверки гипотез.

При отсутствии возможности обосновать априорные вероятности гипотез и потери, связанные с ошибочным принятием решения о справедливости той или иной гипотезы, разработчик может использовать только критерии максимального правдоподобия или Неймана-Пирсона [122, 161].

В случае если в рамках рассматриваемых гипотез имеет место априорно неизвестные параметры функции правдоподобия, то они оцениваются по той же выборке, по которой проверяются гипотезы. В математической литературе подобные правила называются подстановочными правилами проверки гипотез [1, 30, 196]. В технической литературе подобные правила чаще всего называются правилами «обнаружения–измерения» [66, 135, 166].

В подстановочном решающем правиле или решающем правиле «обнаружения-измерения» процедуре обнаружения предшествует процедура измерения. Это общий принцип решения задачи смешанной оптимизации с дискретными и непрерывными параметрами [79, 147, 153, 165, 173, 190].

Если выполняется оптимизация по дискретным и непрерывным параметрам, то для каждого дискретного параметра (объект имеет нулевое или ненулевое (околонулевое) видимое движение) находится наилучшее значение непрерывного параметра (положение и начальная скорость видимого движения объекта) [7, 32, 43, 44, 164]. Решающие статистики гипотез, которые соответствуют разным значениям дискретных параметров, сравниваются между собой после оптимизации условных функций правдоподобия по значению их непрерывных

параметров [2, 63, 78, 175].

Недостатком критерия максимального правдоподобия является недостаточная обоснованность его использования в указанной выше ситуации неопределённости с частью параметров функции правдоподобия. Разработчики предполагают очевидное – использование подстановочного правила, несмотря на то, что данная очевидность не обоснована математически. При этом показатели качества проверки гипотез могут быть проанализированы (исследованы) только статистическим моделированием или на обучающих выборках экспериментальных данных большого объема.

Использование подстановочного правила максимального правдоподобия, является традиционным решением, тем решением, с которым необходимо сравнивать любые новые технические решения, связанные с проверкой гипотез в условиях параметрической априорной неопределённости [89, 92, 166, 190].

Функция правдоподобия для обнаружения околонулевого видимого движения у исследуемого объекта. В качестве функции правдоподобия выбирается совместная плотность распределения измерений положения исследуемого объекта на серии измерений. Согласно постановке задачи, оценки положения объекта на кадрах считаются равноточными, а дисперсии оценок положения объекта по каждой координате считаются равными $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma^2$.

Рассматривается две гипотезы H_0 (2.1) и H_1 (2.2). При первой, плотность распределения измерений положения исследуемого объекта при условии, что объект не является объектом Солнечной системы (является звездой с нулевым видимым движением на серии измерений), имеет вид:

$$f_0(\bar{x}, \bar{y}, \sigma) = \prod_{k=1}^{N_{mea}} [N_{xk}(\bar{x}, \sigma^2) \cdot N_{yk}(\bar{y}, \sigma^2)], \quad (2.10)$$

где \bar{x}, \bar{y} – координаты неизменного положения исследуемого объекта.

При второй гипотезе для плотности распределения измерений положения

исследуемого объекта с ненулевым (околонулевым) видимым движением объекта вместо параметров \bar{x} , \bar{y} положения исследуемого объекта используются координаты $x_k(\theta_x)$, $y_k(\theta_y)$ положения исследуемого объекта в момент времени τ_k , вычисленные согласно выражений (2.3) и (2.4) соответственно:

$$f_1(\theta, \sigma) = \prod_{k=1}^{N_{mea}} [N_{xk}(x_k(\theta_x), \sigma^2) \cdot N_{yk}(y_k(\theta_y), \sigma^2)]. \quad (2.11)$$

Отсутствие информации о положении исследуемого объекта, скорости его видимого движения и дисперсии оценок положения объекта на серии измерений приводит к необходимости использования подстановочного решающего правила (решающего правила «обнаружения-измерения») [1, 19, 40, 66].

При этом статистикой для различения проверяемых гипотез является оценка отношения правдоподобия $\hat{\ell}(\Omega_{set})$ [9, 10, 27, 47, 122].

МНК-оценка параметров видимого движения исследуемого объекта на серии измерений. Видимое движение объекта вдоль каждой координаты считается независимым. Следовательно, задачу определения параметров видимого движения объекта вдоль двух координат можно свести к независимому определению параметров видимого движения вдоль каждой координаты. Согласно (2.3) и (2.4), оценки векторов параметров видимого движения содержат оценки координат \hat{x}_0 и \hat{y}_0 положения исследуемого объекта на базовом кадре и оценки скорости \hat{V}_x и \hat{V}_y движения исследуемого объекта по соответствующим координатам. Часто задача оценки параметров видимого движения объекта решается методом максимального правдоподобия [93, 111, 122, 184]. При нормальном распределении отклонений оценок координат объекта, оценки параметров видимого движения объекта, полученные методами максимального правдоподобия и наименьших квадратов, полностью совпадают [59, 94, 122].

МНК-оценка вектора (2.5) параметров видимого движения объекта вдоль

координаты x имеет вид [16]:

$$\hat{\theta}_x = \arg \min_{\theta_x} (Y - F_x \theta_x)^T (Y - F_x \theta_x), \quad (2.12)$$

$$\text{где } F_x = \begin{pmatrix} 1 & \Delta_{\tau 1(i,1)} \\ \dots & \dots \\ 1 & \Delta_{\tau k(i,n)} \\ \dots & \dots \\ 1 & \Delta_{\tau N_{mea}(i,N_{fr})} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

– матрица плана [16], также называемая матрицей частных производных [3] или матрицей дифференциальных операторов [37];

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

Решение (МНК-оценка параметров видимого движения объекта вдоль координаты x) системы уравнений (2.12) представляется выражением [16]:

$$\hat{\theta}_x = (F_x^T F_x)^{-1} F_x^T Y. \quad (2.14)$$

МНК-оценки параметров видимого движения объекта вдоль координаты x (координата \hat{x}_0 на базовом кадре и скорость \hat{V}_x вдоль данной координаты) можно представить в скалярном виде [29]:

$$\hat{x}_0 = \frac{D \cdot A_x - C \cdot B_x}{T \cdot D - C^2}; \quad (2.15)$$

$$\hat{V}_x = \frac{T \cdot B_x - C \cdot A_x}{T \cdot D - C^2}, \quad (2.16)$$

$$\text{где } A_x = \sum_{k=1}^{N_{mea}} x_k; B_x = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau k} x_k; C = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau k}; D = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau k}^2.$$

Аналогично, для координаты y :

$$\hat{y}_0 = \frac{D \cdot A_y - C \cdot B_y}{T \cdot D - C^2}; \quad (2.17)$$

$$\hat{V}_y = \frac{T \cdot B_y - C \cdot A_y}{T \cdot D - C^2}, \quad (2.18)$$

$$\text{где } A_y = \sum_{k=1}^{N_{mea}} y_k; B_y = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau k} y_k.$$

При этом, интерполированные оценки координат исследуемого объекта на k -м кадре серии могут быть представлены выражениями:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k(\hat{\theta}_x) = \hat{x}_0(\hat{\theta}_x) + \hat{V}_x(\hat{\theta}_x) \cdot (\tau_k - \tau_0); \quad (2.19)$$

$$\hat{y}_k = \hat{y}_k(\hat{\theta}_y) = \hat{y}_0(\hat{\theta}_y) + \hat{V}_y(\hat{\theta}_y) \cdot (\tau_k - \tau_0). \quad (2.20)$$

Таким образом, для каждого (k -го) из N_{mea} измерений серии Ω_{set} (2.7) имеют место:

- неизвестное значение истинного положения объекта $(x_k(\theta_x), y_k(\theta_y))$;
- измеренные положения объекта на кадре (x_k, y_k) на момент времени τ_k в СК базового кадра;
- интерполированные (согласно выражениям (2.19), (2.20)) оценки координат исследуемого объекта $(\hat{x}_k, \hat{y}_k) = (\hat{x}_k(\hat{\theta}_x), \hat{y}_k(\hat{\theta}_y))$.

Определение дисперсии оценок положения исследуемого объекта на серии измерений. В исследуемом случае дисперсии σ_x^2, σ_y^2 оценок положения объекта неизвестны, поэтому предлагается использовать оценки дисперсий $\hat{\sigma}_x^2,$

$\hat{\sigma}_y^2$ измерений исследуемого объекта на серии измерений.

Оценка дисперсии $\hat{\sigma}_x^2$ оценки положения объекта по координате x в невырожденной линейной регрессионной модели [16] после подстановки МНК-оценок параметров прямолинейного равномерного движения (2.15) – (2.18) моделей (2.3) и (2.4) имеет вид:

$$\hat{\sigma}_x^2 = (Y - F_x \hat{\theta}_x)^T (Y - F_x \hat{\theta}_x) / (N_{mea} - m), \quad (2.21)$$

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

Используя значения измеренных x_k, y_k (2.3), (2.4) и интерполированных \hat{x}_k, \hat{y}_k (2.19), (2.20) оценок положения объекта, оценки дисперсий $\hat{\sigma}_x^2$ и $\hat{\sigma}_y^2$ оценок координат объекта могут быть представлены в виде:

$$\hat{\sigma}_x^2 = \sum_{k=1}^{N_{mea}} (x_k - \hat{x}_k(\hat{\theta}_x))^2 / (N_{mea} - m); \quad (2.22)$$

$$\hat{\sigma}_y^2 = \sum_{k=1}^{N_{mea}} (y_k - \hat{y}_k(\hat{\theta}_y))^2 / (N_{mea} - m). \quad (2.23)$$

В ряде случаев целесообразно использовать условные по гипотезам оценки дисперсий измерений в предположении, что измерения координат исследуемого объекта равноточны.

При условии справедливости гипотез о принадлежности совокупности измерений исследуемому объекту с нулевой (H_0) и ненулевой (околонулевой) (H_1) скоростью видимого движения на данной серии измерений выражения для условных оценок $\hat{\sigma}_0^2, \hat{\sigma}_1^2$ дисперсий оценок положения исследуемого объекта соответственно примут вид:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{R_0^2}{2(N_{mea} - m)}; \quad (2.24)$$

$$\hat{\sigma}_1^2 = \frac{R_1^2}{2(N_{mea} - m)}, \quad (2.25)$$

$$\text{где } R_0^2 = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \left((x_k - \hat{x})^2 + (y_k - \hat{y})^2 \right); \quad (2.26)$$

$$R_1^2 = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \left((x_k - \hat{x}_k(\hat{\theta}_x))^2 + (y_k - \hat{y}_k(\hat{\theta}_y))^2 \right) \quad (2.27)$$

– остаточные суммы квадратов отклонений [8] положения исследуемого объекта в предположении истинности гипотез о нулевом (H_0) и ненулевом (H_1) видимом движении соответственно на данной серии измерений.

Также, оценка дисперсии оценки положения исследуемого объекта на серии измерений может быть получена и по внешним данным. Например, оценка дисперсии измерений положения может быть получена на других измерениях каталогизированных объектов исследуемых кадров. Тогда значение искомой оценки является, например, значением оценки дисперсии всех измерений положения объектов используемого астрометрического каталога на CCD-кадре.

Подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения ненулевого (околонулевого) видимого движения исследуемого объекта при неизвестной дисперсии измерений положения объекта на кадрах. В исследуемом случае, когда дисперсии $\sigma_x^2 = \sigma_y^2$ измерений положения объекта на кадрах неизвестны, предлагается использовать оценки дисперсий $\hat{\sigma}_0^2$ и $\hat{\sigma}_1^2$ измерений координат исследуемого объекта из выражений (2.24) и (2.25) при условии справедливости гипотезы H_0 (2.1) и альтернативы H_1 (2.2) соответственно. Тогда подстановочное решающее правило (решающее правило «обнаружения-измерения») для обнаружения ненулевого (околонулевого) видимого движения у исследуемого объекта будет иметь вид:

$$\hat{\ell}(\Omega_{set}) = \frac{\max_{\hat{\theta}} f_1(\hat{\theta}, \hat{\sigma}_1)}{\max_{\hat{x}, \hat{y}} f_0(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\sigma}_0)} \geq \ell_{кр}, \quad (2.28)$$

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

$$\hat{x} = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \hat{x}_k / N_{mea}, \quad \hat{y} = \sum_{k=1}^{N_{mea}} \hat{y}_k / N_{mea} \quad \text{– средние значения оценок координат}$$

положения объекта на исследуемой серии кадров;

$$\hat{\theta} = \{\hat{\theta}_x, \hat{\theta}_y\} = \arg \max_{\hat{\theta}} f_1(\hat{\theta}, \hat{\sigma}_1) \quad \text{– МНК-оценки параметров видимого дви-}$$

жения исследуемого объекта, полученные согласно выражениям (2.15) – (2.18).

После подстановки функций правдоподобия $f_0(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\sigma}_0)$ и $f_1(\hat{\theta}, \hat{\sigma}_1)$ выражение для оценки ОП $\hat{\ell}(\Omega_{set})$ примет вид:

$$\hat{\ell}(\Omega_{set}) = \frac{\prod_{k=1}^{N_{mea}} [N_{xk}(\hat{x}_k(\hat{\theta}_x), \hat{\sigma}_1^2) \cdot N_{yk}(\hat{y}_k(\hat{\theta}_y), \hat{\sigma}_1^2)]}{\prod_{k=1}^{N_{mea}} [N_{xk}(\hat{x}, \hat{\sigma}_0^2) \cdot N_{yk}(\hat{y}, \hat{\sigma}_0^2)]}. \quad (2.29)$$

Используя полученное выражение для оценки ОП (2.29), подстановочное решающее правило (2.28) будет иметь вид:

$$\frac{\prod_{k=1}^{N_{mea}} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi\hat{\sigma}_1}} \exp\left[-\frac{(x_k - \hat{x}_k(\hat{\theta}_x))^2}{2\hat{\sigma}_1^2}\right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\hat{\sigma}_1}} \exp\left[-\frac{(y_k - \hat{y}_k(\hat{\theta}_y))^2}{2\hat{\sigma}_1^2}\right] \right]}{\prod_{k=1}^{N_{mea}} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi\hat{\sigma}_0}} \exp\left[-\frac{(x_k - \hat{x}_k)^2}{2\hat{\sigma}_0^2}\right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\hat{\sigma}_0}} \exp\left[-\frac{(y_k - \hat{y}_k)^2}{2\hat{\sigma}_0^2}\right] \right]} \geq \ell_{кр}. \quad (2.30)$$

Натуральное логарифмирование обеих частей неравенства (2.30) позволяет избавиться от экспоненты в выражениях для самих функций правдоподобия, а произведения в числителе и знаменателе заменить на суммы:

$$\begin{aligned} & \frac{N_{mea}}{\hat{\sigma}_1^2} - \frac{1}{2\hat{\sigma}_1^2} \left(\sum_{k=1}^{N_{mea}} (x_k - \hat{x}_k(\hat{\theta}_x))^2 + \sum_{k=1}^{N_{mea}} (y_k - \hat{y}_k(\hat{\theta}_y))^2 \right) - \\ & - \frac{N_{mea}}{\hat{\sigma}_0^2} + \frac{1}{2\hat{\sigma}_0^2} \left(\sum_{k=1}^{N_{mea}} (x_k - \hat{x})^2 + \sum_{k=1}^{N_{mea}} (y_k - \hat{y})^2 \right) \geq \ln(\ell_{кр}). \end{aligned} \quad (2.31)$$

После подстановки значений оценок дисперсий $\hat{\sigma}_0^2$ и $\hat{\sigma}_1^2$ измерений оценок положения исследуемого объекта из выражений (2.24) и (2.25) подстановочное решающее правило (2.31) будет иметь вид:

$$\frac{A \cdot N_{mea}}{R_1^2} - \frac{A}{2R_1^2} R_1^2 - \frac{A \cdot N_{mea}}{R_0^2} - \frac{A}{2R_0^2} R_0^2 \geq \ln(\ell_{кр}), \quad (2.32)$$

где $A = 2(N_{mea} - m)$.

После сокращений и приведения подобных в левой части неравенства (2.32) решающее правило «обнаружения-измерения» примет вид:

$$A \cdot N_{mea} \cdot \frac{R_0^2 - R_1^2}{R_0^2 \cdot R_1^2} \geq \ln(\ell_{кр}). \quad (2.33)$$

После преобразований и переноса констант в правую часть неравенства (2.33) подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения ненулевого (околонулевого) видимого движения исследуемых объектов при неизвестной дисперсии измерений положения объекта на кадрах имеет следующий вид:

$$\frac{R_0^2 - R_1^2}{R_0^2 \cdot R_1^2} \geq \frac{\ln(\ell_{кр})}{A \cdot N_{mea}}. \quad (2.34)$$

Подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения ненулевого (околонулевого) видимого движения исследуемого объекта при известной дисперсии измерений положения объекта на кадрах. В случае известной дисперсии $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma^2$ оценок координат объекта подстановочное решающее правило будет иметь вид:

$$\hat{\ell}(\Omega_{set}) = \frac{\max_{\hat{\theta}} f_1(\hat{\theta}, \sigma)}{\max_{\hat{x}, \hat{y}} f_0(\hat{x}, \hat{y}, \sigma)} \geq \ell_{кр}. \quad (2.35)$$

После подстановки функций правдоподобия $f_0(\hat{x}, \hat{y}, \sigma)$ и $f_1(\hat{\theta}, \sigma)$ выражение (2.35) для оценки ОП $\hat{\ell}(\Omega_{set})$ примет вид:

$$\hat{\ell}(\Omega_{set}) = \frac{\prod_{k=1}^{N_{mea}} [N_{xk}(\hat{x}_k(\hat{\theta}_x), \sigma^2) \cdot N_{yk}(\hat{y}_k(\hat{\theta}_y), \sigma^2)]}{\prod_{k=1}^{N_{mea}} [N_{xk}(\hat{x}_k, \sigma^2) \cdot N_{yk}(\hat{y}_k, \sigma^2)]}. \quad (2.36)$$

Используя выражение (2.36), подстановочное решающее правило (решающее правило «обнаружения-измерения») (2.35) будет иметь вид:

$$\frac{\prod_{k=1}^{N_{mea}} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \left[-\frac{(x_k - \hat{x}_k(\hat{\theta}_x))^2}{2\sigma^2} \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \left[-\frac{(y_k - \hat{y}_k(\hat{\theta}_y))^2}{2\sigma^2} \right] \right]}{\prod_{k=1}^{N_{mea}} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \left[-\frac{(x_k - \hat{x}_k)^2}{2\sigma^2} \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \left[-\frac{(y_k - \hat{y}_k)^2}{2\sigma^2} \right] \right]} \geq \ell_{кр}. \quad (2.37)$$

Значение σ считается не равным нулю. При этом константа $\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}$ в числителе и знаменателе дроби в левой части неравенства (2.37) может быть вынесена из-под знака произведения и сокращена.

После ряда преобразований выражение (2.37) примет вид:

$$\frac{\sum_{k=1}^{N_{mea}} (x_k - \hat{x})^2 + \sum_{k=1}^{N_{mea}} (y_k - \hat{y})^2 - \sum_{k=1}^{N_{mea}} (x_k - \hat{x}_k(\hat{\theta}_x))^2 - \sum_{k=1}^{N_{mea}} (y_k - \hat{y}_k(\hat{\theta}_y))^2}{2\sigma^2} \geq \ln(\ell_{кр}). \quad (2.38)$$

С учетом ранее введенных обозначений (2.26), (2.27) и в предположении $\sigma^2 \neq 0$ подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного ненулевого (околонулевого) видимого движения исследуемого объекта при известной дисперсии измерений положения объекта на кадрах имеет вид:

$$R_0^2 - R_1^2 \geq 2\sigma^2 \cdot \ln(\ell_{кр}). \quad (2.39)$$

Подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения ненулевого (околонулевого) видимого движения исследуемого объекта при использовании внешней оценки дисперсии измерений положения объекта на кадрах. В ряде случаев дисперсии оценок координат объекта по каждой координате могут быть оценены по данным, являющимся внешними относительно исследуемой выборки. Оценка СКО позиционных измерений, включенных в исследуемую серию, не является априорно заданной константой. Данная оценка так же получается из выборки, пусть внешней, включающей другие позиционные измерения исследуемой серии кадров.

Следовательно, для получения соответствующего подстановочного вычислительного метода необходимо в методе (2.39) заменить СКО позиционных измерений на его внешнюю оценку, а последнюю перенести в левую часть, как зависящую от выборки:

$$\frac{R_0^2 - R_1^2}{\hat{\sigma}_{out}^2} \geq 2 \ln(\ell_{кр}). \quad (2.40)$$

Например, внешняя (относительно выборки, используемой для обнаружения видимого движения) 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 используемого астрометрического каталога на CCD-кадре. СКО оценок координат объекта может быть определено на основе отклонений положений опорных звёзд на CCD-кадре.

Так как в настоящее время в качестве опорных звёзд в CoLiTec [51, 55, 98] используется от 500 звёзд на CCD-кадре, то такая оценка может считаться надёжной и использоваться в качестве внешней оценки дисперсии измерений положения объекта в подстановочном вычислительном методе максимально правдоподобного обнаружения ненулевого (околонулевого) видимого движения исследуемого объекта (2.40).

Обосновывается это тем, что условия формирования всех измерений на выборке либо можно считать одинаковыми, либо зависимость СКО позиционных измерений от блеска и координат объектов на кадре легко аппроксимируется по экспериментальным данным.

Исследования показывают, что зависимость СКО позиционных измерений от координат объектов на кадре практически отсутствует. В свою очередь, зависимость СКО позиционных измерений от блеска значима и иногда в литературе называется астрометрическим уравнением блеска [108, 109, 110, 116, 117, 169]. Блеск астероидов тусклее, чем блеск опорных звезд, как правило, не менее чем на 2-3 звездные величины.

Тем самым, при использовании СКО измерений опорных звезд как внешней оценки СКО измерений в исследуемой серии необходимы дополнительные

поправки, учитывающие снижение блеска в исследуемой выборке, по отношению блеска в обучающей/внешней.

Это является недостатком использования оценки СКО позиционных измерений по опорным звездам.

Подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения ненулевого (околонулевого) видимого движения объекта. Разработанные подстановочные вычислительные методы (2.34), (2.39) и (2.40) максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта представляют собой следующую последовательность действий (рисунок 2.2).

1. Выбор серии Ω_{set} (2.7) из N_{mea} измерений исследуемого объекта с координатами в системе координат (СК) базового кадра после внутрикадровой обработки. Задаются входные данные вычислительного метода. Для подстановочного вычислительного метода (2.39) задаётся известная дисперсия $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma^2$ оценок координат объекта, а для метода (2.40) – внешняя оценка дисперсии $\hat{\sigma}_{out}^2$ оценок положения объекта. Также для каждого подстановочного вычислительного метода (2.34), (2.39) и (2.40) задаются предельно допустимые (критические) значения ℓ_{cr} .

2. Для N_{mea} измерений исследуемой серии Ω_{set} (2.7) производится следующая последовательность операций.

2.1. МНК-оценка векторов параметров модели прямолинейного равномерного видимого движения исследуемого объекта вдоль каждой координаты (оценки координат \hat{x}_0 и \hat{y}_0 положения объекта на момент τ_0 привязки базового кадра и оценки скоростей \hat{V}_x и \hat{V}_y видимого движения вдоль каждой координаты) согласно выражениям (2.15) – (2.18).

2.2. Определение интерполированных оценок координат \hat{x}_k и \hat{y}_k исследуемого объекта на всех кадрах исследуемой серии с помощью выражений (2.19) и (2.20).

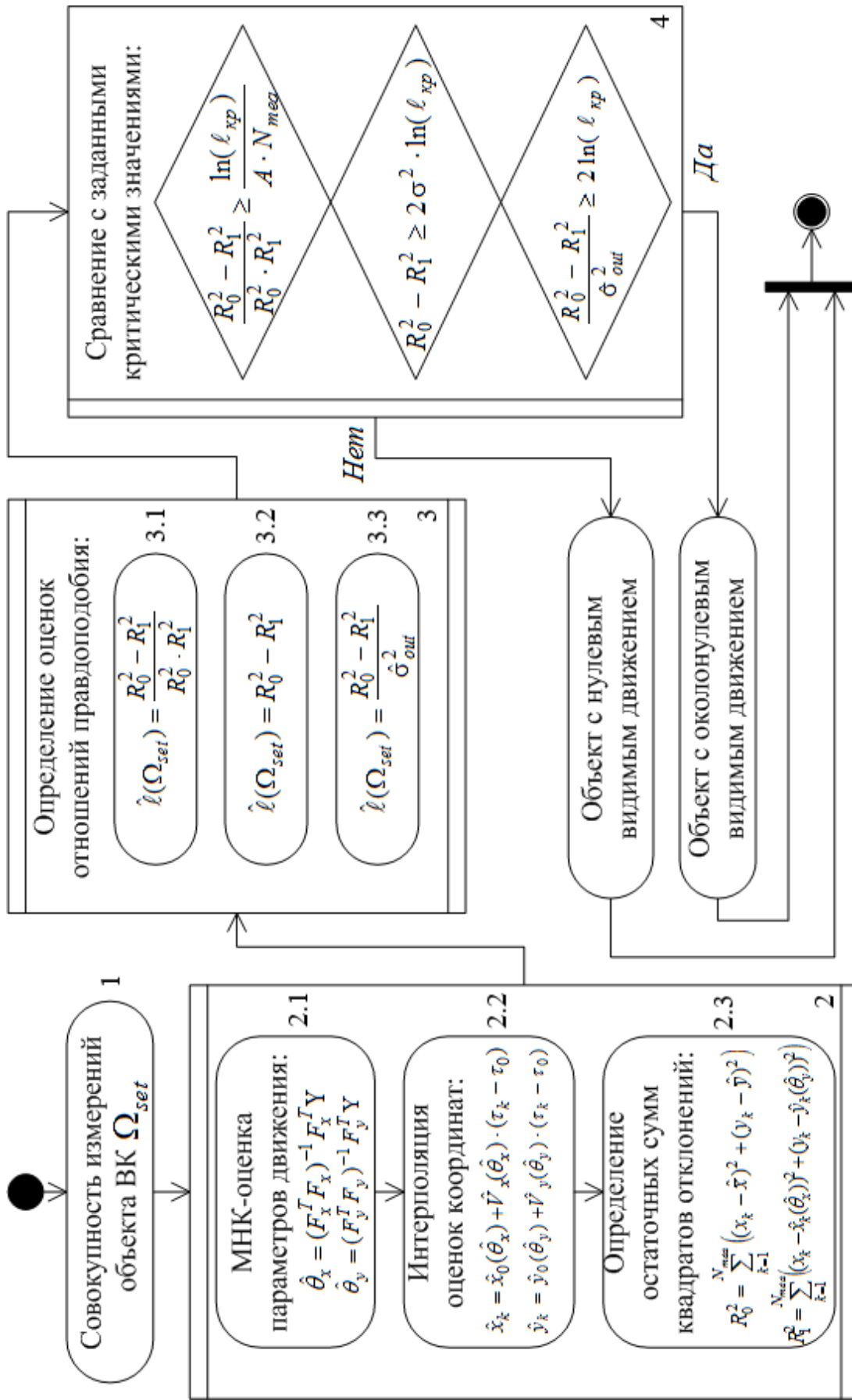


Рисунок 2.2 – UML-диаграмма подстановочного вычислительного метода обнаружения

околонулевого видимого движения объекта

2.3. Определение значений остаточных сумм R_0^2 и R_1^2 квадратов отклонений положения исследуемого объекта в предположении истинности гипотезы о нулевом (H_0) (2.1) и альтернативы о ненулевом (H_1) (2.2) видимом движении на данной серии измерений Ω_{set} (2.7) согласно выражениям (2.26) и (2.27) соответственно.

3. Определяются значения оценок ОП $\hat{\ell}(\Omega_{set})$ для всех разработанных подстановочных вычислительных методов максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта.

3.1. При неизвестной дисперсии измерений положения объекта на кадрах используется выражение (2.34).

3.2. При известной дисперсии измерений положения объекта на кадрах используется выражение (2.39).

3.3. При использовании внешней оценки дисперсии измерений положения исследуемого объекта – выражение (2.40).

4. Полученные в блоке 3 значения оценок ОП $\hat{\ell}(\Omega_{set})$ для всех синтезированных подстановочных вычислительных методов максимально правдоподобного обнаружения сравниваются с заданными в блоке 1 предельно допустимыми (критическими) значениями ℓ_{cr} , которые соответствует им.

На основании подстановочных вычислительных методов обнаружения с известной (2.39), неизвестной (2.34) дисперсией измерений положения объекта, а также с использованием её внешней оценки (2.40), принимается решение об обнаружении околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров.

Таким образом, исследуемый объект может являться объектом с нулевым видимым движением или же объектом с околонулевым видимым движением.

Соответственно, и множество измерений положения исследуемого объекта, которое получено на серии цифровых кадров, может принадлежать объекту с нулевым или околонулевым видимым движением.

2.3 Разработка вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта, основанного на критериях значимости скорости видимого движения объекта

Сведение проверки гипотезы об околонулевом видимом движении исследуемого объекта к задаче проверки статистической значимости скорости видимого движения объекта на исследуемой серии измерений. Недостатком подстановочных вычислительных методов (подраздел 2.2), основанных на критерии максимального правдоподобия, является недостаточная обоснованность его использования в ситуации неопределённости с частью параметров функции правдоподобия. Вторым недостатком такого решения является необходимость подбора граничного значения решающей статистики.

Кроме того, в данном конкретном случае можно отметить, что указанные подстановочные вычислительные методы не эффективны при незначительном (околонулевом) видимом движении объекта.

Модели (2.3) и (2.4) видимого движения исследуемого объекта независимо вдоль каждой координаты являются классическими линейными регрессионными моделями с двумя параметрами, физически означающими начальное положение и скорость объекта вдоль каждой из координат.

Таким образом, в исследуемом случае альтернатива H_1 (2.2) о том, что исследуемый объект является объектом с околонулевым видимым движением (объект Солнечной системы), равносильна гипотезе о статистической значимости фактора скорости видимого движения объекта на исследуемой серии измерений.

Для обнаружения околонулевого видимого движения исследуемых объектов (для проверки истинности H_1) предлагается выполнить проверку значимости фактора скорости видимого движения [1, 125].

Данную проверку можно реализовать в виде двух однокоординатных (покоординатных) или одного двухкоординатного решающего правила.

Покоординатные решающие правила проверки статистической значимости скорости видимого движения объекта на исследуемой серии измерений (t-критерий Стьюдента). В основе покоординатного решающего правила обнаружения околонулевого видимого движения (выявления значимости фактора скорости) у исследуемого объекта отдельно вдоль одной координаты предлагается использовать t-критерий Стьюдента [75, 118, 125].

При этом решение об обнаружении околонулевого видимого движения (значимости фактора скорости вдоль координат) исследуемого объекта принимается в случае срабатывания хотя бы одного из двух покоординатных решающих правил.

В качестве предельно допустимого (критического) значения t-критерия Стьюдента для принятия решения об околонулевом видимом движении исследуемого объекта выбирается табличное значение распределения Стьюдента с соответствующей степенью свободы и необходимым значением уровня значимости α [75, 118, 125].

Уровень значимости α определяет вероятность ошибки первого рода (вероятность отвергнуть истинную гипотезу H_0 о нулевой скорости видимого движения).

Таким образом, если значение статистики t-распределения Стьюдента хотя бы для одной из координат на рассматриваемой серии измерений превысит предельно допустимое, то фактор скорости видимого движения соответствующего объекта вдоль данной координаты считается значимым.

Следовательно, объект признается объектом с ненулевым (околонулевым) видимым движением (движущимся объектом).

Так как видимое движение осуществляется вдоль обеих координат независимо, то исследуемая серия измерений может быть признана принадлежащей исследуемому объекту с нулевым видимым движением (не является объектом Солнечной системы), только если предположения о значимости скорости видимого движения исследуемого объекта отвергнуты для обеих координат.

Двухкоординатное решающее правило проверки статистической значимости скорости видимого движения объекта на исследуемой серии измерений (f-критерий Фишера). Видимое движение объекта осуществляется на плоскости. При этом гипотеза о значимости общей скорости объекта может обладать большей различимостью, чем гипотезы о значимости скорости движения объекта вдоль каждой из координат отдельно.

В этой связи предлагается дополнительно проводить проверку альтернативы об околонулевом видимом движении исследуемого объекта на серии измерений с помощью проверки значимости общей скорости видимого движения исследуемого объекта. Для данной проверки целесообразно использовать f-критерий Фишера [16, 120].

F-критерий Фишера целесообразно использовать при неизвестной дисперсии оценок положения исследуемого объекта на данной серии измерений.

Это обосновывается тем, что закон распределения f-критерия проверки значимости общей скорости видимого движения исследуемого объекта не зависит от законов распределения ошибок измерений положения объекта на серии измерений [75, 134, 159, 168].

При этом в f-критерии Фишера используются лишь остаточные суммы квадратов отклонений [8] оценок положения исследуемого объекта в предположении истинности гипотез о нулевом (H_0) и ненулевом (H_1) видимом движении на данной серии измерений [16].

Также существуют табличные значения статистики распределения Фишера [16, 120].

Исследуемый объект будет считаться объектом с ненулевой (околонулевой) скоростью видимого движения, если значение критерия значимости оценки общей скорости видимого движения (при использовании f-критерия Фишера) или же вдоль одной из координат (при использовании t-критерия Стьюдента) больше, чем соответствующее наперед заданное критическое значение в соответствии со значением уровня значимости α .

Покоординатные вычислительные методы обнаружения околонулевого видимого движения астероида вдоль каждой координаты с применением t-критерия Стьюдента. Для определения статистической значимости фактора скорости модели (2.3) и (2.4) линейного видимого движения необходимо определить значение t-критерия Стьюдента значимости скорости видимого движения исследуемого объекта вдоль каждой координаты.

Значение t-критерия Стьюдента значимости скорости видимого движения вдоль любой координаты (например, x) имеет вид [16]:

$$t_x = \hat{V}_x / (\hat{\sigma}_x \sqrt{[(F_x^T F_x)^{-1}]_{ii}}), \quad (2.41)$$

где $[(F_x^T F_x)^{-1}]_{ii}$ – i -й диагональный элемент матрицы $(F_x^T F_x)^{-1}$, обратной матрице $F_x^T F_x$, которая сформирована основываясь на матрице частных производных F_x (2.13).

Также согласно выражению (2.13) для матрицы частных производных матрица $F_x^T F_x$ имеет вид:

$$F_x^T F_x = \begin{pmatrix} N_{mea} & \sum_{k=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau k} \\ \sum_{k=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau k} & \sum_{k=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau k}^2 \end{pmatrix}. \quad (2.42)$$

Матрица, обратная матрице (2.42), имеет вид:

$$(F_x^T F_x)^{-1} = (N_{mea} D - C^2)^{-1} \cdot \begin{pmatrix} D & -C \\ -C & N_{mea} \end{pmatrix}. \quad (2.43)$$

Исходя из выражения (2.43) значение t-критерия Стьюдента значимости

скорости видимого движения вдоль координаты x в выражении (2.41) может быть уточнено следующим образом:

$$t_x(\Omega_{set}) = \hat{V}_x / \left(\hat{\sigma}_x \sqrt{\frac{N_{mea}}{N_{mea}D - C^2}} \right). \quad (2.44)$$

Выражение, аналогичное (2.44), для координаты y имеет вид:

$$t_y(\Omega_{set}) = \hat{V}_y / \left(\hat{\sigma}_y \sqrt{\frac{N_{mea}}{N_{mea}D - C^2}} \right). \quad (2.45)$$

Статистика критерия значимости скорости видимого движения вдоль координаты x имеет стандартное вероятностное распределение Стьюдента с $N_{mea} - m$ степенями свободы [16, 82, 115], где N_{mea} – количество измерений, а m – количество оцениваемых параметров видимого движения объекта.

Гипотеза H_0 (2.1) (гипотеза о том, что данная совокупность измерений принадлежит объекту с нулевой скоростью видимого движения) должна быть отвергнута, если модуль полученных согласно выражений (2.44) или (2.45) значений статистики критерия значимости скорости превысит модуль $\alpha/2$ -квантиля t -распределения Стьюдента с $N_{mea} - m$ степенями свободы [16, 75, 82]. Например, когда количество измерений положения объекта равно $N_{mea} = 4$, а количество оцениваемых параметров движения исследуемого объекта равно $m = 2$ (рассматриваемая модель видимого движения имеет два параметра – начальное положение и скорость), то число степеней свободы $N_{mea} - m$ для t -распределения Стьюдента будет равно 2.

Соответственно, при значении уровня значимости равном $\alpha = 10^{-3}$, табличные предельно допустимые (критические) значения $t_{x\max}$ и $t_{y\max}$ статистик t -распределения Стьюдента с двумя степенями свободы для каждой координаты

ты составляет $t_{x\max} = t_{y\max} = 31.59$ [16, 120].

Покоординатные вычислительные методы обнаружения околонулевого видимого движения объекта вдоль координат x и y с применением t -критерия Стьюдента имеют следующий вид соответственно:

$$\hat{V}_x / \left(\hat{\sigma}_x \sqrt{\frac{N_{mea}}{N_{mea}D - C^2}} \right) \geq t_{x\max}; \quad (2.46)$$

$$\hat{V}_y / \left(\hat{\sigma}_y \sqrt{\frac{N_{mea}}{N_{mea}D - C^2}} \right) \geq t_{y\max}, \quad (2.47)$$

причем оценки скоростей \hat{V}_x и \hat{V}_y видимого движения исследуемого объекта вдоль каждой координаты могут быть получены согласно выражениям (2.16) и (2.18), соответственно, а оценки дисперсий $\hat{\sigma}_x$ и $\hat{\sigma}_y$ оценок координат исследуемого объекта на серии измерений – согласно выражениям (2.22) и (2.23).

Двухкоординатный вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f -критерия Фишера. Согласно выражениям (2.46) и (2.47) производится проверка значимости фактора скорости отдельно вдоль каждой координаты. Однако в общем случае объект движется вдоль обеих координат одновременно.

Покоординатная проверка значимости скорости может снижать различимость проверяемых гипотез. Поэтому представляется целесообразным провести также проверку значимости общей скорости видимого движения исследуемого объекта. Произвести такую проверку можно следующим образом.

Общий вид f -критерия проверки значимости общей скорости видимого движения исследуемого объекта (истинности гипотезы H_1) имеет вид [8]:

$$f(\Omega_{set}) = \frac{R_0^2 - R_1^2}{R_1^2} \cdot \frac{N_{mea} - r}{w}, \quad (2.48)$$

где $w = 1$ – количество исследуемых факторов линейной регрессионной модели (в исследуемом случае этим фактором является скорость видимого движения), гипотеза о которых проверяется;

r – ранг матрицы частных производных (2.13) F_x ($\text{rang } F_x = r \leq \min(m, N_{mea})$).

Для модели линейного видимого движения вдоль одной координаты ранг матрицы F_x равен 2, так как количество оцениваемых параметров видимого движения исследуемого объекта равно $m = 2$.

В исследуемом случае независимого линейного видимого движения вдоль двух координат количество оцениваемых параметров движения исследуемого объекта равно $m = 4$, соответственно и ранг матрицы F_x будет равен $r = 4$, так как $r = m$.

Статистика (2.48) имеет вероятностное распределение Фишера с (w , $N_{mea} - r$) степенями свободы [16, 75, 159, 168].

Её распределение соответствует распределению отношения двух независимых случайных величин, имеющих распределение хи-квадрат [167, 186] со степенями свободы w и $N_{mea} - r$.

Например. Пусть количество CCD-кадров N_{fr} в исследуемой серии кадров равно $N_{fr} = 4$, и на каждом кадре присутствует измерение положения исследуемого объекта.

Следовательно, количество этих измерений по двум координатам равно $2 \cdot N_{mea} = 8$, $w = 1$, а ранг r матрицы частных производных (2.11) F_x равен $r = 4$. Тогда статистика (2.48) имеет вероятностное распределение Фишера с (1, 4) степенями свободы.

Для определения предельно допустимого (критического) табличного значения статистики распределения Фишера необходимо использовать наперед заданное значение уровня значимости α .

Данное значение является вероятностью ложного обнаружения объекта с

околонулевой скоростью видимого движения (принятие решения о справедливости H_1 при условии справедливости гипотезы H_0). Например, при $\alpha = 10^{-3}$, предельно допустимое (критическое) f_{cr} табличное значение статистики распределения Фишера с (1, 4) степенями свободы составляет $f_{cr} = 74.13$ [16, 120, 134].

Двухкоординатное решающее правило обнаружения околонулевого видимого движения астероида с применением f-критерия Фишера имеет следующий вид:

$$\frac{R_0^2 - R_1^2}{R_1^2} \cdot \frac{N_{mea} - r}{w} \geq f_{cr}. \quad (2.49)$$

Если значение статистики в левой части выражения (2.49) оказалось меньше предельно допустимого значения f_{cr} , то гипотеза H_0 признается истинной и рассматриваемая серия измерений Ω_{set} признается принадлежащей объекту с нулевой скоростью видимого движения (объект не является объектом Солнечной системы).

В противном случае рассматриваемая серия измерений Ω_{set} считается принадлежащей объекту с околонулевой скоростью видимого движения (объекту Солнечной системы).

После преобразований и переноса констант в правую часть неравенства (2.49) двухкоординатный вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта вдоль каждой координаты с применением f-критерия Фишера имеет следующий вид:

$$\frac{R_0^2 - R_1^2}{R_1^2} \geq \frac{wf_{cr}}{N_{mea} - r}. \quad (2.50)$$

Вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта, основанный на критериях значимости скорости видимого движения объекта. Разработанный вычислительный метод представляет собой следующую последовательность действий (рисунок 2.3).

1. Выбор серии Ω_{set} (2.7) из N_{mea} измерений исследуемого объекта с координатами в системе координат (СК) базового кадра после внутрикадровой обработки.

2. Для N_{mea} измерений исследуемой серии Ω_{set} (2.7) производится следующая последовательность операций.

2.1. МНК-оценка векторов параметров модели прямолинейного равномерного видимого движения исследуемого объекта вдоль каждой координаты (оценки координат \hat{x}_0 и \hat{y}_0 положения объекта на момент τ_0 привязки базового кадра и оценки скоростей \hat{V}_x и \hat{V}_y видимого движения вдоль каждой координаты) согласно выражениям (2.15) – (2.18).

2.2. Определение интерполированных оценок координат \hat{x}_k и \hat{y}_k исследуемого объекта на кадрах серии с помощью выражений (2.19) и (2.20).

2.3. Определение значений остаточных сумм R_0^2 и R_1^2 квадратов отклонений положения исследуемого объекта в предположении истинности гипотез о нулевом (H_0) (2.1) и ненулевом (H_1) (2.2) видимом движении на данной серии измерений Ω_{set} (2.7) согласно выражениям (2.26) и (2.27) соответственно.

2.4. Нахождение оценок дисперсий $\hat{\sigma}_x^2$ и $\hat{\sigma}_y^2$ измерений координат положения объекта на серии измерений Ω_{set} согласно выражениям (2.22) и (2.23).

3. Определение значений критериев проверки значимости скорости видимого движения исследуемого объекта:

3.1. t-критериев Стьюдента $t_x(\Omega_{set})$ и $t_y(\Omega_{set})$ проверки значимости скорости видимого движения исследуемого объекта вдоль каждой координаты согласно выражениям (2.44) и (2.45).

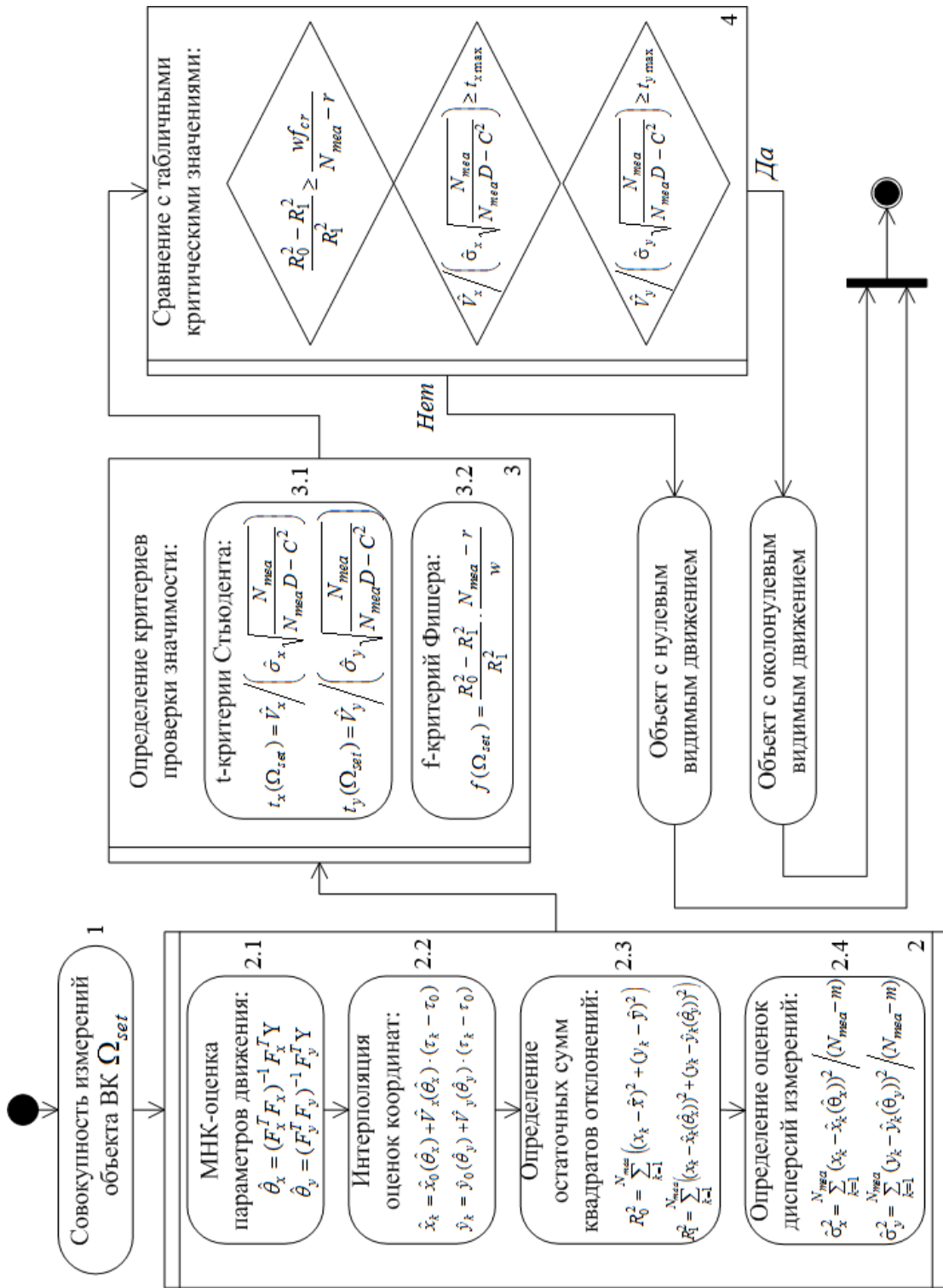


Рисунок 2.3 – UML–диаграмма вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта, основанного на критериях значимости скорости видимого движения объекта

3.2. f -критерия Фишера $f(\Omega_{set})$ проверки значимости общей скорости видимого движения исследуемого объекта вдоль обеих координат с помощью выражения (2.48).

4. На основании двухкоординатного (2.50) и покоординатных решающих правил (2.46) и (2.47) принимается решение об обнаружении околонулевого видимого движения исследуемого объекта.

Таким образом, исследуемый объект на серии цифровых кадров может являться звездой с нулевым видимым движением (не являться объектом Солнечной системы) или же объектом Солнечной системы с околонулевым видимым движением.

Сравнительный анализ вычислительных методов обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта, основанных на критериях максимального правдоподобия и f -критерии Фишера. F -критерий согласия Фишера в качестве решающего правила обнаружения околонулевого видимого движения астероида целесообразно использовать при неизвестной дисперсии оценок положения исследуемого объекта на данной серии измерений.

В этом случае традиционно используется подстановочное решающее правило максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта при неизвестной дисперсии измерений положения объекта на кадрах из выражения (2.34).

Для использования подстановочного решающего правила вместо неизвестной дисперсии измерений положения объекта на кадрах используются условные по гипотезе H_0 и альтернативе H_1 оценки дисперсии $\hat{\sigma}_0^2$ и $\hat{\sigma}_1^2$ оценок координат исследуемого объекта из выражений (2.24) и (2.25).

Однако для каждого значения оценок дисперсий $\hat{\sigma}_0^2$ и $\hat{\sigma}_1^2$ необходимо использовать различные критические значения ℓ_{cr} , которые им соответствуют.

Данные значения определяются в соответствии с уровнем значимости α при моделировании гипотезы H_0 , когда значение модуля приведенной скоро-

сти видимого движения равно 0.

Однако для f -критерия согласия Фишера уже существуют табличные значения статистики распределения Фишера f_{cr} [16, 120, 134].

Без учёта констант левая часть неравенства (2.50) отличается от левой части неравенства (2.34) для подстановочного решающего правила максимально правдоподобного обнаружения ненулевого (околонулевого) видимого движения объекта при неизвестной дисперсии измерений положения объекта на кадрах отсутствием в знаменателе дроби множителя R_0^2 , как остаточной суммы квадратов отклонений положения исследуемого объекта в предположении истинности гипотезы H_0 о нулевом видимом движении на серии измерений.

2.4 Эвристический метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта

Особенности эвристического метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта. После формирования (подраздел 1.3.2) внутреннего каталога (ВК) объектов, неподвижных на серии кадров (объектов с нулевым видимым движением), необходимо отобрать объекты ВК с околонулевым видимым движением. Объекты могли попасть в ВК имея околонулевое видимое движение, соизмеримое с ошибками измерения. Из-за особенностей процесса обнаружения-измерения [32, 44] возможно появление ситуации, когда у исследуемого объекта выявлено видимое движение, однако оценка модуля его скорости $\hat{V} = \sqrt{\hat{V}_x^2 + \hat{V}_y^2}$ будет близка или равна нулю ($\hat{V} = 0$). Для ликвидации самой возможности появления такого нонсенса предлагается устанавливать предел минимальной допустимой оценки скорости \hat{V}_{\min} видимого движения околонулевого видимого движения у исследуемого объекта. Использование данного предельно допустимого значения улучшит показатели качества обнаружения околонулевого видимого движения у исследуемых объектов. При формирова-

нии ВК объектов, неподвижных на серии кадров, измерения положения объекта (не более одного с каждого кадра) признаются принадлежащими одному объекту, если они удалены друг от друга не больше чем на значение наперед заданного радиуса R_{static} неподвижности.

Эвристический метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта. Принятие решения об обнаружении околонулевого видимого движения исследуемого объекта происходит, основываясь на следующей последовательности операций (рисунок 2.4).

1. Выбор очередной серии Ω_{set} (2.7) из N_{mea} измерений объекта с его координатами в СК базового кадра после внутрикадровой обработки [178].

2. Если количество измерений положения исследуемого объекта N_{mea} меньше минимального допустимого количества измерений $N_{VK\min}$ для проведения исследования объекта на наличие у него околонулевого видимого движения, то измерения, принадлежащие данному объекту, не рассматриваются.

3. Для N_{mea} измерений очередной серии Ω_{set} (2.7) производится следующая последовательность операций.

3.1. МНК-оценка положения \hat{x}_0 и \hat{y}_0 исследуемого объекта на момент τ_0 привязки базового кадра 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 (2.15) – (2.18).

3.2. Определение интерполированных оценок координат \hat{x}_k и \hat{y}_k исследуемого объекта на моменты привязки всех кадров исследуемой серии с помощью выражений (2.19) и (2.20).

3.3. Определение значений остаточных сумм R_0^2 и R_1^2 квадратов отклонений [16] положения исследуемого объекта в предположении истинности гипотез о нулевом (H_0) (2.1) и околонулевом (H_1) (2.2) видимом движении соответственно на данной серии измерений с помощью выражений (2.26) и (2.27).

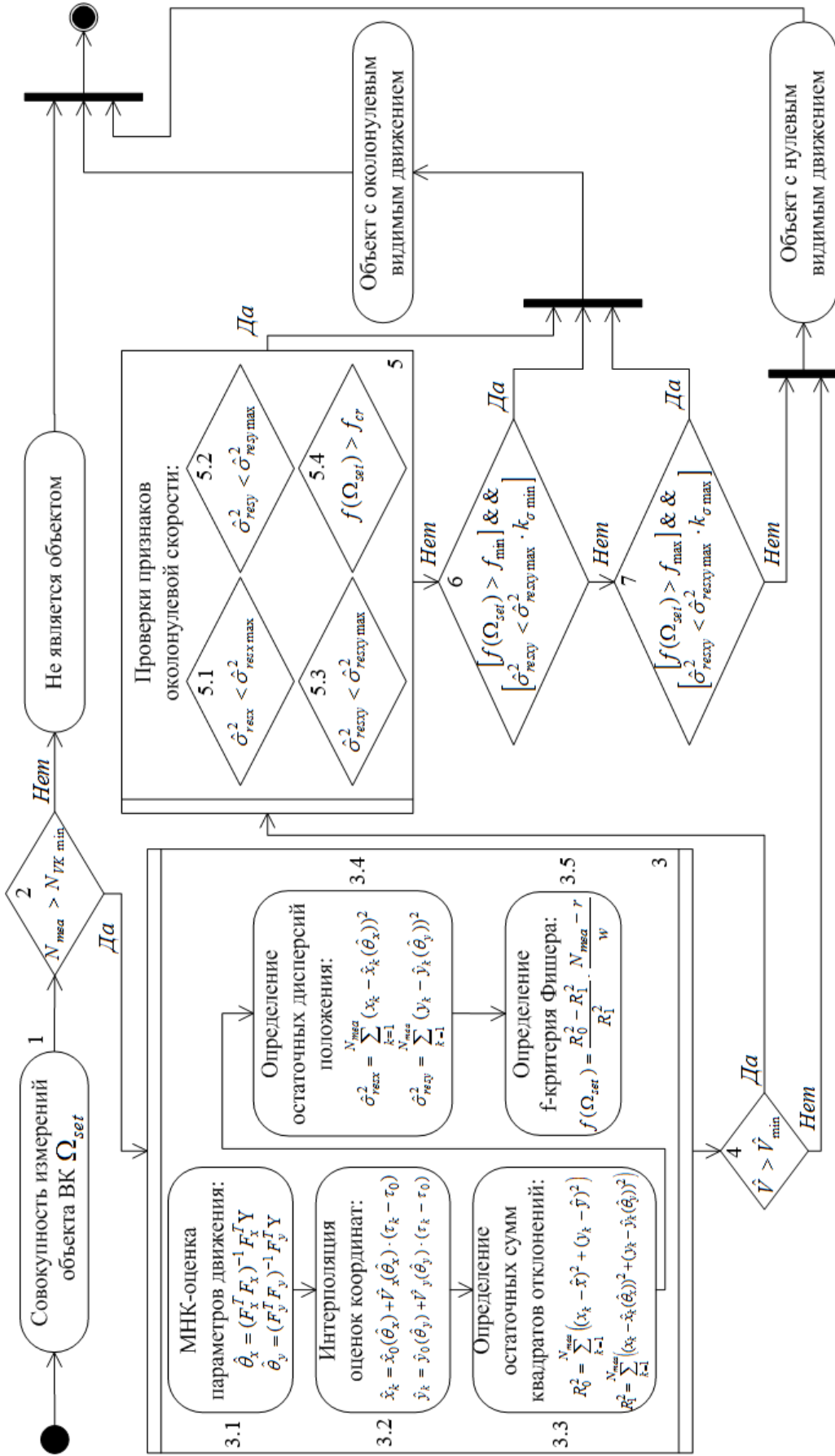


Рисунок 2.4 – UML–диаграмма эвристического метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта

3.4. Определение остаточных дисперсий $\hat{\sigma}_x^2$ и $\hat{\sigma}_y^2$ оценок координат исследуемого объекта соответственно с помощью следующих выражений:

$$\hat{\sigma}_x^2 = \sum_{k=1}^{N_{mea}} (x_k - \hat{x}_k(\hat{\theta}_x))^2 / (N_{mea} - m); \quad (2.51)$$

$$\hat{\sigma}_y^2 = \sum_{k=1}^{N_{mea}} (y_k - \hat{y}_k(\hat{\theta}_y))^2 / (N_{mea} - m). \quad (2.52)$$

3.5. Определение значения *f*-критерия Фишера $f(\Omega_{set})$ значимости общей скорости видимого движения с помощью выражения (2.48), используя выражения (2.26) и (2.27) для остаточных сумм R_0^2 и R_1^2 квадратов отклонений положения исследуемого объекта соответственно.

4. Проверка на наличие у объекта околонулевой скорости видимого движения производится (на блоки 5, 6, 7) если оценка модуля скорости \hat{V} его видимого движения больше заданного минимального предела допустимого модуля скорости \hat{V}_{min} видимого движения:

$$\hat{V} > \hat{V}_{min}. \quad (2.53)$$

5. Исследуемый объект считается объектом с околонулевой скоростью видимого движения (объектом Солнечной системы), если:

5.1. остаточная дисперсия $\hat{\sigma}_x^2$ оценок положения объекта по координате x из выражения (2.51) меньше, чем заданное критическое значение $\hat{\sigma}_{resx\max}^2$:

$$\hat{\sigma}_x^2 < \hat{\sigma}_{resx\max}^2. \quad (2.54)$$

5.2. остаточная дисперсия $\hat{\sigma}_y^2$ оценок положения объекта по координате

у из выражения (2.52) меньше, чем заданное критическое значение $\hat{\sigma}_{resy\max}^2$:

$$\hat{\sigma}_y^2 < \hat{\sigma}_{resy\max}^2. \quad (2.55)$$

5.3. суммарная остаточная дисперсия $\hat{\sigma}_{resxy}^2 = \hat{\sigma}_x^2 + \hat{\sigma}_y^2$ оценок положения объекта по координатам x и y , которая равна $\hat{\sigma}_{resxy}^2 = R_1^2 / (N_{mea} - m)$, меньше, чем заданное критическое значение $\hat{\sigma}_{resxy\max}^2$:

$$\hat{\sigma}_{resxy}^2 < \hat{\sigma}_{resxy\max}^2. \quad (2.56)$$

5.4. значение f-критерия Фишера $f(\Omega_{set})$ значимости общей скорости видимого движения больше, чем его заданное критическое значение f_{cr} :

$$f(\Omega_{set}) > f_{cr}. \quad (2.57)$$

6. Кроме того исследуемый объект считается объектом с околонулевой скоростью видимого движения (объектом Солнечной системы), если суммарная остаточная дисперсия $\hat{\sigma}_{resxy}^2$ оценок координат x и y исследуемого объекта будет меньше, чем заданное предельно допустимое значение $\hat{\sigma}_{resxy\max}^2$, умноженное на минимальный множитель дисперсии $k_{\sigma\min}$, а значение f-критерия Фишера значимости общей скорости видимого движения превышает минимальное допустимое значение f_{\min} :

$$\left[\hat{\sigma}_{resxy}^2 < \hat{\sigma}_{resxy\max}^2 \cdot k_{\sigma\min} \right] \& \& \left[f(\Omega_{set}) > f_{\min} \right]. \quad (2.58)$$

7. Также объект считается объектом с околонулевой скоростью видимого движения (объектом Солнечной системы), если суммарная остаточная дисперсия $\hat{\sigma}_{resxy}^2$ оценок координат x и y объекта будет меньше, чем заданное предельно допустимое значение $\hat{\sigma}_{resxy\max}^2$, умноженное на максимальный множитель дисперсии $k_{\sigma\max}$, а значение f -критерия Фишера значимости общей скорости видимого движения превышает максимальное допустимое значение f_{\max} :

$$\left[\hat{\sigma}_{resxy}^2 < \hat{\sigma}_{resxy\max}^2 \cdot k_{\sigma\max} \right] \& \& \left[f(\Omega_{set}) > f_{\max} \right]. \quad (2.59)$$

Исходя из содержания пунктов 4 – 7 данного эвристического метода правило обнаружения околонулевой скорости видимого движения объекта с использованием выражений (2.53) – (2.59) может быть представлено следующим выражением:

$$\begin{aligned} & \left[\hat{V} > \hat{V}_{\min} \right] \& \& \left\{ \left(\left[\hat{\sigma}_x^2 < \hat{\sigma}_{resx\max}^2 \right] \& \& \left[\hat{\sigma}_y^2 < \hat{\sigma}_{resy\max}^2 \right] \& \& \right. \right. \\ & \left. \& \& \left[\hat{\sigma}_{resxy}^2 < \hat{\sigma}_{resxy\max}^2 \right] \& \& \left[f(\Omega_{set}) > f_{cr} \right] \right\} \parallel \\ & \parallel \left(\left[\hat{\sigma}_{resxy}^2 < \hat{\sigma}_{resxy\max}^2 \cdot k_{\sigma\min} \right] \& \& \left[f(\Omega_{set}) > f_{\min} \right] \right) \parallel \\ & \left. \parallel \left(\left[\hat{\sigma}_{resxy}^2 < \hat{\sigma}_{resxy\max}^2 \cdot k_{\sigma\max} \right] \& \& \left[f(\Omega_{set}) > f_{\max} \right] \right) \right\}. \quad (2.60) \end{aligned}$$

Константы эвристического метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта. При проведении исследований эвристического метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта и его применения использовались следующие значения констант вычислительного метода.

Предельно допустимые значения остаточных дисперсий оценок координат исследуемого объекта соответственно $\hat{\sigma}_x^2 = \hat{\sigma}_y^2 = 0.125$ пикселя. Предельно допустимое значение суммарной остаточной дисперсии оценок координат x и y исследуемого объекта $\hat{\sigma}_{resxy\max}^2 = 0.25$ пикселя. Предельно допустимое значение $f_{cr} = 400$ для f -критерия Фишера $f(\Omega_{set})$ значимости общей скорости видимого движения, а также его максимальное $f_{\max} = 30000$ и минимальное $f_{\min} = 60$ допустимые значения. Минимальное значение допустимого модуля скорости видимого движения исследуемого объекта $\hat{V}_{\min} = 0.5$ (пикс./кадр). Радиус неподвижности для формирования ВК $R_{static} = 2$ пикселя.

Минимальный $k_{\sigma\min} = 0.5$ и максимальный $k_{\sigma\max} = 1.5$ множители для суммарной остаточной дисперсии оценок положения исследуемого объекта на серии цифровых кадров.

Минимальное допустимое количество $N_{VK\min}$ измерений положения исследуемого объекта ВК объектов, неподвижных на серии кадров, зависит от количества кадров и задается в одном из следующих форматов: k/m – в m кадрах должно быть не менее k измерений объектов; например, 3/3, 4/4 и т.д.; $k/(m \div \ell)$ – в серии от m до ℓ кадров должно быть не менее k измерений объектов; например, 5/(7–9), 6/(10–13) и т.д.; $\chi_{VK} / > m$ – в серии от m кадров должно быть не менее $\chi_{VK} \cdot N_{fr}$ измерений объектов, где N_{fr} – количество кадров в серии; например, 0.5/>14 и т.д.

Описанные выше предельно допустимые значения констант вычислительного метода являются универсальными и не зависят от количества N_{mea} измерений объекта серии Ω_{set} (2.7) при условии, что $N_{mea} > N_{VK\min}$.

Опытная эксплуатация данных предельно допустимых значений констант проводилась в случае, когда количество измерений положения объекта $N_{mea} = 4$.

Выводы по разделу 2

1. Разработан подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта. Метод основан на подстановочных решающих правилах обнаружения видимого движения объекта. Использование подстановочных решающих правил обосновано отсутствием априорных данных о таких параметрах функции правдоподобия как параметры видимого движения объекта и дисперсия позиционных измерений исследуемой серии. Поэтому параметры функции правдоподобия заменяются их оценками. Рассмотрены случаи с неизвестной и известной дисперсиями оценками положения объекта на кадрах, а также с использованием её внешней оценки. Данный метод был разработан для сравнительного анализа эффективности нового подхода в синтезе методов обнаружения околонулевого движения, основанного на критериях значимости, и методов старого подхода, основанного на критериях байесовской группы.

2. Разработан вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта, основанный на критериях значимости скорости видимого движения объекта. Основной особенностью разработанного вычислительного метода является использование решающих правил проверки статистической значимости скорости видимого движения объекта на серии измерений с использованием таких критериев проверки значимости как t -критерия Стьюдента и f -критерия Фишера.

3. Разработан и исследован эвристический метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта, основанный на одновременном использовании критерия остаточных дисперсий измерений положения объекта и f -критерия Фишера, как критерия значимости общей скорости видимого движения объекта.

Материалы раздела опубликованы в работах [4, 5, 12, 13, 34, 60, 61, 72, 73, 74, 141, 178, 189].

РАЗДЕЛ 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ОКОЛОНУЛЕВОГО ВИДИМОГО ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА

3.1 Метод оценки показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на основе статистического моделирования

Постановка задачи. Показателями качества обнаружения принято считать условную вероятность ошибок первого α (условная вероятность ложного обнаружения, УВЛО, $F_{false} = \alpha$) и второго β (пропуск объекта с заданными свойствами, в данном случае – объекта с ненулевым (околонулевым) видимым движением) рода [29, 66] (подробнее в подразделе 2.1).

В диссертации 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 $D_{true} = 1 - \beta$. Обнаружение околонулевого видимого движения исследуемого объекта производится на серии N_{fr} CCD-кадров. Поэтому исследуются характеристики показателей качества обнаружения на серии кадров, а не на кадре.

Необходимо провести исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров методом статистического моделирования при использовании известных и разработанных вычислительных методов обнаружения околонулевого видимого движения объекта (подразделы 2.2 – 2.4).

Исследуемые методы обнаружения околонулевого видимого движения объекта методом статистического моделирования. В разделе диссертации методом статистического моделирования исследуются показатели качества обнаружения вычислительных методов обнаружения околонулевого видимого движения объекта, введённые в подразделах 2.2 – 2.4:

– подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта при:

1) неизвестной дисперсии измерений положения объекта на кадрах с помощью выражения (2.34);

2) известной дисперсии измерений положения объекта на кадрах с помощью выражения (2.39);

3) использовании внешней оценки дисперсии измерений положения объекта на кадрах с помощью выражения (2.40);

– двухкоординатный вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f -критерия Фишера из выражения (2.50).

Обоснование использования статистического моделирования при исследовании показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения. В практической деятельности часто известен закон распределения переменных (входных параметров) некой функции. Данный закон может быть задан в аналитическом виде или в форме статистического ряда выборочных распределений. Необходимо определить статистические характеристики значений исследуемой функции.

Существует два метода решения данной задачи. Первый – аналитический [28, 29, 103]. Его использование сводится к нахождению аналитических выражений закона распределения или числовых характеристик значений исследуемой функции на основе заданных закона распределения или числовых характеристик значений переменных данной функции.

Данный метод часто связан с практически неопределимыми математическими затруднениями. Даже в том случае, когда аналитические выражения можно получить, их сложность (бесконечные ряды, специальные функции) не допускает ни символьного анализа, ни точной табуляции путем их программирования.

В этой связи более уместен второй метод – метод статистического ими-

тационного моделирования [38, 62, 83, 90, 191]. При его использовании моделируются переменные исследуемой функции (входные данные вычислительного метода) согласно заданным законам распределения, а значения функции (вычислительного метода) определяются согласно её определению. Далее вычисляются статистические характеристики значений функции. Как правило, такими характеристиками являются: математическое ожидание, СКО, значения квантилей и вероятности критических значений функции. Способ оценки подобных параметров изложен в специальной литературе [22, 28, 29, 95, 112].

Обоснование количества экспериментов. При проведении исследований методом статистического моделирования имеют место ошибки (погрешности) γ_0 и γ_1 экспериментальных частот, которые являются оценками условных вероятностей ложной тревоги (моделируется в условиях гипотезы H_0) и правильного обнаружения (моделируется в условиях альтернативы H_1 с использованием критических значений решающей статистики, полученных при моделировании в условиях гипотезы H_0).

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

$$\gamma_{0\text{accept}} = \alpha / 10; \quad (3.1)$$

$$\gamma_{1\text{accept}} = 10^{-3}. \quad (3.2)$$

Предполагалось, что зависимость значений указанных в (3.1) и (3.2) ошибок экспериментальных частот $\gamma_{0\text{accept}}$ и $\gamma_{1\text{accept}}$ от количества экспериментов при справедливости гипотезы H_0 и альтернативы H_1 , определяется эмпирическими формулами:

$$N_{0\text{exp}} = 10^2 / \gamma_{0\text{accept}}; \quad (3.3)$$

$$N_{1\text{exp}} = 10^2 / \gamma_{1\text{accept}} = 10^6. \quad (3.4)$$

При малых значениях УВЛО $F = \alpha$ количества экспериментов $N_{0\text{exp}}$ (3.3) проводимого исследования при условиях гипотезы H_0 может на порядки превышать 10^9 . Хранить такое большое количество значений исследуемой решающей статистики накладно. Достаточно хранить $\alpha \cdot N_{0\text{exp}} = 10^3$ самых малых значений решающей статистики. Для этого после каждого моделирования проводится проверка текущего значения решающей статистики на его принадлежность множеству самых малых значений решающей статистики. А если, текущее значение решающей статистики попало в указанное множество, то оно заносится в него. При этом множество самых малых значений решающей статистики упорядочено. После попадания в него очередного значения решающей статистики данное значение размещается на соответствующем месте. А элемент данного множества с максимальным значением исключается из него.

Предпосылки, используемые при исследовании показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта методом статистического моделирования. Дополнительно к предпосылкам, которые используются при разработке решающих правил обнаружения околонулевого видимого движения объекта при исследовании показателей качества обнаружения методом статистического моделирования используются следующие.

1. Считается, что предварительно в процессе внутрикадровой обработки для всех N_{fr} кадров исследуемой серии (по одному на каждом кадре) выявлено изображение объекта. Для данного изображения исследуемого объекта со всех N_{fr} кадров сформированы измерения, составляющие серию Ω_{set} (2.7), с координатами в системе координат (СК) базового кадра.

2. В соответствии с заданным количеством N_{fr} кадров серии определено количество N_{mea} измерений положения исследуемого объекта на серии кадров

как $N_{mea} = 2N_{fr}$ (положение объекта задаётся двумя координатами x и y).

3. Значение модуля приведенной скорости V видимого движения задается в относительных величинах – СКО отклонений измерений положения исследуемого объекта ($V = k\sigma$), где k – коэффициент, который задается при моделировании. Выражение для модуля приведенной скорости V видимого движения исследуемого объекта имеет следующий вид:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}. \quad (3.5)$$

4. Также при моделировании задается 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:

$$V_x = V \sin \gamma, \quad (3.6)$$

$$V_y = V \cos \gamma. \quad (3.7)$$

Для исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта с использованием всех перечисленных подстановочных методов (2.34), (2.39), (2.40) максимально правдоподобного обнаружения используются соответствующие им предельно допустимые (критические) значения ℓ_{cr} . Данные значения определяются в соответствии с наперед заданным уровнем значимости α при моделировании гипотезы $H_0(V = 0)$.

В процессе статистического моделирования метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта при использовании двухкоординатного метода (2.50) обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f -критерия Фишера использовалось табличное критическое значение

f_{cr} для распределения Фишера [8, 16, 75, 159, 168] с $(w, N_{mea} - r)$ степенями свободы, 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 (2.11).

В качестве альтернативного варианта критическое значение f_{cr} Фишера определялось в соответствии с наперед заданным уровнем значимости α при моделировании гипотезы H_0 ($V = 0$).

Известно множество методов моделирования случайных величин, распределенных по нормальному закону [18, 29, 49].

Среди них метод нормальной аппроксимации [16, 18, 21], основанный на центральной предельной теореме (ЦПТ), метод Ziggurat [136, 154], метод Тичроу (Тейчроева) [21], метод Бокса-Мюллера [8, 21], метод Марсальи-Брея [21, 97] и другие.

В диссертации для проведения статистического моделирования с применением разработанных вычислительных методов обнаружения околонулевого видимого движения объекта используются метод нормальной аппроксимации [16, 18, 21] и метод Ziggurat [136, 154].

Для моделирования случайной величины, распределенной по нормальному закону $N_x(m, \sigma^2)$ с математическим ожиданием m и СКО σ выполняется последовательно две операции.

Моделируется случайная величина, распределенная по нормальному закону $N_x(0,1)$ с нулевым средним и единичной СКО. Затем полученный результат умножается на значение СКО σ и к нему прибавляется математическое ожидание m :

$$N_x(m, \sigma^2) = \sigma \cdot N_x(0,1) + m. \quad (3.8)$$

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

Константы метода статистического моделирования. При проведении исследований процесса обнаружения околонулевого видимого движения объекта использовались следующие значения констант методов.

Значение уровня значимости α , вероятности ошибки первого рода (вероятности ложного обнаружения при условии справедливости гипотезы H_0) равно $\alpha = 10^{-3}$ и $\alpha = 10^{-4}$.

Количество N_{fr} кадров исследуемой серии кадров принимает значения $N_{fr} = (4,6,8,10,15)$.

Угол γ , под которым осуществляется видимое движение исследуемого объекта, принимает следующие значения $\gamma = (15^\circ, 30^\circ, 45^\circ)$.

Для моделирования гипотезы H_0 (исследуемый объект имеет нулевое видимое движение) $k = 0$, а СКО принимает значения $\sigma = (0.5, 1.0)$.

Для моделирования гипотезы H_1 (исследуемый объект имеет околонулевое видимое движение), задаётся коэффициент k для получения значения модуля приведенной скорости V видимого движения в относительных величинах, который принимает значения $k = (0, 0.5, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 3, 4, 5, 10)$.

Математическое ожидание m внешней оценки СКО $\hat{\sigma}_{out}$ измерений положений объекта на серии CCD-кадров равно $m(\hat{\sigma}_{out}) = 1$.

СКО σ внешней оценки СКО $\hat{\sigma}_{out}$ измерений положений объекта на серии CCD-кадров принимает значения $\sigma(\hat{\sigma}_{out}) = (0.15, 0.25)$.

Количество исследуемых факторов w линейной регрессионной модели (в исследуемом случае этим фактором является скорость видимого движения), гипотеза о которых проверяется, равно $w = 1$.

Ранг r матрицы частных производных F_x (2.11) 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 табличное значение статистики распределения Фишера с (1,4) степенями свободы составляет $f_{cr} = 74.13$ а при $\alpha = 10^{-4}$ – $f_{cr} = 241.62$ [98]. В качестве альтернативного варианта критическое значение f_{cr} Фишера также определялось в соответствии с наперед заданным уровнем значимости α при моделировании гипотезы H_0 ($V = 0$).

Метод оценки показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на основе статистического моделирования. В диссертации проводится статистическое моделирование для двух случаев, когда истинна гипотеза H_0 (2.1) о нулевом видимом движении исследуемого объекта, и когда истинна альтернатива H_1 (2.2) об околонулевом видимом движении исследуемого объекта.

Метод статистического моделирования в условиях гипотезы H_0 (2.1) заключается в следующей последовательности операций (рисунки 3.1, 3.2).

1. Формирование серии Ω_{set} из N_{mea} измерений исследуемого объекта. Для каждого кадра рассматриваемой серии задаются параметры эксперимента: неизменные от кадра к кадру детерминированные координаты x и y положения исследуемого объекта, СКО σ измерений положений объекта на серии CCD-кадров.

Моделируются отклонения измерений положения исследуемого объекта (нормально распределённые случайные величины). При этом измерения x_k и y_k положения исследуемого объекта формируются как сумма детерминированных координат положения и соответствующих отклонений.

2. Проводится N_{0exp} экспериментов в условиях гипотезы H_0 о нулевом видимом движении исследуемого объекта ($V = 0$).

Для моделирования одного эксперимента выполняется следующая последовательность операций.

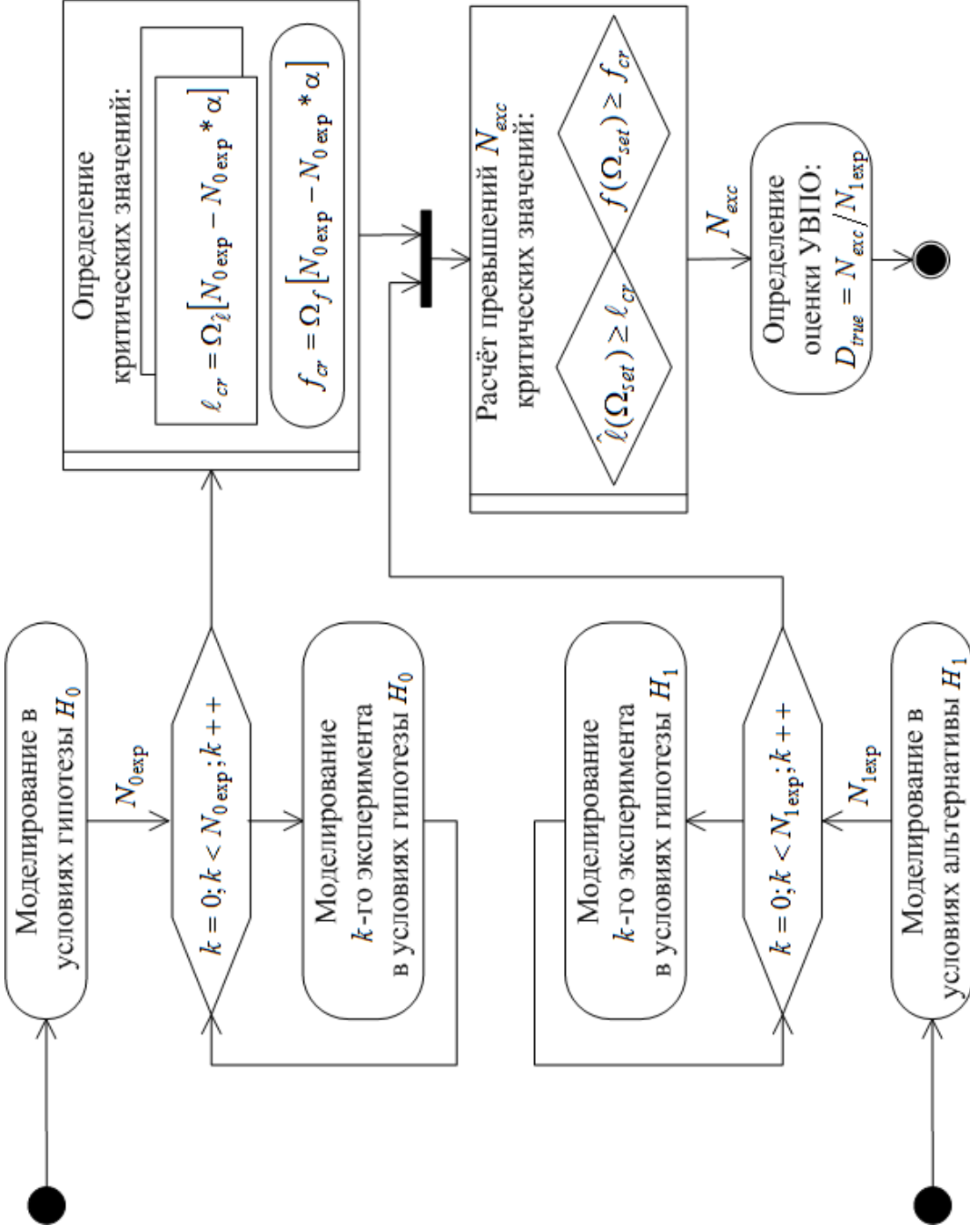


Рисунок 3.1 – UML-диаграмма метода оценки показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на основе статистического моделирования

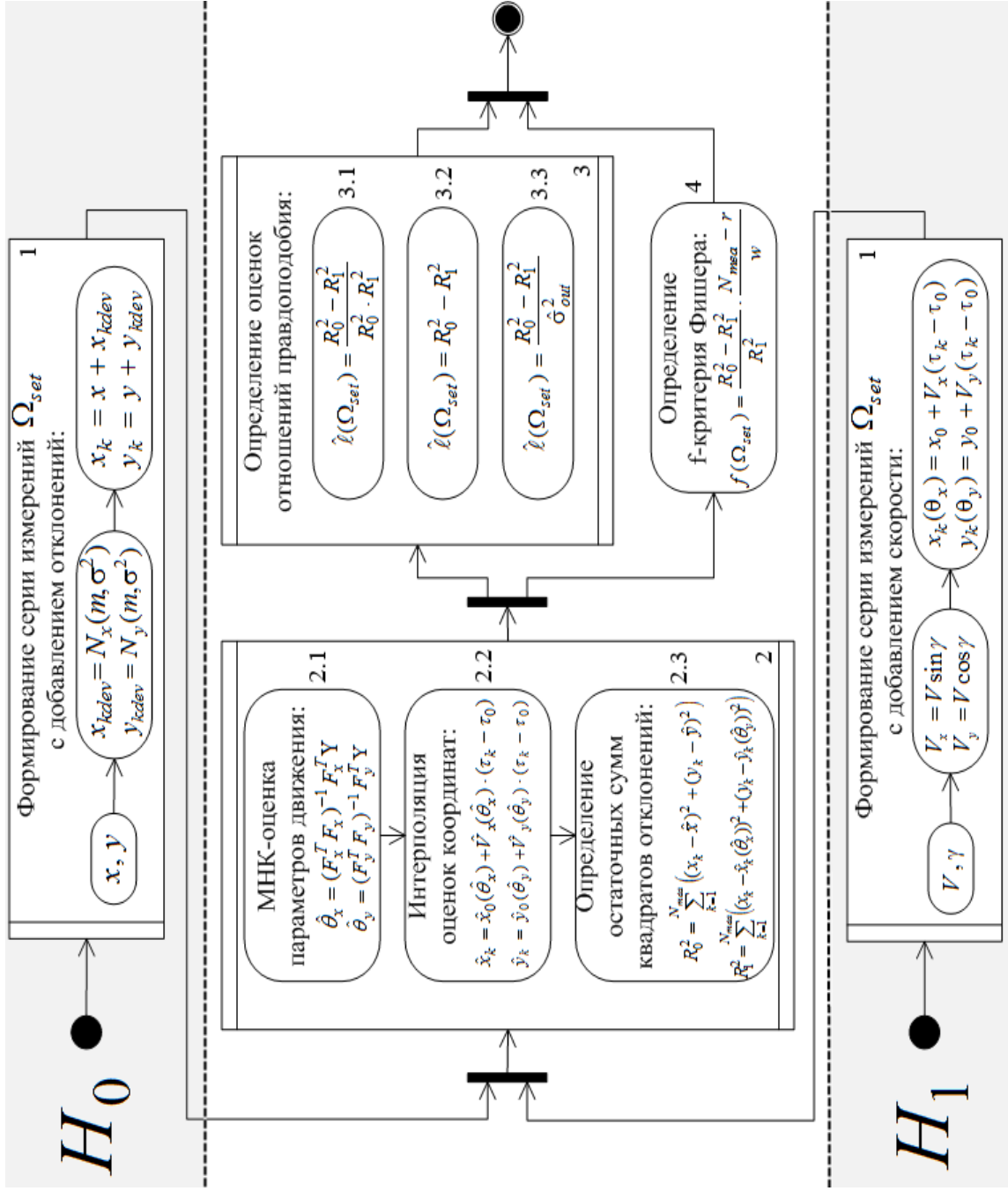


Рисунок 3.2 – UML-диаграмма статистического моделирования k -го эксперимента в условиях гипотез H_0 и H_1

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 (2.15) – (2.18).

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 (2.19) и (2.20).

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 (2.26) и (2.27).

3. Определяются значения оценок отношений правдоподобия (ОП) для всех исследуемых подстановочных методов максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта.

3.1. При неизвестной дисперсии измерений положения объекта на кадрах используется выражение (2.34).

3.2. При известной дисперсии измерений положения объекта на кадрах используется выражение (2.39).

3.3. При использовании внешней оценки дисперсии измерений положения исследуемого объекта – выражение (2.40).

4. Определяется значение f-критерия Фишера $f(\Omega_{set})$ значимости общей скорости видимого движения с помощью выражения (2.48).

5. Определяются на основе заранее заданного значения уровня значимости α обнаружения предельно допустимые (критические) значения ℓ_{cr} , которые соответствуют всем описанным и исследуемым (2.34), (2.39) и (2.40) подстановочным вычислительным методам максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии цифровых кадров.

Также определяется критическое значение f_{cr} Фишера в соответствии с наперед заданными уровнями значимости $\alpha = 10^{-3}$ и $\alpha = 10^{-4}$.

Метод статистического моделирования в условиях гипотезы H_1 о около-нулевом видимом движении исследуемого объекта является следующей последовательностью операций.

1. Формирование серии Ω_{set} из N_{mea} измерений исследуемого объекта. Для каждого кадра рассматриваемой серии задаются параметры эксперимента: модуль приведенной скорости V и направление γ видимого движения исследуемого объекта.

Определяются значения скоростей V_x и V_y видимого движения исследуемого объекта вдоль каждой координаты на серии цифровых кадров с помощью выражений (3.6) – (3.7).

Также задаются СКО σ измерений положений объекта на серии CCD-кадров, математическое ожидание m и СКО $\sigma(\hat{\sigma}_{out})$ внешней оценки СКО $\hat{\sigma}_{out}$ измерений положений объекта.

С учётом заданного значения времени между кадрами определяются координаты положения $x_k(\theta_x)$ и $y_k(\theta_y)$ исследуемого объекта в момент времени τ_k в соответствии с выражениями (2.3) и (2.4).

2, 3, 4. Проводится N_{1exp} экспериментов в условиях гипотезы H_1 об около-нулевом видимом движении исследуемого объекта.

Для моделирования одного эксперимента выполняется аналогичная последовательность операций, которая описана в пунктах 2.1 – 2.5 при моделировании гипотезы H_0 .

5. Полученные в блоке 3 значения оценок ОП для всех разработанных подстановочных вычислительных методов максимально правдоподобного обнаружения сравниваются с полученными в блоке 3 при моделировании гипотезы H_0 предельно допустимыми (критическими) значениями ℓ_{cr} , которые соответствует им.

6. Полученное в блоке 4 значение f-критерия Фишера $f(\Omega_{set})$ значимости общей скорости видимого движения сравнивается с предварительно заданным табличным предельно допустимым (критическим) значением статистики распределения Фишера с $(w, N_{mea} - r)$ степенями свободы [16, 120]. Также полученные значения f-критерия Фишера $f(\Omega_{set})$ сравниваются с полученным в блоке 5 при моделировании гипотезы H_0 критическим значением f_{cr} Фишера в соответствии с наперед заданными уровнями значимости $\alpha = 10^{-3}$ и $\alpha = 10^{-4}$.

7. Основываясь на результатах N_{1exp} экспериментов, определяется оценка условной вероятности правильного обнаружения (УВПО).

Оценка УВПО является оценкой вероятности по частоте превышения предельно допустимого (критического) значения ℓ_{cr} оценками ОП $\hat{\ell}(\Omega_{set})$ для всех разработанных подстановочных методов максимально правдоподобного обнаружения.

Также оценка УВПО является оценкой вероятности по частоте превышения критического значения f_{cr} Фишера полученными в п. 2 значениями f-критерия Фишера $f(\Omega_{set})$ для двухкоординатного метода обнаружения:

$$D_{true} = N_{exc} / N_{1exp}, \quad (3.9)$$

где N_{exc} – количество превышений критического значения ℓ_{cr} для подстановочных методов максимально правдоподобного обнаружения или f_{cr} для двухкоординатного вычислительного метода обнаружения с применением f-критерия Фишера.

Оценка УВПО определяется для разного количества N_{fr} кадров, значений модуля приведенной скорости V видимого движения исследуемого объекта и угла γ , под которым осуществляется движение.

3.2 Исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта методом статистического моделирования

В диссертации проводятся исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров методом статистического моделирования (подробнее в подразделе 3.1).

Данное исследование учитывает особенности используемого метода статистического моделирования для оценки показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии CCD-кадров.

В качестве исследуемых вычислительных методов обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров были использованы методы, описанные в подразделе 3.1.

Результаты исследований показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта методом статистического моделирования приведены в таблицах 3.1 – 3.10.

В таблицах 3.1 – 3.10 приведены значения условной вероятности правильного обнаружения (УВПО) околонулевого видимого движения объекта для разного количества кадров $N_{fr} = (4,6,8,10,15)$ исследуемых серий цифровых кадров.

Использовались следующие разработанные в диссертационной работе вычислительные методы обнаружения околонулевого видимого движения объекта (раздел 2):

– двухкоординатный вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f -критерия Фишера (2.50) с использованием предельно допустимого значения, которое было определено в соответствии с заранее заданным значением уровня значимости α (МОФМ);

– двухкоординатный вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f -критерия Фишера (2.50) с использованием табличного предельно допустимого (критического) значения

(подраздел 2.3) (МОФТ) в соответствии со степенями свободы вероятностного распределения Фишера;

– подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии цифровых кадров при известной дисперсии измерений положения объекта (2.39) (подраздел 2.2) (ММПОИД);

– подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта (2.40) на серии цифровых кадров с применением внешней оценки СКО $\hat{\sigma}_{out} = 0.15$ (ММПОВОД 0.15) и $\hat{\sigma}_{out} = 0.25$ (подраздел 2.2) (ММПОВОД 0.25).

Таблицы 3.1 – 3.5 соответствуют условной вероятности ложного обнаружения $\alpha = 10^{-3}$, а таблицы 3.6 – 3.10 – $\alpha = 10^{-4}$.

Таблица 3.1 – Значения УВПО околонулевого видимого движения объекта при уровне значимости $\alpha = 10^{-3}$ и количестве кадров $N_{fr} = 4$

V	0	0.5σ	1σ	1.25σ	1.5σ	1.75σ	2σ	3σ	4σ
МОФМ	0.001	0.002	0.008	0.014	0.024	0.038	0.056	0.183	0.387
ММПОИД	0.001	0.010	0.104	0.236	0.432	0.646	0.821	0.999	1.000
ММПОВОД 0.15	0.001	0.008	0.085	0.196	0.371	0.576	0.764	0.997	1.000
ММПОВОД 0.25	0.001	0.002	0.011	0.023	0.043	0.075	0.122	0.474	0.851
МОФТ	0.002	0.006	0.021	0.034	0.056	0.086	0.125	0.353	0.634

Таблица 3.2 – Значения УВПО околонулевого видимого движения объекта при уровне значимости $\alpha = 10^{-3}$ и количестве кадров $N_{fr} = 6$

V	0	0.5σ	1σ	1.25σ	1.5σ	1.75σ	2σ	3σ	4σ
МОФМ	0.001	0.017	0.185	0.380	0.606	0.798	0.918	0.999	1.000
ММПОИД	0.001	0.078	0.734	0.951	0.996	0.999	1.000	1.000	1.000
ММПОВОД 0.15	0.001	0.066	0.672	0.924	0.992	0.999	1.000	1.000	1.000
ММПОВОД 0.25	0.001	0.009	0.093	0.209	0.383	0.585	0.767	0.997	1.000
МОФТ	0.003	0.047	0.357	0.615	0.821	0.939	0.985	1.000	1.000

Таблица 3.3 – Значения УВПО околонулевого видимого движения объекта при уровне значимости $\alpha = 10^{-3}$ и количестве кадров $N_{fr} = 8$

V	0	0.5σ	1σ	1.25σ	1.5σ	1.75σ	2σ	3σ	4σ
МОФМ	0.001	0.129	0.865	0.986	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000
ММПОИД	0.001	0.381	0.998	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ММПОВОД 0.15	0.001	0.331	0.995	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ММПОВОД 0.25	0.001	0.038	0.429	0.733	0.923	0.987	0.999	1.000	1.000
МОФТ	0.003	0.260	0.961	0.998	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Таблица 3.4 – Значения УВПО околонулевого видимого движения объекта при уровне значимости $\alpha = 10^{-3}$ и количестве кадров $N_{fr} = 10$

V	0	0.5σ	1σ	1.25σ	1.5σ	1.75σ	2σ	3σ	4σ
МОФМ	0.0010	0.514	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ММПОИД	0.0010	0.837	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ММПОВОД 0.15	0.0010	0.781	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ММПОВОД 0.25	0.0010	0.126	0.862	0.987	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000
МОФТ	0.0037	0.717	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Таблица 3.5 – Значения УВПО околонулевого видимого движения объекта при уровне значимости $\alpha = 10^{-3}$ и количестве кадров $N_{fr} = 15$

V	0	0.5σ	1σ	1.25σ	1.5σ	1.75σ	2σ	3σ	4σ
МОФМ	0.001	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ММПОИД	0.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ММПОВОД 0.15	0.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ММПОВОД 0.25	0.001	0.765	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
МОФТ	0.004	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Таблица 3.6 – Значения УВПО околонулевого видимого движения объекта при уровне значимости $\alpha = 10^{-4}$ и количестве кадров $N_{fr} = 4$

V	0	0.5σ	1σ	1.25σ	1.5σ	1.75σ	2σ	3σ	4σ
МОФМ	0.0001	0.0002	0.0009	0.001	0.002	0.004	0.006	0.025	0.066
ММПОИД	0.0001	0.001	0.034	0.100	0.233	0.428	0.643	0.995	1.000
ММПОВОД 0.15	0.0001	0.0001	0.024	0.072	0.172	0.335	0.537	0.986	1.000
ММПОВОД 0.25	0.0001	0.0002	0.0007	0.001	0.002	0.003	0.005	0.030	0.109
МОФТ	0.0003	0.0005	0.002	0.004	0.006	0.010	0.015	0.060	0.147

На рисунках 3.3 – 3.12 приведены кривые обнаружения околонулевого видимого движения объекта при использовании:

– двухкоординатного вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением *f*-критерия Фишера (2.50) (кривая 1);

– подстановочного вычислительного метода максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта при известной дисперсии измерений положения объекта (2.39) (кривая 2);

– подстановочного вычислительного метода максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта (2.40) с применением внешней оценки СКО $\hat{\sigma}_{out} = 0.15$ (кривая 3) и $\hat{\sigma}_{out} = 0.25$ (кривая 4).

Рисунки 3.3 – 3.7 соответствуют УВЛО $\alpha = 10^{-3}$, рисунки 3.8 – 3.12 – $\alpha = 10^{-4}$.

На оси абсцисс лежат значения модуля приведенной скорости видимого движения V , который задается в относительных величинах – СКО отклонений измерений положения объекта.

По оси ординат приведены значения УВПО.

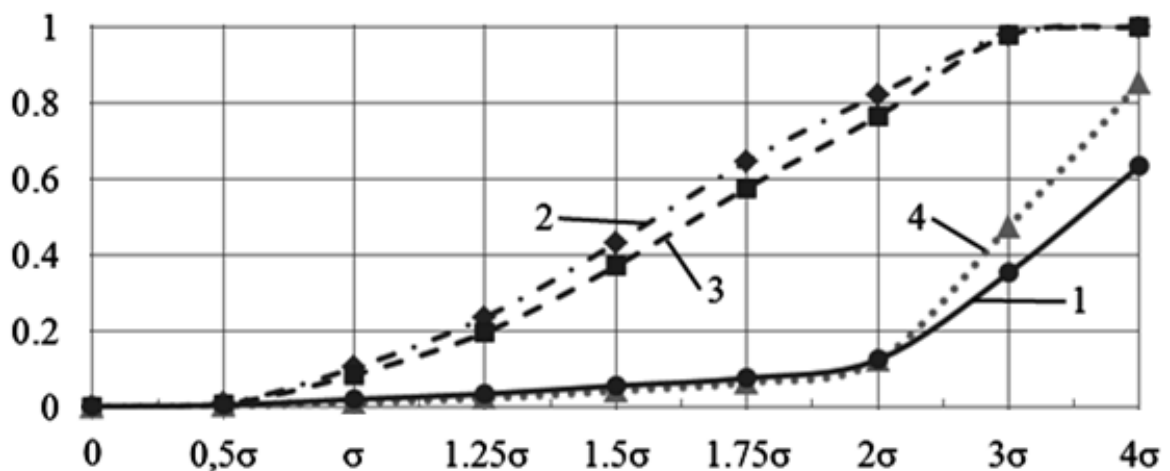


Рисунок 3.3 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 4$ кадров ($\alpha = 10^{-3}$)

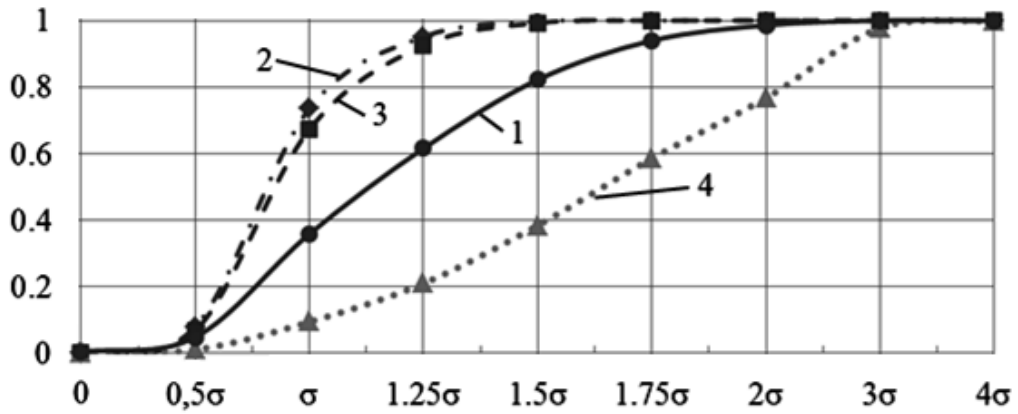


Рисунок 3.4 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 6$ кадров ($\alpha = 10^{-3}$)

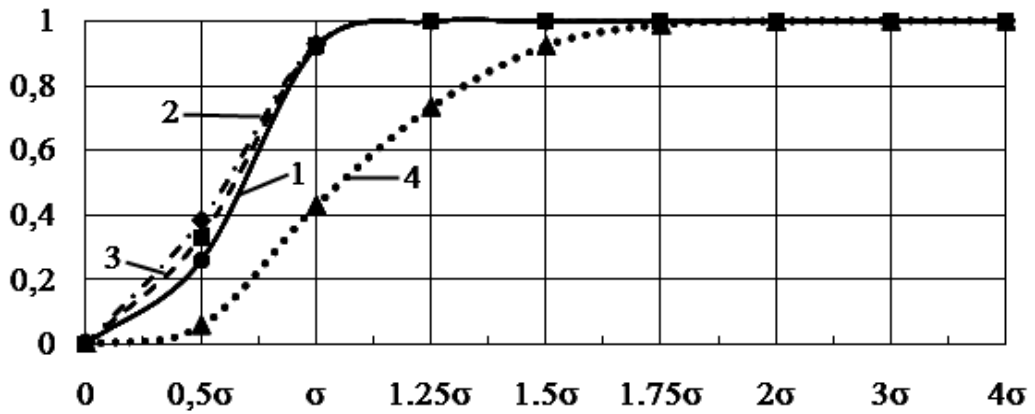


Рисунок 3.5 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 8$ кадров ($\alpha = 10^{-3}$)

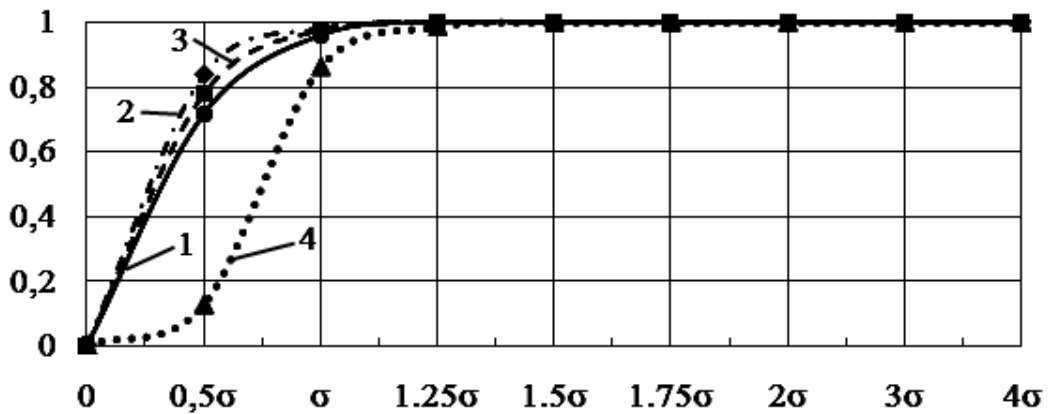


Рисунок 3.6 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 10$ кадров ($\alpha = 10^{-3}$)

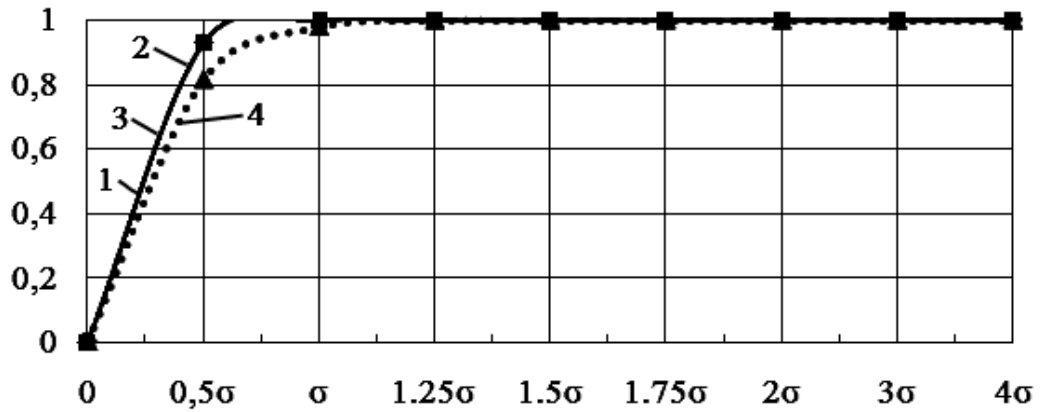


Рисунок 3.7 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 15$ кадров ($\alpha = 10^{-3}$)

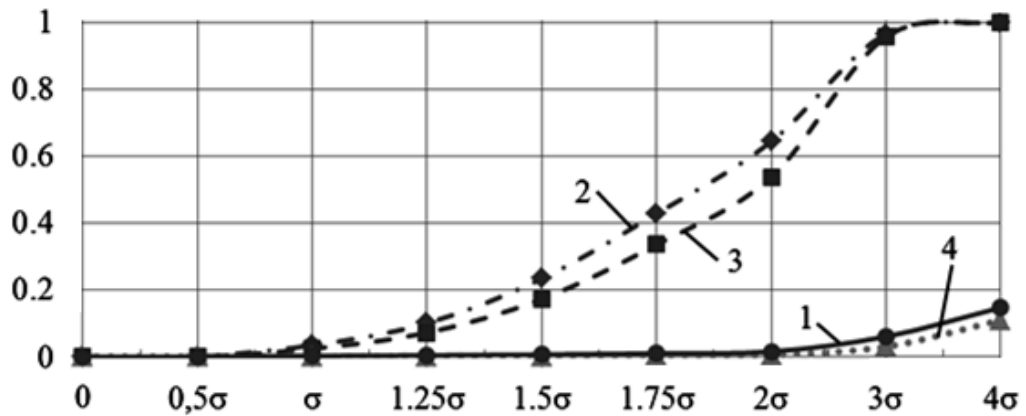


Рисунок 3.8 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 4$ кадров ($\alpha = 10^{-4}$)

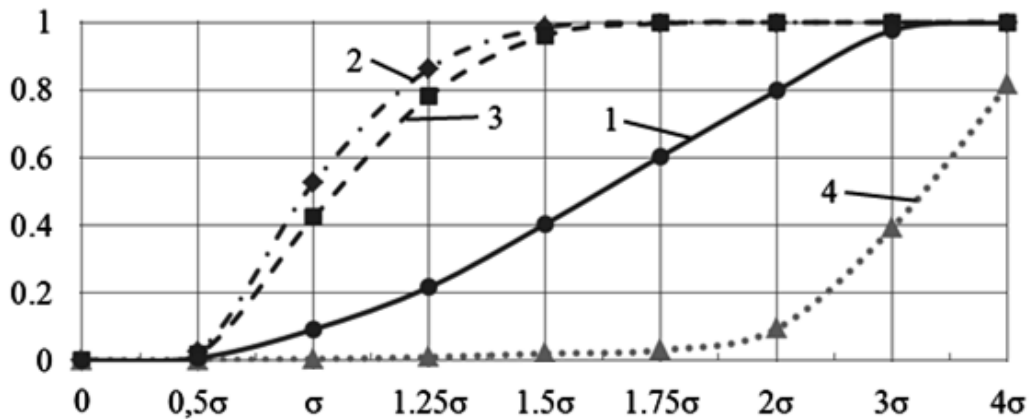


Рисунок 3.9 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 6$ кадров ($\alpha = 10^{-4}$)

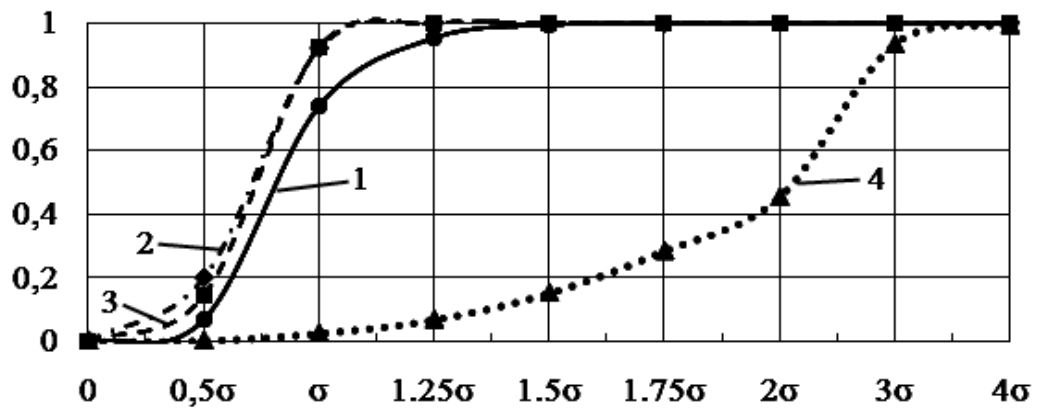


Рисунок 3.10 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 8$ кадров ($\alpha = 10^{-4}$)

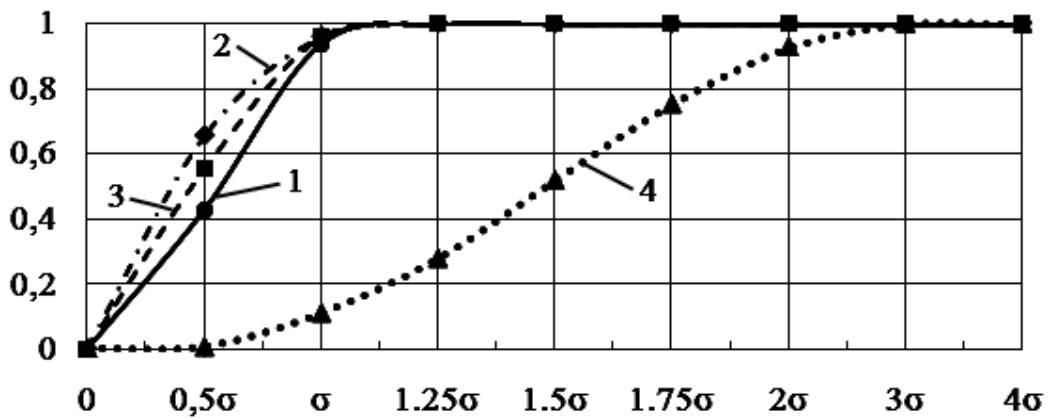


Рисунок 3.11 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 10$ кадров ($\alpha = 10^{-4}$)

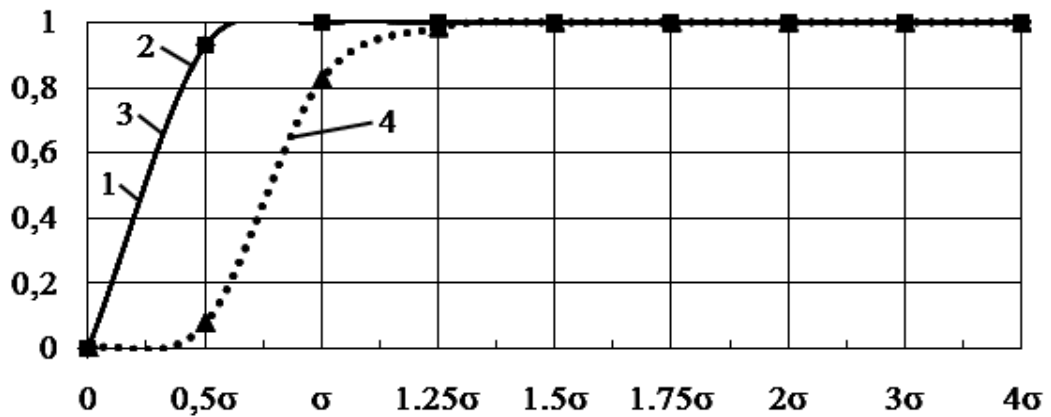


Рисунок 3.12 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 15$ кадров ($\alpha = 10^{-4}$)

На рисунках 3.13 – 3.22 приведены кривые обнаружения околонулевого видимого движения объекта для двухкоординатного вычислительного метода обнаружения с применением f -критерия Фишера при использовании: предварительно заданного табличного критического значения статистики распределения Фишера с $(w, N_{mea} - r)$ степенями свободы [16, 120, 168] (сплошная линия) и полученного на основе данных критического значения f_{cr} Фишера в соответствии с наперед заданным уровнем значимости (штрих). Рисунки 3.13 – 3.17 соответствуют УВЛО $\alpha = 10^{-3}$, рисунки 3.18 – 3.22 – $\alpha = 10^{-4}$.

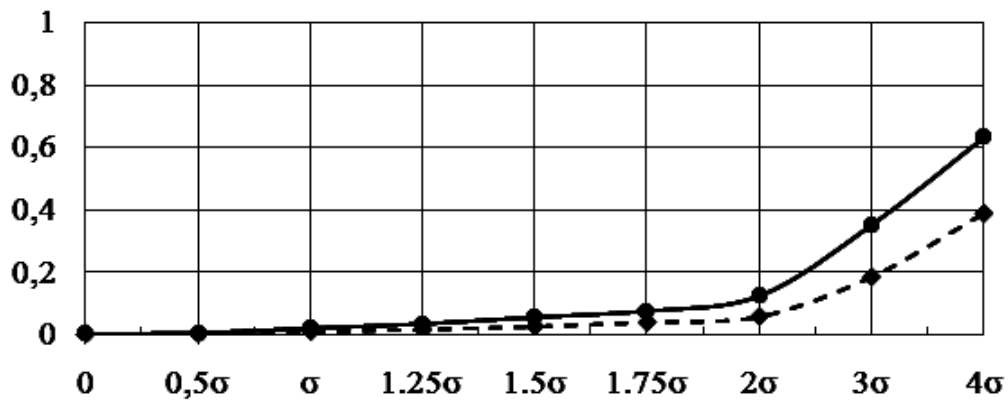


Рисунок 3.13 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 4$ кадров ($\alpha = 10^{-3}$)

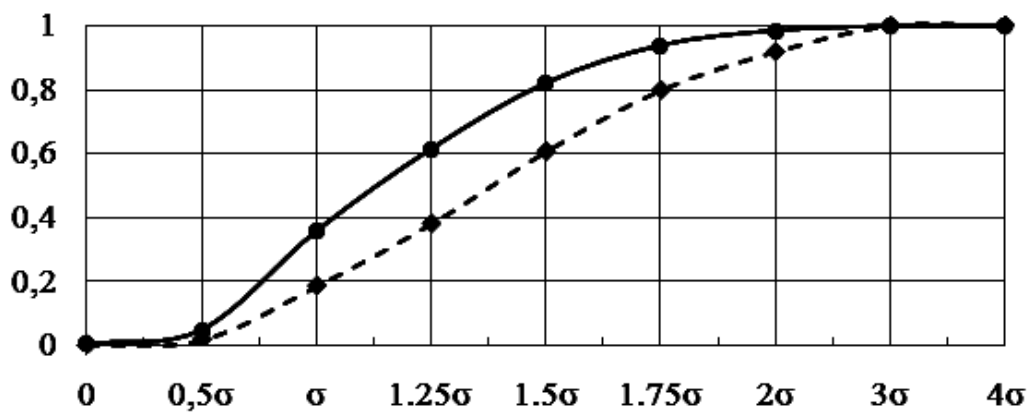


Рисунок 3.14 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 6$ кадров ($\alpha = 10^{-3}$)

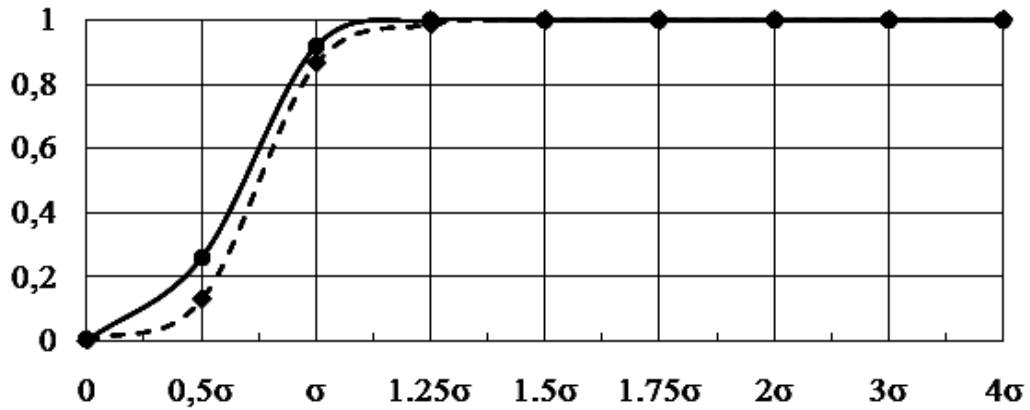


Рисунок 3.15 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 8$ кадров ($\alpha = 10^{-3}$)

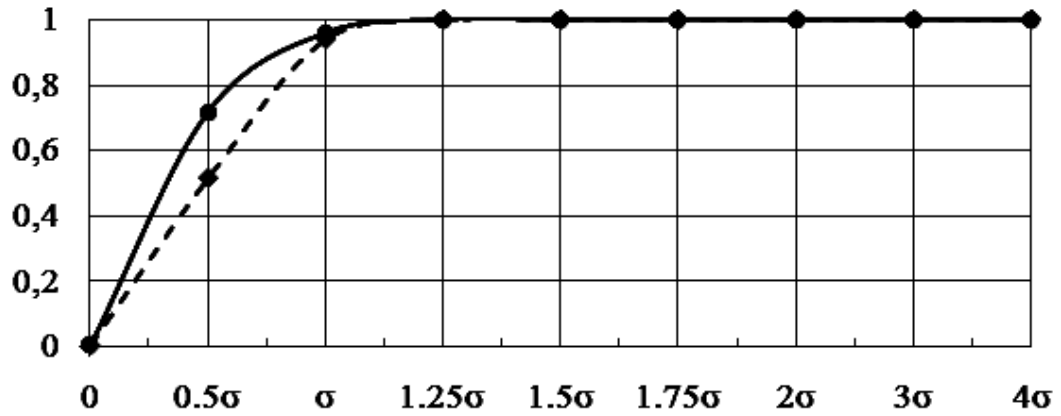


Рисунок 3.16 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 10$ кадров ($\alpha = 10^{-3}$)

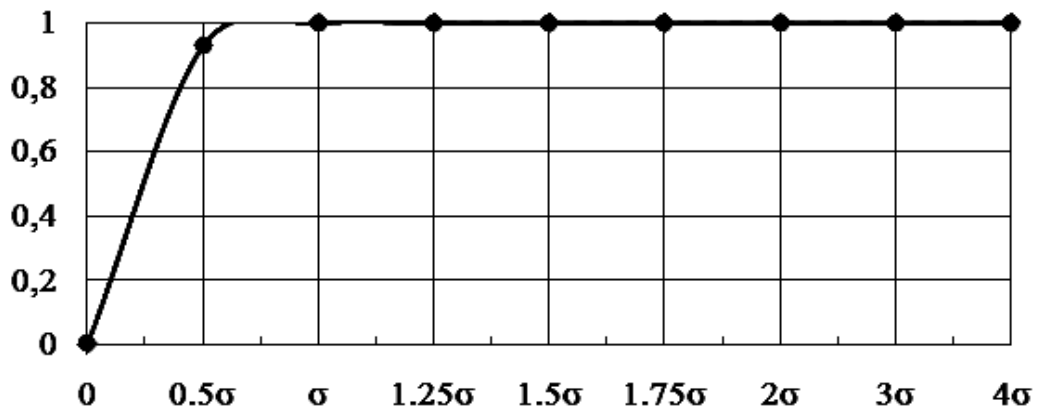


Рисунок 3.17 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 15$ кадров ($\alpha = 10^{-3}$)

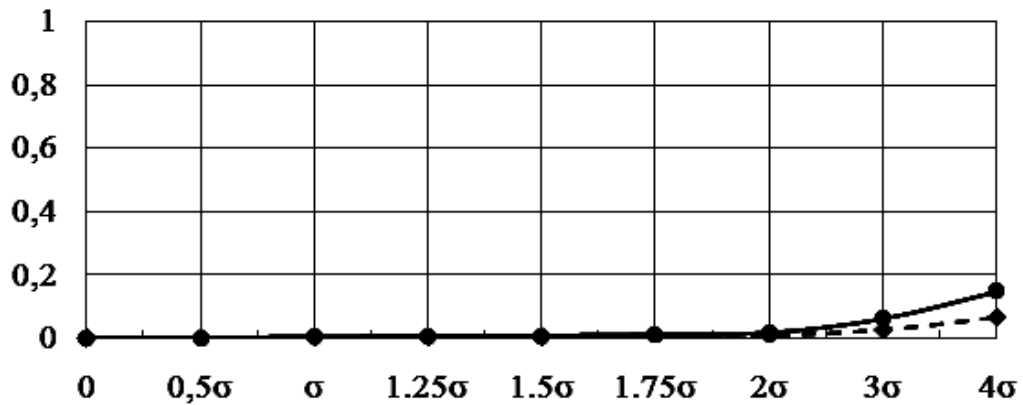


Рисунок 3.18 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 4$ кадров ($\alpha = 10^{-4}$)

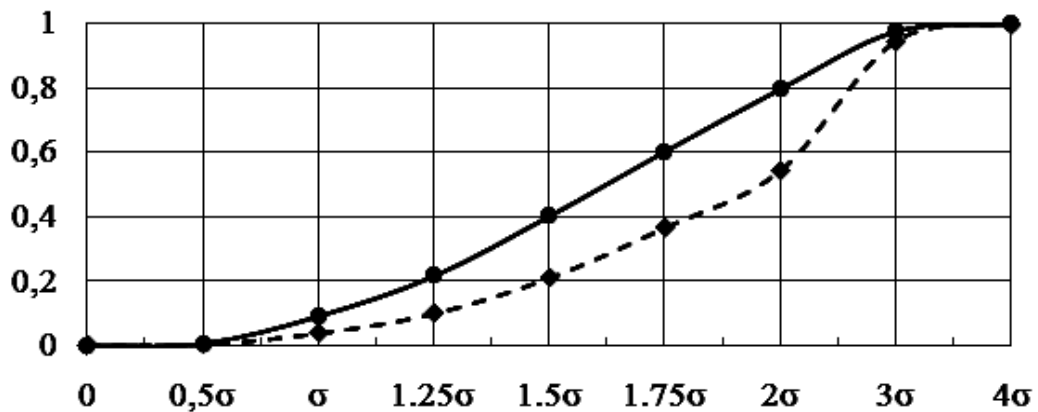


Рисунок 3.19 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 6$ кадров ($\alpha = 10^{-4}$)

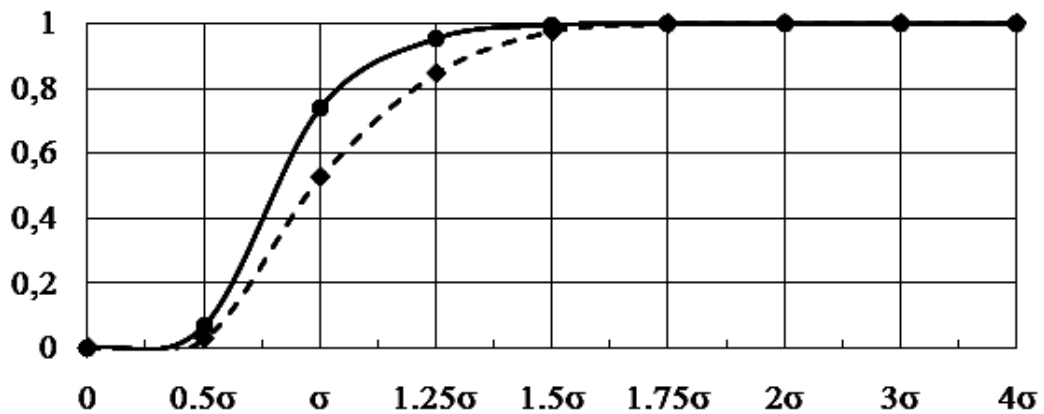


Рисунок 3.20 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 8$ кадров ($\alpha = 10^{-4}$)

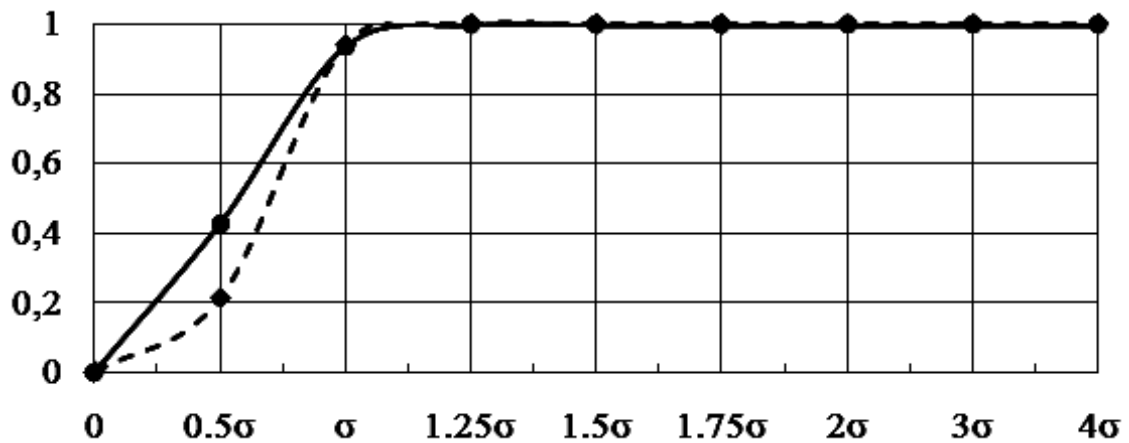


Рисунок 3.21 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 10$ кадров ($\alpha = 10^{-4}$)

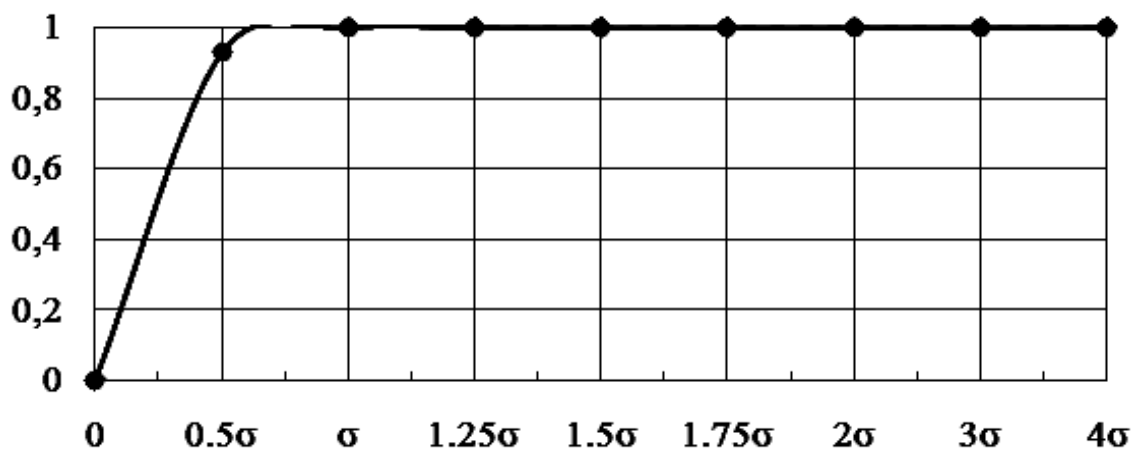


Рисунок 3.22 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для $N_{fr} = 15$ кадров ($\alpha = 10^{-4}$)

На рисунках 3.23 – 3.24 приведены кривые обнаружения околонулевого видимого движения объекта 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 [16, 120, 168] для разных значений уровня значимости α и количества кадров N_{fr} .

Рисунок 3.23 соответствует УВЛО $\alpha = 10^{-3}$, рисунок 3.24 – $\alpha = 10^{-4}$.

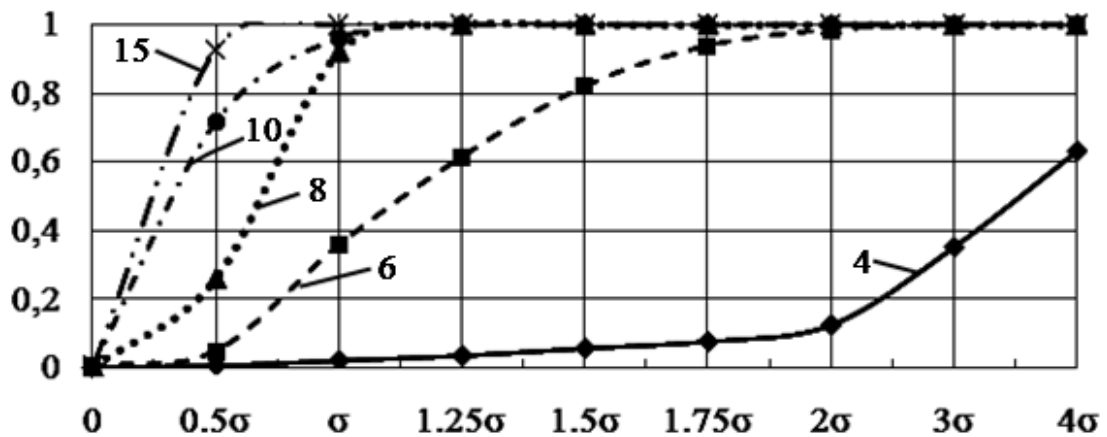


Рисунок 3.23 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для уровня значимости $\alpha = 10^{-3}$

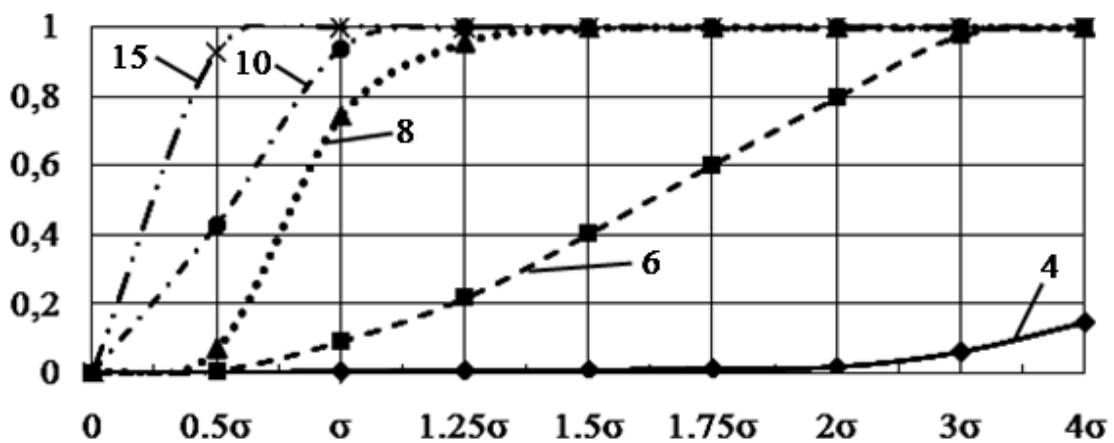


Рисунок 3.24 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения для уровня значимости $\alpha = 10^{-4}$

Анализ исследований показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения методом статистического моделирования. При исследовании показателей качества методом статистического моделирования определялась оценка УВПО околонулевой скорости видимого движения объекта для каждого из описанных выше вычислительных методов обнаружения (2.39), (2.40) и (2.50).

Оценка УВПО определялась для разных значений модуля приведенной скорости $V = (0, 0.5\sigma, \sigma, 1.25\sigma, 1.5\sigma, 1.75\sigma, 2\sigma, 3\sigma, 4\sigma)$ и количества

$N_{fr} = (4,6,8,10,15)$ кадров и видимого движения исследуемого объекта на серии цифровых кадров.

Основываясь на данном исследовании, самыми чувствительными к изменениям значения модуля скорости видимого движения методами обнаружения являются подстановочные вычислительные методы максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта с известной дисперсии измерений положения исследуемого объекта (2.39) – кривая 2 (рисунки 3.3 – 3.12), и с применением внешней оценки СКО $\hat{\sigma}_{out} = 0.15$ (2.40) – кривая 3 (рисунки 3.3 – 3.12).

Так, например, при четырех кадрах в исследуемой серии уже при $V = 0.5\sigma$ (σ – СКО ошибок оценок координат небесных объектов) значение УВПО околонулевой скорости видимого движения объекта 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 околонулевого видимого движения объекта с известной дисперсии измерений положения объекта (2.39) не может быть использован на практике (в виду ее неизвестности) и является лишь потенциально допустимым пределом.

Поэтому самым эффективным и адаптивным является подстановочный метод максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта (2.40) с применением внешней оценки (относительно выборки, используемой для обнаружения видимого движения) СКО – кривая 3 (рисунки 3.3 – 3.12).

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 вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f -критерия Фишера (2.50) – кривая 1, является не достаточно эффективным по данным статистического моделирования (рисунки 3.3, 3.4, 3.8, 3.9) при малом значении количества кадров N_{fr} . Однако уже при $N_{fr} = 8$ (рисунок 3.5) данный метод не уступает другим по значению УВПО.

С другой стороны, имеют место практически непреодолимые трудности при определении критического значения при использовании описанных подстановочных вычислительных методов максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта.

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.

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.

Во время исследований для двухкоординатного вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f -критерия Фишера (2.50) использовались предварительно заданные табличные предельно допустимые (критические) значения статистики распределения Фишера с $(w, N_{mea} - r)$ степенями свободы [16, 120, 168].

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 3.13 – 3.22) подтверждают это.

Кроме того, рисунки 3.13 – 3.22 свидетельствуют, что схожесть критических значений решающей статистики как табличных [16, 120, 168], так и опре-

делённых по результатам статистического моделирования не зависит от количества исследуемых кадров N_{fr} .

Следовательно, нет необходимости принимать дополнительные меры для выбора критического значения решающей статистики для разного количества исследуемых кадров N_{fr} и условий наблюдения.

Для этого достаточно использовать табличное предельно допустимое значение [16, 120, 168].

Исследования показали, что использование двухкоординатного метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f -критерия Фишера (2.50) наиболее эффективно при большом значении количества кадров (рисунки 3.23 – 3.24).

Также об этом свидетельствуют результаты на рисунках 3.4 – 3.6 и 3.9 – 3.11, где значение УВПО достигает большого значения уже при модуле скорости видимого движения $V = 0.5\sigma$.

3.3 Метод оценки показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на основе натурального моделирования

Постановка задачи. 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 [1].

Множество объектов с практически нулевым видимым движением в рамках проекта CoLiTec [88] названо внутренним каталогом (ВК) объектов, неподвижных на серии кадров [50].

Описание ВК подробнее изложено в подразделе 1.3.2.

Для исследования в качестве натуральных данных были выбраны именно

объекты, включённые в ВК объектов, неподвижных на серии кадров [50].

Так как 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 видимой скорости движения на серии цифровых кадров с использованием различных вычислительных методов обнаружения.

Исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров уже проводилось с помощью метода статистического моделирования (подраздел 3.1).

Однако существенный интерес представляет проведение исследований показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии цифровых кадров с помощью метода натурального моделирования.

Это позволит также исследовать закон распределения натуральных данных (измерений положения исследуемого объекта), полученных с телескопов на серии цифровых кадров.

Исследуемые методы обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта методом натурального моделирования. Исследуемые методы обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии CCD-кадров, которые использовались для натурального моделирования, подробно описаны в подразделе 3.1.

Также известен эвристический вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта, который подробно описан в подразделе 2.4.

Он включает в себя использование предельно допустимых значений для оценок параметров движения (остаточные дисперсии оценок координат объекта, суммарная остаточная дисперсия оценок координат объекта), а также f -критерий Фишера $f(\Omega_{set})$ (2.48).

Данный метод формально представлен в выражении (2.60), а значения его констант приведены в подразделе 2.4.

Таким образом, в методе натурального моделирования проводится исследование показателей качества следующих методов обнаружения околонулевого видимого движения объектов:

– подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта при:

1) неизвестной дисперсии измерений положения объекта на кадрах с помощью выражения (2.34);

2) известной дисперсии измерений положения объекта на кадрах с помощью выражения (2.39);

3) использовании внешней оценки дисперсии измерений положения объекта на кадрах с помощью выражения (2.40);

– двухкоординатный вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f -критерия Фишера из выражения (2.50);

– эвристический вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта из выражения (2.60).

Условия наблюдения объектов с околонулевым видимым движением в качестве натуральных данных. В качестве натуральных данных (измерения положений исследуемых объектов на серии цифровых кадров) были выбраны серии CCD-кадров, полученные в обсерваториях ISON-NM (код MPC H15) [36] и

ISON-Kislovodsk (код MPC D00) [36].

Обсерватория ISON-NM находится на горе Джой (Мейхилл), Нью-Мексико, США и использует 40-см телескоп SANTEL-400AN и ПЗС-матрицу FLI ML09000-65 [187] (3056×3056 пикселей, размер пикселя 12 мкм). Время экспозиции составляло 150 с.

Обсерватория ISON-Kislovodsk расположена в 20км от Кисловодска (плато Шаджатмаз), РФ и использует 19,2-см. широкопольный телескоп GENON (VT-78) [64] и ПЗС-матрицу FLI ML09000-65 (4008 x 2672 пикселей, размер пикселя 9 мкм). Время экспозиции составляло 180 с.

Предпосылки, используемые при исследовании показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта методом натурного моделирования. Дополнительно к предпосылкам, используемым при разработке вычислительных методов обнаружения околонулевого видимого движения объекта, при исследовании показателей качества обнаружения методом натурного моделирования используются следующие.

1. Считается, что предварительно в процессе внутрикадровой обработки для всех N_{fr} кадров исследуемой серии выявлено изображение объекта (не более одного на каждом кадре).

Для данного изображения исследуемого объекта со всех N_{fr} кадров сформированы измерения, составляющие серию Ω_{set} (2.7), с координатами в системе координат (СК) базового кадра.

2. В соответствии с количеством N_{fr} кадров исследуемой серии определено число N_{mea} измерений положения исследуемого объекта на серии кадров как $N_{mea} = 2N_{fr}$ (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 из выражения (3.5) 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 задается при моделировании.

Выражение для модуля приведенной скорости V видимого движения исследуемого объекта имеет следующий вид.

5. Также при моделировании задается 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 на серии цифровых кадров по соответствующим координатам с помощью выражений (3.6) и (3.7).

Для исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта с использованием всех перечисленных подстановочных методов (2.34), (2.39), (2.40) максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии цифровых кадров используются соответствующие им предельно допустимые (критические) значения ℓ_{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 ОП $\hat{\ell}(\Omega_{set})$ для каждого разработанного подстановочного метода максимально правдоподобного обнаружения отдельно заносятся во множество $\Omega_{\hat{\ell}}$. Элементы данного множества упорядочиваются по возрастанию.

Соответствующие предельно допустимые (критические) значения решающей статистики ℓ_{cr} для каждого метода определяются как элементы упо-

рядоченного множества $\Omega_{\hat{\lambda}}$, находящиеся на позиции с номером $N_{VK} - N_{VK} * \alpha$:

$$l_{cr} = \Omega_{\hat{\lambda}} [N_{VK} - N_{VK} * \alpha]. \quad (3.10)$$

В процессе натурального моделирования исследования показателей качества обнаружения с использованием двухкоординатного метода (2.50) обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f-критерия Фишера использовалось табличное критическое значение f_{cr} Фишера в соответствии с $(w, N_{mea} - r)$ степенями свободы для распределения Фишера, 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 (подробнее в подразделе 2.3).

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 вычислительные методы обнаружения околонулевого видимого движения объекта были исследованы на одних и тех же выборках натуральных данных.

Константы метода натурального моделирования. При проведении исследований процесса обнаружения околонулевого видимого движения объекта использовались следующие значения констант вычислительного метода.

Значение уровня значимости α , вероятности ошибки первого рода (вероятности ложного обнаружения при условии справедливости гипотезы H_0) равно $\alpha = 10^{-3}$ и $\alpha = 10^{-4}$. Количество N_{fr} кадров исследуемой серии CCD-кадров равно $N_{fr} = 4$. Для моделирования условий альтернативы H_1 (исследуемый

объект имеет околонулевое видимое движение), задаётся коэффициент k для получения значения модуля приведенной скорости V видимого движения в относительных величинах.

Он принимает следующие значения $k = (0, 0.5, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 3, 4, 5, 10)$.

Математическое ожидание m внешней оценки СКО $\hat{\sigma}_{out}$ измерений положений объекта на серии CCD-кадров равно $m(\hat{\sigma}_{out}) = 0$. СКО σ внешней оценки СКО $\hat{\sigma}_{out}$ измерений положений объекта на серии CCD-кадров принимает следующие значения $\sigma(\hat{\sigma}_{out}) = 0.15$. Количество исследуемых факторов w линейной регрессионной модели (в исследуемом случае этим фактором является скорость видимого движения), гипотеза о которых проверяется, равно $w = 1$. Ранг r матрицы частных производных F_x (2.11) 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 $\alpha = 10^{-4}$ – $f_{cr} = 241.62$ [16, 120].

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

Метод оценки показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на основе натурального моделирования заключается в следующей последовательности операций (рисунки 3.25, 3.26).

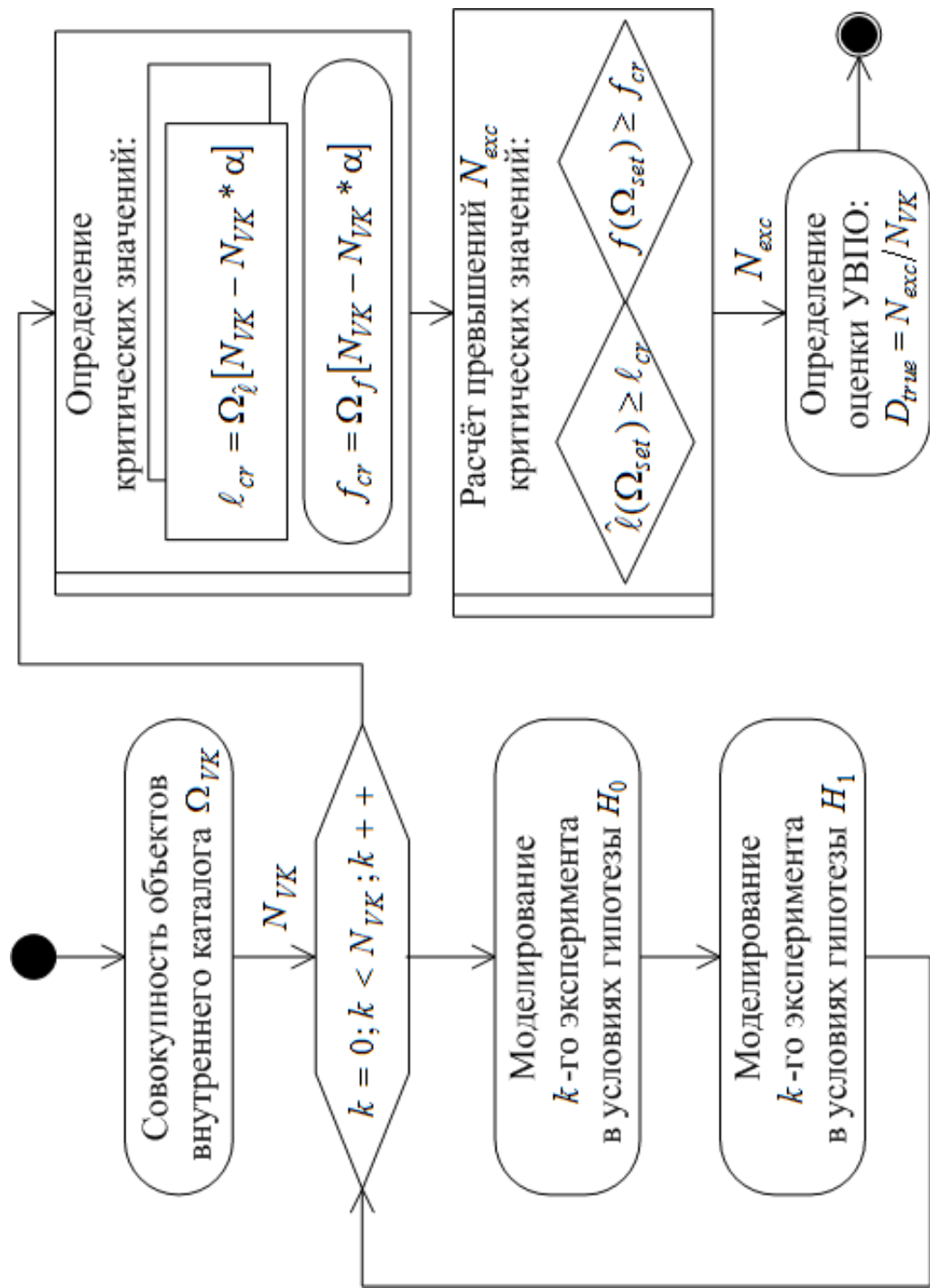


Рисунок 3.25 – UML-диаграмма метода оценки показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на основе натурного моделирования

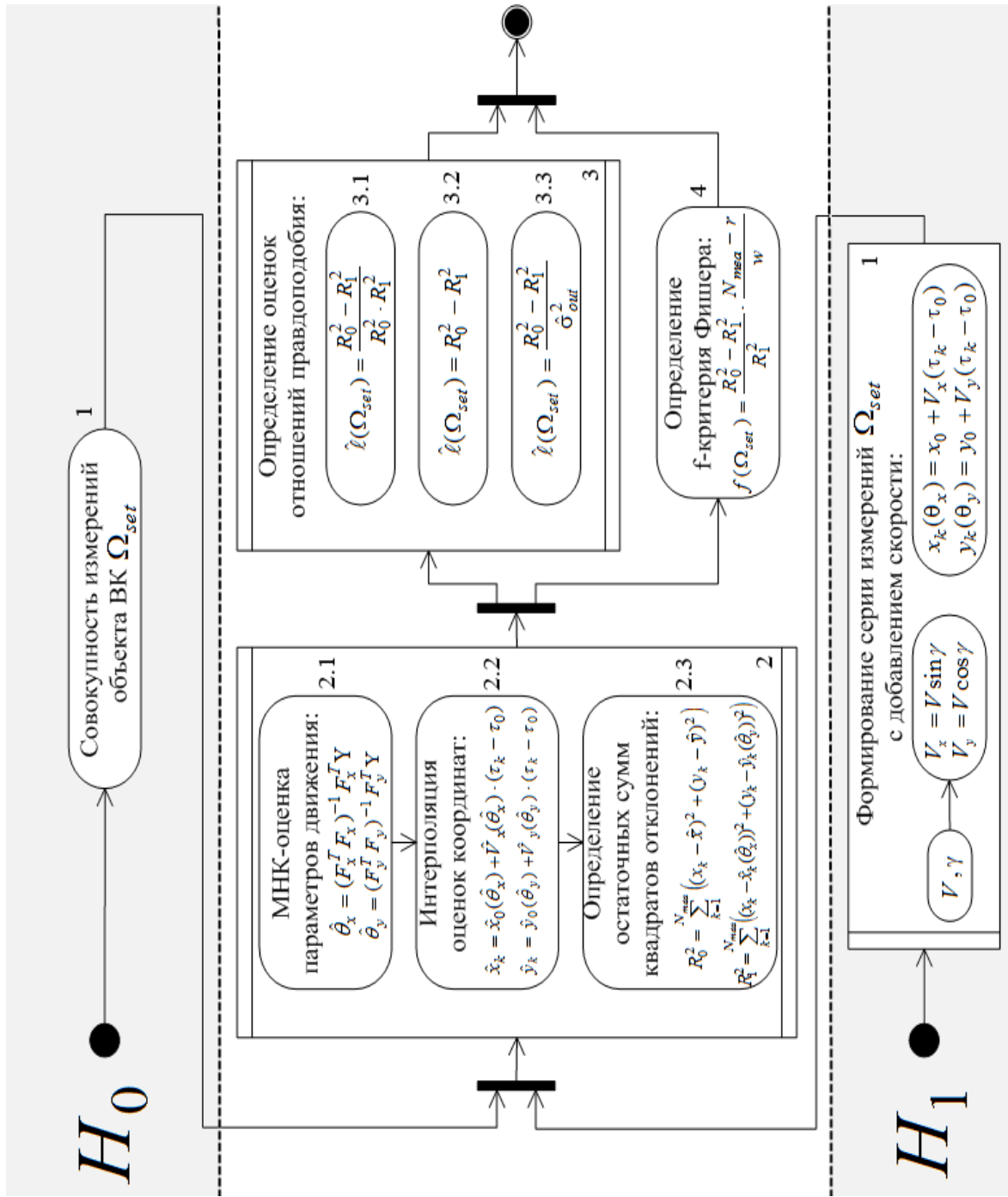


Рисунок 3.26 – UML-диаграмма натурального моделирования k -го эксперимента в условиях гипотез H_0 и H_1

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 следующая 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 (2.15) – (2.18).

2.2. Определяются интерполированные оценки координат \hat{x}_k и \hat{y}_k исследуемого объекта на моменты привязки всех кадрах исследуемой серии с помощью выражений (2.19) и (2.20).

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 (2.26) и (2.27).

2.4. Определяются значения оценок ОП для всех исследуемых подстановочных методов максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта. Для этого используются: выражение (2.34) – при неизвестной дисперсии измерений положения объекта на кадрах; выражение (2.39) – при известной дисперсии; выражение (2.40) – 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 (2.48).

3. На основе заданного уровня значимости (условной вероятности ложной тревоги, УВЛО) α обнаружения определяются (3.10) предельно допусти-

мые (критические) значения ℓ_{cr} , которые соответствуют всем исследуемым (2.34), (2.39) и (2.40) 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 (3.6) и (3.7) соответственно. 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 $y_k(\theta_y)$ объекта в момент времени τ_k в соответствии с выражениями (2.3) и (2.4).

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.

6. Полученные в блоке 5 значения оценок ОП для всех синтезированных подстановочных методов максимально правдоподобного обнаружения сравниваются с полученными в блоке 3 соответствующими предельно допустимыми (критическими) значениями ℓ_{cr} .

7. Полученные в блоке 5 значения f-критерия Фишера $f(\Omega_{set})$ значимости общей скорости видимого движения сравнивается с предварительно заданным табличным предельно допустимым (критическим) значением статистики распределения Фишера с $(w, N_{mea} - r)$ степенями свободы [16, 120]. 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) с помощью выражения (3.9) (подробнее в подразделе 3.1). Оценка УВПО определяется для разных значений модуля приведенной скорости V видимого движения объекта и количества N_{fr} кадров. Исследования проводились с использованием ПО CoLiTec [49, 51, 98].

3.4 Исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта методом натурального моделирования

В диссертации проводятся исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта методом натурального моделирования (подробнее в подразделе 3.3).

Данное исследование учитывает особенности используемого метода натурального моделирования. В качестве исследуемых вычислительных методов обнаружения околонулевого видимого движения объекта были использованы методы, описанные в подразделе 3.3.

Результаты исследований показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта методом натурального моделирования приведены в таблицах 3.11 – 3.14.

В таблицах 3.11 – 3.14 приведены значения УВПО для разных исследуемых серий телескопов SANTEL-400AN и GENON (VT-78) при использовании следующих методов обнаружения:

- подстановочного вычислительного метода максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объектов (2.40) с применением внешней оценки СКО $\hat{\sigma}_{out} = 0.15$ (подраздел 2.2) (ММПОВОД);
- эвристического вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения объектов (2.61) (подраздел 2.4) (ЭМО);
- двухкоординатного вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения объектов с применением f-критерия Фишера (2.50) с

использованием табличного критического значения (подраздел 2.3) (МОФТ).

Таблицы 3.11, 3.13 соответствуют условной вероятности ложного обнаружения $\alpha = 10^{-3}$, а таблицы 3.12, 3.14 – $\alpha = 10^{-4}$.

Таблица 3.11 – Значения УВПО околонулевого видимого движения объекта для телескопа SANTEL-400AN при уровне значимости $\alpha = 10^{-3}$

V	0	0.5σ	1σ	1.25σ	1.5σ	1.75σ	2σ	3σ	4σ	5σ	10σ
ММПОВОД	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.007	0.052	0.405	0.933	1.000
ЭМО	0.0002	0.0003	0.0007	0.001	0.002	0.004	0.070	0.657	0.759	0.781	0.799
МОФТ	0.002	0.127	0.356	0.441	0.506	0.559	0.602	0.722	0.798	0.848	0.961

Таблица 3.12 – Значения УВПО околонулевого видимого движения объекта для телескопа SANTEL-400AN при уровне значимости $\alpha = 10^{-4}$

V	0	0.5σ	1σ	1.25σ	1.5σ	1.75σ	2σ	3σ	4σ	5σ	10σ
ММПОВОД	0.0001	0.0001	0.0003	0.0004	0.0005	0.0007	0.001	0.006	0.046	0.250	1.000
ЭМО	0.0002	0.0003	0.0007	0.001	0.002	0.004	0.070	0.687	0.769	0.781	0.799
МОФТ	0.0002	0.031	0.141	0.208	0.271	0.332	0.385	0.535	0.628	0.695	0.869

Таблица 3.13 – Значения УВПО околонулевого видимого движения объекта для телескопа GENON (VT-78) при уровне значимости $\alpha = 10^{-3}$

V	0	0.5σ	1σ	1.25σ	1.5σ	1.75σ	2σ	3σ	4σ	5σ	10σ
ММПОВОД	0.001	0.002	0.007	0.013	0.023	0.044	0.139	0.842	0.979	0.999	1.000
ЭМО	0.0004	0.001	0.006	0.046	0.285	0.474	0.516	0.527	0.538	0.555	0.583
МОФТ	0.003	0.231	0.360	0.413	0.460	0.503	0.542	0.669	0.762	0.833	0.982

Таблица 3.14 – Значения УВПО околонулевого видимого движения объекта для телескопа GENON (VT-78) при уровне значимости $\alpha = 10^{-4}$

V	0	0.5σ	1σ	1.25σ	1.5σ	1.75σ	2σ	3σ	4σ	5σ	10σ
ММПОВОД	0.0001	0.0003	0.001	0.003	0.006	0.012	0.062	0.275	0.901	0.997	1.000
ЭМО	0.0004	0.001	0.006	0.046	0.285	0.474	0.516	0.527	0.538	0.555	0.583
МОФТ	0.0004	0.147	0.242	0.281	0.316	0.349	0.379	0.484	0.569	0.640	0.863

На рисунках 3.27 – 3.30 приведены кривые обнаружения околонулевого видимого движения объекта при использовании подстановочного вычисли-

тельного метода максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением внешней оценки СКО (2.40) (кривая 1), двухкоординатного вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f-критерия Фишера (2.50) (кривая 2) и эвристического вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта (2.60) (кривая 3).

Рисунки 3.27, 3.29 соответствуют УВЛО $\alpha = 10^{-3}$, рисунки 3.28, 3.30 – $\alpha = 10^{-4}$.

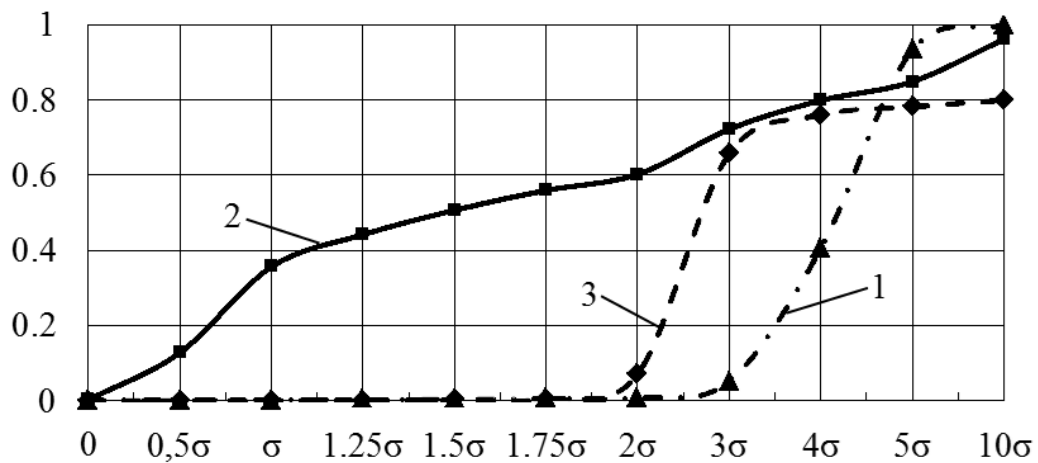


Рисунок 3.27 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения телескопа SANTEL-400AN ($\alpha = 10^{-3}$)

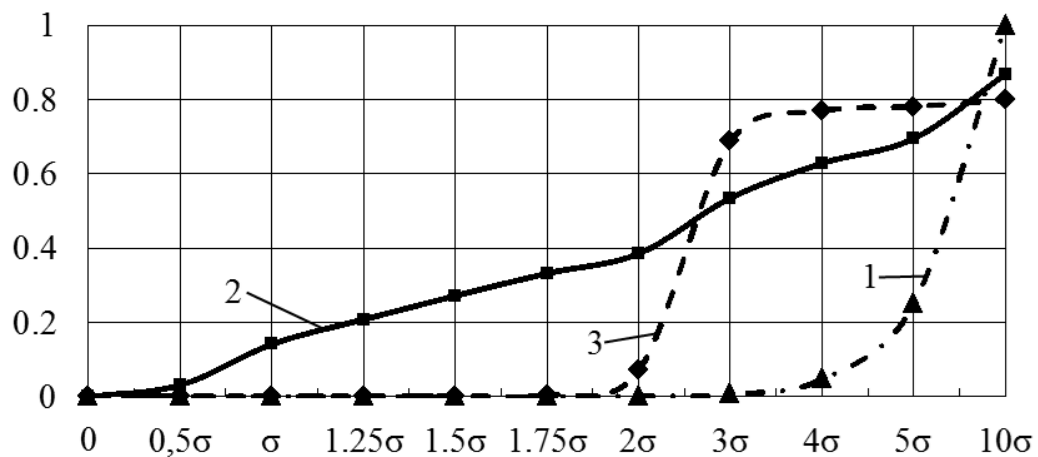


Рисунок 3.28 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения телескопа SANTEL-400AN ($\alpha = 10^{-4}$)

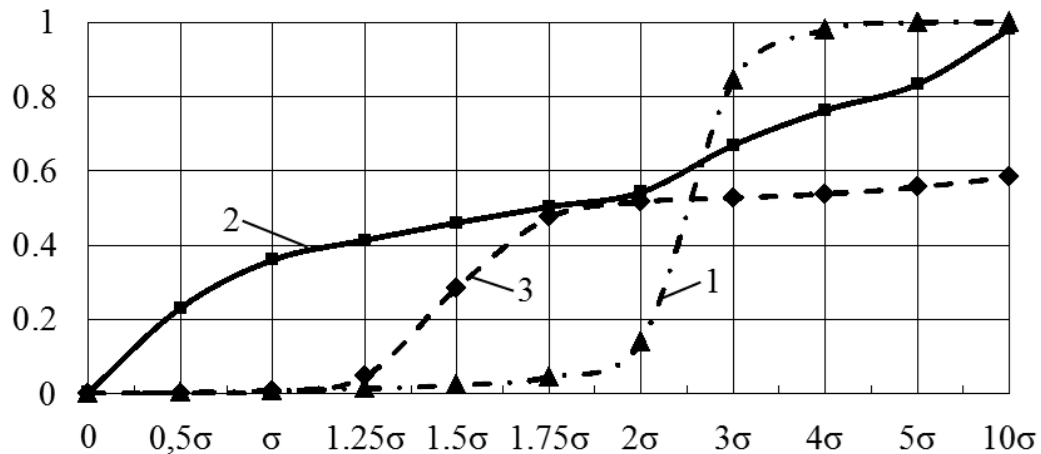


Рисунок 3.29 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения телескопа GENON (VT-78) ($\alpha = 10^{-3}$)

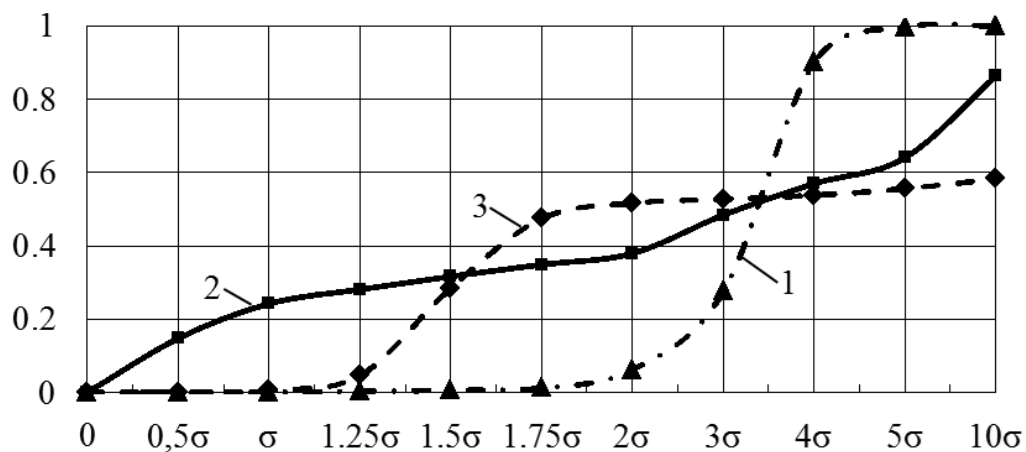


Рисунок 3.30 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения телескопа GENON (VT-78) ($\alpha = 10^{-4}$)

Основываясь на проведенном исследовании, самым чувствительным к наличию ненулевой скорости видимого движения методом обнаружения является двухкоординатный вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии цифровых кадров с применением f -критерия Фишера (2.50).

Так, например, уже при четырех кадрах в исследуемой серии уже при $V = 0.5\sigma$ (σ - СКО ошибок оценок координат исследуемых объектов) значение УВПО околонулевой скорости видимого движения объекта для данного метода

начинает возрастать, когда для других методов обнаружения для этого необходимо значение модуля скорости видимого движения исследуемого объекта не менее $V = 1.25\sigma$.

Исследования показали, что эвристический вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта (2.60) является не достаточно эффективным по данным натурного моделирования.

Кроме того, с использованием данного метода невозможно стабилизировать УВЛО на заданном уровне.

Очевидно, что идею одновременного использования статистик остаточных дисперсий измерений положения объекта и f -критерия Фишера следует считать непродуктивной.

Кроме того, данная идея не вытекает из каких-либо теоретических построений, тем самым не является теоретически обоснованной.

Во время исследований для двухкоординатного вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии цифровых кадров с применением f -критерия Фишера (2.50) использовались предварительно заданные табличные предельно допустимые (критические) значения статистики распределения Фишера с $(w, N_{mea} - r)$ степенями свободы [16, 120].

Определение по результатам натурного 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, рисунок 3.31 свидетельствует, что двухкоординатный вычислительный метод обнаружения с применением f -критерия Фишера (2.50) устойчив к смене телескопа.

Следовательно, нет необходимости принимать дополнительные меры для выбора критического значения решающей статистики при смене оборудования и условий наблюдения.

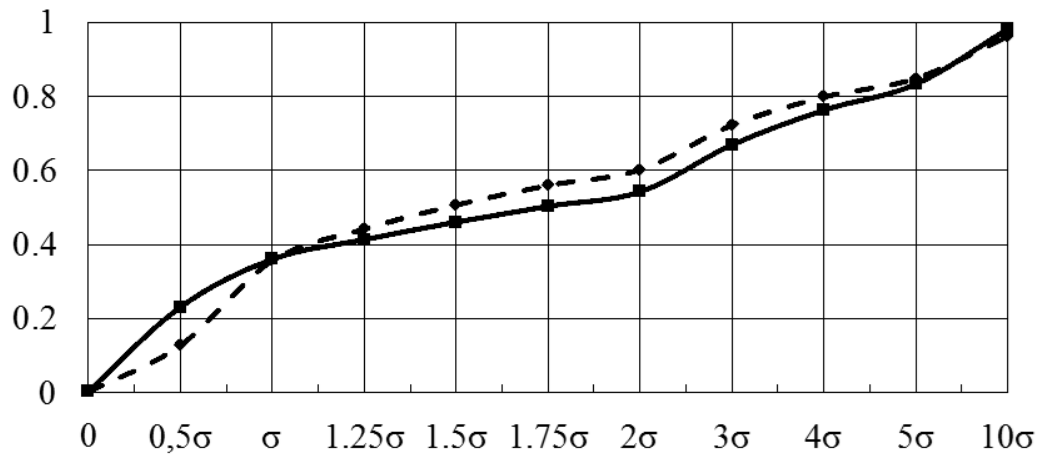


Рисунок 3.31 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения двухкоординатного метода обнаружения с применением f-критерия Фишера ($\alpha = 10^{-3}$) телескопов GENON (VT-78) (сплошная линия) и SANTEL-400AN (штрих)

С другой стороны, при использовании других описанных выше методов обнаружения возникают трудности при определении критического значения (рисунок 3.32).

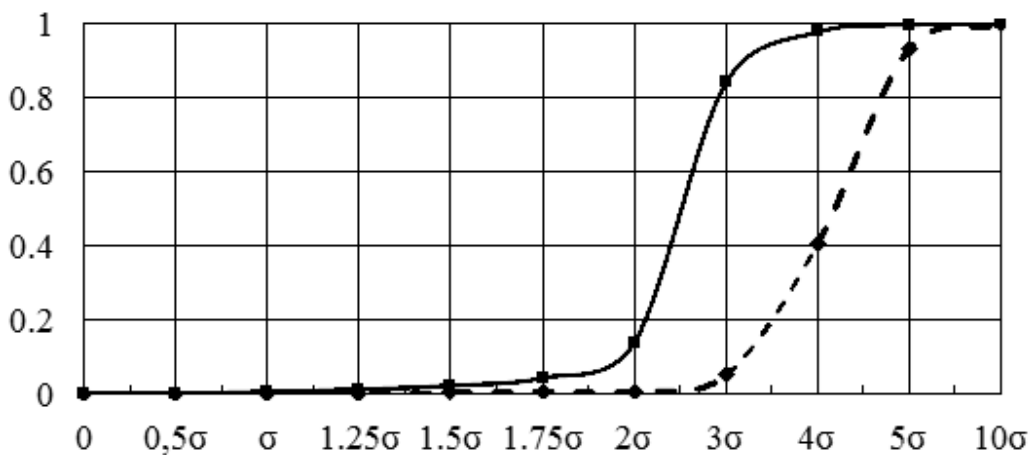


Рисунок 3.32 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения подстановочного метода максимально правдоподобного обнаружения с применением внешней оценки СКО ($\alpha = 10^{-3}$) телескопов GENON (VT-78) (сплошная линия) и SANTEL-400AN (штрих)

Прежде всего, не ясно как разделить смесь звёзд и объектов с околонулевым видимым движением для определения критического значения используемой решающей статистики.

И 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.

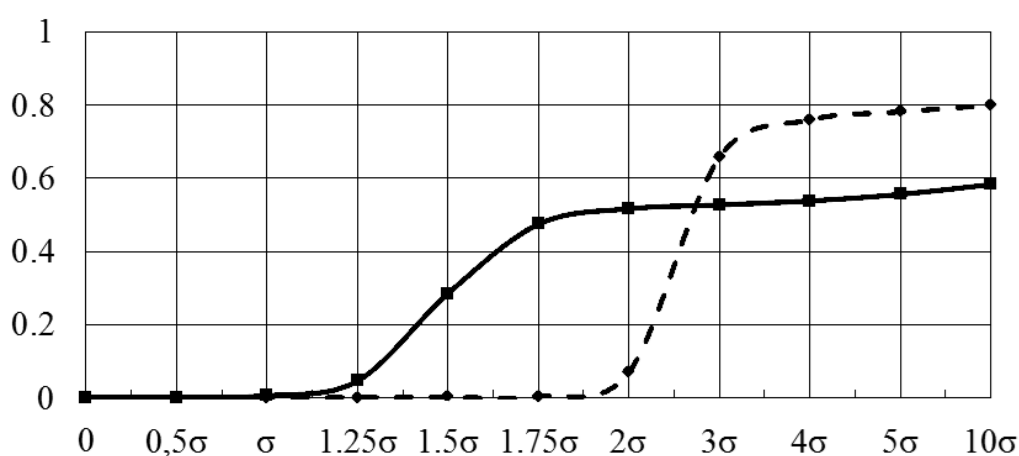


Рисунок 3.33 – Кривые обнаружения околонулевого видимого движения эвристического вычислительного метода обнаружения ($\alpha = 10^{-3}$) телескопов GENON (VT-78) (сплошная линия) и SANTEL-400AN (штрих)

Анализ исследований показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта методами статистического и натурального моделирования. Основываясь на исследованиях показателей качества обнаружения методами статистического (подраздел 3.2) и натурального моделирования (подраздел 3.4), эффективным и чувствительным к наличию околонулевой скорости видимого движения объекта методом обнаружения является двухкоординатный вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f -критерия Фишера (2.50) (рисунки 3.4 – 3.6, 3.9 – 3.11 и 3.27 – 3.30).

Данный метод особенно себя проявил при использовании натуральных дан-

ных (объектов ВК объектов, неподвижных на серии ССD-кадров).

Так как был использован реальный закон распределения измерений положения объектов, что применимо в практике в отличие от нормального распределения, использованного в методе статистического моделирования.

Также в результате исследований замечено, что двухкоординатный вычислительный метод обнаружения с применением f -критерия Фишера (2.50) устойчив к смене оборудования, включая телескоп (рисунок 3.31).

Во время исследований обоими методами для двухкоординатного вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f -критерия Фишера (2.50) использовались предварительно заданные табличные критические значения статистики распределения Фишера с (w , $N_{mea} - r$) степенями свободы [16, 120].

Определение критических значений f_{cr} Фишера в соответствии с наперед заданными уровнями значимости $\alpha = 10^{-3}$ и $\alpha = 10^{-4}$ по результатам статистического и натурного моделирования приводит практически к тем же критическим значениям решающей статистики (рисунки 3.13 – 3.24).

Также по результатам обоих исследований хорошо себя проявил подстановочный метод максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта (2.40) с применением внешней оценки (относительно выборки, используемой для обнаружения видимого движения) СКО (рисунки 3.3 – 3.12, 3.32).

Имеют место практически непреодолимых трудностей при определении критического значения при использовании подстановочных вычислительных методов максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта (рисунок 3.32).

Для преодоления указанных трудностей предлагается использовать двухкоординатный вычислительный метод обнаружения с применением f -критерия Фишера (2.50).

3.5 Применение разработанных методов обработки данных для автоматизированного обнаружения околонулевого видимого движения объекта

3.5.1 Использование разработанных вычислительных методов обнаружения околонулевого видимого движения в программе автоматизированного обнаружения астероидов CoLiTec (CLT)

Разработанные вычислительные методы обнаружения околонулевого видимого движения исследуемых объектов были апробированы на практике и внедрены в блоке межкадровой обработки программы автоматизированного обнаружения астероидов CoLiTec [49, 55, 178].

CoLiTec – программа автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров [49, 51, 55, 178]. ПО в настоящее время находится в открытом доступе [98] и позволяет автоматически выделять объекты с ненулевым видимым движением за счёт плагинов обнаружения быстрых, медленных объектов и объектов с околонулевой скоростью видимого движения.

Одна из лучших программ мира по точности наблюдений [178, 179]. Единственное в мире программное обеспечение, надежно работающее на широких полях. Не имеет аналогов в СНГ и Балтии.

ПО CoLiTec было рекомендовано всем членам Gaia-FUN-SSO для анализа наблюдений в качестве инструмента для обнаружения слабых движущихся объектов на кадрах (приложение Д).

ПО CoLiTec выполняет следующие функции/возможности/операции: возможность быстрого выбора профиля конфигурации; калибровка кадров; настройка и трансформация изображения; поддержка локальных каталогов XPM [108, 109, 110], USNO A2.0, USNO B1.0 [158], UCAC3, UCAC4 [200], CMC-14, PPMXL, Tycho2 [65]; поддержка онлайн каталогов XPM [108, 109, 110], UCAC3, UCAC4 [200], USNO B1.0 [158], CMC-14, PPMXL, NOMAD, SDSS v8; возможность отдельного применения опорных каталогов для астрометрической и фотометрической редукций; запись координатной информации (WCS) в

заголовок FITS-кадра; интерактивный режим измерения объектов; инструмент «лупа»; автоматизированный поиск движущихся объектов; визуальная инспекция автоматически обнаруженных, движущихся объектов; выдача астрометрических измерений в формате MPC; отправка измерений в MPC из интерфейса программы; отображение известных и обнаруженных объектов на кадре; техника сложения кадров Track&Stack; идентификация обнаруженных движущихся объектов с онлайн базой MPCORB (MPC); идентификация стационарных объектов с базой данных переменных звезд (VSX); идентификация стационарных объектов с базой данных галактик (HyperLeda); астрометрическая редукция CCD-кадров с большими полями зрения (2° и более); автоматизированный поиск движущихся тусклых объектов ($\text{SNR} \sim 2.5$); автоматический режим обработки потока данных; сохранение результатов обработки кадров (обнаруженные реальные объекты, объекты отклоненные оператором и пр.); модульная конструкция (возможность подключения отдельных модулей).

Визуальный просмотр результатов работы программы реализовано с использованием вьювера результатов [56]. Вьювер работает независимо от основной программы. Им можно просматривать результаты ПО CoLiTec не прерывая обработку данных основной программой.

Функциональное взаимодействие блоков в ПО CoLiTec. Программа разбита на отдельные блоки [51, 55, 98, 178, 179] (рисунок 3.34). Связь между блоками осуществляется через файлы, что реализует идеологию открытой архитектуры и позволяет использовать на каждом этапе обработки независимо разработанные программные средства.

Изначально серия CCD-кадров поступает на вход блока внутрикадровой обработки. В данном блоке учитываются дефектные («битые» и «горячие») пиксели CCD-матрицы [132, 187, 193] и исключаются крупноструктурные составляющие изображения, соответствующие фону; разбиваются кадры на подсерии с определением базового кадра; складываются кадры подсерий с накоплением изображений объектов; сегментируется изображение и

отбираются в дальнейшую обработку изображения от небесных объектов.

При этом отбор основан на выборе изображений с отношением сигнал/шум, превышающем наперед заданную величину.

Также в блоке внутрикадровой обработки оцениваются положение и блеск объектов на цифровом кадре. В качестве модели формы изображения объекта используется субпиксельная гауссова модель, которая описывает распределение попадания фотонов в пиксели цифрового кадра.

Совокупность сформированных в блоке внутрикадровой обработки измерений Ω_{mea} серии кадров на этапе межкадровой обработки первоначально используется в блоке отождествления измерений и выбора опорных звёзд и в блоке формирования внутреннего каталога (ВК) объектов, неподвижных на серии CCD-кадров (подраздел 1.3.2).

В блоке отождествления измерений и выбора опорных звёзд отождествляются [15, 124, 145, 146] измерения (объекты кадра) и формуляры (звёзды каталога).

Результат отождествления заносится в множество Ω_{ident} измерений, отождествлённых со звёздами используемого астрономического звёздного каталога. Так же в данном блоке выбираются опорные звёзды [15, 50] и оцениваются постоянные пластинки [20, 50].

На основе постоянных пластинок координаты объектов в системе координат (СК) любого CCD-кадра могут быть пересчитаны как в экваториальные координаты, так и в СК любого другого CCD-кадра серии.

При формировании ВК объектов, неподвижных на серии кадров, все измерения пересчитываются в СК одного кадра, который называется базовым кадром [50]. В результате, формируется совокупность измерений Ω_{VK} , гипотетически принадлежащих объектам с нулевым видимым движением.

В блоке оценки экваториальных координат и видимого блеска формируются оценки видимого блеска и экваториальных координат объектов на серии CCD-кадров.

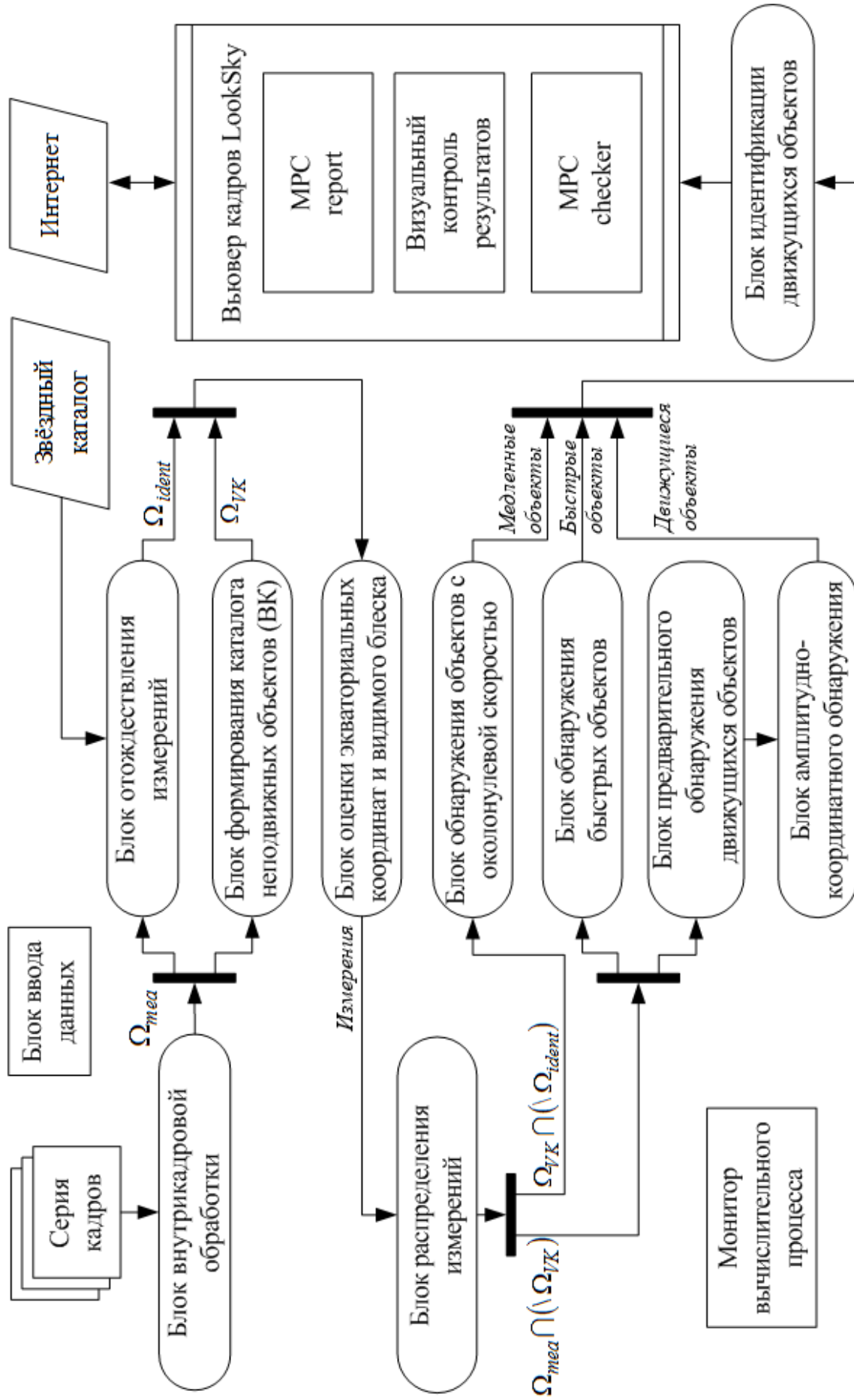


Рисунок 3.34 – Функциональная схема программы автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров CoLiTeС

Для оценки экваториальных координат используется астрометрический каталог, а для оценки видимого блеска используется отдельный фотометрический каталог.

Также в данном блоке происходит отбраковка измерений по видимому блеску согласно критическому значению видимого блеска.

В блоке распределения измерений выполняется распределение сформированных измерений для дальнейшей обработки между такими блоками обнаружения движущихся объектов как блок обнаружения объектов с околонулевым видимым движением, блок обнаружения быстрых объектов и блок предварительного обнаружения движущихся объектов. Данное распределение учитывает особенности изображений объектов с различными скоростями видимого движения.

Некоторые объекты ВК объектов, неподвижных на серии кадров, могут быть по ошибке признаны неподвижными на серии CCD-кадров.

С целью минимизации частоты подобных ошибок в ПО CoLiTec [51, 55] для совокупности измерений ВК Ω_{VK} за исключением измерений Ω_{ident} , отождествлённых со звёздами используемого астрометрического звёздного каталога ($\Omega_{VK} \cap (\setminus \Omega_{ident})$), используется разработанный в работе вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта на серии CCD-кадров, основанный на критериях значимости фактора скорости видимого движения исследуемых объектов (подраздел 2.3).

Данный метод основан на использовании критерия значимости фактора видимого движения объекта (подраздел 2.3), который, как показали проведенные в работе исследования, является более чувствительным к определению околонулевой скорости видимого движения.

Использование вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения исследуемого объекта, основанного на критериях значимости фактора скорости видимого движения исследуемых объектов является одним из конкурентных преимуществ ПО CoLiTec.

Вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии CCD-кадров, основанный на критериях значимости фактора скорости видимого движения исследуемых объектов, включает такую последовательность операций.

Согласно выражений (2.15) – (2.18), проводится МНК-оценка параметров видимого движения исследуемых объектов.

Определяются интерполированные оценки координат исследуемого объекта на кадрах исследуемой серии с помощью выражений (2.19) и (2.20).

После этого согласно выражений (2.26) и (2.27) определяются значения остаточных сумм R_0^2 и R_1^2 квадратов отклонений положения исследуемого объекта в предположении истинности гипотез о нулевом (H_0) (2.1) и ненулевом (H_1) (2.2) видимом движении на данной серии измерений.

А с помощью выражений (2.44), (2.45) и (2.48) определяются значения критериев значимости фактора скорости видимого движения исследуемого объекта. После проведения всех указанных операций принимается решение о наличии или отсутствии околонулевого видимого движения у исследуемого объекта ВК согласно (2.46), (2.47) и (2.49).

В результате, отбираются только те измерения, которые соответствуют критерию принадлежности объектам с околонулевым видимым движением. Они поступают на блок отождествления движущихся объектов.

Все сформированные измерения Ω_{mea} , кроме измерений Ω_{VK} , попавших в ВК объектов, неподвижных на серии CCD-кадров ($\Omega_{mea} \cap (\setminus \Omega_{VK})$), поступают на блок предварительного обнаружения движущихся объектов. Кроме того, те из них, что имеют признаки протяженного изображения, также используются в блоке обнаружения быстрых объектов.

Для обнаружения объектов, изображение которых смазано собственным движением (быстрых объектов), используется вычислительный метод выделения изображений объектов, смазанных собственным движением [5, 73, 105]. Данный метод учитывает большую скорость видимого движения объектов и то,

что эффектом перемещения объекта за время экспозиции кадра при наблюдении таких объектов пренебречь нельзя.

Данный метод состоит из трех этапов.

На первом этапе выделяются измерения, которым соответствуют изображения, имеющие селективные признаки протяженных изображений.

На втором этапе исключаются случайные кластеры объектов с круговыми изображениями.

На третьем этапе проверяется согласованность положений выделенных протяженных изображений на разных кадрах.

Использование данного метода максимизирует вероятность обнаружения объектов с высокой скоростью видимого движения при практическом исключении обнаружения подобных ложных объектов.

Измерения обнаруженных быстрых объектов поступают на блок идентификации движущихся объектов.

В блоке предварительного обнаружения движущихся объектов производится обнаружение движущихся объектов путем накопления статистик, пропорциональных энергии изображения объектов, вдоль возможных траекторий движения объекта (методом собирания света) [49].

В следующем блоке амплитудно-координатного обнаружения осуществляется МНК-оценка параметров предварительно обнаруженных движущихся объектов.

После чего принимаются решения об обнаружении движущихся объектов.

Далее в блоке идентификации движущихся объектов производится идентификация предварительно обнаруженных объектов с известными астероидами, которые находятся в исследуемой области небесной сферы. Для этого с помощью блока MPC-checker во взаимодействии с сервером MPC [129, 130] формируются данные об известных астероидах.

На выходе данного блока формируется множество измерений астероидов,

проидентифицированных с известными астероидами, и множество непроидентифицированных измерений, принадлежащих астероидам, считающимися вновь обнаруженными.

Множество проидентифицированных астероидов формируется путем решения задачи о назначениях венгерским методом [15, 55, 99, 143].

Измерения из множества непроидентифицированных могут являться как ложными, так и измерениями, принадлежащими неоткрытым астероидам или кометам.

Множество измерений астероидов, проидентифицированных с известными астероидами, и множество непроидентифицированных измерений, принадлежащих астероидам, считающимися вновь обнаруженными поступают в блок визуального контроля результатов, функции которого выполняет вьювер LookSky (рисунок 3.35).

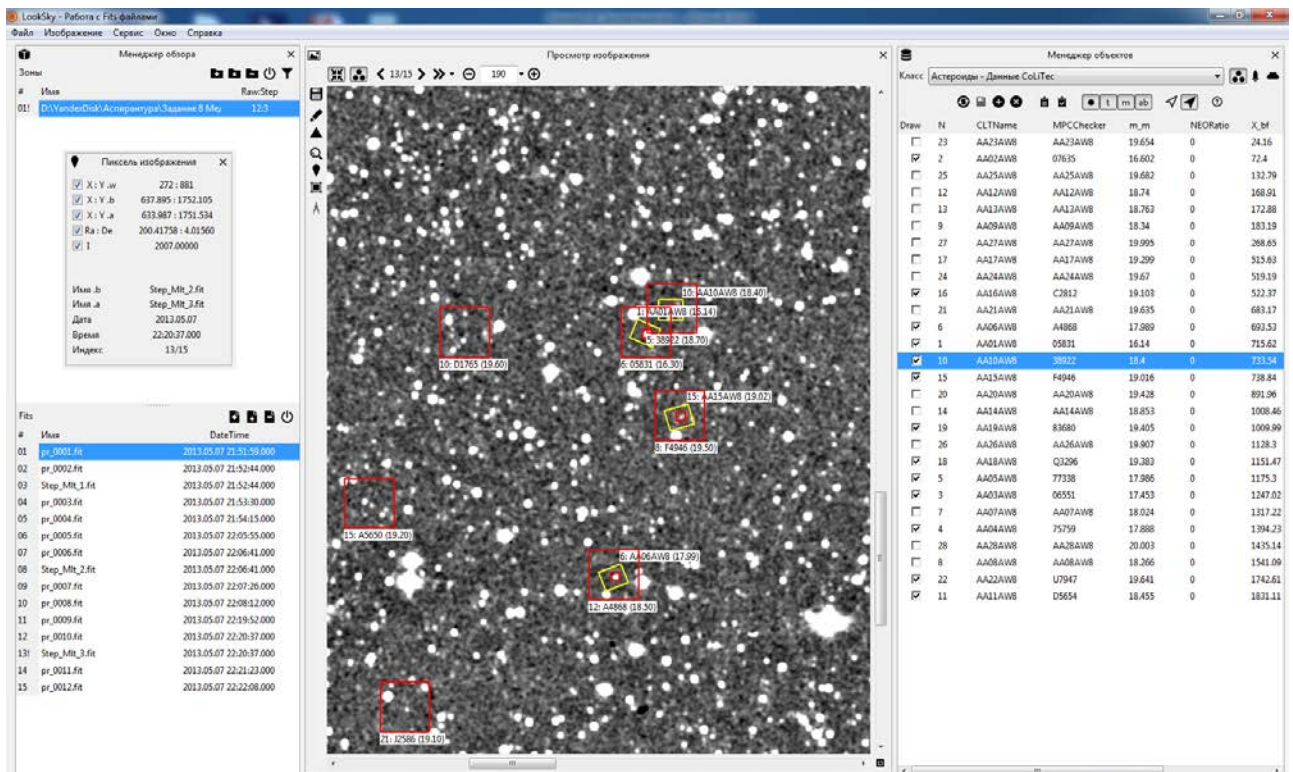


Рисунок 3.35 – Главное окно вьювера LookSky

В данном блоке наблюдатель модерирует решения, принятые автомати-

чески программным обеспечением автоматического поиска астероидов и комет на серии CCD-кадров CoLiТес [51, 98], о наличии на кадрах изображений астероидов.

В результате множество отобранных измерений астероидов преобразуется в отчет о наблюдениях в формате MPC (MPC-report) [129]. Данный MPC отчет наблюдатель отправляет на сервер MPC электронной почтой с использованием вьювера LookSky.

Также существует мобильная версия вьювера (рисунок 3.36).

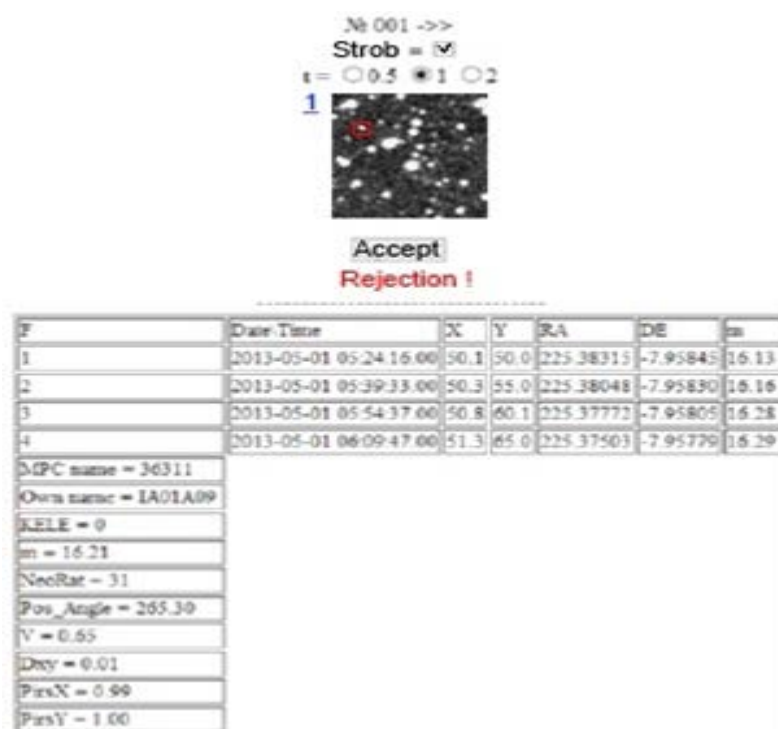


Рисунок 3.36 – Мобильная версия вьювера

Результаты CoLiТес можно контролировать из любой точки мира. Для этого достаточно использовать любой современный мобильный телефон, планшет, или нетбук, работающий на любой платформе. Зайдя на специализированный сайт, можно выполнить различные операции, например, отправить рапорт в MPC, включая NEOCR.

Во время создания новой версии ПО CoLiТес были применены новые принципы, технологии для кроссплатформенности, а также пересмотрены под-

ходы для качественного контроля выполняемого процесса обработки.

При создании основных модулей с GUI применялась кроссплатформенная технология Java FX. Данными модулями являются CoLiTec Control Center (рисунок 3.37), редактор настроек ThresHolds (рисунок 3.38) и основная шина для поэтапной обработки.

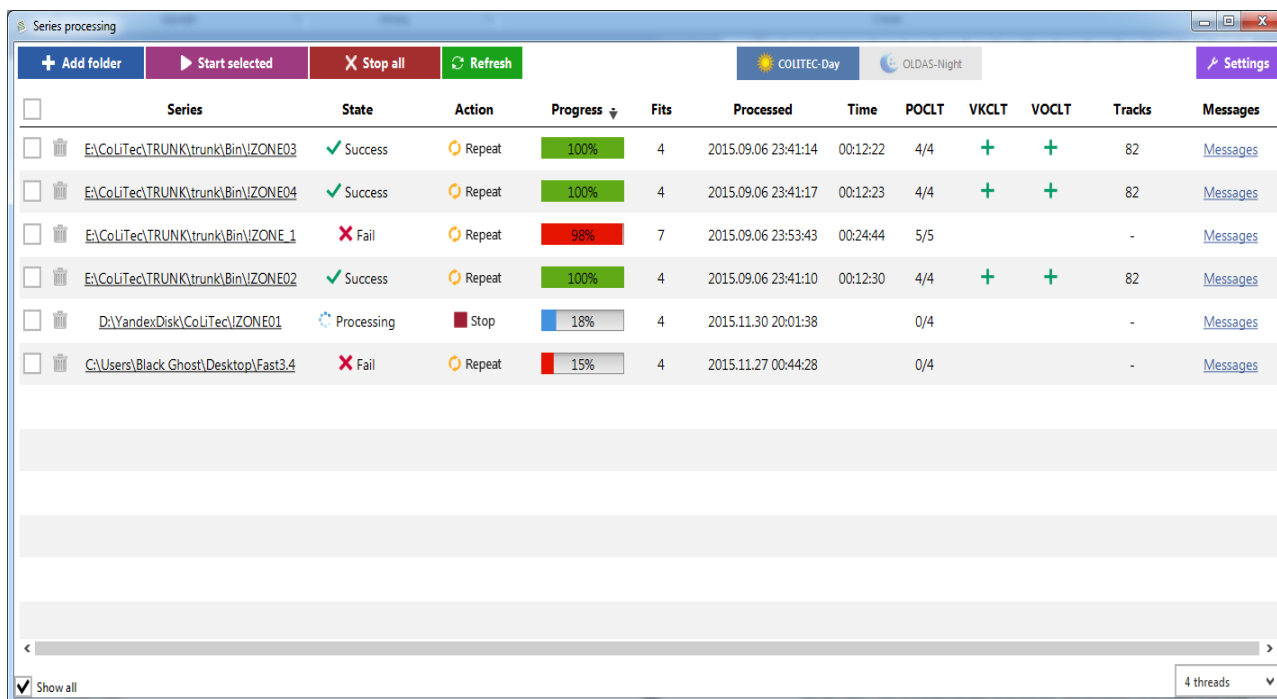


Рисунок 3.37 – Главное окно CoLiTec Control Center

Некоторые из подходов для качественного контроля выполняемого процесса обработки указаны ниже. А именно, упорядоченное хранение всех необходимых параметров обработки позволяет структурированно извлекать параметры отдельно для каждого модуля. На данный момент применяется XML. Эти подходы используются не только в редакторе настроек, а еще и на каждом этапе обработки в качестве внутренних проверок основной шины.

Мультипоточность как возможность управления отдельными процессами обработки. Внедрена система отслеживания всех запущенных модулей во время обработки. Данная система позволяет корректно без потерь данных отследить и по необходимости завершить обработку на любом её этапе.

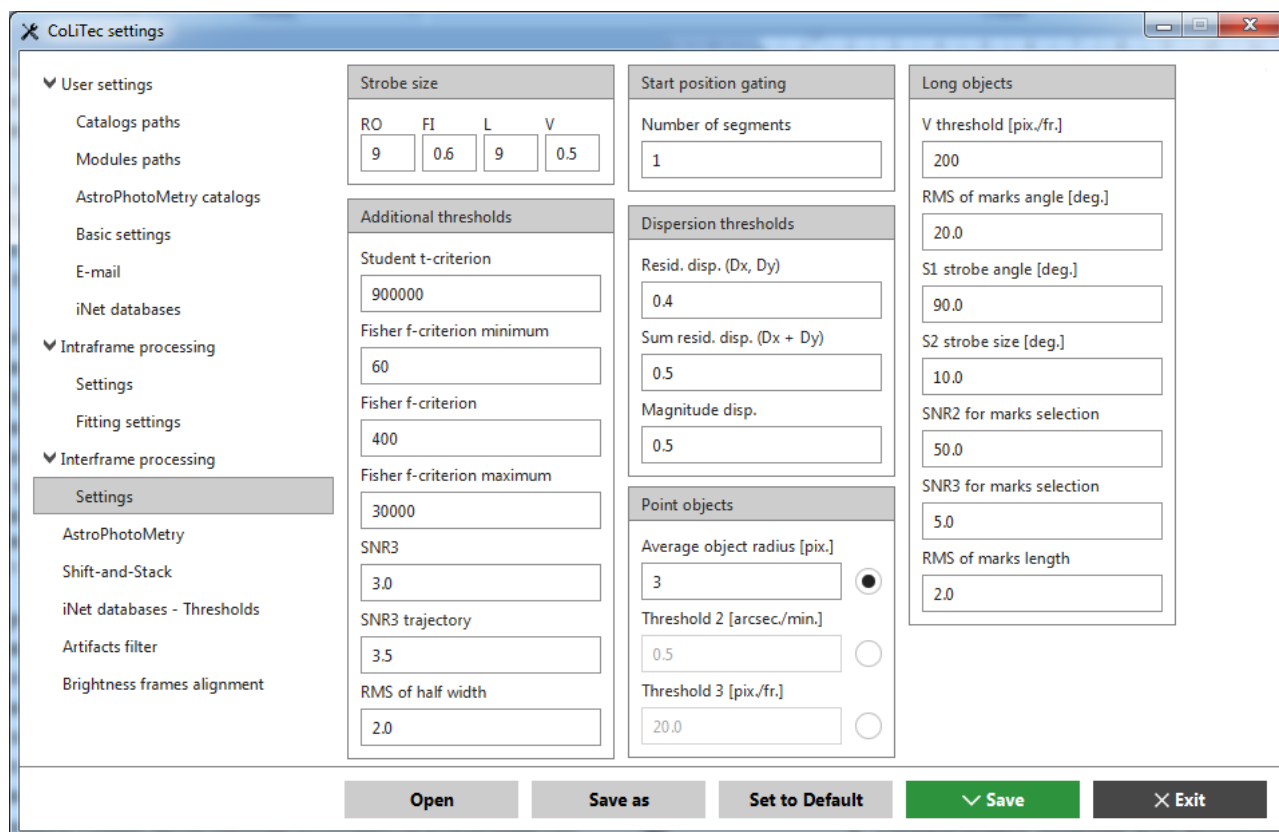


Рисунок 3.38 – Редактор настроек ThresHolds

Система для принятия решения о результатах обработки позволяет адаптировать пользовательские настройки, а также сообщать пользователю корректные результаты на каждом этапе обработки.

Усиленный контроль входных и выходных данных, который проводится на каждом этапе обработки, что позволяет точно отследить какие данные нецелостные.

Редактор настроек ThresHolds (рисунок 3.38) предназначен для тонкой настройки параметров каждого этапа обработки, установки предельно допустимых значений используемых параметров, выбора режимов обработки, а также создания определённой последовательности процесса обработки входных данных в виде серии цифровых кадров. Редактор настроек ThresHolds также содержит внутренний контроль введённых параметров.

Система мониторинга сообщений с подробным логированием процесса обработки представлена на рисунке 3.39.

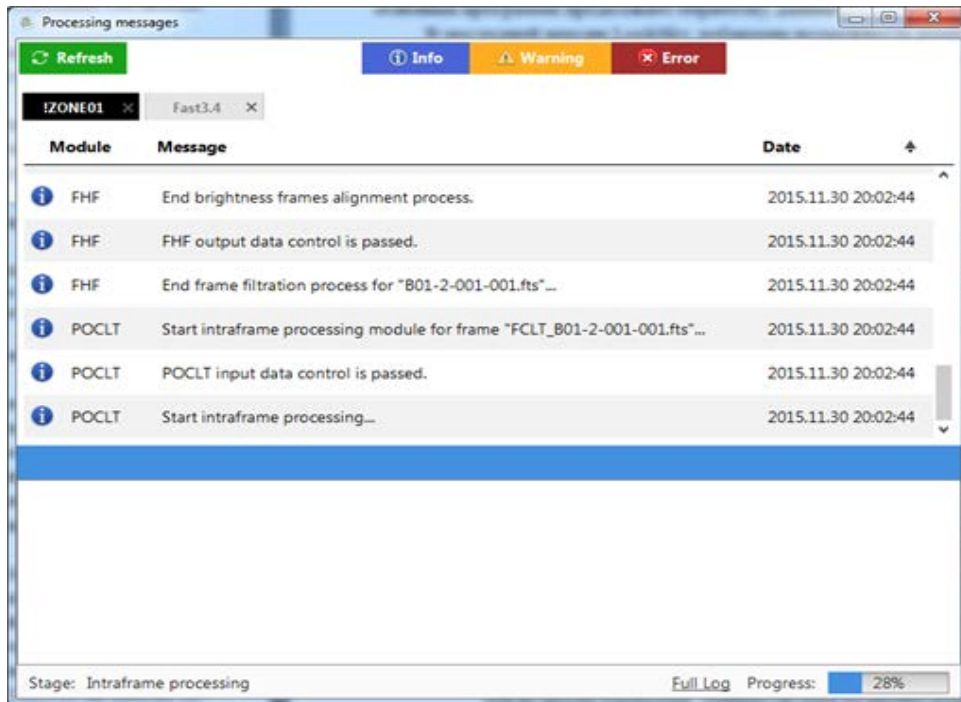


Рисунок 3.39 – Система мониторинга сообщений

Данный подход реализуется за счёт обмена с реляционной базой данных как данными, так и результатами обработки на каждом этапе. В качестве такой выбрана PostgreSQL, которая может быть применена на любых ОС. Структура реляционной базы данных представлена на рисунке 3.40.

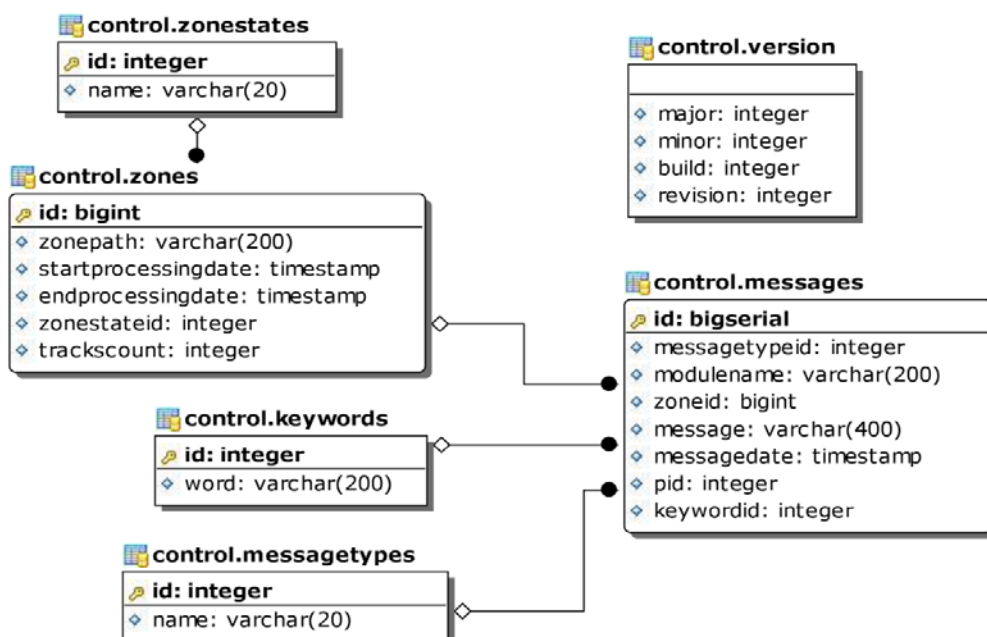


Рисунок 3.40 – Структура реляционной базы данных PostgreSQL

Интересные примеры объектов с околонулевым видимым движением. В ходе исследований при обработке натуральных данных в виде серий цифровых данных с использованием программного обеспечения (ПО) CoLiTec были обнаружены интересные примеры объектов с околонулевым видимым движением. Данные объекты были надёжно идентифицированы с известными объектами в Minor Planet Center (MPC) [129, 130].

Для каждого из этих объектов были рассчитаны значение блеска изображения объекта в звёздных величинах и параметры их видимого движения, а именно: общая угловая скорость объекта, а также скорости вдоль каждой из координат в угловых секундах в минуту и пикселях на кадр, перемещение изображения на серии изображений в пикселях на серию.

В таблице 3.15 приведены параметры видимого движения объекта AA02AW8 (MPC идентификатор - 07635) (рисунок 3.41).

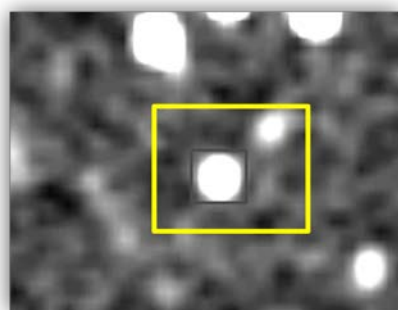


Рисунок 3.41 – Изображения объекта AA02AW8 (07635)

Таблица 3.15 – Параметры видимого движения объекта AA02AW8

Блеск, [зв. вел.]	V, [угл. с./ мин.]	Vra, [угл. с./ мин.]	Vde, [угл. с./ мин.]	V, [пикс./ кадр]	Vx, [пикс./ кадр]	Vy, [пикс./ кадр]	S, [пикс./ серия]
17.45	0.451	0.441	0.094	1.467	1.441	0.274	4.401

В таблице 3.16 приведены параметры видимого движения объекта AA04AW8 (MPC идентификатор - 75759) (рисунок 3.42).

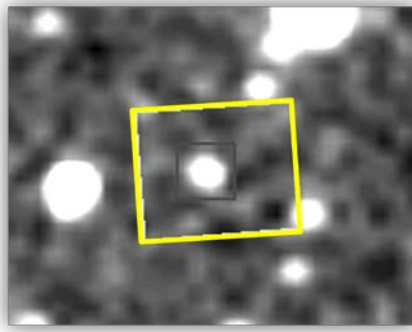


Рисунок 3.42 – Изображения объекта AA04AW8 (75759)

Таблица 3.16 – Параметры видимого движения объекта AA04AW8

Блеск, [зв. вел.]	V, [угл. с./ мин.]	Vra, [угл. с./ мин.]	Vde, [угл. с./ мин.]	V, [пикс./ кадр]	Vx, [пикс./ кадр]	Vy, [пикс./ кадр]	S, [пикс./ серия]
17.88	0.360	0.358	0.036	1.175	1.171	0.091	3.525

В таблице 3.17 приведены параметры видимого движения объекта AA05AW8 (MPC идентификатор - 77338) (рисунок 3.43).

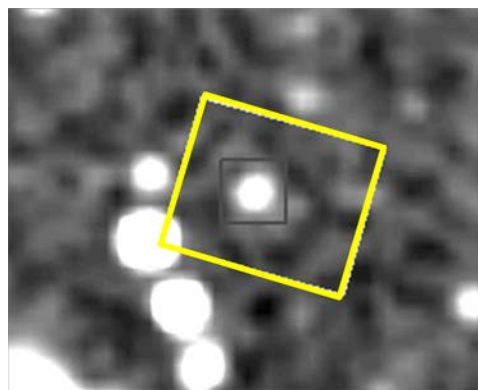


Рисунок 3.43 – Изображения объекта AA05AW8 (77338)

Таблица 3.17 – Параметры видимого движения объекта AA05AW8

Блеск, [зв. вел.]	V, [угл. с./ мин.]	Vra, [угл. с./ мин.]	Vde, [угл. с./ мин.]	V, [пикс./ кадр]	Vx, [пикс./ кадр]	Vy, [пикс./ кадр]	S, [пикс./ серия]
18.85	0.400	0.318	0.241	1.305	1.056	0.766	3.915

В таблице 3.18 приведены параметры видимого движения объекта AA15AW8 (MPC идентификатор - F4946) (рисунок 3.44).

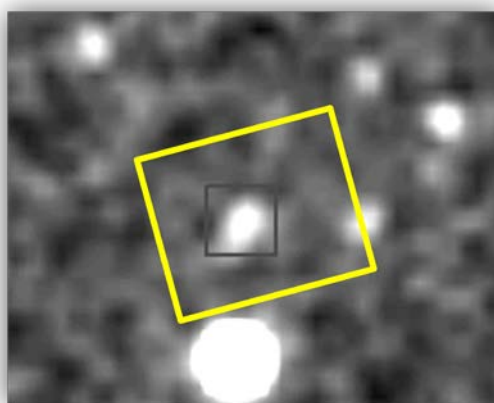


Рисунок 3.44 – Изображения объекта AA15AW8 (F4946)

Таблица 3.18 – Параметры видимого движения объекта AA15AW8

Блеск, [зв. вел.]	V , [угл. с./ мин.]	V_{ra} , [угл. с./ мин.]	V_{de} , [угл. с./ мин.]	V , [пикс./ кадр]	V_x , [пикс./ кадр]	V_y , [пикс./ кадр]	S , [пикс./ серия]
19.11	0.515	0.494	0.144	1.683	1.626	0.433	5.049

В таблице 3.19 приведены параметры видимого движения объекта AA16AW8 (MPC идентификатор - C2812) (рисунок 3.45).

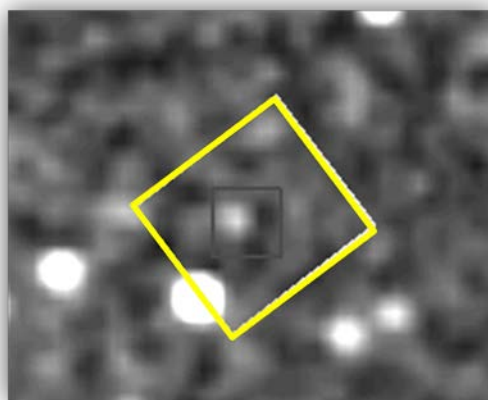


Рисунок 3.45– Изображения объекта AA16AW8 (C2812)

Таблица 3.19 – Параметры видимого движения объекта AA16AW8

Блеск, [зв. вел.]	V, [угл. с./ мин.]	Vra, [угл. с./ мин.]	Vde, [угл. с./ мин.]	V, [пикс./ кадр]	Vx, [пикс./ кадр]	Vy, [пикс./ кадр]	S, [пикс./ серия]
19.48	0.282	0.212	0.186	0.921	0.705	0.591	2.763

В таблице 3.20 приведены параметры видимого движения объекта AA22AW8 (MPC идентификатор - U7947) (рисунок 3.46).

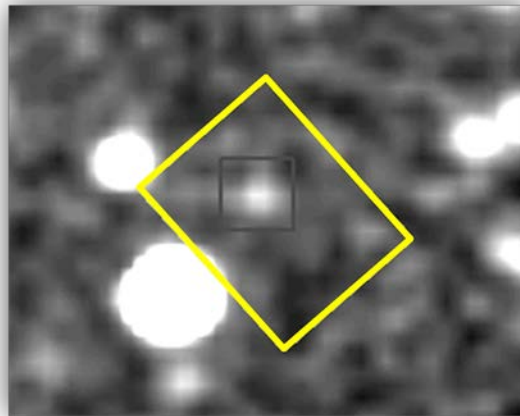


Рисунок 3.46 – Изображения объекта AA22AW8 (U7947)

Таблица 3.20 – Параметры видимого движения объекта AA22AW8

Блеск, [зв. вел.]	V, [угл. с./ мин.]	Vra, [угл. с./ мин.]	Vde, [угл. с./ мин.]	V, [пикс./ кадр]	Vx, [пикс./ кадр]	Vy, [пикс./ кадр]	S, [пикс./ серия]
19.48	0.282	0.212	0.186	0.921	0.705	0.591	2.763

Параметры видимого движения описанных выше объектов с околонулевой скоростью видимого движения были получены после обработки их изображений на CCD-кадре следующими модулями программного комплекса CoLiTec: модулем для яркостного выравнивания изображения, модулем для внутрикадровой обработки, в котором была проведена оценка положения изображений объектов в СК базового кадра.

3.5.2 Открытие долгопериодической околосолнечной кометы C/2012 S1 (ISON) с использованием вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения объекта, основанного на критериях значимости скорости видимого движения объекта

21 сентября 2012 года в обсерватории ISON-Kislovodsk Observatory (Russia) [код Центра Малых Планет «D00»] [36] проекта ISON (International Scientific Optical Network – Международная Научная Оптическая Сеть [36]) была открыта долгопериодическая околосолнечная комета C/2012 S1 (ISON) [91, 157] (рисунок 3.47).



Рисунок 3.47 – Долгопериодическая околосолнечная комета C/2012 S1 (ISON)

Открытие было сделано с помощью 40-см телескопа Santel-400AN и CCD-матрицы FLI ML09000-65 (3056×3056 пикселей, размер пикселя 12 мкм) [91, 106]. Время экспозиции составляло 100 с (рисунок 3.48).

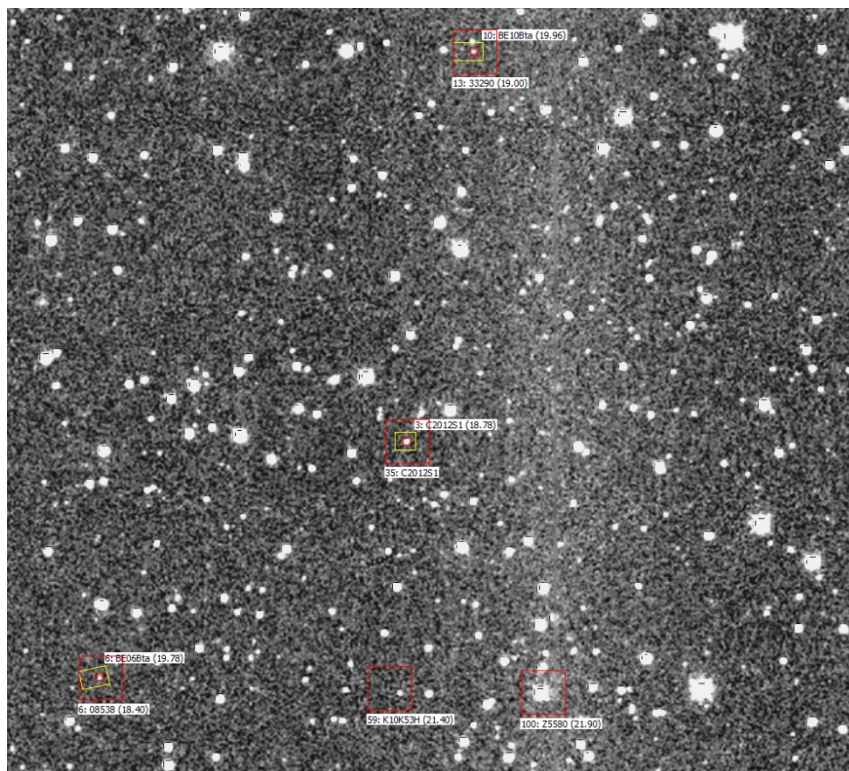


Рисунок 3.48 – Долгопериодическая околосолнечная комета C/2012 S1 (ISON) на момент открытия в центре фрагмента CCD-кадра при масштабе 150%

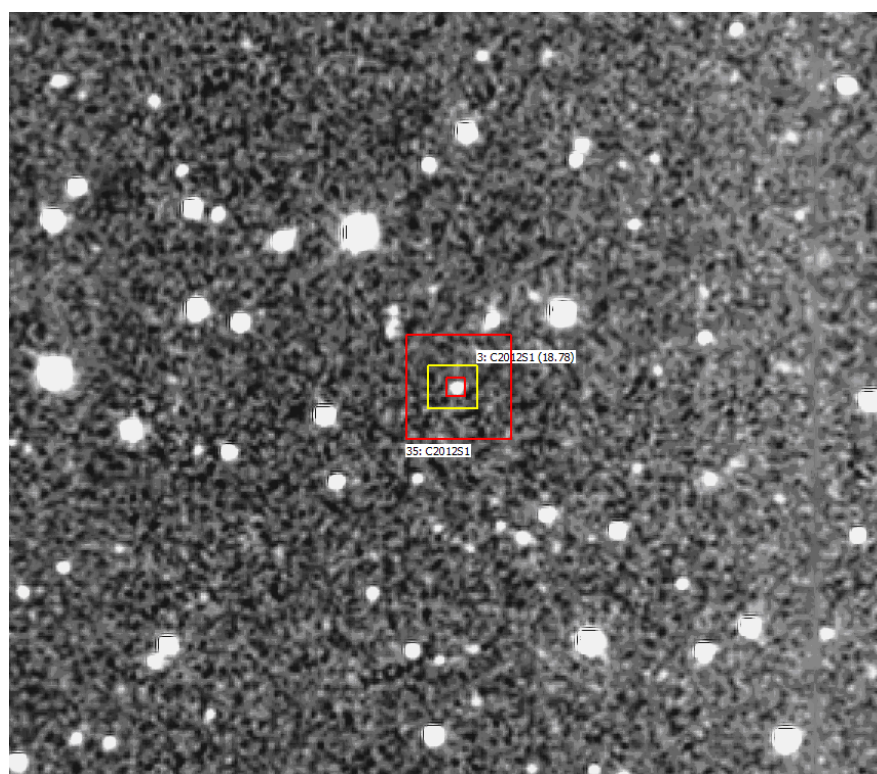


Рисунок 3.49 – Долгопериодическая околосолнечная комета C/2012 S1 (ISON) на момент открытия в центре фрагмента CCD-кадра при масштабе 300%

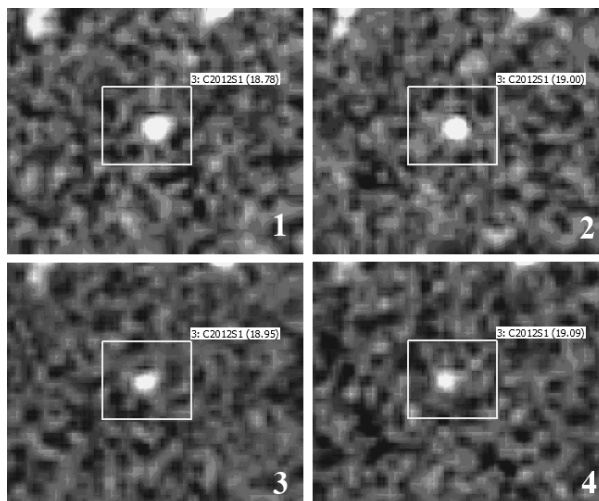


Рисунок 3.50 – Долгопериодическая околосолнечная комета C/2012 S1 (ISON) на серии из 4 CCD-кадров при масштабе 500%

Долгопериодическая околосолнечная комета C/2012 S1 (ISON) была выделена блоком обнаружения объектов с околонулевым видимым движением программного комплекса автоматизированного обнаружения астероидов и комет CoLiTec. В данном блоке использовался разработанный вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта, основанный на критериях значимости скорости видимого движения исследуемого объекта (подразделы 2.2 – 2.4).

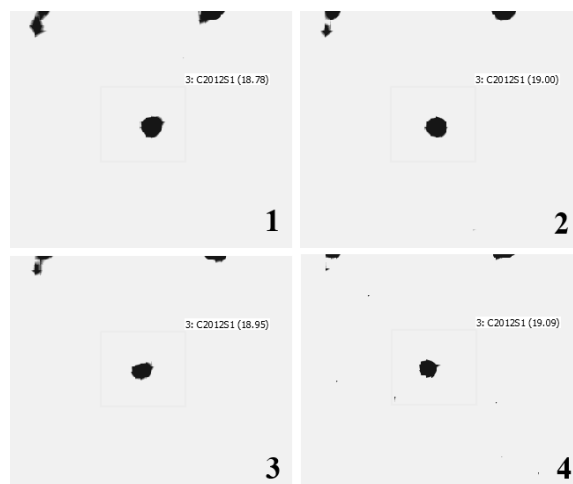


Рисунок 3.51 – Долгопериодическая околосолнечная комета C/2012 S1 (ISON) на серии из 4 CCD-кадров при масштабе 500% (выровненная гистограмма изображения + инверсия)

Данные наблюдения изображения долгопериодической околосолнечной кометы ISON представлены в таблице 3.21.

Таблица 3.21 – Данные наблюдения изображения кометы ISON

Дата	Время	RA, [гр.]	DE, [гр.]	X, [pix]	Y, [pix]
2012-09-21	01:15:39.000	123.17955	27.83949	1760.79	423.12
2012-09-21	01:26:02.016	123.18017	27.83937	1761.00	422.17
2012-09-21	01:34:43.000	123.18086	27.83926	1761.20	421.10
2012-09-21	01:41:39.000	123.18112	27.83934	1761.06	420.69

МНК-оценки параметров движения изображения долгопериодической околосолнечной кометы ISON в СК базового кадра получены с помощью программного комплекса CoLiТес.

Координаты \hat{x}_0, \hat{y}_0 положения изображения долгопериодической околосолнечной кометы ISON на момент времени τ_0 привязки базового кадра равны $\hat{x}_0 = 1760.84$ и $\hat{y}_0 = 423.11$ соответственно. МНК-оценки скоростей \hat{V}_x, \hat{V}_y видимого движения изображения долгопериодической околосолнечной кометы ISON вдоль соответствующих координат равны $\hat{V}_x = 0.086$ и $\hat{V}_y = -0.672$ пикселей на кадр. С помощью выражения $\hat{V} = \sqrt{\hat{V}_x^2 + \hat{V}_y^2}$ МНК-оценка модуля приведенной скорости \hat{V} видимого движения изображения долгопериодической околосолнечной кометы ISON будет равна $\hat{V} = 0.677$ (пикс./кадр).

Перемещение изображения долгопериодической околосолнечной кометы ISON в СК базового кадра вдоль соответствующих координат S_x и S_y за 26 минут наблюдения на серии из 4 CCD-кадров равно $S_x = 0.27$ и $S_y = 2.43$ пикселей соответственно.

С помощью выражения $S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$ полное перемещение S_{xy} изображения долгопериодической околосолнечной кометы ISON будет равно $S_{xy} = 2.445$ пикселей.

Тогда оценка скорости движения изображения долгопериодической околосолнечной кометы ISON по пройденному пути будет равна $V = 0.815$ (пикс. / кадр). На момент открытия видимый блеск кометы составлял 18 звёздную величину, а кома имела диаметр 10 угловых секунд, что соответствует 50 тыс. км на расстоянии в 6,75 а. е. Скорость видимого движения долгопериодической околосолнечной кометы C/2012 S1 (ISON) в момент открытия составляла около 0,8 пикселя за кадр. Размер изображения кометы на кадре был около 5 пикселей (рисунок 3.52, размер клетки соответствует размеру пикселя в 2 угл. секунды).

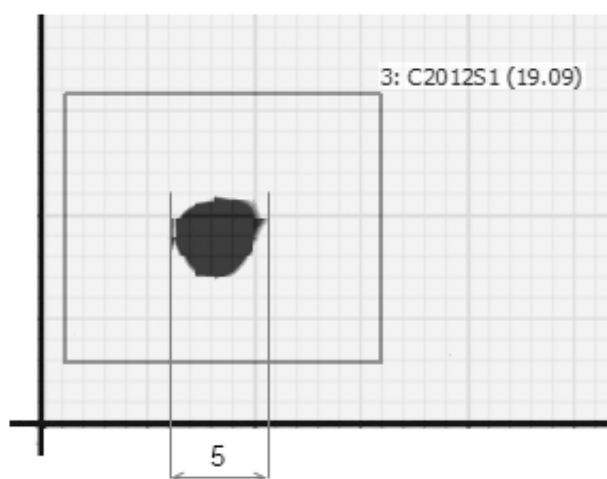


Рисунок 3.52 – Размер изображения долгопериодической околосолнечной кометы C/2012 S1 (ISON) 5 пикселей

За 26 минут наблюдения на серии из 4 кадров изображение кометы ISON переместилось на 3 пикселя (рисунок 3.53).

Перед обнаружением долгопериодической околосолнечной кометы C/2012 S1 (ISON) блоком обнаружения объектов с околонулевым видимым движением её изображение на CCD-кадре было обработано следующими модулями программного комплекса CoLiTec: модулем для яркостного выравнивания изображения, модулем для внутрикадровой обработки, в котором была проведена оценка положения изображения кометы ISON в СК базового кадра.

Также полученные измерения положения изображения кометы ISON из-за незначительного видимого движения были отнесены в модуль формирова-

ния ВК объектов, неподвижных на серии кадров. Данные измерения не были отождествлены со звёздным каталогом в модуле отождествления измерений.

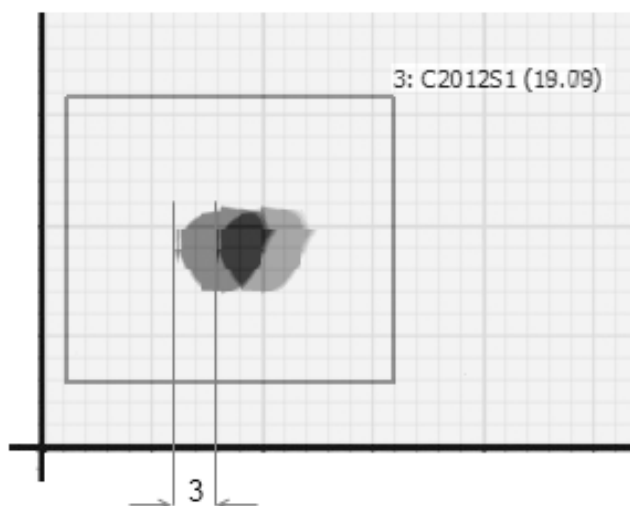


Рисунок 3.53 – Изображение долгопериодической околосолнечной кометы C/2012 S1 (ISON) на 1-м и 4-м CCD-кадрах серии, на которой она была открыта, при масштабе 500%

Основой приведенных выше изображений являются инвертированные изображения кометы ISON на CCD-кадрах, используемых при её открытии. Дополнительно использовалась сетка, размер клетки которой равен размерам пикселя CCD-изображения, то есть двум угловым секундам.

Выводы по разделу 3

1. Разработан метод оценки показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на основе статистического и натурального моделирования. Метод позволил определить условные вероятности правильного обнаружения околонулевого видимого движения объекта при использовании разработанных вычислительных методов обнаружения. По результатам исследований методом статистического моделирования самым эффективным является подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного об-

наружения околонулевого видимого движения объекта (2.40) с применением внешней оценки СКО (рисунки 3.3 – 3.12). Однако сам по себе процесс определения критического значения решающей статистики для этого метода является ресурсно-затратным и не трудоспособен при быстрых изменениях условий наблюдения. Поэтому при кадрах $N_{fr} = 4$ или более (рисунки 3.5 – 3.7 и 3.10 – 3.12) является наилучшим и рекомендуется к использованию двухкоординатный вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f-критерия Фишера (2.50).

2. В качестве натуральных данных при натурном моделировании использовались измерения положения объектов внутреннего каталога, неподвижных на серии кадров [50]. По результатам исследований методом натурального моделирования самым эффективным методом обнаружения околонулевого (скорость не превышает 3 СКО ошибок определения координат за кадр) видимого движения (рисунки 3.27 – 3.31) является двухкоординатный вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f-критерия Фишера (2.50). Так же установлено, что данный метод устойчив к смене оборудования, например, телескопа (рисунок 3.31), чего нельзя сказать о других исследованных методах (рисунки 3.32, 3.33).

3. Разработанные вычислительные методы обнаружения околонулевого видимого движения объекта были апробированы на практике и внедрены в блоке обнаружения объектов с околонулевым видимым движением программного комплекса автоматизированного обнаружения астероидов и комет CoLiTec [51, 178]. С помощью CoLiTec и внедрённого в него предложенного вычислительного метода было и открыто, и обнаружено много объектов, в том числе была открыта комета C/2012 S1 (ISON) [106, 157] – долгопериодическая околосолнечная комета, которая на момент открытия являлась объектом с околонулевым видимым движением.

Материалы раздела опубликованы в работах [14, 42, 46, 53, 54, 69, 70, 71, 137, 138, 139, 140, 170, 176, 177, 179, 180, 181, 182].

ВЫВОДЫ

Для повышения показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения за счет разработки новых и усовершенствования известных вычислительных методов обработки данных решена актуальная научно-техническая задача разработки вычислительных методов обнаружения околонулевого видимого движения объекта и методов исследования показателей качества обнаружения разработанных методов. В результате исследований были получены следующие новые научные результаты.

1. В работе введён подкласс объектов с околонулевым видимым движением, который включает объекты с перемещениями между кадрами, соизмеримыми с ошибками определения положения объекта.

2. Проведенный анализ существующих вычислительных методов обнаружения движущихся объектов и программного обеспечения позволил сделать вывод, что для обнаружения объектов с околонулевым видимым движением не разработано специальных вычислительных методов и программного обеспечения. Использование общей теории обнаружения движущихся объектов приводит к лавинообразному росту ложных обнаружений и пропусков объектов с околонулевым видимым движением.

3. Разработан подстановочный вычислительный метод максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объекта при известной, неизвестной дисперсии измерений положения объекта и также при её внешней оценке. Использование подстановочного метода обосновано отсутствием априорных данных о таких параметрах функции правдоподобия как параметры видимого движения объекта и дисперсия измерений серии. Для нахождения оценок отношений правдоподобия выполняется оценка параметров видимого движения объекта методом наименьших квадратов, интерполяция оценок координат и определение остаточных сумм квадратов отклонений положения объекта в предположении истинности гипотез о нуле-

вом и ненулевом видимом движении соответственно.

4. Задача обнаружения околонулевого видимого движения сведена к задаче проверки значимости скорости видимого движения. Для этого модель видимого движения объекта представлена как линейная регрессионная модель с двумя факторами, физически означающими начальное положение и скорость объекта вдоль каждой из координат.

5. Разработан вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта, основанный на критериях значимости скорости видимого движения объекта. В качестве критерия значимости скорости вдоль каждой координаты используется t -критерий Стьюдента, а критерия значимости общей скорости – f -критерий Фишера.

Разработанный метод является методом с параллельным (одновременным) поступлением данных в отличие от традиционных методов, основанных на последовательном поступлении данных от кадра к кадру. В исследуемой задаче обнаружения околонулевого видимого движения различимость гипотез существенно меньше, чем в общей задаче выделения движущегося. Поэтому последовательная обработка данных невозможна из-за больших потерь данных, связанных с ней и отсутствия запаса этих данных. В работе обнаружение околонулевого видимого движения производится после окончания формирования серии измерений.

6. Разработан и исследован эвристический метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта, основанный на одновременном использовании критерия остаточных дисперсий измерений положения объекта и f -критерия Фишера, как критерия значимости общей скорости видимого движения объекта. Данный метод включает в себя следующие операции для каждой серии измерений: оценка параметров движения методом наименьших квадратов и определение интерполированных оценок координат положения объекта, расчёт критерия значимости (f -критерий Фишера), проверка необходимых условий и принятие решения о наличии околонулевой скорости видимо-

го движения у объекта. Однако сама идея эвристического метода – совместное использование критериев остаточных дисперсий измерений положения и значимости общей скорости видимого движения объекта – не оправдала себя. Показатели качества обнаружения эвристического метода оказались значительно хуже показателей качества метода, использующего критерий значимости общей скорости видимого движения.

7. Разработан метод оценки показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на основе статистического и натурального моделирования. Метод позволил определить условные вероятности правильного и ложного обнаружений околонулевого видимого движения объекта при использовании разработанных вычислительных методов обнаружения.

В качестве натуральных данных были выбраны серии кадров, полученные в обсерваториях ISON-NM (код MPC H15) и ISON-Kislovodsk (код MPC D00). Обсерватория ISON-NM использует 40-см телескоп SANTEL-400AN и ПЗС-матрицу FLI ML09000-65 (3056×3056 пикселей, размер пикселя 12 мкм). Время экспозиции составляло 150 с. Обсерватория ISON-Kislovodsk использует 19,2-см. широкопольный телескоп GENON (VT-78) и ПЗС-матрицу FLI ML09000-65 (4008 x 2672 пикселей, размер пикселя 9 мкм). Время экспозиции составляло 180 с. Использовались измерения положения представителей внутреннего каталога объектов, неподвижных на серии кадров.

8. По результатам исследований показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта самым эффективным в быстроизменяющихся условиях наблюдения является двухкоординатный вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f -критерия Фишера. В данном методе используется табличное критическое значение решающей статистики распределения Фишера с $(w, N_{mea} - r)$ степенями свободы. Это позволяет исключить трудоёмкую и не полностью обоснованную задачу поиска критического значения решающей статистики, полученной в соответствии с наперед заданной условной вероятностью ложного обнаружения

α . Устойчивое обнаружение околонулевого видимого движения при количестве кадров равно $N_{fr} = 8$ возможно при значениях скорости от $V = 1.25\sigma$ (σ - СКО ошибок определения координат за кадр). Для $N_{fr} = 10$ - при $V = \sigma$, а для $N_{fr} = 15$ устойчивое обнаружение околонулевого видимого движения достигается уже при значениях скорости $V = 0.6\sigma$.

Так же установлено, что двухкоординатный вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объекта с применением f-критерия Фишера устойчив к смене оборудования, в данном случае, телескопа, чего нельзя сказать о других исследованных методах.

9. Разработанные вычислительные методы обнаружения околонулевого видимого движения объекта были апробированы на практике и внедрены в блоке обнаружения объектов с околонулевым видимым движением программного комплекса автоматизированного обнаружения астероидов и комет CoLiTec. ПО CoLiTec было рекомендовано всем членам Gaia-FUN-SSO для анализа наблюдений в качестве инструмента для обнаружения слабых движущихся объектов на кадрах.

10. С помощью ПО CoLiTec и внедрённых в него предложенных вычислительных методов было и открыто, и обнаружено много объектов, в том числе была открыта комета C/2012 S1 (ISON) [117, 119] – долгопериодическая около-солнечная комета, которая на момент открытия являлась объектом с околонулевым видимым движением. Скорость видимого движения кометы ISON составляла около 0,8 пикселя за кадр. За 26 минут наблюдения на серии из 4 кадров комета ISON переместилась на 3 пикселя при собственном размере изображения равно 5 пикселей.

Комета ISON стала самой известной кометой 2013 года. По мнению авторов открытия, в случае если бы комета «пережила» встречу с Солнцем, она могла бы стать Большой кометой 2013 года, а также самой яркой кометой первой половины XXI века.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Айвазян С. А. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности [Текст] / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин // М.: Финансы и статистика. – 1989. – 607 с.
2. Аттетков А. В. Методы оптимизации [Текст] / А. В. Аттетков, С. В. Галкин, В. С. Зарубин // М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2003. – 440 с.
3. Бакут П. А. Обнаружение движущихся объектов [Текст] / П. А. Бакут, Ю. В. Жулина, Н. А. Иванчук. – М.: Сов. Радио. – 1980. – 288 с.
4. Безкровный М. М. Метод выбора начальных приближений для оценки координат объектов со статистически зависимыми цифровыми изображениями [Текст] / М. М. Безкровный, Н. С. Соковикова, В. Е. Саваневич, С. В. Хламов, А. Н. Дашкова. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 68. – Х., 2015. – С. 173–188.
5. Безкровный М. М. Пиксельный метод оценки местоположения объектов с изображением, смазанным собственным движением [Текст] / 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.
6. Бортников А. А. Алгоритм совместной траекторной обработки радиолокационной информации [Текст] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – №12. – 2. – С. 182–189.
7. Васильев Ф. П. Методы оптимизации [Текст] // М.: Факториал пресс. – 2002. – 824 с.
8. Вентцель Е. С. Теория вероятности и ее инженерные приложения [Текст] / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров // М.: Высш. шк. – 2000. – 480 с.
9. Гадзиковский В. И. Теоретические основы цифровой обработки сигналов [Текст] // М.: Радио и связь. – 2004. – 344 с.

10. Гимпилевич Ю. Б. Сигналы и процессы в радиотехнике. Часть 1 [Текст] // Севастополь: СевНТУ. – 2003. – 272 с.

11. Гуров И. П. Основы теории информации и передачи сигналов [Текст] // СПб: БХВ – Санкт-Петербург. – 2000. – 97 с.

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

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

14. Дихтяр Н. Ю. Метод автоматического исследования статистических характеристик оценок параметров объектов, неподвижных на серии кадров цифровых кадров одной серии [Текст] / 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.

15. Дихтяр Н. Ю. Метод отождествления астрономических измерений CCD–кадра с формулярами звездного каталога [Текст] / Н. Ю. Дихтяр, Я. С. Мовсесян, В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун–та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин–т». – Вып. 67. – Х., 2015. – С. 197–215.

16. Ермаков С. М. Математическая теория оптимального эксперимента [Текст] / С. М. Ермаков, А. А. Жиглявский // М.: Наука. – 1987. – 320 с.

17. Зверев В. А. Оптические материалы. Часть 2 [Текст] / В. А. Зверев, Е. В. Кривоустова, Т. В. Точилина // СПб: СПб НИУ ИТМО. – 2013. – 248 с.

18. Золотарев В. М. Устойчивые одномерные распределения [Текст] // М.: Наука, Гл. ред. физ.–мат. лит. – 1983. – 304 с.
19. Иванов М. Т. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] / М. Т. Иванов, А. Б. Сергиенко, В. Н. Ушаков // СПб.: Питер. – 2014. – 336 с.
20. Киселев А. А. Теоретические основания фотографической астрометрии [Текст] // М.: Наука, Гл. ред. физ–мат. Лит. – 1989. – 264 с.
21. Кнут Д. Э. Искусство программирования. В 3–х т. [Текст] // М.: Вильямс. Т. 2: Получисленные алгоритмы / ред. Ю. В. Казаченко. – 2000. – 832 с.
22. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников [Текст] // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
23. Козырев Е. С. Исследование точности астрометрической редукции при использовании комбинированного метода наблюдений небесных объектов [Текст] / Е. С. Козырев, Е. С. Сибирякова, А. В. Шульга // Космічна наука і технологія. – 2010. – Т. 16. – № 5. – С. 71–76.
24. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации: в 2 ч. [Текст] // СПб.: Изд–во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 180 с.
25. Коцюба И. Ю. Основы проектирования информационных систем [Текст] / И. Ю. Коцюба, А. В. Чунаев, А. Н. Шиков // ИТМО. – 2015. – 206 с.
26. Коцюба И. Ю. Методы оценки и измерения характеристик информационных систем [Текст] / И. Ю. Коцюба, А. В. Чунаев, А. Н. Шиков // СПб: ИТМО. – 2015. – 264 с.
27. Кривошеев В. И. Современные методы цифровой обработки сигналов [Текст] // Н. Новгород: Изд-во ННГУ. – 2006. – 117 с.
28. Кузьмин С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации [Текст] // М.: "Радио и связь". – 1986. – 352 с.
29. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию [Текст] // К.: Издательство КвіЦ. – 2000. – 428 с.
30. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники [Текст] // М.: Радио и связь. – 1989. – 656 с.

31. Легкий В. Н. Синтез систем ближней локации [Текст] / В. Н. Легкий, М. В. Орлова // Новос. гос. техн. ун–т. – Новосибирск: Изд–во НГТУ. – 2005. – 180 с.

32. Мину М. Математическое программирование. Теория и алгоритмы: Пер. с фр. и предисловие А. И. Штерна [Текст] // М.: Наука. Гл. ред. физ.–мат. лит. – 1990. – 488 с.

33. Миронов А. В. Основы астрофотометрии. Практические основы высокоточной фотометрии и астрофотометрии звезд [Текст] // М: Физматлит. – 2008. – 260 с.

34. Михайлова Л. О. Метод максимально правдоподобной оценки местоположения объектов компактной группы на ПЗС–кадре [Текст] / Л. О. Михайлова, В. Е. Саваневич, Н. С. Соковицова, М. М. Безкровный, С. В. Хламов // Восточно–Европейского журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 5/4 (71). – С. 16–22.

35. Михельсон Н. Н. Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета [Текст] // М.: Физматлит. – 1995. – 333 с.

36. Молотов И. Е. Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений [Текст] / И. Е. Молотов, В. М. Агапов, В. В. Куприянов и др. // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове. – 2009. – № 219. – Вып. 1. – С. 233–248.

37. Мудров В. И. Методы обработки измерений [Текст] / В. И. Мудров, В. Л. Кушко // М.: Советское радио. – 1976. – 252 с.

38. Муха В. С. Вычислительные методы и компьютерная алгебра [Текст] // Минск: БГУИР. – 2010. – 148 с.

39. Объекты, сближающиеся с Землей – Предварительный доклад Инициативной группы по объектам, сближающимся с Землей – Организация Объединенных Наций, Генеральная Ассамблея, Комитет по использованию космического пространства в мирных целях Научно–технический подкомитет: 44 сессия, Вена, 12–23 февраля 2007 года, Пункт 9 предварительной повестки дня

(A/АС.105/С.1/Л.290). [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.un.org/ru/documents/ods.asp?m=A/АС.105/С.1/Л.290>. – Загл. с экрана.

40. Оппенгейм А. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Оппенгейм, Р. Шафер // М: Техносфера. – 2006. – 856 с.

41. Орышич С. С. Анализ показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии ССD–кадров методом натурального моделирования [Текст] / С. С. Орышич, С. В. Хламов, В. Е. Саваневич // 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.

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

43. Пантелеев А. В. Методы оптимизации в примерах и задачах [Текст] / А. В. Пантелеев, Т. А. Летова // М.: Высшая школа. – 2005. – 544 с.

44. Пападимитриу Х. Комбинаторная оптимизация: Алгоритмы и сложность [Текст] / Х. Пападимитриу, К. Стайглиц // М.: Мир. – 1984. – 510 с.

45. Пинигин Г. И. Телескопы наземной оптической астрометрии [Текст] // Николаев: Атолл. – 2000. – 108 с.

46. Саваневич В. Е. CoLiТес – Обнаружение околонулевого видимого движения [Текст] / 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.

47. Саваневич В. Е. Введение и оптимизация параметров иерархической формы представления функции правдоподобия при классификации локационной информации [Текст] / В. Е. Саваневич, Е. В. Ветлугин // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вип. 1 (17). – С. 27–33.

48. Саваневич В. Е. Виртуальные обсерватории и автоматизированное открытие астероидов и комет CoLiTec: исследования и разработки [Текст] / В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, В. П. Власенко, Н. С. Соковикова, С. В. Хламов, А. В. Погорелов, Я. С. Мовсесян, Н. Ю. Дихтяр // Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених «Теоретичні та прикладні аспекти застосування інформаційних технологій в галузі природничих наук», 20–22 квітня 2016 р.: зб. матер. конф. – Одеса, 2016. – С. 94–95.

49. Саваневич В. Е. 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 оброб. інформації.: Зб. наук. праць. Харків. – 2011. – Вип. 2. – С. 137–144.

50. Саваневич В. Е. Метод формирования внутреннего каталога объектов, неподвижных на серии кадров [Текст] / В. Е. Саваневич, Я. С. Мовсесян, Н. Ю. Дихтяр // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 8(145). – С. 44–49.

51. Саваневич В. Е. Программа CoLiTec автоматизированного обнаружения небесных тел со слабым блеском [Текст] / В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, А. М. Кожухов, Е. Н. Диков, В. П. Власенко // Космічна наука і технологія. – 2012. – Т. 18(1). – С. 39–46.

52. Саваневич В. Е. Программа для автоматизированного открытия астероидов и комет CoLiTec: исследования и разработки [Текст] / В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, Н. С. Соковикова, С. В. Хламов, А. В. Погорелов, Я. С. Мовсесян, Н. Ю. Дихтяр // Міжнародний науковий семінар пам'яті Б. Л. Кашеєва до 96-річчя з дня народження «Радіометеори, метеори і міжпланетна складова: поблизу та на відстані», 15 березня 2016 р.: зб. матер. конф. – Харків, 2016. – С. 36–37.

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

54. Саваневич В. Е. Сравнительный анализ показателей точности ПЗС-измерений малых тел Солнечной системы программными обеспечениями CoLiTec и Astrometrica [Текст] / В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, Ю. Н. Иващенко, И. Б. Вавилова, М. М. Безкровный, Е. Н. Диков, В. П. Власенко, Н. С. Соковикова, Я. С. Мовсесян, А. В. Погорелов, С. В. Хламов // «15-та українська конференція з космічних досліджень», 24–28 серпня 2015 р.: сб. матер. конф. – Одеса, 2015. – С. 167.

55. Свід. про реєстр. авт. права № 47290. Україна. Комп'ютерна програма «Програма автоматизованого відкриття астероїдів та комет на серії ПЗС-кадрів CoLiTec» / В. Є. Саваневич, О. Б. Брюховецький, О. М. Кожухов, Є. М. Діков, В. П. Власенко, Л. В. Єленін, М. М. Безкровний, О. Б. Анненков, О. В. Герасименко – дата реєстрації 21. 01. 13.

56. 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.

57. 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.

58. 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.

59. Симонова О. Г. МНК–оценка параметров зависимых линейных траекторий по классифицированной выборке [Текст] // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2004. – Вип. 9 (37). – С. 164–169.
60. Сокови́кова Н. С. Оценка координат близких астероидов на ПЗС–изображении [Текст] / Н. С. Сокови́кова, В. Е. Саваневич, М. М. Безкровный, С. В. Хламов // Восточно–Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 4/4 (64). – С. 41–45.
61. Сокови́кова Н. С. Подпиксельный метод оценки местоположения близких астероидов на дискретном изображении [Текст] / Н. С. Сокови́кова, В. Е. Саваневич, М. М. Безкровный, С. В. Хламов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2013. – №. 3 (62). – С. 32–38.
62. Строгалев В. П. Имитационное моделирование [Текст] / В. П. Строгалев, И. О. Толкачева // МГТУ им. Баумана. – 2008. – С. 697–737.
63. Сухарев А. Г. Курс методов оптимизации [Текст] / А. Г. Сухарев, А. В. Тимохов, В. В. Федоров // М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2005. – 368 с.
64. Телескопы Genon [Электронный ресурс] – режим доступа к ресурсу: <http://www.genon.info/ru>. – Загл. с экрана.
65. Тербиж В. Ю. Современные оптические телескопы [Текст] // М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2005. – 80 с.
66. 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.
67. Ушаков А. В. Прикладная теория информации [Текст] // Санкт-Петербург: НИУ ИТМО. – 2012. – 325 с.
68. Фарбер В. Б. Основы траекторной обработки радиолокационной информации в многоканальных РЛС [Текст] // М.: МФТИ. – 2005. – 160 с.
69. Хламов С. В. Software for asteroids survey processing. Current status and prospects [Текст] / 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.: сб. матер. конф. – Ужгород, 2014. – С. 119.

70. Хламов С. В. Метод натурального моделирования исследования показателей качества обнаружения околонулевого видимого движения объекта на серии CCD–кадров [Текст] / С. В. Хламов, В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, С. С. Орышич // Вестник НТУ "ХПИ". – 2016. – № 16 (1188). – 93–105.

71. Хламов С. В. Метод статистического моделирования 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. 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.

72. Хламов С. В. Разработка подстановочных вычислительных методов максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объектов на серии CCD–кадров [Текст] / С. В. Хламов, В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, С. С. Орышич // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 4/3 (30). – С. 19–26.

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

74. Хламов С. В. Эвристический вычислительный метод обнаружения околонулевого видимого движения объектов на серии CCD–кадров [Текст] / 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.

75. Abramowitz M. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables [Текст] / М. Abramowitz, I. A. Stegun // New York: Dover. – 1972. – 948 p.

76. Aguirre E. L. Comets, asteroids, and Astrometrica [Текст] // Sky and Telescope. – 1997. – Т. 94. – №. 2. – С. 72.

77. Ahn W. Y. Comparison of decision learning models using the generalization criterion method. [Текст] / W. Y. Ahn, J. R. Busemeyer, E.–J. Wagenmakers, J. C. Stout // Cognitive Science. – 2008. – Vol. 32. – P. 1376–1402.

78. Appa G. M. Handbook on Modelling for Discrete Optimization [Текст] / G. M. Appa, L. Pitsoulis, H. P. Williams // Springer. – 2006. – 434 p.

79. Arora J. S. Methods for Optimization of Nonlinear Problems with Discrete Variables: A Review [Текст] / J. S. Arora, M. W. Haug // Structural Optimization. – 1994. – Vol. 8. – P. 69–85.

80. Astrometrica [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.astrometrica.at>. – Загл. с экрана.

81. Atkinson S. Comets, Asteroids, and Meteors [Текст] // Mankato, MN: Capstone Press. – 2013. – 284 p.

82. Bailey R. W. Polar generation of random variates with the t–distribution. [Текст] // Mathematics of Computation. – 1994. – Vol. 62. – Issue 206. – P. 779–781.

83. Bandyopadhyay S. Discrete and Continuous Simulation: Theory and Practice [Текст] / S. Bandyopadhyay, R. Bhattacharya // CRC Press. – 2014. – 375 p.

84. Behseta S. Bayesian correction for attenuation of correlation in multi–trial spike count data [Текст] / S. Behseta, T. Berdyyeva, C. R. Olson, R. E. Kass // Journal of Neurophysiology. – 2009. – Vol. 101. – P. 2186–2193.

85. Berger J. O. The Likelihood Principle (2nd edn.) [Текст] / J. O. Berger, R. L. Wolpert // Hayward, CA: Institute of Mathematical Statistics. – 1988. – 250 p.

86. Berger J. O. The Case for Objective Bayesian Analysis [Текст] // Bayesian Analysis. – 2006. – Vol. 1. – Issue 3. – P. 385–402.

87. Boffin H. M. J. Astronomy at High Angular Resolution. A Compendium of Techniques in the Visible and Near-Infrared [Текст] / H. M. J. Boffin, G. Hussain, J.–P. Berger, L. Schmidtobreick // Springer International Publishing. – 2016 – 274 p.

88. Bolstad W. M. Introduction to Bayesian statistics [Текст] // 2nd edition, Hoboken, NJ: Wiley. – 2007. – 463 p.

89. Botev Z. I. The generalized cross-entropy method, with applications to probability density estimation [Текст] / Z. I. Botev, D. P. Kroese // Methodology and Computing in Applied Probability. – 2011. – Vol. 13. – P. 1–27.

90. Burden R. L. Numerical Analysis [Текст] / R. L. Burden, J. D. Faires // Brook Cole, 9th edition. – 2010. – 888 p.

91. C/2012 S1 (ISON). [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://en.wikipedia.org/wiki/C/2012_S1. – Загл. с экрана.

92. Chan J. C. C. A comparison of cross-entropy and variance minimization strategies [Текст] / J. C. C. Chan, P. W. Glynn, D. P. Kroese // Journal of Applied Probability. – 2011. – Vol. 48A. – P. 183–194.

93. Chan J. Marginal Likelihood Estimation with the Cross-Entropy Method [Текст] / J. Chan, E. Eisenstat // MPRA Paper. – 2012. – Vol. 40051. – 1–28.

94. Charles S. Bos. A comparison of marginal likelihood computation methods [Текст] // In W. Härdle and B. Ronz, editors, COMPSTAT: Proceedings in Computational Statistics. – 2002. – P. 111–117.

95. Chen L. M. Digital Functions and Data Reconstruction: Digital-Discrete Methods [Текст] // Springer. – 2013. – 207 p.

96. Christian R. P. The Bayesian Choice [Текст] // Springer Texts in Statistics. – 2007. – 606 p.

97. Churchill R. L. Modified McLaren–Marsaglia pseudo-random number generator and stochastic key agreement [Текст] // Oklahoma State University. – 2011. – P. 66–104.

98. Collection Light Technology (CoLiTec). Software for automated asteroids and comets discoveries [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.neoastrosoft.com>. – Загл. с экрана.

99. Cope J. S. Utilizing the hungarian algorithm for improved classification of high-dimension probability density functions in an image recognition problem

[Текст] / J. S. Cope, P. Remagnino // ACIVS'12 Proceedings of the 14th international conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems Springer–Verlag Berlin, Heidelberg. – 2012. – P. 268–277.

100. Daniels M. J. Missing Data in Longitudinal Studies: Strategies for Bayesian Modeling and Sensitivity Analysis [Текст] / M. J. Daniels, J. W. Hogan // Monographs on Statistics & Applied Probability. – Chapman & Hall. – 2007. – 324 p.

101. David P. S. Defending Against Asteroids and Comets [Текст] / P. S. David, P. Dearborn, L. Miller // Springer International Publishing. Handbook of Cosmic Hazards and Planetary Defense. – 2014. – P. 1–18.

102. DeGroot M. H. Optimal Statistical Decisions [Текст] // Wiley–Interscience, WCL Edition edition. – 2004. – 512 p.

103. DeGroot M. H. Probability and Statistics [Текст] / M. H. DeGroot, M. J. Schervish // Pearson, Addison Wesley, 4th Edition. – 2011. – 911 p.

104. Draper N. R. Applied regression analysis [Текст] / N. R. Draper, Harry Smith // Business & Economics. – 1998. – Vol. 1. – 706 p.

105. Einicke G. A. Iterative Smoother–Based Variance Estimation [Текст] / G. A. Einicke, G. Falco, M. T. Dunn, D. C. Reid // Signal Processing Letters, IEEE. – 2012. – Vol. 19. – Issue 5. – P. 275–278.

106. Entrevue avec Vitali Nevski. Codécouvreur de la comète ISON [Текст] // Astronomie–Québec, Novembre/décembre. – 2013. – Vol. 2, Issue. 4.

107. Ericson J. Asteroids, comets, and meteorites. Cosmic Invaders of the Earth [Текст] // New York: Fact on File. – 2003. – 273 p.

108. Fedorov P. N. An investigation of the absolute proper motions of the XPM catalogue [Текст] / P. N. Fedorov, V. S. Akhmetov, V. V. Bobylev, A. T. Bajkova // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2010. – Vol. 406, Issue 3. – P. 1734–1744.

109. Fedorov P. N. Residual rotation of the HIPPARCOS/Tycho–2 system as determined from the data of the XPM catalogue [Текст] // P. N. Fedorov, V. S.

Akhmetov, V. V. Bobylev // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2011. – Vol. 416, Issue 1. – P. 403 – 408.

110. Fedorov P. N. The XPM catalogue as a realization of the ICRS in optical and near-infrared ranges of wavelengths [Текст] / P. N. Fedorov, V. S. Akhmetov, V. V. Bobylev and A. G. Gontcharov // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2011. – Vol. 415, Issue 1. – P. 665– 672.

111. Feinberg S. Maximum likelihood estimation in latent class models for contingency table data [Текст] / S. Feinberg, P. Hersh, A. Rinaldo, Y. Zhou // *AR-XIV*. – 2007. – 70 p.

112. Frauendiener J. Analytical and numerical approaches to mathematical relativity [Текст] / J. Frauendiener, D. J. W. Giulini, V. Perlick // Springer, Berlin, New York. – 2006. – 296 p.

113. Gaia Follow-Up Network for Solar System Objects. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <https://gaiafunssso.imcce.fr>. – Загл. с экрана.

114. Garcia J. Opportunity trajectory reconstruction techniques for evaluation of ATC systems [Текст] / J. Garcia, A. Soto, G. de Miguel, J. Besada, P. Tarrío // *Digital Communications – Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles. Tyrrhenian International Workshop*. – 2008. – P. 1–6.

115. Gelman A. Bayesian Data Analysis (Second Edition) [Электронный ресурс] / A. Gelman, J. B. Carlin, H. S. Stern, D. B. Rubin // CRC/Chapman & Hall. – 2003. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.stat.columbia.edu/~gelman/book>. – Загл. с экрана.

116. Girard T. M. The Southern Proper Motion Program. I. Magnitude equation correction [Текст] / T. M. Girard, I. Platais, V. Kozhurina-Platais et al. // *Astron. J.* – 1998. – Vol. 11. – P. 855–865.

117. Girard T. M. The Southern Proper Motion Program. IV. The SPM4 Catalog [Текст] / T. M. Girard, W. F. van Altena, N. Zacharias et al. // *The Astron. J.* – 2011. – Vol. 142, Issue 1. – P. 15.

118. Gonen M. The Bayesian two-sample t test [Текст] / M. Gonen, W. O. Johnson, Y. Lu, P. H. Westfall // *The American Statistician*. – 2005. – Vol. 59. – P. 252–257.

119. Griffiths T. L. Bayesian models of cognition [Текст] / T. L. Griffiths, C. Kemp, J. B. Tenenbaum // *Cambridge Handbook of Computational Cognitive Modeling*. Cambridge, MA: Cambridge University Press. – 2008. – P. 59–100.

120. Guy Mélard. On the accuracy of statistical procedures in Microsoft Excel 2010 [Текст] // *Journal of Computational Statistics and Data Analysis*. – 2014. – Volume 29. – Issue 5. – P. 1095–1128.

121. Harris A. W. The surface properties of small asteroids from thermal-infrared observations [Текст] // *Proceedings of the International Astronomical Union*. – 2005. – T. 1. – №. S229. – C. 449–463.

122. Harris J. W. Maximum Likelihood Method [Текст] / J. W., Harris, H. Stocker // *Handbook of Mathematics and Computational Science*. New York: Springer-Verlag. – 1998. – 824 p.

123. Hogg D. W. Astronomical imaging: The theory of everything [Текст] / D. W. Hogg, D. Lang // *AIP Conf. Proc., Germany*. – 2008. – Vol. 1082. – P. 331.

124. Hogg D. W. Automated Astrometry [Текст] / D. W. Hogg, M. Blanton, D. Lang // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII, ASP Conference Series 394*, – 2008, – P. 27–34.

125. Hogg R. V. Introduction to Mathematical Statistics [Текст] / R. V. Hogg, A. T. Craig, J. W. McKean // New York: Pearson, 7th edition. – 2013. – 704 p.

126. Hoijtink H. Bayesian Evaluation of Informative Hypotheses [Текст] / H. Hoijtink, I. Klugkist, P. Boelen // New York: Springer. – 2008. – 361 p.

127. Hungary–Slovakia–Romania–Ukraine ENPI Cross-border Cooperation Programme. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.huskroua-abc.net>. – Загл. с экрана.

128. Hog E. Construction and verification of the Tycho–2 Catalogue [Текст] / E. Hog, C. Fabricius, V. V. Makarov // *Astron. Astrophys.* – 2000. – Vol. 357. – P. 367–386.

129. IAU Minor Planet Center. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.net>. – Загл. с экрана.

130. IAU Minor Planet Center. Guide to Minor Body Astrometry [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.net/iau/info/Astrometry.html#quality>. – Загл. с экрана.

131. Jae–On K. Factor Analysis: Statistical Methods and Practical Issues [Текст] / K. Jae–On, C. W. Mueller // Eleventh Printing. – 1986. – 215 p.

132. Janesick J. R. Scientific Charge–Coupled Devices [Текст] // SPIE Publications, SPIE Press Monograph. – 2001. – Vol. PM83. – 920 p.

133. Jaynes E. T. Probability theory: the logic of science [Текст] / E. T. Jaynes, G. L. Bretthorst // Cambridge University Press. – 2003 – 753 p.

134. Johnson N. L. Continuous Univariate Distributions [Текст] / N. L. Johnson, S. Kotz, N. Balakrishnan // Wiley. – 1995. – Vol. 2. – 732 p.

135. Jones M. Bayesian fundamentalism or enlightenment? On the explanatory status and theoretical contributions of Bayesian models of cognition [Текст] / M. Jones, B. Love // *Behavioral and Brain Sciences*. – 2011. – Vol. 34. – P. 169–231.

136. Jurgen A. Doornik An Improved Ziggurat Method to Generate Normal Random Samples [Текст] // University of Oxford, Nuffield College. – 2005. – P. 1–9.

137. Khlamov S. CoLiTec: research and development [Электронный ресурс] / S. Khlamov, O. Briukhovetskiy, V. Savanevych, N. Sokovikova, M. Bezkrivnyi // "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>

138. Khlamov S. CoLiTec–multifunction software for the CCD image processing [Электронный ресурс] / V. Savanevych, O. Bryukhovetskiy, S. Khlamov,

N. Sokovikova, A. Pohorelov, Ia. Movsesian, M. Bezkrovniy, 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>

139. 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. Bezkrovniy, 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

140. 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 «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology» (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.

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

142. Kortencamp S. Asteroids, Comets, and Meteoroids [Текст] // Mankato, MN: Capstone Press. – 2011. – 32 p.

143. Kuhn H. W. The Hungarian Method for the Assignment Problem [Текст] // 50 Years of Integer Programming 1958-2008. – 2009. – P. 29-47.

144. Kypraios Th. Introduction to Bayesian Statistics [Текст] // Mathematical Science in Applied Bioinformatics, The University of Nottingham. – 2014. – 212 p.

145. Lang D. Astrometry.net: Blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images [Текст] / D. Lang, D. W. Hogg, K. Mierle // *The Astronomical Journal*. – Vol. 139. – Issue 1782. – 2010. – P. 46.

146. Lang D. Measuring the undetectable: Proper motions and parallaxes of very faint sources [Текст] / D. Lang, D. W. Hogg, S. Jester // *The Astronomical Journal*. – Vol. 137. – Issue 5. – 2009. – P. 4400–4411.

147. Lee K. H. Robust optimization in discrete design space for constrained problems [Текст] / K. H. Lee, G. J. Park // *AIAA Journal*. – 2002. – Vol. 40. – Issue 4. – P. 774–780.

148. Lee M. D. Bayesian Cognitive Modeling: A Practical Course [Текст] / M. D. Lee, E.–J. Wagenmakers // Cambridge University Press. – 2014. – 284 p.

149. Lee M. D. How cognitive modeling can benefit from hierarchical Bayesian models [Текст] // *Journal of Math. Psychology*. – 2011. – Vol. 55. – P. 1–7.

150. Lehman E. L. Testing Statistical Hypotheses [Текст] / E. L. Lehman, J. P. Romano // Springer, 3rd edition. – 2010 – 768 p.

151. Liang F. Mixtures of g priors for Bayesian variable selection [Текст] / F. Liang, R. Paulo, G. Molina, M. A. Clyde, J. O. Berger // *Journal of the American Statistical Association*. – 2008. – Vol. 103. – P. 410–423.

152. Lodewyckx T. A tutorial on Bayes factor estimation with the product space method [Текст] / T. Lodewyckx, W. Kim, F. Tuerlinckx, P. Kuppens, M. D. Lee, E.–J. Wagenmakers // *Journal of Mathematical Psychology*. – 2011. – Vol. 55. – P. 331–347.

153. Mandal M. Continuous and Discrete Time Signals and Systems [Текст] / M. Mandal, A. Asif // Cambridge University Press. – 2007. – 880 p.

154. Marsaglia G. The ziggurat method for generating random variables [Текст] / G. Marsaglia, W. W. Tsang // *Journal of Statistical Software*. – 2000. – Vol. 5, Issue 8, P. 1–7.

155. Masson M. E. J. A tutorial on a practical Bayesian alternative to null-hypothesis significance testing [Текст] // Behavior Research Methods. – 2011. – Vol. 43. – P. 679–690.

156. McLean I. S. Electronic Imaging in Astronomy: detectors and instrumentation [Текст] // Springer Science & Business Media, 2nd edition. – 2008. – 552 p.

157. Minor Planet Center, COMET C/2012 S1 (ISON). [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.org/mpec/K12/K12S63.html>. – Загл. с экрана.

158. Monet D. The USNO–B1.0 Catalog [Электронный ресурс] / D. Monet, S. Levine, B. Canzian. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.harvard.edu/catalogs/ub1.html>. – Загл. с экрана.

159. Mood A. Introduction to the Theory of Statistics [Текст] / A. Mood, F. A. Graybill, D. C. Boes // Third edition, McGraw–Hill. – 1974. – P. 246–249.

160. Morey R. D. Simple relation between Bayesian order–restricted and point–null hypothesis tests [Текст] / R. D. Morey, E.–J. Wagenmakers // Statistics Probability Letters. – 2014. – Vol. 92. – P. 121–124.

161. Myung I. J. Tutorial on maximum likelihood estimation [Текст] // Journal of Mathematical Psychology. – 2003. – Vol. 47. – P. 90–100.

162. National Aeronautics and space administration NEAR–EARTH ASTEROID TRACKING (NEAT) [Электронный ресурс]. // NEAT. – 2016. – Режим доступа к ресурсу: <http://neo.jpl.nasa.gov/programs/neat.html>. – Загл. с экрана.

163. Near Earth Object Program [Электронный ресурс] // NASA. – 2016. – Режим доступа к ресурсу: <http://neo.jpl.nasa.gov/index.html>. – Загл. с экрана.

164. Norman L. J. Continuous univariate distributions [Текст] / L. J. Norman, S. Kotz, N. Balakrishnan // 2nd edition. – N.-Y.: Wiley. – 1995. – 795 p.

165. Očenášek J. Estimation Distribution Algorithm for mixed continuous–discrete optimization problems [Текст] / J. Očenášek, J. Schwarz // Proceedings of the 2nd Euro–International Symposium on Computational Intelligence. Kosice: IOS Press. – 2002. – P. 227–232.

166. Ortega A. A Bayesian latent group analysis for detecting poor effort in the assessment of malingering [Текст] / A. Ortega, E.–J. Wagenmakers, M. D. Lee, H. J. Markowitsch, M. Piefke // Archives of Clinical Neuropsychology. – 2012. – Vol. 27. – P. 453–465.

167. Park S. Y. Maximum entropy autoregressive conditional heteroskedasticity model [Текст] / S. Y. Park; A. K. Bera // Journal of Econometrics (Elsevier). – 2009. – Vol. 150. – Issue 2. – P. 219–230.

168. Phillips P. C. B. The true characteristic function of the F distribution [Текст] // Biometrika. – 1982. – Vol. 69. – P. 261–264.

169. Platais I. A study of systematic positional errors in the SPM plates [Текст] / I. Platais, T. Girard, W. F. van Altena et al. // Astron. and Astrophys. – 1995. – Vol. 304. – P. 141–149.

170. Pohorelov A. Development of software for publication and data retrieval from virtual observatories [Электронный ресурс] / A. Pohorelov, V. Savanevych, S. Khlamov, O. Briukhovetskyi, M. Bezkrivnyi // "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>

171. PRISM [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://prism-america.com>. – Загл. с экрана.

172. Prokopenko I. G. Local trajectory parameters estimation and detection of moving targets in rayleigh noise [Текст] / V. Iu. Vovk, I. P. Omelchuk, Yu. D. Chirka, K. I. Prokopenko // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2014. – №1. – С. 23–35.

173. Qingyang Xu. A Fast Elitism Gaussian Estimation of Distribution Algorithm and Application for PID Optimization [Текст] / Xu Qingyang, Ch. Zhang, Li Zhang // The Scientific World Journal. – 2014. – Vol. 2014. – Issue 597278. – 14 p.

174. Rivkin A. S. Asteroids, Comets And Dwarf Planets [Текст] // Greenwood Press. – 2009. – 224 p.

175. Rosen K. H. Discrete Mathematics and its Applications [Текст] // 5th edition. – The McGraw-Hill. – 2002. – 928 p.

176. Savanevych V. Automated software for CCD–image processing and detection of small Solar System bodies [Текст] / V. Savanevych, A. Bryukhovetskiy, N. Sokovikova, M. Bezкровniy, S. Khlamov, L. Elenin, Ia. Movsesian, M. Dihtyar // "Asteroids, Comets, Meteors 2014" 12–я международная конференция, 30 июня – 4 июля 2014 г.: сб. матер. конф. – Хельсинки, 2014. – С. 491.

177. Savanevych V. CoLiTec – automated software for the image processing and moving objects detection. Current status and prospects [Текст] / V. Savanevych, A. Bryukhovetskiy, E. Dikov, I. Vavilova, L. Elenin, M. Bezкровniy, N. Sokovikova, S. Khlamov, V. Vlasenko, O. Gerasimenko, V. Tkachov // NASA's Asteroid Initiative Idea Synthesis Workshop, Houston, USA, September 30th – October 2nd, 2013, – P. 9–10.

178. Savanevych V. E. A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinates [Текст] / V. E. Savanevych, O. B. Briukhovetskiy, N. S. Sokovikova, M. M. Bezкровny, 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.

179. Savanevych V. E. Comparative analysis of the positional accuracy of CCD measurements of small bodies in the solar system software CoLiTec and Astrometrica [Текст] / V. E. Savanevych, A. B. Briukhovetskiy, Yu. N. Ivashchenko, I. B. Vavilova, M. M. Bezкровniy, E. N. Dikov, V. P. Vlasenko, N. S. Sokovikova, Ia. S. Movsesian, N. Yu. Dihtyar, L. V. Elenin, A. V. Pohorelov, S. V. Khlamov // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2015. – Т. 31 (6). – P. 302–313.

180. Savanevych V. E. Estimating the astronomical object parameters through CCD–frames in CoLiTec project: the current state and perspectives [Текст] / V. E. Savanevych, A. B. Bryukhovetskiy, M. M. Bezкровniy, N. S. Sokovikova, S. V. Khlamov, K. S. Smelyakov, I. B. Vavilova, L. Elenin, Yu. N. Ivashenko

//Astronomy and Space Physics Annual International Conference, 21–24 May 2013.: сб. матер. конф – Kyiv, 2013.

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

182. 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. Bezkrovniy, A. Dahskova // "International scientific and methodological conference KOLOS 2014", 4 – 6 декабря 2014 г.: сб. матер. конф. – Стакчин, Словакия, 2014. – Режим доступа к публ.: http://www.astrokolonica.sk/uploads/files/kolos2014/kolos2014_abstractbook.pdf

183. Sellke T. Calibration of p values for testing precise null hypotheses [Текст] / T. Sellke, M. J. Bayarri, J. O. Berger // The American Statistician. – 2001. – Vol. 55. – P. 62–71.

184. Shaowei L. Marginal Likelihood Integrals for Mixtures of Independence Models [Текст] / L. Shaowei, B. Sturmfels, Xu. Zhiqiang // Journal of Machine Learning Research. – 2009. – Vol. 10. – P. 1611–1631.

185. Shustov B. M. A concept of a space hazard counteraction system: Astronomical aspects [Текст] / B. M. Shustov, L. V. Rykhlova, Yu. P. Kuleshov, Yu. N. Dubov, K. S. Elkin, S. S. Veniaminov, G. K. Borovin, I. E. Molotov, S. A. Naroenkov // Springer, Solar System Research. – 2013. – Т. 47 (4). – P. 302–314.

186. Simon M. K. Probability Distributions Involving Gaussian Random Variables [Текст] // A Handbook for Engineers and Scientists, New York: Springer. – 2002. – 200 p.

187. Smith G. E. The invention and early history of the CCD [Текст] / E. G. Smith // Rev. Mod. Phys. – 2010. – Vol. 3, Issue 82. – P. 2307–2312.

188. Sokolova M. G. Asteroid and comet hazard: Identification problem of observed space objects with the parental bodies [Текст] / M. G. Sokolova, Y. A. Nefedyev, N. Y. Varaksina // *Advances in Space Research*. – 2014. – Т. 54 (11). – P. 2415–2418.

189. Sokovikova N. S. The estimation of the object position on the digital CCD frame using the pixel model of the object image [Текст] / N. S. Sokovikova, V. E. Savanevych, M. M. Bezkrovniy, A. V. Pogorelov, S. V. Khlamov // *Scholars Journal of Engineering and Technology*. – 2015. – Т. 3(2a). – С. 153–165.

190. Subroto G. Papalambros Reliability Optimization With Mixed Continuous–Discrete Random Variables and Parameters [Текст] / G. Subroto, Y. Panos // *Journal of Mechanical Design*. – 2006. – 129 (2). – P. 158–165.

191. Taha H. A. *Operations Research: An Introduction* [Текст] // Prentice Hall. – 2006. – 838 p.

192. The Spaceguard Foundation home page. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <https://www.cfa.harvard.edu/~marsden/SGF>. – Загл. с экрана.

193. Theuwissen A. J. *Solid–State Imaging with Charge–Coupled Devices* [Текст] // Springer Science & Business Media. – 1995. – 388 p.

194. Troianskyi V. V. Method for calculating orbits of Near-Earth asteroids observed with telescope OMT-800 [Текст] / V. V. Troianskyi, A. A. Bazyey, V. I. Kashuba, V. V. Zhukov, S. A. Korzhavin // *Odessa Astronomical Publications*. – 2014. – Vol. 27. – P. 154–155.

195. Tsiatis A. *Semiparametric Theory and Missing Data* [Текст] // Springer. – 2006. – 384 p.

196. Wagenmakers E.–J. Simple relation between one–sided and two–sided Bayesian point–null hypothesis tests [Текст] / E.–J. Wagenmakers, R. D. Morey // *Statistics Probability Letters*. – 2014. – Vol. 92. – P. 121–124.

197. Wetzels R. Bayesian inference using WBDDev: A tutorial for social scientists [Текст] / R. Wetzels, M. D. Lee, E.–J. Wagenmakers // Behavior Research Methods. – 2010. – Vol. 42. – P. 884–897.

198. Wetzels R. Bayesian parameter estimation in the Expectancy Valence model of the Iowa gambling task [Текст] / R. Wetzels, J. Vandekerckhove, F. Tuerlinckx, E. Wagenmakers // Journal of Mathematical Psychology. – 2010. – Vol. 54. – P. 14–27.

199. Williams D. R. Earth Fact Sheet [Электронный ресурс]. – National Aeronautics and Space Administration (NASA). – 2013. – Режим доступа к ресурсу: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>. – Загл. с экрана.

200. Zacharias N. The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4) [Текст] / N. Zacharias, C. T. Finch // The Astronomical Journal. – 2013. – Vol. 145(2). – Issue 44. – 14 p.

Приложение А
Акты использования и внедрения результатов диссертационных исследований

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор

Харківського національного
 університету радіоелектроніки

І.І. Ключник

2016р.



АКТ

про впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи
 аспіранта кафедри електронних обчислювальних машин

Хламова Сергія Васильовича

**«Обчислювальні методи обробки даних для виявлення об'єктів з близьконульовим
 видимим рухом» у науково-дослідну роботу № 307 Харківського національного
 університету радіоелектроніки**

Комісія у складі голови – д.т.н., проф. Бодяньського Є. В., наукового керівника НДР №307, наукового керівника ПНДІ АСУ ХНУРЕ, професора кафедри штучного інтелекту; та членів – к.т.н., с.н.с. Плісс І. П., відповідального виконавця НДР №307, провідного наукового співробітника ПНДІ АСУ ХНУРЕ; Хоменко Н. Ю., начальника наукового інформаційно-аналітичного відділу ХНУРЕ, склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи **Хламова С. В.** використовуються у Харківському національному університеті радіоелектроніки при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи № 307 «Динамічний інтелектуальний аналіз послідовностей нечіткої інформації за умов суттєвої невизначеності на основі гібридних систем обчислювального інтелекту» № ДР 0116U002539, згідно з тематичним планом НДДКР ХНУРЕ затвердженим Міністерством освіти і науки України.

Розроблені методи виявлення близьконульового видимого руху об'єкта базуються на критеріях значимості фактору швидкості видимого руху об'єкта, а традиційні методи виявлення – на критерії максимальної правдоподібності. Методи використовують регресійну модель замість моделі прямолінійного рівномірного видимого руху об'єкта. За допомогою розроблених Хламовим С. В. обчислювальних методів здійснюється високоточне виявлення близьконульового видимого руху об'єкта на послідовностях цифрових зображень. Результати будуть використані в науково-технічних звітах по НДР №307.

Голова комісії:

Є. В. Бодяньський

Члени комісії:

І. П. Плісс

Н. Ю. Хоменко

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис

Печатка

Л. В. Колесник

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор

Харківського національного
університету радіоелектроніки



І.І. Ключник

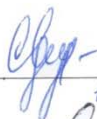
2016р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Хламова Сергія Васильовича

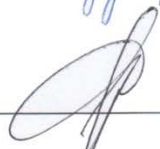
Комісія у складі начальника навчального відділу к.т.н., доцента Свид І.В., завідувача кафедри електронних обчислювальних машин д.т.н., професора Рубана І.В., д.т.н., професора кафедри електронних обчислювальних машин Міхалья О.Ф., підтверджує, що результати дисертаційної роботи Хламова Сергія Васильовича «Обчислювальні методи обробки даних для виявлення об'єктів з близьконульовим видимим рухом» впроваджені у навчальний процес на кафедрі електронних обчислювальних машин в курсах «Комп'ютерні методи обробки зображень» та «Програмні методи обробки зображень» а також у дипломному проектуванні.

Начальник НВ


19.09.2016р.

І. В. Свид

Завідувач кафедри ЕОМ



І. В. Рубан

Професор кафедри ЕОМ



О.Ф. Міхаль

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис
Печатка

Л. В. Колесник

ЗАТВЕРДЖУЮ

про ректор з навчально-наукової
роботи ДВНЗ «УжНУ»
проф. Сливка О.Г.



2016 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Хламова Сергія Васильовича

Комісія у складі: голова – наук. керівник ЛКД ДВНЗ «УжНУ» ст.н.сп. Єпішев В.П., члени – ст.н.сп. Мотрунич І.І., н.сп. Кудак В.І. та м.н.сп. Періг В.М., складала даний акт у тому, що розроблені аспірантом кафедри Електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки Хламовим Сергієм Васильовичем обчислювальні методи виявлення об'єктів з близьким до нульового видимого руху, що впроваджені у програмному забезпеченні автоматичного пошуку астероїдів та комет на серії ПЗЗ-кадрів CoLiТес, використовуються в Лабораторії космічних досліджень фізичного факультету ДВНЗ «Ужгородський національний університет» для обробки астрономічних ПЗЗ-кадрів астероїдних оглядів та в рамках наукових досліджень пов'язаних з обробкою та аналізом результатів спостережень геосинхронних супутників.

Обчислювальні методи виявлення об'єктів з близьконульовим видимим рухом, які розробив Хламов С. В. в рамках дисертаційної роботи, діляться на дві групи методів виявлення. Перша базується на використанні критерію максимальної правдоподібності. Друга група методів виявлення базується на новій лінійній регресійній моделі, що відповідає моделі прямолінійного рівномірного видимого руху об'єкта. Методи другої групи базуються на критеріях значимості фактору швидкості видимого руху об'єкта.

Розроблені Хламовим С. В. обчислювальні методи виявлення дозволяють впевнено знаходити в автоматизованому режимі об'єкти з близьконульовим видимим рухом на серії цифрових кадрів. Це значно покращує продуктивність праці астронома, дозволяє зовсім по іншому планувати огляди та дає ще ряд переваг. З використанням розроблених Хламовим С.В. методів виокремлення малорухомих об'єктів на серії ПЗЗ-кадрів стає можливим проводити обробку даних в умовах спостережень, які постійно змінюються.

Акт складений для подання у спеціалізовану Вчену раду з захисту дисертацій і не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії _____ Єпішев В.П.

Члени комісії: _____ Мотрунич І.І.
_____ Кудак В.І.
_____ Періг В.М.

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис
Печатка

Л. В. Колесник

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
Одеського національного
університету імені І.І. Мечникова

В.О.Іваніця

« _____ » 2016 р.



АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
Хламова Сергія Васильовича

Комісія у складі директора НДІ "Астрономічна обсерваторія" Одеського національного університету імені І.І. Мечникова, доктора фіз.-мат. наук Андрієвського Сергія Михайловича і заступника директора з науки НДІ "Астрономічна обсерваторія" ОНУ імені І.І. Мечникова, кандидата фіз.-мат. наук Кошкіна Миколи Івановича склали даний акт у тому, що розроблені аспірантом кафедри Електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки Хламовим Сергієм Васильовичем обчислювальні методи виявлення близьконульового видимого руху об'єкта, які були інтегровані у блок міжкадрової обробки програмного забезпечення CoLiTec, впроваджені в НДІ "Астрономічна обсерваторія" ОНУ імені І.І. Мечникова – Odessa-Mayaki (с. Маяки, Одеська обл., Україна, МРС код - 583).

Розроблені методи дозволили автоматизувати обробку даних астероїдного огляду, що проводить НДІ АО ОНУ на 0,8 м телескопі ОМТ-800 з матрицею FLI ML9000 3056 x 3056.

При створенні обчислювальних методів модель прямолінійного рівномірного видимого руху об'єкта представлялася лінійною регресійною моделлю. Розроблені методи базуються на критеріях значимості фактору швидкості видимого руху об'єкта, в той час як традиційні методи виявлення базуються на критерії максимальної правдоподібності. Методи дозволяють проводити роботи в умовах спостереження, які постійно змінюються.

Показники якості виявлення зазначеного класу астероїдів на серії цифрових кадрів значно зросли завдяки обчислювальним методам виявлення близьконульового видимого руху об'єкта, що розроблені Хламовим С. В.

Акт складений для подання у спеціалізовану вчену раду з захисту дисертацій і не є підставою для фінансових розрахунків.

Директор НДІ АО ОНУ,
Зав. Відділом малих тіл Сонячної системи

 М. Андрієвський

Заст. директора НДІ АО ОНУ,
Зав. Відділом космічних досліджень

 М.І. Кошкін

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

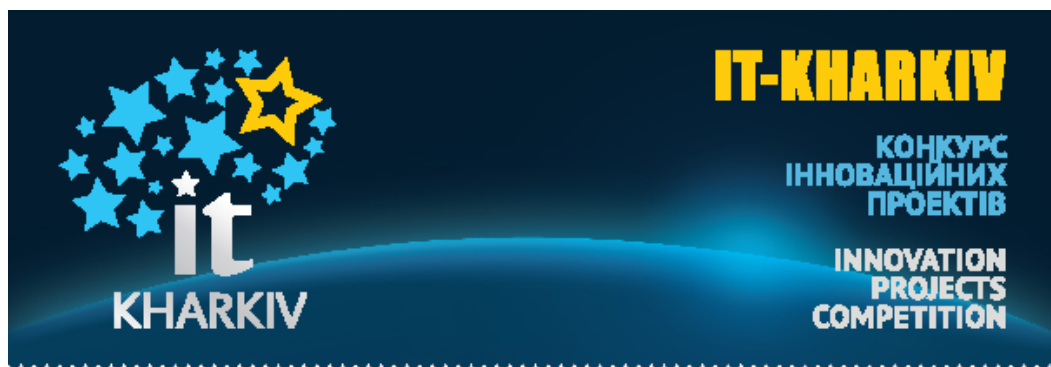
Підпис

Печатка

Л. В. Колесник

Приложение Б

Диплом за первое место в конкурсе инновационных проектов «IT-Kharkiv»



ДИПЛОМ

НАГОРОДЖУЄТЬСЯ

Саваневич Вадим Євгенович

професор кафедри електронних обчислюваних машин
Харківського національного університету радіоелектроніки
Брюховецький Олександр Борисович, Діков Євген Миколайович,
Власенко Володимир Петрович, Герасименко Олег Вікторович,
Безкровний Михайло Михайлович, Соковікова Наталія Сергіївна,
Хламов Сергій Васильович, Ткачов Віталій Миколайович,
Погорелов Артем Віталійович, Мовсесян Яна Самвелівна

ЗА ПЕРЕМОГУ У НОМІНАЦІЇ

Кращий проект в області розпізнавання, обробки,
відтворення тексто-графічних і аудіо-візуальних даних

ПРОЕКТ

Програма автоматизованого відкриття астероїдів та комет
на серії ПЗЗ-кадрів CoLiTec

Голова організаційного комітету
конкурсу інноваційних проектів
«IT-KHARKIV»

A.V. Movchan

it-kharkiv.com.ua

28 листопада 2013 р.

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис
Печатка

Л. В. Колесник

Приложение В

Рекомендация ПО CoLiTec от Gaia-FUN-SSO



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Observatoire de Paris

Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides
77, avenue Denfert-Rochereau - F-75014 PARIS, France



Centre National de la
Recherche Scientifique
UMR 8028

William THUILLOT
Astronomer at
IMCCE-UMR8028 CNRS
Paris Observatory
thuillot@imcce.fr
<http://www.imcce.fr>
Phone : (33) 1 40 51 22 62
Fax : (33) 1 46 33 28 34

Paris, December 15, 2014

To:

V. Savanevich
S. Khlamov
CoLiTec members
Department of Electronic Computers
Kharkov National University of Radio Electronics
Department of Electronic Computers
14, Lenin Ave.
Kharkiv, 61166
UKRAINE

Dear CoLiTec team,

As chairman of the Gaia-FUN-SSO-3 workshop, I would like to thank you for your participation to this workshop. I thank you also for your very interesting presentation of the CoLiTec software and its applications. Since it addresses the problem of the detection of faint moving objects, it is well adapted to the Gaia-FUN-SSO conditions of observation. Therefore I recommend CoLiTec software to all members of the Gaia-FUN-SSO network. Information about CoLiTec with link to web-site has been posted on the Gaia-FUN-SSO Wiki (<https://www.imcce.fr/gaia-fun-ss0/>)

With hope for further collaboration.
With my best regards,



William THUILLOT
Astronomer at IMCCE & UMR 8028 CNRS
Paris Observatory
Chairman of the Gaia-FUN-SSO workshop
Coordinator of the Gaia-FUN-SSO network

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис
Печатка

Л. В. Колесник

- [Main page](#)
- [The network](#)
- [Observing sites](#)
- [Recommendations](#)
- [Technical documents](#)
- [Tools](#)
- [Campaigns of observation](#)
- [Alerts](#)
- [Data Policy](#)
- [Papers and Communications](#)
- [Links](#)
- [Circulars Gaia-FUN-SSO](#)
- [Access to GBOT, the Ground Based Optical Tracking of Gaia](#)
- [Workshop 2010 web pages](#)
- [Workshop 2012 web pages](#)
- [Workshop 2014 web pages](#)
- [Blog Gaia](#)
- [Launch Gaia LIVE](#)
- [Information on Gaia](#)

Tools

Table of Contents

- [Tools](#)
- [Preparing observation](#)
- [Analysing observation](#)

Preparing observation

- [Ephemeride servers](#)
- [JPL Horizon system](#)
- [IMCCE ephemerides](#)
- [MPC ephemerides](#)
- [NEODys-2](#)
- [Lowell Asteroid Observing Services](#)
- [Sky Body Tracker \(SkyBoT\) on Aladin](#)

SkyBoT is a VO compliant tool for preparing and analyzing observation of Solar System Objects. It can provide several services. You can seek and identify all the known solar system objects in a field of view of a given size ("cone search" mode). You can resolve the names of the solar system objects into their celestial coordinates at a given epoch ("resolver" mode). You can access dynamical and physical properties of the identified objects.

This web service is implemented in the Aladin Sky Atlas at the CDS in Strasbourg (France) and is a very convenient mean for the visualisation of field of view and positioning of SSO objects. The address is: <http://aladin.u-strasbg.fr/aladin.gml>

- [Sky Body Tracker \(SkyBoT\) web service](#)

If you wish to insert automatic requests to SkyBoT in a code, you will find the instructions at this address: <http://vo.imcce.fr/webservices/skybot/>

Analysing observation

- [ColITec software](http://www.neoastrosoft.com/colitec_en/) : http://www.neoastrosoft.com/colitec_en/ can allow you to detect faint moving objects in your frames. A light version can be downloaded at http://www.neoastrosoft.com/download_en/
- [Praia](#) see item [Technical Documents](#) (information to be get from M. Assafin, Valongo obs., Rio, Brazil)
- [Astrometrica](http://www.astrometrica.at/) : <http://www.astrometrica.at/>
- [Prism](http://www.prism-astro.com/us/index.php) (sky mapping, imaging, astrometry...) : <http://www.prism-astro.com/us/index.php>