

Министерство образования и науки Украины
Харьковский национальный университет радиоэлектроники

На правах рукописи

СОКОВИКОВА НАТАЛИЯ СЕРГЕЕВНА



УДК 519.6:004.932

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ
ОБЪЕКТОВ, СМАЗАННЫХ СОБСТВЕННЫМ 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



Л.В. Колесник

Харьков – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень условных сокращений	5
Введение	6
Раздел 1. Анализ особенностей формирования цифровых кадров при наблюдении небесных объектов и методов их автоматической обработки	13
1.1 Необходимость наблюдения объектов с малым (круговые изображения) и большим (изображения, смазанные собственным движением) временем экспозиции.....	13
1.2 Характеристика и особенности условий наблюдения объектов с круговыми и смазанными собственным движением изображениями	18
1.3 Известные системы автоматизированного обнаружения объектов с круговыми и смазанными собственным движением изображениями и вычислительные методы обработки таких изображений ...	23
1.3.1 Оптические системы для обнаружения объектов и программные средства обработки цифровых ПЗС-кадров.....	23
1.3.2 Вычислительные методы обработки цифровых изображений, используемые для определения положения астероидов.....	29
1.4 Постановка целей и задач исследования.....	31
Выводы по разделу 1	34
Раздел 2. Разработка вычислительного метода обработки цифровых кадров для оценки параметров круговых объектов	36
2.1 Постановка задачи для изображений круговых объектов	36
2.2 Разработка субпиксельной гауссовой модели для описания кругового изображения объекта.....	38
2.3 Определение параметров изображения круговых объектов согласно критерию минимума суммы квадратов отклонений между модельной и экспериментальной яркостями.....	41
2.4 Исследование точности оценки положения круговых объектов на ПЗС-кадрах.....	49
2.4.1 Анализ показателей точности ПЗС-измерений программно-	

го обеспечения CoLiTec на фоне тридцати самых продуктивных обсерваторий мира по количеству наблюдений.....	50
2.4.2 Сравнительный анализ показателей точности ПЗС-измерений малых тел Солнечной системы программными обеспечениями CoLiTec и Astrometrica.....	55
Выводы по разделу 2	60
Раздел 3. Разработка вычислительного метода для оценки параметров цифровых изображений объектов, смазанных собственным движением, на цифровых кадрах.....	62
3.1 Постановка задачи оценки параметров цифровых изображений объектов, смазанных собственным движением.....	62
3.2 Субпиксельная гауссова модель цифрового изображения объекта, смазанного собственным движением.....	66
3.3 Разработка методов оценки положения объектов, смазанных собственным движением, на цифровых кадрах.....	73
3.3.1 Определение параметров цифрового изображения объекта, смазанного собственным движением, согласно критерию минимума суммы квадратов отклонений.....	73
3.3.2 Вычислительный метод максимально правдоподобной оценки положения объекта с цифровым изображением, смазанным собственным движением, при использовании субпиксельной модели изображения.....	80
3.4 Метод выделения изображений объектов, смазанных собственным движением.....	94
3.5 Типовые примеры изображений, смазанных собственным движением объектов.....	115
Выводы по разделу 3	126
Раздел 4. Использование разработанных вычислительных методов оценки параметров объектов с изображениями, смазанными собственным движением, в системах автоматизированного обнаружения астероидов	128
4.1 Реализация методов обработки в программном комплексе авто-	

матизированного обнаружения астероидов и комет CoLiTec.....	128
4.2 Сравнение функциональных возможностей ПО CoLiTec и Astrometrica.....	134
Выводы по разделу 4	139
Выводы	140
Список использованных источников	143
Приложение А. Акты использования и внедрения результатов диссертационных исследований.....	159
Приложение Б. Диплом за первое место в конкурсе инновационных проектов «IT-Kharkiv»	164

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АСЗ – астероид, сближающийся с Землей.

ВО – виртуальная обсерватория.

МНК – метод наименьших квадратов.

ПЗС – прибор с зарядовой связью.

ОВКО – область внутрикадровой обработки.

ОСЗ – объект, сближающийся с Землей.

ПО – программное обеспечение.

ПГА – потенциально опасный астероид.

СКО – среднеквадратическое отклонение.

ССО – объект Солнечной системы.

CoLiTec – программа автоматического поиска астероидов и комет на серии

ПЗС-кадров.

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

PSF – англ. Point spread function, Функция рассеивания точки.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Объекты, изображения которых смазаны собственным движением, имеют различное происхождение. Примерами таких техногенных объектов могут быть самолеты, искусственные спутники Земли [1], летящие снаряды, множество вариантов беспилотных летательных аппаратов (например, дроны [2, 3]). Примерами таких природных объектов являются астероиды, сближающиеся с Землей, кометы, метеоры, птицы и т.д. При наблюдении и изучении таких объектов возникают определенные сложности (из-за размера, удаленности или скорости наблюдаемых объектов), в результате чего возникает необходимость в специализированных системах обработки результатов их наблюдения.

Наиболее явно данная проблематика заметна в области обзорных, прежде всего астероидных, наблюдений [4, 5, 6]. При этом круговая форма изображений присуща большей части объектов астероидных обзоров, в том числе и потенциально опасных.

Наблюдение и обнаружение астероидов, как правило, проводится при помощи телескопов со сравнительно небольшими апертурами. Учитывая это, возникает необходимость повышения точности оценки положения объектов.

Научное направление автоматической компьютерной обработки ПЗС-кадров является достаточно новым и продолжает развиваться вместе с совершенствованием средств ПЗС-наблюдений. Методам обработки ПЗС кадров с изображениями небесных объектов (как круговых, так и смазанных собственным движением) посвящены следующие работы: Куприянов В. [7], Бауэр Т. (Baueг T.) [8], Чай Ч. (Zhai C.) [9], Верес П. (Vereš P.) [10]. Однако описанные методы определения параметров изображений круговых и протяженных объектов не всегда соответствуют выдвигаемым к ним требованиям, особенно к точности оценки координат объектов. Поэтому актуальной является **научно-техническая задача** разработки вычислительных методов обработки цифровых

изображений для оценки положения небесных объектов с круговыми изображениями и изображениями, смазанными собственным движением.

Связь работы с научными программами, планами и темами. Диссертационная работа связана с международной программой «проект быстро движущихся объектов» (FMO (Fast moving object) project) [11], «Космическая стража» (Spaceguard) [12], программой «Информированность о ситуации в космосе» Европейского космического агентства (ESA Space Situational Awareness) [13], программами наблюдений астероидов под эгидой Центра малых планет (Minor Planet Center – MPC) Международного Астрономического Союза [14], НИР №273 «Нейро-фаззи системы для поточної кластеризації та класифікації послідовностей даних за умов їх викривленості відсутніми та аномальними спостереженнями» (№ГР 0113U000361): раздел №273-2 «Адаптивні методи та моделі класифікації даних і прогнозування часових рядів за умов їх викривленості відсутніми та аномальними спостереженнями на основі штучних імунних систем».

В рамках данной тематики диссертантом разработаны вычислительные методы обработки изображений для оценки местоположения объектов с малым (круговые изображения) и большим (изображения, смазанные собственным движением) временем экспозиции.

Цель и задачи исследования. Цель работы состоит в повышении точности оценки параметров объектов с круговыми и смазанными собственным движением изображениями за счет разработки новых и уточнения известных вычислительных методов обработки цифровых изображений.

Достижение данной цели обеспечивается решением частных задач:

– усовершенствование метода оценки положения объектов с круговыми изображениями за счет разработки субпиксельной модели круговых изображений объектов;

– усовершенствование метода оценки положения объектов с изображениями, смазанными собственным движением, за счет разработки субпиксель-

ной модели изображений объектов, смазанных собственным движением;

– разработка метода выделения изображений объектов, смазанных собственным движением.

Объект исследования – изображения объектов с ненулевой скоростью видимого движения.

Предмет исследований – модели изображений объектов с большой скоростью видимого движения.

Методы исследований. Основные результаты работы получены на основе теории вычислительных методов, теории математической статистики, теории оптимизации, позволивших разработать: вычислительный метод оценки параметров изображения небесных объектов на ПЗС-кадрах с использованием субпиксельной модели изображения объектов; вычислительный метод оценки параметров изображения небесных объектов на ПЗС-кадрах, согласно критерию минимума суммы квадратов отклонений, при описании цифровых изображений субпиксельной моделью; вычислительный метод максимально правдоподобной оценки положения объектов с изображением, смазанным собственным движением; теории цифровой обработки изображений, позволивших усовершенствовать метод предварительного выделения изображения небесных объектов, смазанных собственным движением; теории статистического моделирования и обработки натуральных данных, подтвердивших достоверность полученных теоретических результатов.

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

– впервые предложен трехэтапный вычислительный **метод обнаружения изображений объектов, смазанных собственным движением.** Его использование максимизирует вероятность обнаружения объектов с высокой скоростью видимого движения;

– усовершенствован **итерационный метод оценки положения объекта с круговым изображением на цифровом ПЗС-кадре на основе субпиксель-**

ной модели. Метод позволяет уменьшить среднее отклонение оценки положения объекта с круговым изображением по сравнению с традиционными методами, которые основаны на аппроксимации изображения объекта гауссовой моделью;

– усовершенствован **вычислительный метод оценки положения объекта с цифровым изображением, смазанным собственным движением, на основе субпиксельной модели** изображения объектов. Использование данного метода позволяет расширить пределы достоверных измерений на область изображений с малыми отношениями сигнал-шум.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивалась корректным использованием основных положений известного и апробированного математического аппарата. Полученные новые научные результаты подтверждаются экспериментальными исследованиями и применением данных результатов исследований в программе автоматизированного обнаружения астероидов CoLiTec, которая на протяжении ряда лет успешно используется в обсерваториях для обнаружения известных и открытия новых астероидов.

Практическое значение полученных результатов. Предложенные вычислительные методы были использованы в разработке программы автоматического поиска астероидов на серии ПЗС-кадров, одним из разработчиков которого является диссертант. Разработанные методы и реализующая их программа CoLiTec были использованы в (Андрушевской астрономической обсерватории (A50), удаленной обсерватории ISON-NM (Нью-Мексико, США, H15), обсерватории ISON-Кисловодск (D00), Уссурийской астрономической обсерватории ISON-Ussuriysk (C15)), Главной астрономической обсерватории Национальной академии наук Украины, что подтверждается соответствующими актами внедрения [15, 16] (приложение А). Также разработанные методы были внедрены в рамках учебного процесса (акт в приложении А).

В результате внедрения разработанных вычислительных методов измерения обсерватории ISON-NM обладают одним из наименьших в мире средним

модулем отклонений. По суммарным итогам 2011-2012 года обсерватория ISON-NM заняла седьмое место, как по количеству наблюдений астероидов, так и по количеству их предварительных открытий.

Использование программы CoLiTec позволяет на тех же кадрах получить на 11 % измерений большее, чем при использовании одной из самых распространенных программ обработки данных астероидных обзоров Astrometrica [6, 17-19].

Разработанные вычислительные методы могут быть использованы в различных программных комплексах обработки цифровых изображений для предварительной селекции и оценки положения объектов с круговыми изображениями и изображениями, смазанными собственным движением, например, в программах автоматизированного обнаружения малых тел Солнечной системы (астероидов и комет) на серии цифровых кадров. Кроме того, предложенные методы могут быть использованы для наблюдения и обнаружения движущихся объектов любой природы (например, самолеты, беспилотные летательные аппараты, спутники, автомобили и их номера).

Личный вклад соискателя. Все основные научные и практические результаты, полученные в диссертационной работе, соискатель получил самостоятельно. Личный вклад автора в совместно опубликованных работах следующий: в работах [20, 21] разработаны и исследованы вычислительные методы оценки положения объекта с цифровым изображением, смазанным собственным движением; в [6, 22] разработан и исследован итерационный метод оценки положения объекта с круговым изображением на цифровом ПЗС-кадре на основе субпиксельной модели; в [23] разработан и исследован трехэтапный вычислительный метод обнаружения изображений объектов, смазанных собственным движением; в работах [24 – 27] исследованы вычислительные методы оценки положения объекта на цифровом изображении, основанные на пиксельной и субпиксельной моделях изображений; в [5] предложен метод исследования точности оценок положения и блеска объектов с изображениями, смазанными

собственным движением; в работах [28 – 30] исследованы показатели точности оценок положения объектов в ПО CoLiTec, в том числе по результатам наблюдений астероидов тридцати самых продуктивных обсерваторий мира, а также сравнительный анализ данных показателей в ПО CoLiTec и Astrometrica.

Апробация результатов диссертационной работы. Основные результаты диссертации обсуждены на восемнадцати научно-технических конференциях:

«Astronomy Space Physics Annual International Conference» (Ukraine, Kyiv, May 21-24, 2013) [31]; «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (Украина, Харьков, 2013–2015 г.) [32–35]; «Современные направления развития информационно-коммуникационных технологий и средств» (11–12 апреля 2013 г., Харьков) [36, 37]; Всеукраїнська наукова конференція «Математичне моделювання та математична фізика» присвячена 90-річчю від дня народження В.М. Глушкова (23-27 сентября 2013 г., Кременчуг) [38, 39]; XI Міжнародна науково-практична конференція «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2013)» (20–22 ноября 2013 г., Днепропетровск) [40]; «Інформація, комунікація і суспільство 2014» 3-я Международ. научная конференция (21–24 мая 2014 г., Львов) [41]; «Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях» (28–31 мая 2014 г. Харьков) [42]; «Asteroids, Comets, Meteors 2014» 12-я международная конференция, (30 июня – 4 июля 2014 г., Хельсинки) [43]; «40th COSPAR Scientific Assembly» (2–10 August 2014, Moscow) [44]; «14-та українська конференція з космічних досліджень» (8–12 сентября 2014 г. Ужгород) [45]; «International scientific and methodological conference KOLOS 2014» (4–6 декабря 2014 г. Стакчин, Словакия) [46, 47]; «Gaia-FUN-SSO-3 International Workshop 2014» (24–26 ноября 2014 г. Париж, Франция) [48].

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 8 научных статьях в профильных научных изданиях Украины, 1 статья опубликована в английском журнале «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society» (входит в наукометрическую базу «Scopus», impact factor 5.107), 1 статья в «Kine-

matics and Physics of Celestial Bodies», статья опубликована в журнале, что относится к физико-математическим наукам, 1 статья опубликована в индийском журнале «Scholars Journal of Engineering and Technology», а также в материалах и сборниках тезисов 19 научно-технических конференций. Соискатель является соавтором 3 авторских прав [49–51] на программный код.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ КАДРОВ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ НЕБЕСНЫХ ОБЪЕКТОВ И МЕТОДОВ ИХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

1.1 Необходимость наблюдения объектов с малым (круговые изображения) и большим (изображения, смазанные собственным движением) временем экспозиции

Изучение небесных объектов представляет большой интерес с разных точек зрения, в том числе из-за проблемы астероидно-кометной опасности [52]. Проблема астероидно-кометной опасности с 2007 года была признана в качестве мировой проблемы Организацией Объединенных Наций (ООН) [53]. Упавший 15 февраля 2013 года метеорит в Челябинске [54, 55] является ярким примером актуальности и необходимости развития науки и технологий в данном направлении.

В том числе данное событие послужило поводом для создания ООН «Международной группы предупреждения об астероидах» (International Asteroid Warning Group) [56]. Одна из задач созданной группы – передача информации в ООН о потенциально опасных космических глыбах странами-членами этой организации. Если астрономы обнаружат астероид, представляющий угрозу для Земли, комитет ООН по использованию космического пространства в мирных целях сможет организовать запуск космического корабля, который проведет мероприятия по изменению траектории полета опасного астероида, отведя его от Земли. «Следующий шаг по защите Земли от опасных астероидов состоит в их поиске, – отметил бывший астронавт Эд Лу (Ed Lu). Мы находим в космосе в сто раз меньше астероидов, чем их там в действительности существует. А в опасной близости от нас находится около миллиона астероидов, которые достаточно велики, чтобы уничтожить Нью-Йорк или да-

же более крупный город. Наша задача заключается в том, чтобы найти их до того, как они найдут нас» [56].

Ежегодно проводится большое количество международных научных конференций, которые в той или иной мере включают тематику наблюдения объектов с круговыми и со смазанными (протяженными) собственным движением изображениями [43, 44, 46–48]. Одним из фактов, подтверждающих научную значимость данной тематики, является действующая на базе НАСА программа (Near-Earth Object Program) по наблюдению объектов сближающихся с Землей (ОСЗ) [57, 58]. По данным этой программы, по состоянию на 19 января 2015 года обнаружено 12132 объектов, сближающихся с Землей [4]. Из них 868 астероидов имеют диаметр около 1 км или более [4]. Также 1537 из них [4] были классифицированы как потенциально опасные астероиды (ПГА, РНА – potential hazard asteroids).

Также в качестве подтверждения актуальности указанной тематики может служить постоянно расширяющийся список обсерваторий, занимающихся наблюдением астероидов [59].

Объекты с изображениями, смазанными собственным движением, искусственного происхождения. Причиной смаза изображения объектов может послужить большое время экспозиции (объекты смазываются собственным движением), нарушение часового ведения при наблюдении, сильные порывы ветра; скорость объекта и многое другое. Такими объектами (естественного происхождения) могут быть астероиды, сближающиеся с Землей, метеоры, кометы. Все эти объекты представляют потенциальную опасность для Земли, что говорит об актуальности и важности их регистрации и наблюдения.

С учетом колоссального технического и информационного прогресса в наше время, нельзя не учитывать объекты искусственного происхождения. Объектов со смазанными изображениями на цифровых кадрах искусственного происхождения большое множество.

Примером таких объектов искусственного происхождения могут послу-

жить дроны (беспилотные летательные аппараты) (рисунок 1.1 в). В последнее время дроны получили по-настоящему широкое распространение. Причем область их применения практически безгранична (от мирных, гражданских до военных сфер эксплуатации). С учетом этого можно сказать, что задача наблюдения и обнаружения этих объектов имеет важное и актуальное значение.

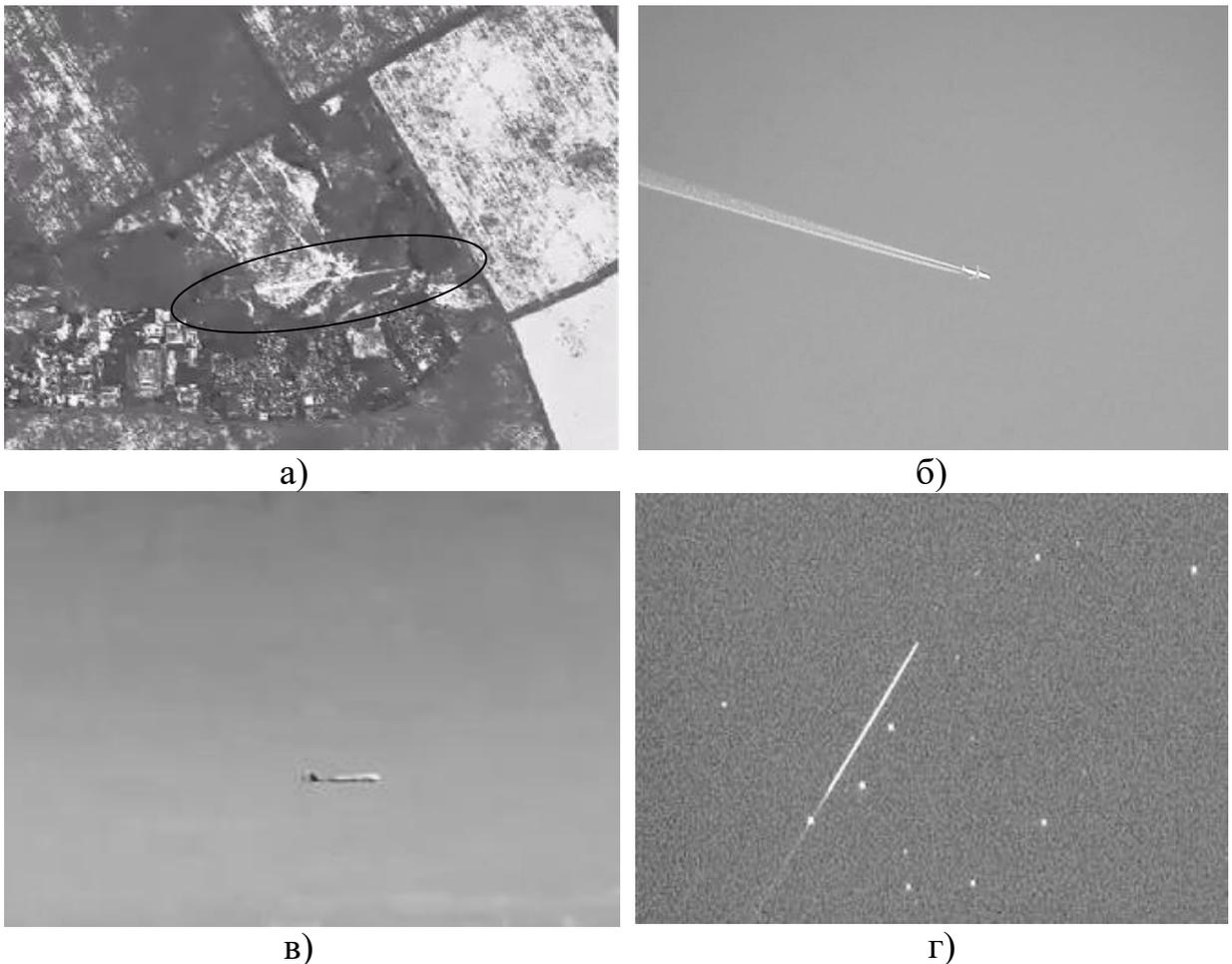


Рисунок 1.1 – Изображения объектов искусственного происхождения:
 а) изображение пролетающего снаряда; б) изображение летящего самолета;
 в) изображение летящего дрона; г) изображение спутника

В число объектов искусственного происхождения, которые на ПЗС-кадре могут быть отображены как смазанное изображение, также относятся: самолеты (рисунок 1.1 б), спутники (рисунок 1.1 г), пролетающие ракеты (рису-

нок 1.1 а) и много другое. Наблюдение и обнаружение таких объектов в нынешнее время является важной и актуальной задачей.

Объекты с изображениями, смазанными собственным движением, естественного происхождения. В наше время проблема астероидно-кометной опасности является очевидной и весьма актуальной. Падение на Землю небесных тел (астероидов или комет) с диаметрами более 5 км способно вызвать катастрофу глобального масштаба, а при диаметре от 0,5 до 1 км – разрушения регионального масштаба [60]. Небесные объекты меньших размеров могут вызвать локальные повреждения на поверхности Земли.



Рисунок 1.2 – комета C/2012 S1 ISON

Ежегодно открываются около десятка комет, а сотни и тысячи, вероятно, остаются необнаруженными. Довольно часто – один раз в два-три года – вблизи Земли и Солнца проходит яркая комета с большим хвостом, а общее число комет, подходящих к Солнцу не более пяти в год [60]. Вероятность столкновения кометы с Землей за время жизни одного поколения не велика. Однако такие случаи столкновения метеороидов с Землей имели место [61]. К числу объектов,

сближающихся с Землей, следует отнести также короткопериодические кометы (рисунок 1.2) и крупные фрагменты метеорных потоков.

Другие объекты, представляющие потенциальную угрозу столкновения с Землей, являются малые планеты, или астероиды. Тысячи этих тел обращаются по орбитам, расположенным в основном между орбитами Марса и Юпитера, образуя в Солнечной системе пояс астероидов.

Метеориты, как правило, имеют большую скорость видимого движения, за счет этого их изображения на ПЗС-кадре может быть смазанным. Попадая в атмосферу Земли, наиболее крупные метеоры сгорают не до конца, и их остатки могут упасть на поверхность Земли. Их называют метеоритами. Падение метеоритов могут иметь весьма разрушительные последствия (например, метеорит в Челябинске [54, 55]).

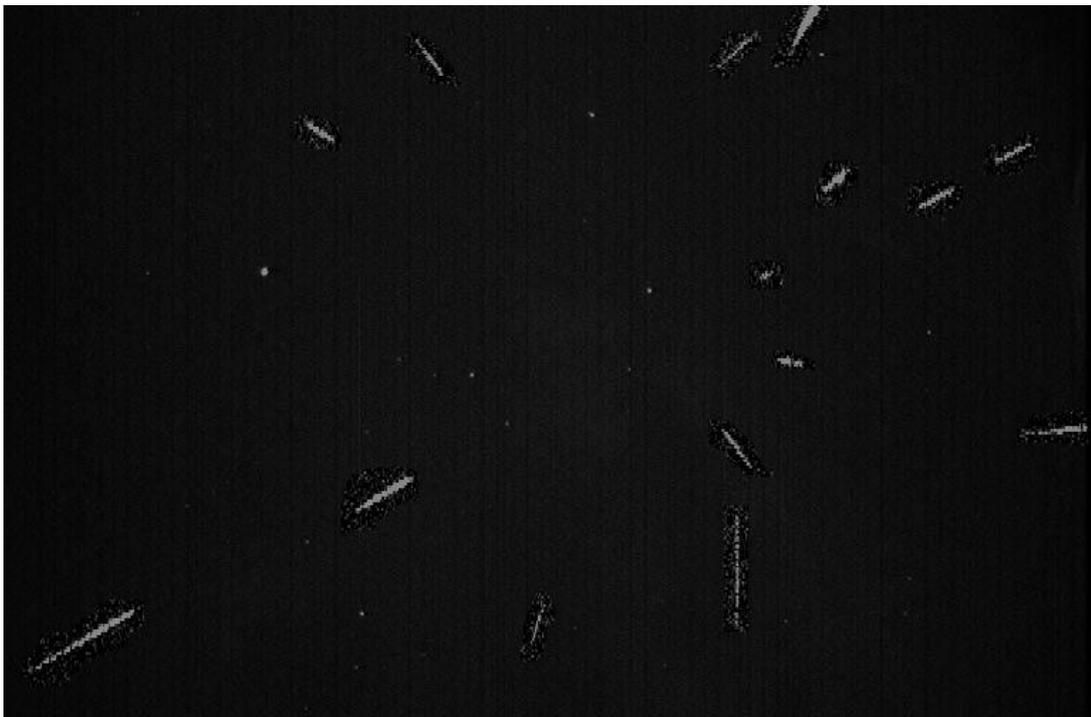


Рисунок 1.3 – Результаты наблюдений метеорного потока Леонид в Одесской обсерватории в 2009 году [62]

Мелкие же астероидные осколки (глыбы метровых размеров, камни и пы-

левые частицы, включая и кометного происхождения) непрерывно падают на Землю ежегодно в виде десятков тысяч тонн космического вещества (рисунок 1.3). Метеороидные объекты размером свыше нескольких метров могут быть обнаружены оптическими средствами на расстоянии порядка 1 млн. км от Земли. Более крупные объекты (десятки и сотни метров в диаметре) могут быть обнаружены и на значительно больших расстояниях [60].

Число астероидов размером не меньше километра на близких к Земле орбитах по данным сайта «NEO Program» [4] составляет 868 (март 2015 года). Считается, что уже обнаружено около 90% астероидов размерами более одного километра [4]. Соответственно, в последние годы число открытий таких астероидов очень упало: в целом, сейчас ежегодно открывается до 10 новых АСЗ. «NEO Program» в настоящее время делает упор на поиск 90% ОСЗ, превышающих 140 метров в диаметре [4].

1.2 Характеристика и особенности условий наблюдения объектов с круговыми и смазанными собственным движением изображениями

Наблюдение объектов может затрудняться рядом факторов: слабokon-трастным изображением наблюдаемых объектов; наличием на кадрах неравномерно распределенного фона; размытием изображения объекта из-за турбулентности атмосферы; искажением изображения объекта вследствие aberrаций оптической системы; нарушением суточного ведения и другие.

При наблюдении объектов самым распространенным является применение фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ПЗС). Основу ПЗС-матрицы составляет монокристалл полупроводника (обычно кремния), на плоской поверхности которого нанесено большое число площадок металла, образующих геометрически правильную структуру [63]. Каждая металлическая площадка вместе с подложкой образует элементарный конденсатор, способный накапливать возникающие под действием света электроны. Данный сигнал счи-

тывается и поступает на аналого-цифровой преобразователь.

Пиксели матрицы реализуют неизменную систему прямоугольных координат, что обеспечивает надежное определение координат изображений объектов в поле, покрываемом матрицей. Обычно изображение звезды занимает площадь в несколько пикселей, тогда путем анализа распределения энергии по пикселям положение центра изображения определяется с точностью до 0.25 размера пикселя.

Особенности наблюдений движущихся объектов. Близкие (околоземные) астероиды отличаются, как правило, быстрым движением относительно звездного фона и на снимках выделяются среди других астероидов по длинным следам. Видимое движение астероида на фоне звезд является результатом сложения орбитальных скоростей астероида и Земли.

В зависимости от условий наблюдения астероида его видимое движение на фоне звезд может иметь скорость в пределах от долей градуса до десятков градусов в сутки и самые разнообразные направления.

Особенности условий наблюдения, влияющие на формирование отдельных кадров. Основным источником освещенности объектов Солнечной системы является Солнце [64]. Удаленность Солнца от большей части малых тел Солнечной системы и их удаленность от поверхности Земли, как места размещения наблюдателей, позволяет считать, что Солнце излучает поток лучей света, который освещает поверхность небесного объекта. ПЗС-матрица, встроенная в телескоп [64, 65], воспринимает отраженный от поверхности объекта свет. За счет накопления в пикселях ПЗС-матрицы фотонов света, в фокальной плоскости ПЗС-матрицы формируется ПЗС-изображение наблюдаемого участка неба (рисунок 1.4). Изображение кадра формируется не только за счет отраженного излучения от объекта, но и за счет фонового излучения, а также за счет излучения звезд, попавших в поле зрения телескопа. Для объектов с большой скоростью видимого движения фотоны света от объекта на ПЗС-матрице за время экспозиции накапливаются вдоль направления движения объекта.

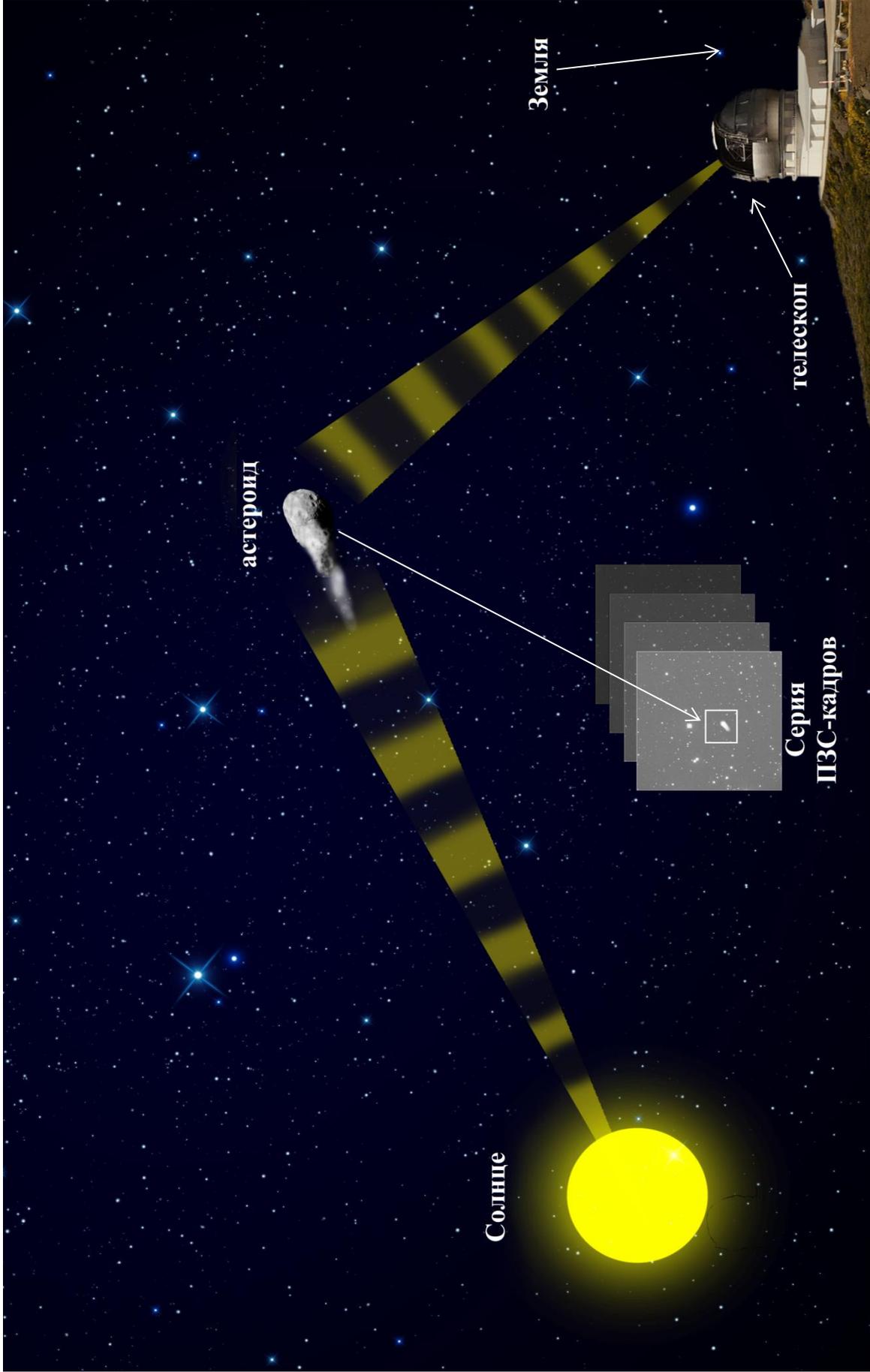


Рисунок 1.4 – Схема процесса формирования ПЗС-кадра с изображением астероида

Отражательная способность поверхности объектов определяется значением альбедо – характеристика диффузной отражательной способности поверхности объекта. Значение альбедо изменяется от 0(0%) до 1(100%), где 0 – абсолютно черная поверхность, а 1 – абсолютно белая поверхность. Для астероидов значение альбедо варьируется между 0.02 и 0.60 [66].

Следует отметить, что изображение объектов с незначительной скоростью видимого движения на ПЗС-кадре ничем не отличается от изображения на нем звезд. Однако при высокой скорости видимого движения объекта, либо при длительной экспозиции, его изображение на ПЗС-кадре смазывается за счет собственного движения.

Как правило, при наблюдении астероидов, телескоп движется в режиме часового ведения. В этом режиме телескоп движется со скоростью, компенсирующей суточное вращение Земли.

Одним из факторов, ухудшающих качество изображения, является атмосферная турбулентность, в результате которой происходит смещение [67] и размытие [67] изображения.

Также к числу факторов, влияющих на качество ПЗС-изображения, можно отнести aberrации оптической системы – ошибка или погрешность изображения в оптической системе, вызываемая отклонением луча от того направления, по которому он должен был бы идти в идеальной оптической системе [66]. Выделяют семь основных видов осесимметричных aberrаций [66, 68, 69]: сферическая aberrация, кома, астигматизм, кривизна поля, дисторсия, хроматизм положения и хроматизм увеличения.

В результате оптических aberrаций, точечные изображения астероидов в фокальной плоскости телескопа имеют вид «размытых точек», расположенных с нарушением законов центральной проекции [68]. Та же картина наблюдается вследствие турбулентности атмосферы [69].

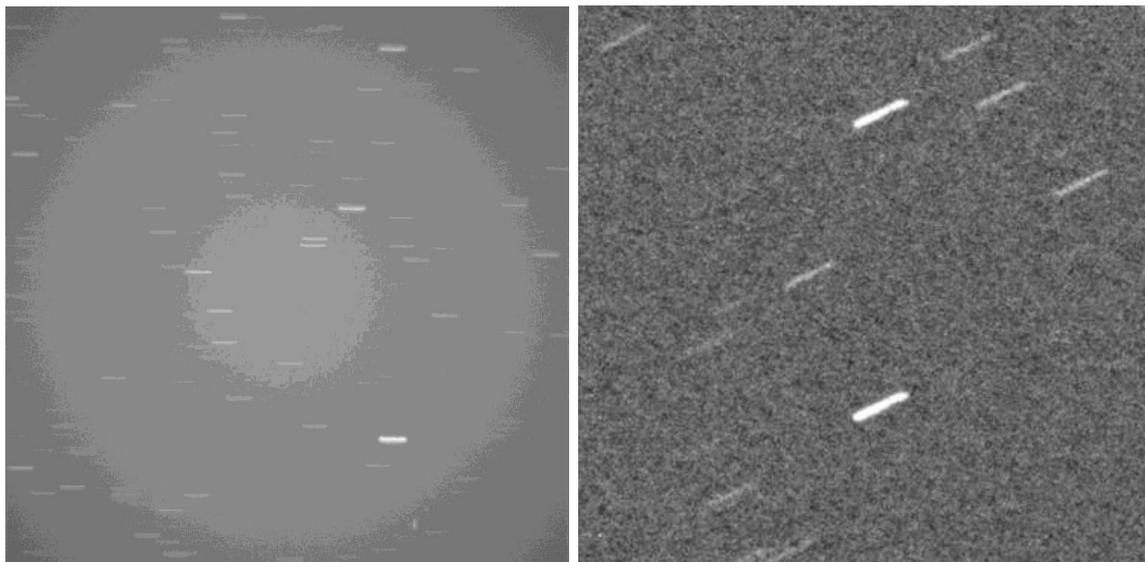


Рисунок 1.5 – Результат астрономических наблюдений без суточного ведения

Большое влияние на формирование изображения небесной сферы на кадре оказывает система управления телескопом. Нарушение часового ведения телескопа (рисунок 1.5) является причиной смаза изображений объектов на ПЗС-кадре и смещения экваториальных координат центров кадров.

На основании вышеописанного, особенностями условий наблюдения объектов с круговыми и протяженными изображениями с помощью телескопа, оснащенного ПЗС-матрицей, которые влияют на формирование ПЗС-кадров являются:

а) изображение объекта на отдельном кадре ничем не отличается от изображения звезд, находящихся на данном участке неба, в случае с протяженным изображением объекта – на отдельном кадре данное изображение ничем не отличается от возможной помехи или нескольких звезд, попавших в общий контур;

б) наличие на кадрах неравномерно распределенной низкочастотной помехи;

в) размытие и смещение изображения объекта в результате турбулентности атмосферы, aberrаций оптической системы телескопа и нарушения часового ведения.

1.3 Известные системы автоматизированного обнаружения объектов с круговыми и смазанными собственным движением изображениями и вычислительные методы обработки таких изображений

1.3.1 Оптические системы для обнаружения объектов и программные средства обработки цифровых ПЗС-кадров

Наличие цифрового ПЗС-изображения создает условия для проведения их компьютерной обработки [70]. Наблюдательная установка, состоящая из телескопа с ПЗС-камерой и компьютером с необходимым программным и информационным обеспечением, может позволить выявить астероиды на фоне звезд.

Автоматизированные программные средства обработки цифровых ПЗС-кадров для обнаружения объектов. Одним из самых распространенных автоматизированных программных обеспечений (ПО) обработки ПЗС-кадров является ПО *Astrometrica*. **Astrometrica** [17–19] – программный инструмент для обработки позиционных ПЗС изображений. Данная программа акцентирует внимание на измерении малых тел Солнечной системы (астероидов, комет и карликовых планет).

ПО Астрометрика реализует такие функции/возможности/операции: возможность быстрого выбора профиля конфигурации; калибровка кадров; инструменты настройки и трансформации изображения; поддержка локальных опорных каталогов звезд; список поддерживаемых локальных каталогов (XPM, USNO A2.0, USNO B1.0, UCAC3, UCAC4); список поддерживаемых онлайн каталогов (USNO B1.0, UCAC4); поддержка онлайн опорных каталогов звезд; запись координатной информации (WCS) в заголовок FITS-кадра; интерактивный режим измерения объектов; инструмент «лупа»; автоматизированный поиск движущихся объектов; возможность визуальной инспекции автоматически обнаруженных, движущихся объектов; выдача астрометрических измерений в формате MPC; отправка измерений в MPC из интерфейса программы; отобра-

жение известных и обнаруженных объектов на кадре; поддерживаемые локальные каталоги (PPMXL и СМС-14); поддерживаемые онлайн каталоги (ХРМ, УСАС3 СМС-14, PPMXL); техника сложения кадров Track&Stack; идентификация обнаруженных движущихся объектов с локальной базой MPCORB.

Основным недостатком ПО Astrometrica является очень слабые ее поисковые возможности в автоматическом режиме.

PinPoint [71] является инструментом для точного определения положения объектов или астрометрии (нет автоматического обнаружения быстрых).

Программа **IzmCCD** [72] предназначена для высокоточной астрометрической обработки числовых изображений небесных объектов. Программа позволяет получать как измеренные, так и экваториальные координаты малых планет, комет, спутников больших планет, визуально-двойных звезд и других объектов, а также идентифицировать уже известные малые планеты и найти на числовых изображениях движущиеся объекты. Также программа позволяет получать кривые блеска переменных звезд, и имеет функцию поиска новых переменных звезд.

PRiSM — программа обработки астрономических изображений [73]. Позволяет делать анализ астрокадров, однако в ней нет функции автоматического обнаружения объектов, в частности быстрых или протяженных объектов.

CoLiTec – программа автоматического поиска астероидов на серии ПЗС-кадров [74, 75]. ПО находится в открытом доступе [76] и позволяет автоматически выделять объекты с ненулевым видимым движением. ПО CoLiTec выполняет внутрикадровую и межкадровую обработку кадров. Ядром ПО CoLiTec является обнаружение объектов на основе накопления статистик, пропорциональных энергии изображений, вдоль возможных траекторий движения объекта. CoLiTec имеет блоки обнаружения очень медленных и очень быстрых объектов.

В отличие от распространенного ПО Astrometrica, ПО CoLiTec дополнительно выполняет следующие функции: астрометрическая редукция ПЗС-

кадров с большими полями зрения (2° и более); поддерживаемый локальный каталог Tycho2; поддерживаемые онлайн каталоги (NOMAD, SDSS v8); возможность отдельного применения опорных каталогов для астрометрической и фотометрической редукиций; 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.); 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); модульная конструкция (возможность подключения отдельных модулей).

Сейчас появилось новое направление поиска ОСЗ – NEO prescovery (предварительное открытие ОСЗ) [77]. Данный термин описывает процесс идентификации объекта по архивным данным, присутствие которого не было обнаружено во время произведенных наблюдений.

Далее указаны программы и алгоритмы, которые используют архивные данные для открытия или уточнения орбит ОСЗ. Программа Пизанского университета **ANEOPP**, которая находит недавно открытые АСЗ по старым наблюдениям. Занимаются NEO prescovery на основании архивных данных. Используют SDSS (Sloan Digital Sky Survey) изображения с подкачкой данных из AstDyS[78] и NEODyS[79, 80]. Также существует программа Arcetri NEO Prescovery Program, которая занимается предварительным открытием ОСЗ.

Оптические системы для обнаружения объектов. На данный момент ведущими обсерваториями по открытию АСЗ являются: Pan-STARRS [81, 82], Catalina [83, 84], NEOWISE [85] и Spacewatch [86].

Самые продуктивные обсерватории по открытию АСЗ за период с 1995 по 2014 годы представлены на рисунке 1.6.

Система Pan-STARRS [81, 82] представляет собой крупный проект, включающий в себя несколько телескопов, камер и вычислительных комплексов.

Основная задача системы – обнаружение близких объектов, которые могут угрожать Земле. На данный момент есть один действующий телескоп (остальные в разработке). Телескоп Pan-STARRS-1 имеет основное зеркало диаметром 1.8 метра. В телескопе также установлена крупнейшая в мире цифровая камера с 1.4-гигапиксельной матрицей.

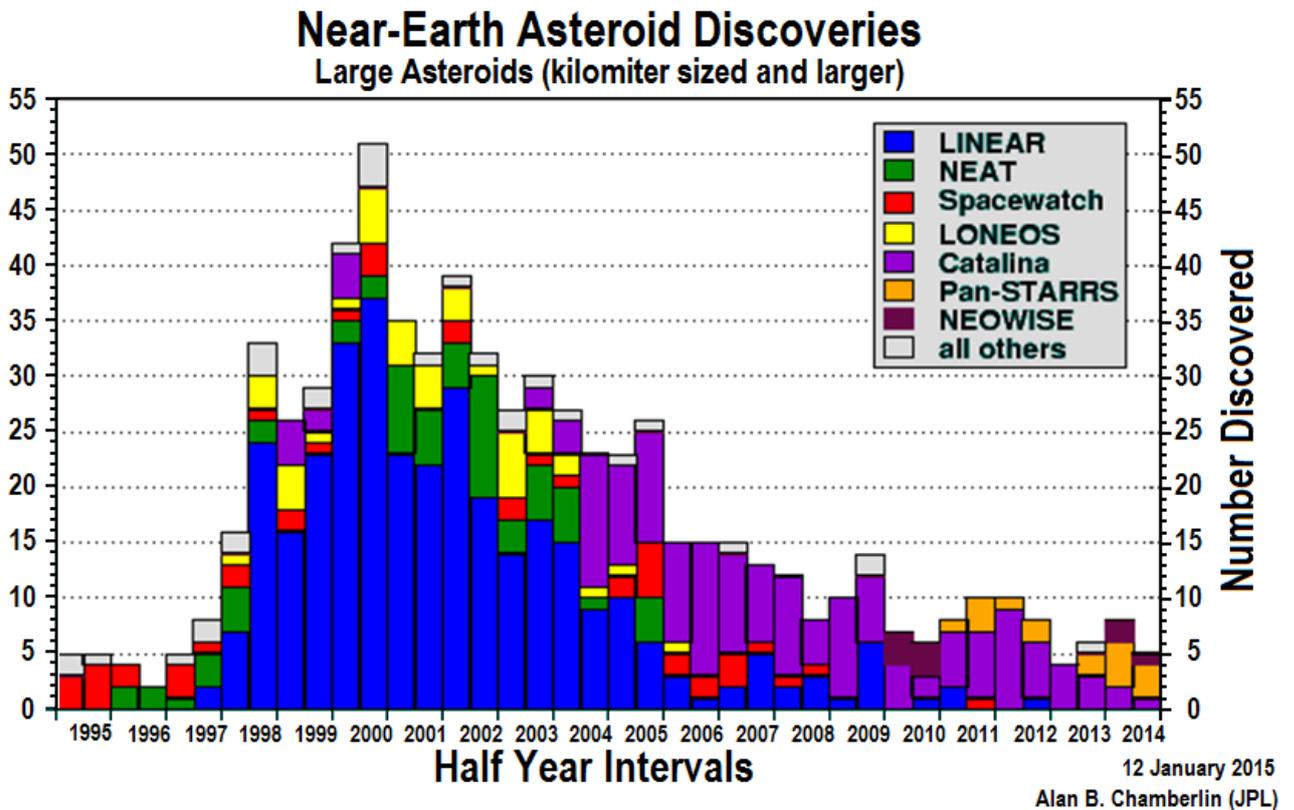


Рисунок 1.6 – количество открытых АСЗ известными обсерваториями мира

Catalina Sky Survey [83, 84] — проект по поиску комет и астероидов, в особенности околоземных объектов, представляющих угрозу столкновения с Землей. В обзоре используются три телескопа. 1.5-метровый телескоп на горе Леммон (диафрагма 2), 68-сантиметровый телескоп Шмидта у горы Бигелоу (диафрагма 1.7) и 50-сантиметровый уппсальский телескоп Шмидта (диафрагма 3) обсерватории Сайдин Спринг. Руководство проектом осуществляется из Университета Аризоны.

NEOWISE [85] (ранее WISE, космический инфракрасный телескоп) – это

криогенный пятизеркальный афокальный телескоп диаметром 40 сантиметров с фокусным расстоянием 1.35 метра и полем зрения 47 угловых минут. Телескоп оснащен четырьмя камерами, каждая из которых работает в своем диапазоне: 3.3, 4.7, 12 и 23 мкм. Каждая камера состоит из матрицы размером 1024×1024 пикселя (1 мегапиксель). В первых трех диапазонах (3.3, 4.7 и 12 мкм) масштаб изображения составляет 6 угловых секунд на пиксель, а в последнем четвертом (23 мкм) составляет 12 угловых секунд на пиксель.

Spacewatch [86] – это проект университета Аризоны, целью которого является поиск и открытие малых тел Солнечной Системы. Инструментами проекта являются: 0.91-м f/3 рефлектор (Обсерватория Стюарда, Китт-Пик) с полем зрения 2.9 квадратных градуса и пропускательной способностью 21.7 V; 1.8-м f/2.7 рефлектор (LPL/Spacewatch II) с полем зрения 0.78° и пропускательной способностью 22.2 V [86].

Одной из ведущих обсерваторий также является дистанционно управляемая обсерватория ISON-NM (International Scientific Optical Network, New Mexico), расположенная в штате Нью-Мексико (США). Код Международного центра малых планет (MPC) – H15. Инструменты обсерватории ISON-NM: 40-см телескоп САНТЕЛ-400АН, установленный на американской монтажке фирмы Astro-Physics и ПЗС-матрицу FLI ML09000-65 (3056×3056 пикселей, размер пикселя 12 мкм). По суммарным результатам 2011 и 2012 годов обсерватория ISON-NM, оснащенная ПО CoLiTec, заняла 7 место в мире (таблица 1.2) [6] как по количеству наблюдений астероидов (таблица 1.2), так и по количеству их предварительных открытий (таблица 1.1). Таблицы сформированы на основании данных международного центра малых планет (Minor Planet Center – MPC) гарвардского университета.

Хотелось бы подчеркнуть одну особенность «охоты» за АСЗ. Для обнаружения и регистрации астероидов Главного пояса достаточно 5–6 хорошо оснащенных обсерваторий мира.

Таблица 1.1 – Рейтинг десяти самых производительных обсерваторий за 2011-2012 год по измерениям

№	Обсерватория (MPC-код)	Измерения	Открытия
1	Mt. Lemmon Survey	4186400	39446
2	Lincoln Laboratory ETS, New Mexico	3637872	719
3	Pan-STARRS 1, Haleakala	3506255	27413
4	Catalina Sky Survey	3235680	5273
5	Steward Observatory, Kitt Peak-Spacewatch	1708543	15956
6	Siding Spring Survey	479198	757
7	ISON-NM Observatory, Mayhill	252848	1106
8	Apache Point-Sloan Digital Sky Survey	227025	7
9	Purple Mountain Observatory, Xu Yi Station	195221	356
10	WISE	163006	23

Потенциально опасные АСЗ зачастую видны за несколько суток до их подлета к Земле. Они видны только в некоторых регионах Земного шара, часть из которых не имеет астрономической погоды.

Следовательно, для обнаружения потенциально опасных АСЗ необходимо не 5-6 крупных обсерваторий, а большое количество региональных обсерваторий, оснащенных средними телескопами, имеющих свое ПО обработки кадров астероидных обзоров и объединенных региональными центрами обработки данных.

На данный момент в мире существует достаточное количество виртуальных обсерваторий [87–94], однако только очень малый процент из них занимается обнаружением ОСЗ. Исключением является Испанская Виртуальная Об-

серватория – это самая продуктивная обсерватория по предварительному открытию ОСЗ (NEO precovery) [77]. Испанская ВО занимается NEO precovery на основании архивных данных, использует SDSS (Sloan Digital Sky Survey) изображения с подкачкой данных из ASTDys и NEODys. Также существует и развивается Украинская ВО, которая использует архивные пластинки для уточнения положения открытых астероидов [95]. В настоящее время отсутствует развитая сеть виртуальных обсерваторий.

Таблица 1.2 – Рейтинг десяти самых производительных обсерваторий за 2011-2012 год по открытиям

№	Обсерватория (MPC-код)	Измерения	Открытия
1	Mt. Lemmon Survey	4186400	39446
2	Pan-STARRS 1, Haleakala	3506255	27413
3	Steward Observatory, Kitt Peak-Spacewatch	1708543	15956
4	Catalina Sky Survey	3235680	5273
5	Palomar Mountain—PTF [96]	28638	1827
6	Palomar Mountain/NEAT [96]	56878	1286
7	ISON-NM Observatory, Mayhill	252848	1106
8	University of Szeged, Piszkesteto Stn. (Konkoly)	51885	952
9	OAM Observatory, La Sagra	51927	802
10	Siding Spring Survey	479198	757

1.3.2 Вычислительные методы обработки цифровых изображений, используемые для определения положения астероидов

Разработано достаточно большое количество методов определения положения астероидов по наблюдениям с ПЗС-камерой (прибор с зарядовой свя-

зью). В одних, используется аналитический анализ изображений объектов на ПЗС-кадре, например, FWHM-подход (Full Width Half Magnitude) [97]. В других в качестве координат объекта принимается максимум блеска в его нии [98].

Общим для большинства методов определения положения объекта на ПЗС-кадре является использование при аппроксимации его изображения функции рассеяния точки (PSF-fitting) [100–104]. При этом анализируется информация о закономерностях распределения зарегистрированных фотонов по изображению объекта. Наиболее часто в качестве модели распределения фотонов применяются различные варианты двумерной гауссианы [10, 100, 105]: модели Моффата [72], Лоренца [72, 100]. Обычно такие модели описываются непрерывными функциями, в то время как реальные ПЗС-изображения являются дискретными. Такой подход аргументировано критикуется в [8]. Основной его недостаток в том, что модели хорошо работают только с большими объемами данных. Это приводит к тому, что: во-первых, существенно усложняется процесс вычислений; во-вторых, не решается вопрос об адекватности используемых оценок параметров PSF. Как результат: возрастает ошибка определения координат наблюдаемых объектов. Применение этого подхода к объектам с тусклым изображением (при малых отношениях сигнал-шум) существенно влияет на качество представления модели изображения объекта (в частности на оцениваемые параметры такой модели). Впоследствии это также приводит к снижению точности определения координат исследуемых объектов.

Суть метода аппроксимации функцией рассеяния точки (PSF, point spread function) в случае объектов с протяжённым изображением состоит в использовании модели изображения объекта, вытянутого вдоль направления своего движения. Количество используемых моделей распределения фотонов по изображению объекта достаточно велико [100]. Однако модель изображения объекта конструируется на основе одной из стандартных симметричных PSF для точечных источников.

Кроме того, в существующих методах достаточно часто учету фоновой

составляющей изображения не уделяется должного внимания. Считается, что её учет и компенсация производятся на предварительном этапе обработки изображения [102] или что изображение объекта освобождается от шумов согласно принятой модели изображения и помехи [72, 104]. При этом ошибка, привнесенная операцией исключения фоновой составляющей из изображения объекта, не учитывается в последующей процедуре определения координат.

Важным является детальное исследование статистических характеристик ПЗС-измерений объектов с круговыми изображениями и изображениями, смазанными собственным движением, в частности ОСЗ. При наблюдении ОСЗ большое значение имеет оперативность. Одним из способов повышения оперативности является улучшение точности оценки параметров объектов, с круговыми и смазанными собственным движением изображениями. Этого можно достичь за счет разработки новых и уточнения известных вычислительных методов обработки цифровых изображений. Данный подход может быть весьма эффективным для повышения точности наблюдений обсерваторий и модернизации используемого ими программного обеспечения (ПО).

1.4 Постановка целей и задач исследования

Общая постановка задачи. С помощью оптических телескопов, оснащенных ПЗС-матрицами, проводят наблюдение объектов. Характеристики условий наблюдения таких объектов описаны в подразделе 1.2. По результатам наблюдений объектов на одном участке небесной сферы формируются цифровые ПЗС-кадры.

Изображение объекта на ПЗС-кадре формируется за счет попадания сигнальных фотонов от этого объекта в пиксели ПЗС-матрицы. При этом на кадре объекту могут соответствовать как круговые, так и смазанные собственным движением изображения.

Наблюдению доступны экспериментальные яркости A_{ikt}^* пикселей ПЗС-

матрицы, соответствующие изображению объекта. Данные яркости A_{ikt}^* являются величиной, пропорциональной количеству фотонов, попавших в пиксель ПЗС-матрицы от исследуемого объекта.

Изображения объекта на кадре имеет форму точки, а с учетом атмосферной турбулентности изображения объекта становятся размытыми. Фоновые фотоны образуют во всех пикселях исследуемой области фоновую подложку. Фоновая подложка изображения может считаться как удаленной из изображения объекта, так и подлежащей оценке и удалению.

По результатам наблюдения объектов формируются измерения, являющиеся совокупностью оценок параметров (характеристик) исследуемого объекта. Для объектов с круговым изображением такими характеристиками являются: положение X_t, Y_t ; теоретическая амплитуда A_G ; параметр формы изображения объекта σ_G . У объектов с протяженными изображениями в качестве характеристик также учитываются: угол ω_t между направлением видимого движения объекта и осью абсцисс; скорость протяженного объекта V_{xit}, V_{ykt} .

Наиболее часто в качестве модели распределения фотонов применяются варианты двумерной гауссианы, в результате чего не решается вопрос адекватности используемых оценок параметров PSF. Для протяженных изображений, используются модели на основе стандартных симметричных PSF для точечных источников. При этом данные модели не учитывают особенности формирования таких объектов, на ПЗС-кадрах. В результате таких подходов возрастает ошибка определения координат наблюдаемых объектов.

С учетом вышеописанного, возникает необходимость в разработке адекватных моделей круговых изображений объектов и изображений объектов, смазанных собственным движением, а также разработки вычислительных методов обработки для оценки параметров объектов с круговыми изображениями и изображениями, смазанными собственным движением. Данные вычислительные методы должны учитывать основные условия наблюдения исследуемых

объектов и особенности формирования их изображений.

Декомпозиция задачи. Согласно вышеописанным особенностям условий наблюдения объектов с круговым изображением и изображением, смазанным собственным движением, а также формирования ПЗС-кадров следует, что точность оценки экваториальных координат объекта прямо зависит от оценки координат положения изображения этого объекта в системе координат (СК) ПЗС-кадра. Поэтому возникает необходимость обеспечить наилучшую точность оценки местоположения изображения объекта в СК ПЗС-кадра. В этой связи выбрано два критерия качества оценок. Одним из них является минимум суммы квадратов отклонений между экспериментальной A_{ikt}^* и модельной $A_{ikt}(\Theta_{gen\tau})$ яркостями пикселей области внутрикадровой обработки:

$$F_{\Delta A\tau}(\Theta_{gen\tau}) = \sum_{i,k}^{N_{IPS}} \left(A_{ikt}^* - A_{ikt}(\Theta_{gen\tau}) \right)^2 \xrightarrow{\Theta_{gen\tau}} \min, \quad (1.1)$$

где $\Theta_{gen\tau}$ – вектор оцениваемых параметров:

$$\begin{aligned} \Theta_{gen\tau} &= (A_N, B_N, C_N, X_t, Y_t, A_{Gt}, \sigma_{Gt}, \omega) = \\ &= (\theta_1, \dots, \theta_n, \dots, \theta_8). \end{aligned} \quad (1.2)$$

В качестве второго критерия наилучшей оценки положения протяженного объекта в работе используется критерий максимального правдоподобия:

$$L(\Theta_{gen\tau}) \xrightarrow{x,y} \max, \quad (1.3)$$

где $L(\Theta_{gen\tau})$ – функция правдоподобия, соответствующая условной, по искомым параметрам изображений объектов и фоновой подложки, вероятности формирования исследуемого нормированного изображения;

x, y – координаты центра изображения объекта в СК ПЗС-кадра.

Таким образом, с целью повышения точности оценки параметров объектов с круговыми и смазанными собственным движением изображениями за счет разработки новых и уточнения известных вычислительных методов обработки цифровых изображений, научно-техническую задачу можно разбить на следующие частные задачи:

- разработка моделей круговых изображений объектов и изображений объектов, смазанных собственным движением;
- разработка методов оценки положения объектов с круговыми изображениями и изображениями, смазанными собственным движением, на ПЗС-изображениях на основе субпиксельной модели изображения объектов;
- разработка вычислительного метода исследования показателей точности оценок положения и блеска небесных объектов;
- разработка метода выделения изображений объектов, смазанных собственным движением.

Выводы по разделу 1

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

2. Изображения объектов, сближающиеся с Землей, в зависимости от их типа имеют различную форму. Околоземные астероиды, как правило (но не всегда), имеют большую скорость видимого движения и на снимках выделяются среди других астероидов по длинным следам. Однако большая часть астероидов и комет на ПЗС-кадрах имеют круговую форму изображения.

3. Наблюдение астероидов может затрудняться рядом факторов: слабо-контрастным изображением астероидов; неравномерным распределением фона на кадрах; размытием изображения астероида из-за турбулентности атмосферы;

искажением изображения астероида вследствие аббераций оптической системы; нарушением суточного ведения; высокой скоростью видимого движения и других.

4. Разработано достаточно большое количество методов определения положения астероидов по наблюдениям с ПЗС-камерой. Однако недостатком большинства методов оценки параметров местоположения объекта на ПЗС-кадре является то, что они либо не используют реальный закон распределения координат падения фотонов от объекта в фокальной плоскости оптического прибора, либо не учитывают основные особенности процесса формирования изображений, либо игнорируют наличие и распределение координат падения фоновых фотонов на изображении объектов и в его окрестности. Одновременный учет всех перечисленных факторов и условий является необходимым условием создания методов оценки положения объектов с круговыми и смазанными собственным движением изображениями, обладающих точностью, близкой к потенциальной.

5. Большинство существующих автоматизированных программных средств обработки цифровых ПЗС-кадров для обнаружения небесных объектов не имеют возможности тотальной автоматической оценки местоположения объектов со смазанными изображениями.

6. Для повышения точности оценки местоположения объектов с круговыми изображениями и изображениями, смазанными собственным движением, на ПЗС-кадрах сформулирована постановка исследований как решение научно-технической задачи разработки вычислительных методов обработки цифровых изображений для оценки положения небесных объектов с круговыми изображениями и изображениями, смазанными собственным движением.

РАЗДЕЛ 2

РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ КАДРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ КРУГОВЫХ ОБЪЕКТОВ

2.1 Постановка задачи для изображений круговых объектов

Считается, что обнаружен объект. Изображение объекта действительно присутствует в кадре и находится в области внутрикадровой ки (ОВКО). При этом ОВКО представляет собой множество Ω_{Nobj} пикселей, в которых предполагается наличие изображения объекта. Количество пикселей, принадлежащих ОВКО считается равным N_{IPS} . Альтернативно ОВКО может быть задана координатами и размерами соответствующей прямоугольной области.

В работе используется прямоугольная система координат (СК) ПЗС-кадра с центром в левом верхнем углу ПЗС-кадра.

Изображение объекта на ПЗС-кадре формируется за счет попадания сигнальных фотонов от этого объекта в пиксели ПЗС-матрицы. При этом границы ik -го пикселя ПЗС-матрицы можно выразить через координаты привязки x_{it}, y_{kt} центра ik -го пикселя t -го кадра ПЗС-матрицы:

$$x_{bi} = x_{it} - \frac{\Delta_{CCD}}{2}, \quad x_{ei} = x_{it} + \frac{\Delta_{CCD}}{2}; \quad (2.1)$$

$$y_{bk} = y_{kt} - \frac{\Delta_{CCD}}{2}, \quad y_{ek} = y_{kt} + \frac{\Delta_{CCD}}{2}, \quad (2.2)$$

где x_{bi}, x_{ei} – границы (начало и конец соответственно) ik -го пикселя ПЗС-матрицы по координате x ;

y_{bk}, y_{ek} – границы ik -го пикселя ПЗС-матрицы по координате y .

Наблюдению, регистрации доступны яркости A_{ikt}^* пикселей ОВКО (пикселей из множества Ω_{Nobj}) на выходе ПЗС-матрицы. Доступные наблюдению яркости на выходе N_{CCD} пикселей ПЗС-матрицы можно привести к опытным относительным частотам попадания фотонов в ik -й пиксель ПЗС-матрицы в t -м кадре v_{ikt}^* (далее в работе относительные яркости соответствующих пикселей):

$$v_{ikt}^* = A_{ikt}^* / \sum_{i,k}^{N_{IPS}} A_{ikt}^*, \quad (2.3)$$

где A_{ikt}^* – экспериментальная яркость ik -го пикселя ПЗС-матрицы на t -ом кадре, принадлежащего исследуемой ОВКО.

Изображение, в котором в качестве яркостей пикселей используются значения v_{ikt}^* , далее в работе называются нормированными.

Изображения объекта на кадре имеет форму точки, а, с учетом атмосферной турбулентности, изображение объекта становятся размытым.

Помеховые фотоны (вызваны шумами считывания изображения с ПЗС-матрицы, «темновыми токами», неравномерностью чувствительности пикселей ПЗС-матрицы, а также фоновым излучением) образуют во всех пикселях ОВКО фоновую подложку. Адекватной моделью фоновой подложки в рамках ОВКО есть наклонная плоскость с неизвестными параметрами A_N, B_N, C_N . Фоновая подложка изображения может считаться как удаленной из изображения объекта, так и подлежащей оценке и удалению.

Основными характеристиками для каждого гипотетического объекта на изображении кадра являются: положение X_t, Y_t , теоретическая амплитуда A_G ; параметр формы изображения объекта σ_G . Совокупность вышеуказанных параметров является уникальной для каждого объекта и подлежит оценке. Также

оцениванию подлежат параметры фоновой подложки A_N, B_N, C_N , а в случае ее предварительного вычитания из изображения объекта оценивается остаточная фоновая составляющая C_R .

Время экспозиции кадра мало настолько, что перемещением объекта за это время можно пренебречь. Иными словами, при оценке положения объекта использование модели движения объекта не требуется.

Предполагается, что истинные положения объекта локализуются в окрестностях пикселей-пиков (локальных максимумов изображения по яркости). В данной работе под пиком изображения понимается пиксель ПЗС-матрицы, яркость которого больше яркости любого из прилегающих к нему. Начальные приближения координат объекта на t -м кадре x_t, y_t соответствуют координатам привязки пикселей-пиков изображения, гипотетически соответствующих положению объекта.

В качестве модели формы изображения объекта используется субпиксельная гауссова модель [106, 107, 108].

2.2 Разработка субпиксельной гауссовой модели для описания кругового изображения объекта

Считается [106, 107, 108], что координаты падения сигнальных фотонов на ПЗС-матрицу имеют круговое нормальное распределение.

Субпиксельной моделью изображения объекта с точностью до констант считается функция, соответствующая плотности распределения координат падения фотонов от этого объекта. Иными словами, субпиксельная гауссова модель описывает распределение координат падения фотонов в области кадра, соответствующей изображению объекта. Отличие модели от указанной плотности заключается в отсутствии нормирующей константы.

Исходя из вышесказанного, выражение для модельного (теоретического) субпиксельного изображения объекта можно представить смесью функций:

$$f_{G2noise}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_{sh}^{sub}) = A_{noise}^{sub} x_{it} + B_{noise}^{sub} y_{kt} + C_{noise}^{sub} + \frac{A_{subGt}}{2\pi\sigma_{subGt}^2} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{subGt}^2} [(x_{it} - x_t(\Theta_{sh}^{sub}))^2 + (y_{kt} - y_t(\Theta_{sh}^{sub}))^2]\right\}, \quad (2.4)$$

где A_{noise}^{sub} , B_{noise}^{sub} , C_{noise}^{sub} – параметры подынтегральной фоновой подложки;

A_{subGt} – подынтегральная амплитуда пика изображения гипотетического объекта на t -ом ПЗС-кадре;

σ_{subGt} – параметр формы подынтегральной модели изображения гипотетического объекта на t -ом ПЗС-кадре.

Субпиксельное изображение объекта может также называться подынтегральным, так как пиксель есть интегратор.

В качестве модели субпиксельного фонового изображения в работе используется плоскость с произвольным наклоном:

$$G_{noise}^{sub}(x_{it}, y_{kt}) = A_{noise}^{sub} x_{it} + B_{noise}^{sub} y_{kt} + C_{noise}^{sub}. \quad (2.5)$$

Параметры данной плоскости можно оценить по пикселям, что не содержат изображения объекта. Считается, что существует возможность разделения пикселей ОВКО на пиксели, содержащие (N_{IPSS}) и не содержащие изображение объекта. Количество последних считается равным $N_{IPSS(n)}$.

Чтобы выражение (2.4) субпиксельной модели изображения объекта допускало вероятностную трактовку, необходимо A_{subGt} заменить на p_j (вероятность того, что очередной фотон принадлежит объекту). Следует учесть, что $p_j = 1 - p_0$, а интеграл от $A_{noise}^{sub} x_{it} + B_{noise}^{sub} y_{kt} + C_{noise}^{sub}$ должен быть равен p_0 (вероятность того, что очередной фотон является фоновым). При использовании ве-

роятностной трактовки σ_{subGjt} является СКО координат падения сигнальных фотонов.

В рамках субпиксельной гауссовой модели относительная яркость A_{ikt} пикселей ПЗС-матрицы может быть представлена выражением:

$$A_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub}) = \int_{x_{bi}}^{x_{ei}} \int_{y_{bk}}^{y_{ek}} f_{G2n}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_{sh}^{sub}) dx_{it} dy_{kt}. \quad (2.6)$$

Удобно ввести следующие обозначения:

$$N_z(m_z; \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(z - m_z)^2\right), \quad (2.8)$$

$$F_{zi}(m_z; \sigma^2) = \int_{z_{ei}}^{z_{bi}} N_z(m_z; \sigma^2) dz. \quad (2.9)$$

При возможности использования вероятностной трактовки $N_z(m_z; \sigma^2)$ является значением плотности нормального распределения с математическим ожиданием m_z и дисперсией σ^2 в точке z . При этом $F_{zi}(m_z; \sigma^2)$ является значением вероятности попадания нормально распределенной СВ с указанными выше характеристиками в интервал $[z_{bi}, z_{ei}]$.

Согласно субпиксельной гауссовой модели выражение модельной яркости пикселя с учетом выражений (2.8) и (2.9) примет вид:

$$A_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub}) = \Delta_{CCD}^2 \left(A_{noise}^{sub} y_{kt} + B_{noise}^{sub} x_{it} + C_{noise}^{sub} \right) + A_{subGt} F_{xi}(x_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) F_{yk}(y_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) = I_{iktn} + I_{ikts}, \quad (2.10)$$

где I_{iktn}, I_{ikts} – фоновая и сигнальная составляющие модельной яркости

ik -го пикселя t -го ПЗС-кадра;

$$I_{iktn} = \Delta_{CCD}^2 \left(A_{noise}^{int} x_{it} + B_{noise}^{int} y_{kt} + C_{noise}^{int} \right);$$

$$I_{ikts} = A_{Gt}^{int} F_{xi}(x_t(\Theta_{sh}^{int}); \sigma_{Gt}^2) F_{yk}(y_t(\Theta_{sh}^{int}); \sigma_{Gt}^2).$$

При этом вектор оцениваемых параметров имеет вид:

$$\Theta_{sh}^{sub} = (A_{noise}^{sub}, B_{noise}^{sub}, C_{noise}^{sub}, x_t(\Theta_{sh}^{sub}), y_t(\Theta_{sh}^{sub}), A_{subGt}, \sigma_{subGt} = (\theta_1, \dots, \theta_n, \dots, \theta_7), \quad (2.11)$$

где θ_n – n -ый оцениваемый параметр.

2.3 Определение параметров изображения круговых объектов согласно критерию минимума суммы квадратов отклонений между модельной и экспериментальной яркостями

Минимизация суммы квадратов отклонений между модельными и экспериментальными яркостями пикселей изображений объектов. Для изображения объекта на ПЗС-кадре необходимо оценить следующие параметры (2.7): положение $x_t(\Theta_{sh}^{sub})$, $y_t(\Theta_{sh}^{sub})$ теоретическую амплитуду A_{subGt} ; параметр формы σ_{subGt} подынтегральной модели изображения объекта.

В качестве критерия наилучшей оценки положения объекта на ПЗС-кадре выбран минимум суммы квадратов отклонений между модельными и экспериментальными яркостями пикселей:

$$F_{\Delta AGsub}(\Theta_{sh}^{sub}) = \sum_{i,k}^{N_{SIFP}} \Delta A_{subm(i,k)}^2 \xrightarrow{\Theta_{sh}^{sub}} \min, \quad (2.12)$$

где

$$\Delta A_{subm(i,k)} = A_{ikt}^* - A_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub}). \quad (2.13)$$

Решение оптимизационной задачи по минимизации суммы квадратов отклонений (2.11) осуществляется при помощи алгоритма Левенберга-Марквардта (Levenberg-Marquardt Algorithm, LMA) [109, 110], предназначенного для оптимизации параметров нелинейных регрессионных моделей. Данный алгоритм является наиболее распространенным алгоритмом оптимизации, потому что он превосходит по производительности метод наискорейшего спуска и другие методы сопряженных градиентов.

Для реализации алгоритма Левенберга-Марквардта используется матрица Якоби $J_{\Delta AG}$, элементами которой являются частные производные отклонений $\Delta A_{subm(i,k)}$ между модельной и экспериментальной яркостью пикселя по оцениваемым параметрам (элементам вектора оцениваемых параметров Θ_{sh}^{sub}) в каждом пикселе множества Ω_{SIFP} .

Элементами матрицы $J_{\Delta AG}$ являются частные производные отклонений $\Delta A_{subm(i,k)}$ между модельной и экспериментальной яркостями пикселя по оцениваемым параметрам (элементам вектора оцениваемых параметров Θ_{sh}^{sub}) в каждом пикселе множества Ω_{SIFP} . При этом, m -ой строке матрицы Якоби $J_{\Delta AG}^{over}$ соответствует значение производных по всем оцениваемым параметрам от отклонения в m -ом пикселе множества Ω_{SIFP} , а n -ый столбец матрицы содержит производные по n -ому параметру вектора оцениваемых параметров Θ_{sh}^{sub} по отклонению во всех пикселях множества Ω_{SIFP} .

Иными словами, mn -ому элементу матрицы Якоби соответствует значение производной отклонения в m -ом пикселе множества Ω_{SIFP} по n -ому оце-

ниваемому параметру из вектора оцениваемых параметров Θ_{sh}^{sub} .

Далее считается, что номер пиксела m в множестве Ω_{SIFP} является функцией $m(i,k)$ от номеров пиксела на кадре.

Таким образом, матрица Якоби будет имеет следующий вид:

$$J_{\Delta AG}^{sub} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta A_{ns-1(1,1)}^{sub}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{ns-1(1,1)}^{sub}}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{ns-1(1,1)}^{sub}}{\partial \theta_8} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta A_{ns-m(i,k)}^{sub}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{ns-m(i,k)}^{sub}}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{ns-m(i,k)}^{sub}}{\partial \theta_8} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta A_{ns-N_{SIFP}(i,k)}^{sub}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{ns-N_{SIFP}(i,k)}^{sub}}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{ns-N_{SIFP}(i,k)}^{sub}}{\partial \theta_8} \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

где θ_n – n -й оцениваемый параметр из вектора оцениваемых параметров Θ_{sh}^{sub} .

Определение производных по параметрам изображения объекта и параметрам помеховой подложки. Не трудно показать, что производные от отклонения (2.12) между модельной и экспериментальной яркостями пикселя, по параметрам помеховой подложки имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta A_{subm(i,k)}}{dA_{noise}^{sub}} &= -\Delta_{CCD}^2 y_{kt}; \\ \frac{d\Delta A_{subm(i,k)}}{dB_{noise}^{sub}} &= -\Delta_{CCD}^2 x_{it}; \\ \frac{d\Delta A_{subm(i,k)}}{dC_{noise}^{sub}} &= -\Delta_{CCD}^2. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Согласно [111], производные от отклонения (2.12) между модельной и

экспериментальной яркостью пикселя по теоретическим координатам гипотетического объекта на t -ом ПЗС-кадре имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\Delta A_{sub\ m(i,k)}}{dx_t(\Theta_{sh}^{sub})} &= -A_{subGt} F_{yk}(y_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) \times \\
 &\times (N_{x_{ei}}(x_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) - N_{x_{bi}}(x_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2)) = \\
 &= -\frac{A_{subGt} F_{yk}(y_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) F_{xi}(x_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} \times \\
 &\quad \times (m_{x_{it}}^{loc} - x_t(\Theta_{sh}^{sub})), \tag{2.16}
 \end{aligned}$$

где $m_{z_i}^{loc}$ – локальное математическое ожидание случайной величины z [106] на интервале $[z_{bi}, z_{ei}]$ (рис. 2.1) при использовании вероятностной трактовки и просто обозначение в противном случае.

Определением локального математического ожидания случайной величины с математическим ожиданием m_z и дисперсией σ^2 на интервале $[z_{bi}, z_{ei}]$ можно считать среднее ее значение на этом интервале:

$$\begin{aligned}
 m_{z_i}^{loc} &= \frac{\sigma^2}{F_{z_i}(m_z; \sigma^2)} \int_{z_{bi}}^{z_{ei}} z N_z(m_z; \sigma^2) dz = \\
 &= m_z + \frac{\sigma^2}{F_{z_i}(m_z; \sigma^2)} (N_{z_{bi}}(m_z; \sigma^2) - N_{z_{ei}}(m_z; \sigma^2)). \tag{2.17}
 \end{aligned}$$

Аналогично (2.16) вычисляется производная от отклонения (2.12) по параметру положения гипотетического объекта:

$$\begin{aligned}
\frac{d\Delta A_{subm(i,k)}}{dy_t(\Theta_{sh}^{sub})} &= -A_{subGt} F_{xi}(x_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) \times \\
&\times (N_{y_{ei}}(y_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) - N_{y_{bi}}(y_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2)) = \\
&= -\frac{A_{subGt} F_{xi}(x_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) F_{yk}(y_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} \times \\
&\times (m_{y_{kt}}^{loc} - y_t(\Theta_{sh}^{sub})). \tag{2.18}
\end{aligned}$$



Рисунок 2.1 – Определение локального математического ожидания

Производная по параметру σ_{subGt} формы подынтегральной модели изображения гипотетического объекта согласно [111] имеет вид:

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

$$\begin{aligned} & \times ((y_{ei} - y_t(\Theta_{sh}^{sub}))N_{y_{ei}}(y_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) - \\ & - (y_{bi} - y_t(\Theta_{sh}^{sub}))N_{y_{bi}}(y_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2)). \end{aligned} \quad (2.19)$$

Пользуясь выражением (2.10) модельной яркости пикселя, можно легко вычислить частую производную от отклонения (2.12) между экспериментальной и модельной яркостями по подынтегральной амплитуде A_{subGt} пика изображения гипотетического объекта:

$$\frac{d\Delta A_{subm(i,k)}}{dA_{subGt}} = -F_{xi}(x_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2)F_{yk}(y_t(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGt}^2). \quad (2.20)$$

Оценка параметров субпиксельного изображения кругового объекта при предварительно вычтенной помеховой подложке. Для субпиксельного изображения кругового объекта, с учетом предварительно проведенного вычитания помеховой подложки выражение для модельной яркости пикселя будет выглядеть аналогично выражению (2.4).

При этом выражение, описывающее субпиксельное изображение кругового объекта, примет вид:

$$\begin{aligned} & f_{G2residual}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_{sub}) = C_{residual}^{sub} + \\ & + \frac{A_{subGt}}{2\pi\sigma_{subGt}^2} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{subGt}^2} \left[(x_{it} - x_t(\Theta_{sub}))^2 + (y_{kt} - y_t(\Theta_{sub}))^2 \right]\right\}, \end{aligned} \quad (2.21)$$

где Θ_{sub} – вектор оцениваемых параметров:

$$\Theta_{sub} = (C_{residual}^{sub}, x_{1t}(\Theta_{sub}), y_t(\Theta_{sub}), A_{subGt}, \sigma_{subGt}, \dots = (\theta_1, \dots, \theta_n, \dots, \theta_5); \quad (2.22)$$

$C_{\text{residual}}^{\text{sub}}$ – остаточная составляющая помеховой подложки.

Оптимизационная задача по минимизации суммы квадратов отклонений между экспериментальной и модельной яркостями формируется аналогично выражению (2.12).

Матрица Якоби (матрица частных производных от отклонения $\Delta A_{\text{sub}2m(i,k)}$ между модельной и экспериментальной яркостью пикселя) формируется по аналогии с матрицей (2.14).

Выражения для частных производных от отклонения $\Delta A_{\text{sub}2m(i,k)}$ по подынтегральной амплитуде пика изображения гипотетического объекта, параметру формы подынтегральной модели изображения гипотетического, координатам гипотетического объекта на t -ом ПЗС-кадре совпадают с аналогичными выражениями (2.16), (2.18), (2.19) и (2.20).

Частная производная от отклонения $\Delta A_{\text{sub}2m(i,k)}$ по параметру $C_{\text{residual}}^{\text{sub}}$ остаточной составляющей плоской помеховой подложки имеет вид:

$$\frac{d\Delta A_{\text{sub}2m(i,k)}}{dC_{\text{residual}}^{\text{sub}}} = -\Delta_{\text{CCD}}^2. \quad (2.23)$$

Вычислительный метод определения параметров изображения круговых объектов согласно критерию минимума суммы квадратов отклонений между модельной и экспериментальной яркостями (рисунок 2.2).

При оценке положения элементов объекта с круговым изображением, исследуется множество Ω_{Obj} пикселей ПЗС-кадра, в которых предполагается наличие изображения объекта. А результатом наблюдений является совокупность относительных яркостей $\tilde{U} = (v_{11t}^*, \dots, v_{ikt}^*, \dots, v_{N_{IPst}}^*)$ (2.3).

1. Выбор начальных приближений. Начальные приближения координат

кругового объекта на t -м кадре x_t, y_t соответствуют координатам привязки пикселей-пиков изображения, гипотетически соответствующих положению объекта.

2. На основе начального приближения, полученного на предыдущей итерации, рассчитывается субпиксельная модель яркости кругового изображения объекта (2.6), в пикселях входящих множество Ω_{Obj} .

3. На основе субпиксельной модели (2.6) яркости кругового изображения объекта рассчитываются элементы (2.15), (2.16), (2.18)–(2.20) матрицы Якоби (2.14), согласно вектору оцениваемых параметров (2.11).

4. Полученные на предыдущем шаге элементы матрицы Якоби поступают на вход процедуры алгоритма Левенберга-Марквардта [109, 110], где происходит минимизация суммы квадратов отклонений между модельными и экспериментальными яркостями пикселей (2.13). В том числе на вход данного алгоритма поступает субпиксельная модель яркости кругового изображения объекта (2.6).

5. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет выполнено условие $\sum_{i,k}^{N_{IPS}} (A_{ikt}^* - A_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub}))^2 < \varepsilon_{sr}$, где ε_{sr} – константа, определяющая требуемую точность вычислений, либо пока количество итераций не достигнет заданного значения ε_{iter} . В противном случае на 4м этапе вычислительного алгоритма будет пересчитано условие $(A_{ikt}^* - A_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub}))^2 < \varepsilon_{sr}$ с новым параметром шага (согласно алгоритму Левенберга-Марквардта [109, 110]).

6. При выполнении условий в 5м пункте алгоритма итерационный процесс заканчивается и полученные на этом шаге оценки вектора (2.11) оцениваемых параметров идут на выход алгоритма.



Рисунок 2.2 – Вычислительный метод определения параметров изображения круговых объектов согласно критерию минимума суммы квадратов отклонений между модельной и экспериментальной яркостями

2.4 Исследование точности оценки положения круговых объектов на ПЗС-кадрах

Предложенный в подразделах 2.2 и 2.3 вычислительный метод обработки цифровых кадров для оценки параметров круговых объектов разработан и внедрен программе автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-

кадров CoLiTec (Collection Light Technology – Технология собирания света) [6, 21, 24, 25, 75, 76, 112 – 114].

2.4.1 Анализ показателей точности ПЗС-измерений программного обеспечения CoLiTec на фоне тридцати самых продуктивных обсерваторий мира по количеству наблюдений

Разработанные вычислительные методы обработки цифровых кадров для оценки параметров круговых объектов были внедрены в рамках программного обеспечения (ПО) автоматического поиска астероидов на серии ПЗС-кадров CoLiTec. По результатам обработки программными обеспечениями CoLiTec и Astrometrica одних и тех же кадров проведен сравнительный анализ показателей точности измерений.

Три обсерватории – пользователя CoLiTec неоднократно входили в ТОП-30 самых продуктивных обсерваторий мира по числу измерений астероидов. Обсерватория ISON NM по суммарным итогам 2011 и 2012 годов заняла седьмое место в мире как по количеству измерений, так и по числу открытий. Данные достижения обеспечили возможность анализа показателей точности ПО CoLiTec, представленных центром Малых планет [115, 116, 117].

В таблице 2.1, общее количество измерений и объектов (колонка 3), а также число открытий астероидов (колонка 4) представлены в соответствии с циркулярами 2012 года [117] Центра малых планет (MPC). Для каждой обсерватории в таблице 1 указаны следующие параметры: диаметр D главного зеркала телескопа, метры (колонка 5); масштаб $S_{"/pix}$ пикселей ПЗС-матрицы, угловые секунды (колонка 6); среднее отклонение по прямому восхождению (RA) $\bar{\Delta}_\alpha$ и склонению (DE) $\bar{\Delta}_\delta$, а также СКО отклонений экваториальных координат (RA, DE) соответственно, σ_α и σ_δ (колонка 7) соответствуют данным сайта MPC [116]. Для расчета СКО σ'' измерений в угло-

вых секундах (колонка 8); СКО σ_{pix} измерений в пикселях (колонка 9); среднего модуля отклонений измерений положения объекта (колонка 10) использовались выражения:

$$\sigma'' = 0,5(\sigma_{\alpha} + \sigma_{\delta}); \quad (2.24)$$

$$\sigma_{pix} = \frac{\sigma''}{S_{pix}}; \quad (2.25)$$

$$СМО = \sqrt{(\overline{\Delta_{\alpha}})^2 + (\overline{\Delta_{\delta}})^2}. \quad (2.26)$$

Средние ошибки измерений (колонка 10 таблицы 2.1) ПО CoLiТес од- ни из наименьших среди ТОП-30 обсерваторий. В свою очередь СКО изме- рений σ'' ПО CoLiТес, выраженное в угловых секундах (колонка 8 табли- цы 2.1), не являются таковыми. Однако это связано в большей степени с используемым масштабом пикселя и данный показатель в большей степени характеризует систему телескоп-ПЗС-камера – используемое ПО. Соб- ственно, ПО характеризует СКО измерений σ_{pix} , выраженное в пикселях (колонка 9 таблицы 2.1). По данному показателю обсерватории- пользователи CoLiТес, так же являются одними из лучших в указанном списке ТОП-30 обсерваторий мира и лучшими среди обсерваторий, исполь- зующих телескопы с малой апертурой.

По среднему модулю отклонений обсерватории-партнеры CoLiТес зани- мают лидирующие позиции в своем классе телескопов (рис. 2.2в). Так, в 2012 го- ду модуль средних отклонений на обсерваториях Н15 и А50 был равен 0.06''.

По СКО измерений, в угловых секундах, обсерватории-партнеры CoLiТес не входят в список лучших (рис. 2.2а,б). В 2012 году значение СКО (угловые секунды) для указанных обсерваторий составляло 0.515'' (Н15), 0.49'' (D00) и 0.48'' (А50). Причиной тому, кроме размера апертуры телескопа, является мас- штаб пикселя используемой ПЗС-матрицы. В попытке учесть этот фактор был

использован СКО в пикселях.

Таблица 2.1. Наиболее продуктивные обсерватории мира по наблюдению астероидов за 2012 год

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
N	Код Обсерват.	Измерения, Объекты	Открытия	D,m	S"/pix	RA($\bar{\Delta}_\alpha \pm \sigma_\alpha$)	σ''	σ_{pix}	СМО
						DE($\bar{\Delta}_\delta \pm \sigma_\delta$)			
1	G96	2080033 (384204)	2080033	1,5	1	0,02 +/- 0,33 0,02 +/- 0,28	0,305	0,305	0,028
2	F51	1948353 (467091)	1948353	1,8	0,3	0,07 +/- 0,15 0,04 +/- 0,17	0,16	0,53	0,081
3	703	1723293 (282864)	1723293	0,68	2,6	-0,22 +/- 0,65 0,07 +/- 0,62	0,635	0,24	0,231
4	704	1681504 (262209)	1681504	1	2,2	0,26 +/- 0,67 0,43 +/- 0,64	0,655	0,29	0,502
5	691	896972 (163714)	896972	0,9	1	-0,16 +/- 0,32 0,10 +/- 0,29	0,305	0,27	0,189
6	E12	259295 (62621)	259295	0,5	1,8	-0,01 +/- 0,51 0,29 +/- 0,50	0,505	0,28	0,29
7	J43	102641 (22682)	102641	0,5	1,2	0,19 +/- 0,48 0,05 +/- 0,40	0,44	0,36	0,196
8	926	100161 (29986)	100161	0,81	0,87	0,02 +/- 0,37 0,05 +/- 0,35	0,36	0,41	0,54
9	H15 (CoLiTec)	97878 (24170)	97878	0,45	2	-0,06 +/- 0,50 -0,01 +/- 0,53	0,515	0,25	0,061
10	106	72192 (17451)	72192	0,6	2	0,04 +/- 0,36 -0,12 +/- 0,34	0,35	0,17	0,126
11	A14	57243 (16239)	57243	0,5		0,06 +/- 0,37 -0,02 +/- 0,32	0,345		0,063
12	J04	43209 (10708)	43209	1	0,62	0,21 +/- 0,28 0,20 +/- 0,27	0,275	0,44	0,29
13	D00 (CoLiTec)	31494 (7403)	31494	0,4	2,06	0,00 +/- 0,57 -0,06 +/- 0,41	0,49	0,23	0,06
14	291	24272 (6224)	24272	1,8	0,6	0,07 +/- 0,33 0,13 +/- 0,28	0,305	0,5	0,148
15	461	23847 (5615)	23847	0,6	1,1	0,00 +/- 0,27 0,15 +/- 0,27	0,27	0,24	0,15
16	644	22714 (4486)	22714	1,2	1				

Продолжение таблицы 2.1

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
17	H21	22672 (3870)	22672	0,61	0,8	0,03 + / - 0,34 0,01 + / - 0,36	0,35	0,43	0,032
18	I41	21245 (2392)	21245	1,2	1,01	0,11 + / - 0,23 -0,03 + / - 0,23	0,23	0,22	0,114
19	A24	18940 (2412)	18940	0,36	1,4	0,14 + / - 0,37 0,24 + / - 0,33	0,35	0,25	0,278
20	645	18369 (5650)	18369	2,5	0,396				
21	807	12702 (2383)	12702	0,41		0,04 + / - 0,29 -0,01 + / - 0,24	0,265		0,041
22	A50 (CoLiTec)	11559 (3725)	11559	0,6	2,07	0,25 + / - 0,50 -0,04 + / - 0,46	0,48	0,23	0,253
23	716	10669 (491)	10669	0,35	2,5	0,06 + / - 0,33 -0,01 + / - 0,23	0,28	0,1	0,061
24	D29	9918 (2927)	9918	1,04	1,705	0,09 + / - 0,43 -0,01 + / - 0,44	0,435	0,25	0,091
25	C41	8904 (3188)	8904	0,4	1,8	-0,16 + / - 0,85 0,09 + / - 0,72	0,785	0,43	0,184
26	621	6782 (1692)	6782	0,6	1,2	0,10 + / - 0,35 -0,01 + / - 0,35	0,35	0,29	0,101
27	H45	6414 (368)	6414	0,51		0,04 + / - 0,33 -0,05 + / - 0,31	0,32		0,064
28	D03	5489 (1396)	5489	0,4	1,2	-0,06 + / - 0,64 -0,05 + / - 0,45	0,545	0,45	0,078
29	950	5477 (800)	5477	2,5		0,09 + / - 0,28 0,11 + / - 0,24	0,26		0,142
30	71	5427 (329)	5427	0,5		0,01 + / - 0,63 0,12 + / - 0,43	0,53		0,12

СКО в пикселях оценок положения объектов (рисунок 2.3г) используется для характеристики потенциальных возможностей вычислительного метода при абстрагировании от параметров используемых ПЗС-матрицы и другого используемого оборудования. По этому показателю обсерватории-партнеры CoLiTec имеют одни из лучших результатов среди телескопов с малой апертурой. Обсерватории-партнеры CoLiTec за 2012 год имеют практически одинаковые показатели СКО (в пикселях): H15 – 0.25 pixel, A50 – 0.23 pixel, D00 – 0.23 pixel.

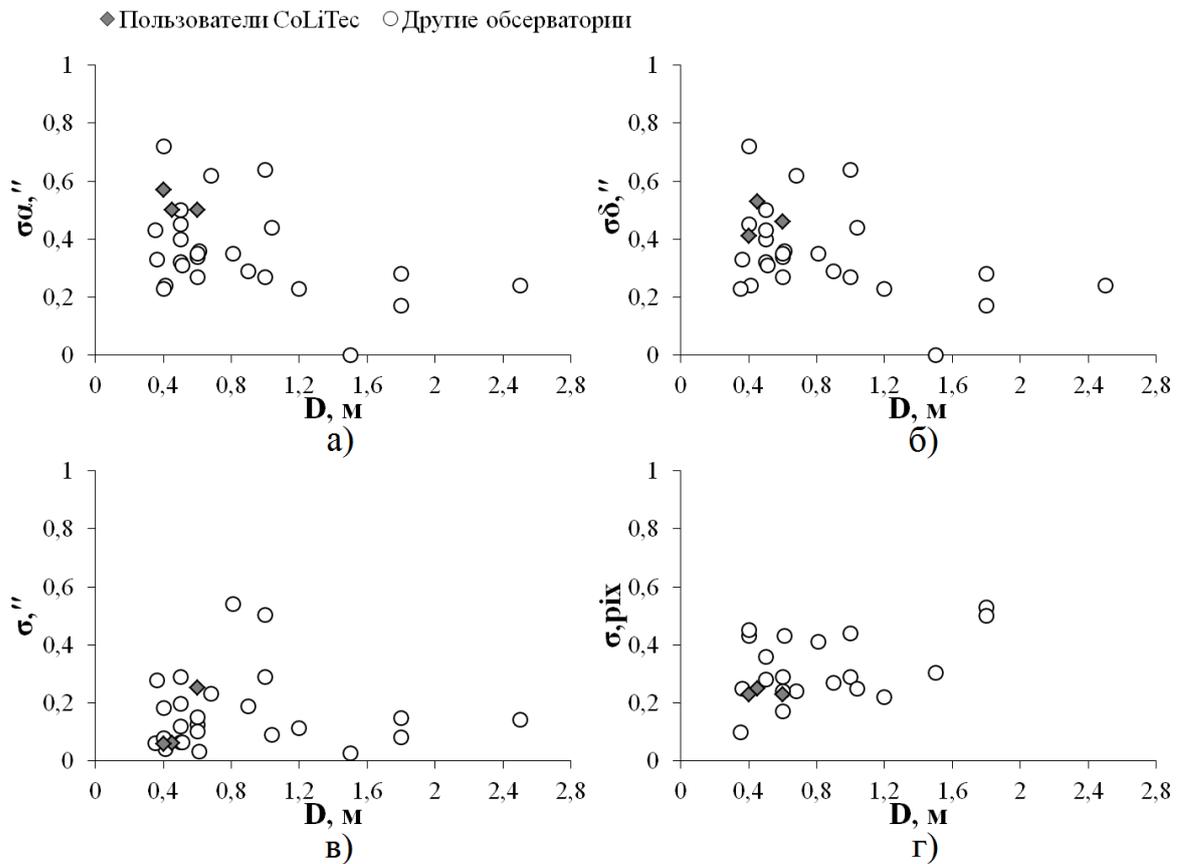


Рисунок 2.3 – Ведущие астероидные обзоры мира по данным 2012 года: а) СКО оценок прямого восхождения объектов, угловые секунды; б) СКО оценок склонения объектов, угловые секунды; в) СКО σ'' измерений, в угловых секундах; г) СКО σ_{pix} измерений, в пикселях

Однако СКО в пикселях оценок положения объектов (рис. 2.3г) является искусственным, не достаточно объективным показателем. В нем не учтено время экспозиции, оптическая схема телескопа, высота над уровнем моря и многое другое. По этому критерию обсерватория Pan-STARRS 1 (F51) проиграла всем остальным, хотя имеет лучшую точность астрометрии среди всех астероидных обзоров. С другой стороны, может быть, это свидетельствует о возможности дальнейшего повышения точности астрометрии F51 за счет использования методов оценки положения объектов на ПЗС-кадрах, максимально свободных от потерь измерительной информации, содержащейся на кадрах.

2.4.2 Сравнительный анализ показателей точности ПЗС-измерений малых тел Солнечной системы программными обеспечениями CoLiTec и Astrometrica

ПО Astrometrica [17 – 19] достаточно известно среди профессионалов и любителей астрономии, занимающихся ПЗС-измерениями объектов Солнечной системы [118]. Основным недостатком ПО Astrometrica является очень слабые ее поисковые возможности в автоматическом режиме.

Сравнительный анализ показателей точности ПЗС-измерений малых тел Солнечной системы. Наряду с анализом данных MPC проводился сравнительный анализ показателей точности ПО CoLiTec и ПО Astrometrica по результатам обработки одних и тех же кадров в соответствии с разработанной методикой [5]. При использовании обоих ПО использовалась кубическая модель координатной редукции [65, 119], а в качестве опорного использовался каталог UCAC-4 [120].

Кадры были получены в обсерватории ISON-NM (код MPC H15) в период с 04.03.2014 по 30.03.14. Обсерватория находится на горе Джой (Мейхилл), Нью-Мексико, США и использует 40-см телескоп САНТЕЛ-400АН и CCD-матрицу FLI ML09000-65 (3056×3056 пикселей, размер пикселя 12 мкм). Время экспозиции составляло 150 сек. Всего было использовано 19 серий по 4 кадра каждая. В предварительном анализе было использовано 36 серий. Однако кадры остальных серий не получили надежного отождествления с использованием ПО Astrometrica, то есть на каждой серии из четырех кадров был хотя бы один кадр, не отождествленный с используемым звездным каталогом. Также были исключены кадры с существенными сбоями в суточном ведении и полученные при сильном ветре.

В анализе использовались только положения астероидов, измерения которых попали в архив MPCAT-OBS [121].

Всего было использовано 2002 измерения. ПО CoLiTec было сделано на

253 измерения больше. По данным 253 измерений ПО Astrometrica выдала признак невозможности гарантировать достоверное измерение положения объекта (Centroid=-1). Это часто связано с попыткой измерить положение смазанных объектов [21] «star trails» или слабых объектов [74], находящихся на изображении рядом с яркими звездами. Более половины из них имеет ОСШ не превышающие 3.5 (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Распределение измерений по диапазонам ОСШ

ОСШ		Измерения CoLiTec & Astrometrica		Измерения CoLiTec	
min	max	количество	%	количество	%
0	1,8	0	0,00%	36	14,23%
1,8	3,5	154	7,49%	94	37,15%
3,5	6,8	822	39,96%	72	28,46%
6,8	10,1	396	19,25%	24	9,49%
10,1	13,4	213	10,35%	9	3,56%
13,4	16,7	130	6,32%	0	0,00%
16,7	20,0	71	3,45%	4	1,58%
20,0	23,3	64	3,11%	2	0,79%
23,3	26,6	53	2,58%	2	0,79%
26,6	29,9	35	1,70%	1	0,40%
29,9	33,2	27	1,31%	3	1,19%
33,2	36,5	11	0,53%	5	1,98%
36,5	274,8	81	3,94%	1	0,40%
Всего:		2057	100,00%	253	100,00%

Общие характеристики точности измерений приведены в таблице 2.3. При малых ОСШ (таблицы 2.4, 2.5) измерения ПО Astrometrica имеют СКО на 30÷50% больше, чем ПО CoLiTec (рисунки 2.4, 2.5). Средние отклонения ПО CoLiTec и Astrometrica в общем случае примерно одинаковы и поэтому данные по ним не приведены. Для получения эталонных значений положений объектов использовался сервис HORIZONS [122]. Также CoLiTec имеет меньшую частоту критических отклонений (таблицы 2.6, 2.7).

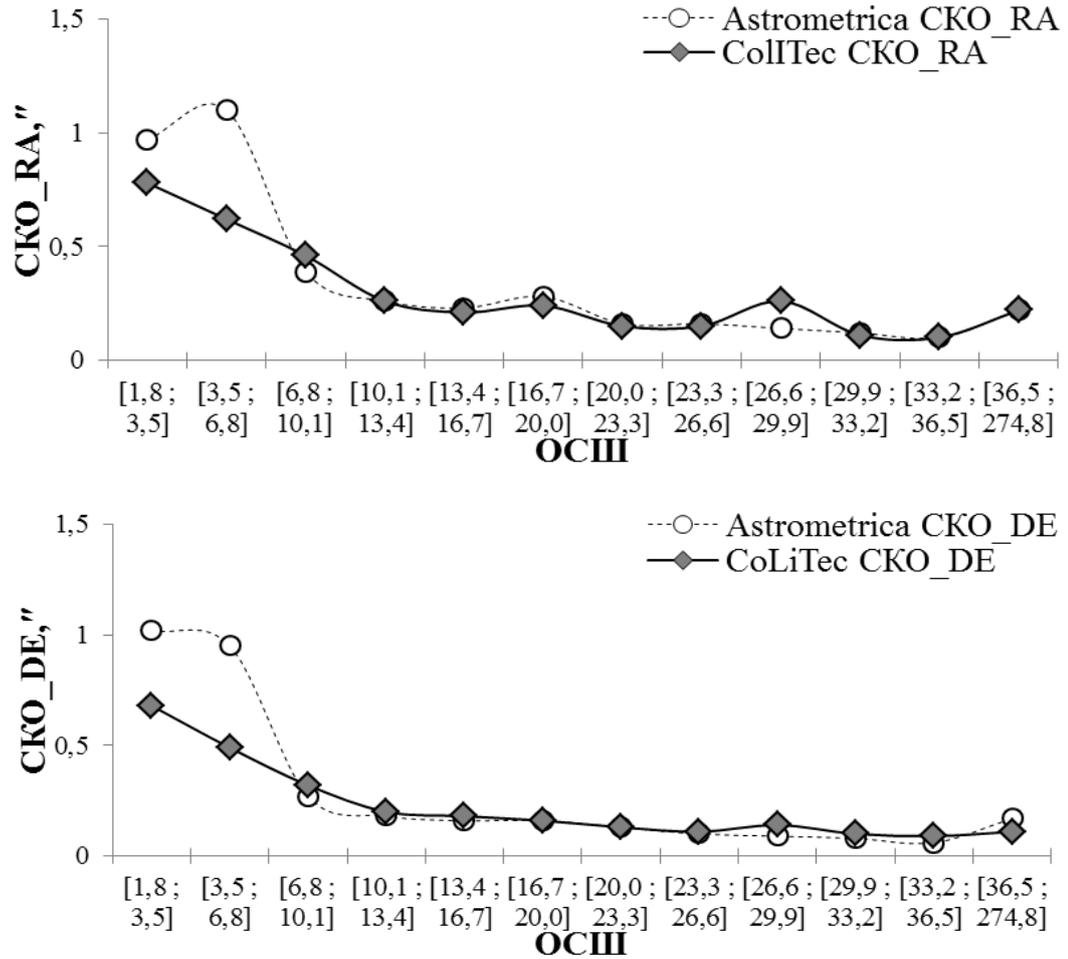


Рисунок 2.4 – Графики распределения отклонений экваториальных координат по диапазонам ОСШ (ПО Astrometrica и CoLiTec)

Таблица 2.3 – Основные параметры отклонений измерений по нумерованным астероидам. При построении использовался HORIZONS(ПО Astrometrica и ПО CoLiTec)

Обработано измерений	ПО Astrometrica			ПО CoLiTec		
	2002	1902	1802	2002	1902	1802
Процент отбраковки худших измерений, по модулю вектора отклонений	0%	5%	10%	0%	5%	10%
Среднее отклонений RA, угл. сек.	0,11	0,10	0,09	0,11	0,10	0,09
Среднее отклонений DE, угл. сек.	-0,04	-0,03	-0,02	-0,03	-0,03	-0,03
СКО отклонений по RA, угл. сек.	0,77	0,40	0,35	0,50	0,39	0,34
СКО отклонений по DE, угл. сек.	0,67	0,31	0,27	0,39	0,32	0,29

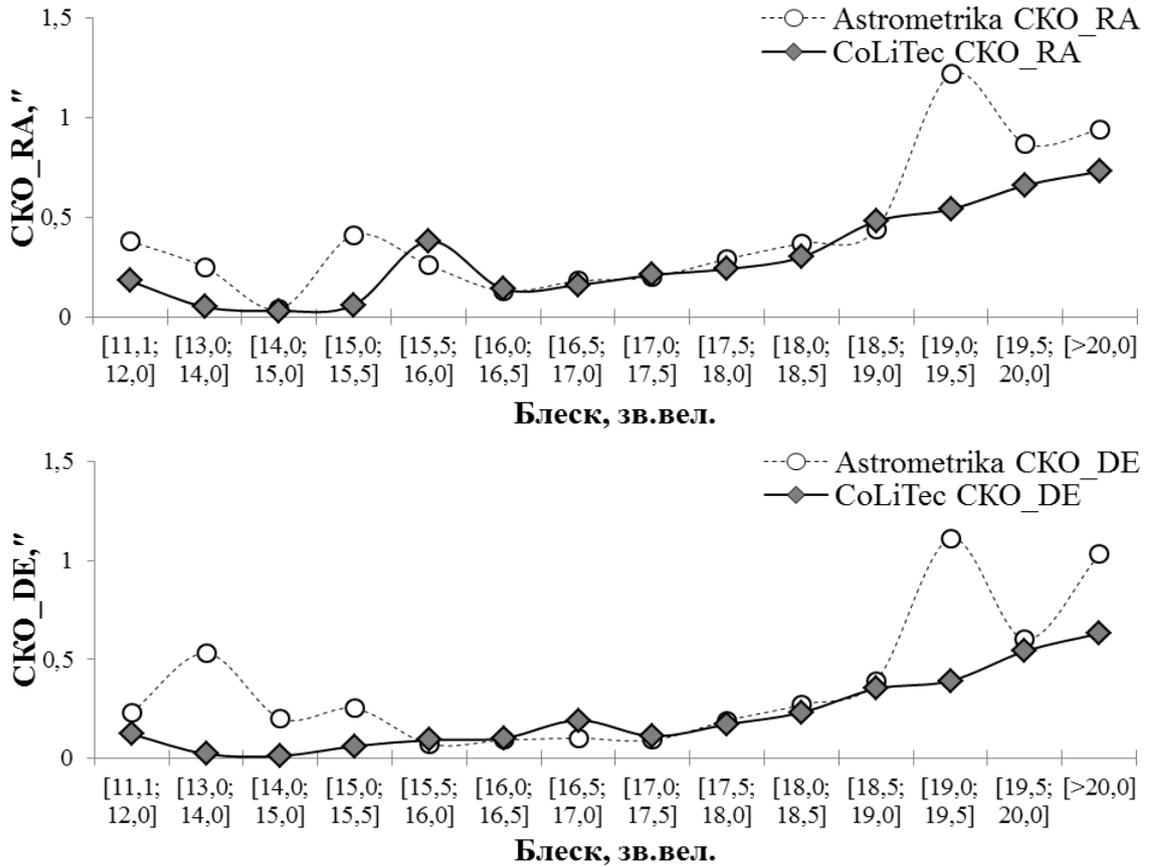


Рисунок 2.5 – Графики распределения отклонений экваториальных координат для диапазонов видимого блеска

Таблица 2.4 – Распределение отклонений по диапазонам ОСИ (ПО Astrometrica и CoLiTec)

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

Таблица 2.5 – Распределение отклонений экваториальных координат для диапазонов видимого блеска

Блеск, зв.вел.		Измерения	ПО Astrometrica		ПО CoLiTec	
max	min		СКО RA	СКО DE	СКО RA	СКО DE
11,1	12,0	12	0,38	0,23	0,18	0,12
13,0	14,0	4	0,25	0,53	0,05	0,02
14,0	15,0	4	0,04	0,20	0,03	0,01
15,0	15,5	12	0,41	0,25	0,06	0,06
15,5	16,0	22	0,26	0,07	0,38	0,09
16,0	16,5	25	0,13	0,09	0,14	0,10
16,5	17,0	40	0,18	0,10	0,16	0,19
17,0	17,5	105	0,20	0,09	0,21	0,11
17,5	18,0	204	0,29	0,19	0,24	0,17
18,0	18,5	263	0,37	0,27	0,30	0,23
18,5	19,0	340	0,44	0,39	0,48	0,35
19,0	19,5	414	1,22	1,11	0,54	0,39
19,5	20,0	406	0,87	0,60	0,66	0,54
>20,0		151	0,94	1,03	0,73	0,63
Всего		2002	0,77	0,67	0,50	0,39

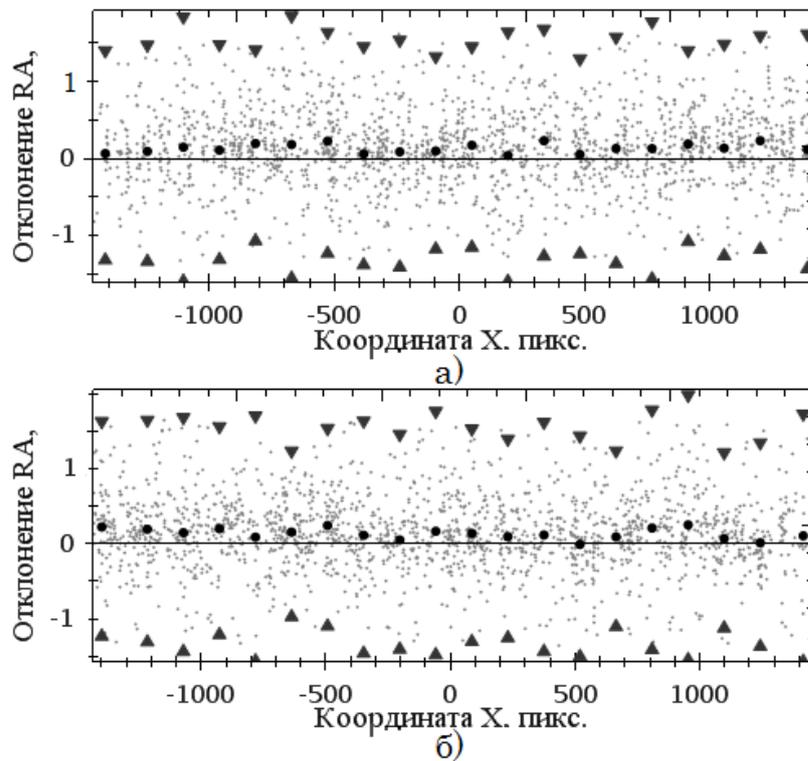


Рисунок 2.6 – Зависимость отклонений по прямому восхождению от абсциссы кадра: а) ПО CoLiTec; б) ПО Astrometrica

Таблица 2.6 – Распределение измерений с критическими значениями отклонений по RA

Отклонение по:	Измерения	<1"	<2"	<3"	<4"	>=4"
% RA (Astrometrica)	100	92,9	6,2	0,7	0,0	0,2
% RA (CoLiTec)	100	93,8	5,6	0,6	0,0	0,0
Количество измерений (Astrometrica)	2002	1937	57	2	1	5
Количество измерений (CoLiTec)	2002	1877	113	12	0	0

Таблица 2.7 – Распределение измерений с критическими значениями отклонений по DE

Отклонение	Измерения	<1"	<2"	<3"	<4"	>=4"
% DE (Astrometrica)	100	96,8	2,8	0,1	0,0	0,2
% DE (CoLiTec)	100	97,4	2,5	0,1	0,0	0,0
Количество измерений (Astrometrica)	2002	1937	57	2	1	5
Количество измерений (CoLiTec)	2002	1949	50	2	1	0

Выводы по разделу 2

1. Разработан вычислительный метод обработки цифровых кадров для оценки параметров круговых объектов, который позволяет с точностью, близкой к потенциальной, оценивать местоположение объектов с круговым изображением на ПЗС-кадре. В качестве модели формы изображения объекта использована субпиксельная гауссова модель (2.4), которая описывает распределение попадания фотонов в пиксели ПЗС-кадра (при наличии в нем изображения кругового объекта) с заданными параметрами. И учитывает основные особенности процесса формирования изображения на ПЗС-кадре. В том числе предлагаемая модель учитывает наличие фоновой подложки (2.5) и позволяет оценивать ее параметры (2.15), а в случае ее предварительного вычитания – параметры остаточной фоновой составляющей (2.23).

2. Задача (2.12) минимизации суммы квадратов отклонений между мо-

дельной и экспериментальной яркостями пикселей (2.13) решается с помощью стандартного алгоритма Левенберга-Марквардта. Данный алгоритм использует матрицу Якоби (2.14), согласно которой рассчитываются производные по оцениваемым параметрам объекта (2.16), (2.18)–(2.20). Применение алгоритма Левенберга-Марквардта к поставленной задаче позволяет быстро и с наименьшими затратами реализовать на практике метод обработки цифровых кадров для оценки параметров круговых объектов.

3. Приведен анализ вычислительного метода обработки цифровых кадров для оценки параметров круговых объектов в рамках ПО автоматического поиска астероидов на серии ПЗС-кадров CoLiTec. Исследования подтвердили высокую точность измерений ПО CoLiTec (раздел 2.4).

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

Материалы раздела опубликованы в работах [5, 6, 28, 33–35, 37, 38, 41, 42, 44–48].

РАЗДЕЛ 3

РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ, СМАЗАННЫХ СОБСТВЕННЫМ ДВИЖЕНИЕМ, НА ЦИФРОВЫХ КАДРАХ

3.1 Постановка задачи оценки параметров цифровых изображений объектов, смазанных собственным движением

Из-за большого времени экспозиции изображение объекта с ненулевым видимым движением становится смазанным собственным движением. Тем самым, эффектом перемещения объекта за время экспозиции Δ_τ при оценке положения объекта на кадре пренебречь нельзя.

При значительном времени экспозиции Δ_τ изображение объекта, смазанное его собственным видимым движением, имеет форму холма, вытянутого вдоль направления его видимого движения. Такое изображение объекта можно назвать протяжённым, иногда и сам объект называют протяженным в этом контексте.

При выборе формы представления модели видимого движения объекта с постоянной скоростью в фокальной плоскости оптического прибора использовались следующие доводы.

При проведении исследований считалось, что в фокальной плоскости телескопа объект движется равномерно вдоль каждой координаты:

$$\begin{aligned} x_\tau(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) &= x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{xit}(\tau - \tau_t); \\ y_\tau(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) &= y_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{ykt}(\tau - \tau_t), \end{aligned} \quad (3.1)$$

где τ – время;

τ_t – время привязки t -го кадра (как правило, τ_t соответствует моменту

половины времени экспозиции);

$x_\tau(\Theta_{\tau noise}^{sub}), y_\tau(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ – координаты объекта на время τ ;

$x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}), y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ – координаты объекта на момент привязки кадра τ_t (как правило, половина времени экспозиции);

V_{xit}, V_{ykt} – скорость объекта по координатам x и y соответственно;

$\Theta_{\tau noise}^{sub}$ – вектор параметров модели изображения объекта.

Наиболее естественной формой модели видимого движения является формула с явным заданием скорости (3.1). С другой стороны, научные организации, которые используют наблюдения астероидов, из наблюдений для своих нужд берут только положение астероидов. Также следует отметить, что указанные научные организации и сами астрономы-наблюдатели в качестве параметров скорости используют не значения координат вектора скорости V_{xit}, V_{ykt} в СК ПЗС-кадра, а значения модуля вектора скорости и угла между вектором видимой скорости и осью абсцисс. В свою очередь, последний определен на интервале $(-\pi/2, \pi/2)$, что связано с тем, что по одному кадру нельзя определить направление движения объекта, изображение которого смазано собственным движением. Исходя из этого, данный угол определяется через вычисление тангенса угла, а это вычисление имеет особые точки $(-\pi/2, \pi/2)$, приводящие к делению на ноль и сбою вычислительного процесса. Естественным способом ухода от данных особых точек есть переход к траверсному углу ω_t (рисунок 3.1).

Таким образом, так как специалисты предметной области используют такой (3.1) способ представления скорости, так как он имеет особую точку, так как любые преобразования не повышают точность представления данных, целесообразно в качестве формы модели видимого движения использовать форму, представленную выражением (3.1).

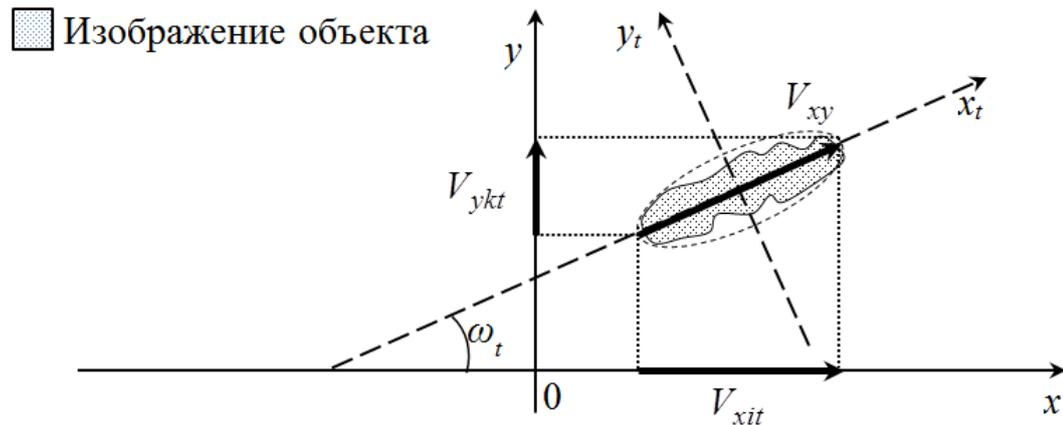


Рисунок 3.1 – Модель движения объекта

Кроме того, все же чаще оценку вектора скорости на кратковременной серии кадров не считают надежной и практически редко используют. Чаще используют только оценку координат середины штриха от объекта. Важно сконцентрироваться на приближении точности этой оценки к потенциальной. Данная точность зависит от показателей качества оконтуривания. И если нет уверенности, что данные показатели качества достаточны, то и нет уверенности в надежности получаемых оценок скорости. В этой связи их целесообразно избежать. Это в свою очередь также приводит к целесообразности выбора в качестве формы модели видимого движения формулы (3.7).

Можно также сказать, что обе формы ((3.1), (3.7)) модели видимого движения могут быть использованы на практике. Однако форма со скоростями, несмотря на все свои преимущества, может использоваться только при анализе ярких объектов, для которых показатели качества оконтуривания будут достаточно высокими. Причем должна быть уверенность, что движение объекта с цифровым изображением, смазанным собственным движением, проходит в удалении от объектов с протяженными, яркими изображениями, каковыми, например, могут быть яркие звезды.

Протяжённое изображение объекта находится в области внутрикадровой обработки (ОВКО). Причем ОВКО – это множество Ω_{IPS} из N_{IPS} пикселей, в которых предполагается наличие протяжённого изображения объекта. ОВКО

может быть задана координатами и размерами соответствующей области кадра.

Считается [106–108], что на любой момент времени τ координаты падения сигнальных фотонов на ПЗС-матрицу имеют круговое нормальное распределение. Тем самым мгновенное изображение объекта на любой момент времени τ имеет форму точки, а с учетом атмосферной турбулентности изображение объекта на кадре становится размытым.

Можно считать, что за время экспозиции кадра, в пиксели ПЗС-матрицы попадает счетное количество фотонов. При этом координаты падения фотонов в ik -й пиксель ПЗС-матрицы принципиально не могут быть известны наблюдателю. Тем самым все события типа «в точку с такими-то координатами ik -ого пикселя попал фотон» самой системой регистрации изображения объединяются, склеиваются, группируются в событие «в ik -й пиксель попал фотон». Наблюдению (подсчету) доступны только склеенные, объединенные, группированные события. Подобные выборки в математической статистике называются группированными [123]. Учет факта работы с группированными выборками иногда помогает извлечь потенциально возможное количество информации из них [103, 106, 124]. Таким образом, при оценке положения элементов протяженных объектов компактной группы по их ПЗС-изображению целесообразно учитывать сам факт того, что на вход процедуры оценки поступает изображение (совокупность потенциалов пикселей ПЗС-матрицы), являющееся группированной выборкой в указанном выше смысле.

Для минимизации потерь информации при получении оценки положения астероида с протяженным изображением, необходимо учесть факт дискретизации пространства наблюдения (оцениваются непрерывные величины – координаты объекта, по дискретным – яркостям пикселей ПЗС-матрицы). Также необходимо учитывать тот факт, что объекты движутся настолько быстро, что их изображения на ПЗС-кадре становятся смазанными собственным движением. При этом изображение как выборка яркостей совокупности исследуемых пикселей является группированной выборкой

координат падения фотонов (см. подраздел 2.1) [106, 123, 124].

Исходя из соображений физики оптических наблюдений [125–127], можно сказать, что в каждый пиксель ПЗС матрицы падает счетное количество квантов света – фотонов. Считается, что при оценке положения элементов объекта со смазанным изображением, по его ПЗС-изображению исследуется только область изображения гипотетического объекта Ω_{IPSt} (ОИГО). ОИГО является частью области внутрикадровой обработки Ω_{IPS} , в которую входит N_{IPSt} пикселей, содержащих изображение объекта. Экспериментальные яркости A_{ikt}^* пикселей ПЗС-матрицы формируются независимо друг от друга (напряжения на выходах пикселей ПЗС-матрицы независимы) и являются величиной, пропорциональной количеству фотонов, попавших в данный пиксель. Экспериментальные яркости A_{ikt}^* приводятся к относительным яркостям v_{ikt}^* (2.3). При этом результатом наблюдений является совокупность относительных яркостей $\tilde{U} = (v_{11t}^*, \dots, v_{ikt}^*, \dots, v_{N_{IPSt}t}^*)$.

3.2 Субпиксельная гауссова модель цифрового изображения объекта, смазанного собственным движением

В качестве модели формы изображения объектов используется субпиксельная гауссова модель [106 – 108]. Субпиксельная гауссова модель для протяженного изображения объекта описывает распределение координат падения фотонов в области кадра (в любой момент времени τ), соответствующей изображению протяженного объекта.

После компенсации фоновой подложки выражение для субпиксельного изображения объекта на любой момент времени τ можно представить смесью функций (аналогично случаю с круговыми объектами (2.4)):

$$f_{Gnoise}^{sub}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_{\tau noise}^{sub}) = A_{noise}^{sub} x_{it} + B_{noise}^{sub} y_{kt} + C_{noise}^{sub} +$$

$$+ A_{subGt} \exp \left\{ - \frac{1}{2\sigma_{subGt}^2} \left[(x_{it} - x_{\tau}(\Theta_{\tau}^{sub}))^2 + (y_{kt} - y_{\tau}(\Theta_{\tau}^{sub}))^2 \right] \right\}, \quad (3.2)$$

где $A_{noise}^{sub}, B_{noise}^{sub}, C_{noise}^{sub}$ – параметры фоновой подложки;

Θ_{τ}^{sub} – вектор параметров модели изображения объекта;

A_{Gt}^{sub} – теоретическая подынтегральная амплитуда изображения объекта на t -ом ПЗС-кадре;

σ_{subGt} – параметр формы подынтегральной модели изображения объекта на t -ом ПЗС-кадре.

Основными характеристиками для протяженного объекта на изображении кадра являются: координаты объекта $x_{\tau t}(\Theta_{\tau})$, $y_{\tau t}(\Theta_{\tau})$, теоретическая амплитуда A_{Gt} , параметр σ_{Gt} формы модели изображения объекта и угол ω_t между направлением его видимого движения и осью абсцисс, скорость протяженного объекта V_{xit}, V_{ykt} . Также оцениванию подлежат параметры плоской наклонной фоновой подложки A_N, B_N, C_N , а в случае ее предварительного вычитания из изображения объектов оценивается остаточная фоновая составляющая C_R .

С учетом вышесказанного, в рамках субпиксельной гауссовой модели (3.2) модельная яркость $A_{ikt}(\Theta_{\tau}^{sub})$ пикселя ПЗС-матрицы, с границами x_{bi}, x_{ei} по координате x и y_{bk}, y_{ek} по координате y соответственно, для цифрового изображения объекта, смазанного собственным движением (протяженного изображения объекта), может быть представлена выражением (аналогично яркости для круговых объектов (2.6)):

$$A_{ikt}(\Theta_{\tau}^{sub}) = \int_{x_{bi}}^{x_{ei}} \int_{y_{bk}}^{y_{ek}} \int_{\tau_t - \Delta/2}^{\tau_t + \Delta/2} f_{G2}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_{\tau}^{sub}) dx_{it} dy_{kt}. \quad (3.3)$$

С учетом (3.1) выражение (3.2) для мгновенного, на момент времени τ_t распределения координат падения фотонов от объекта на дискретном изображении может быть представлено в виде:

$$f_{Gnoise}^{sub}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_{\tau noise}^{sub}) = A_{noise}^{sub} x_{it} + B_{noise}^{sub} y_{kt} + C_{noise}^{sub} + A_{subGt} \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{subGt}^2} \left[(x_{it} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - V_{xit}(\tau - \tau_t))^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + (y_{kt} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - V_{ykt}(\tau - \tau_t))^2 \right] \right\}. \quad (3.4)$$

Для получения выражения, описывающего модельное субпиксельное изображение объекта, накопленное при длительной экспозиции, необходимо проинтегрировать выражение (3.4) по времени экспозиции:

$$f_{Gnoise}^{sub}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_{\tau noise}^{sub}) = \Delta_{\tau} \left(A_{noise}^{sub} x_{it} + B_{noise}^{sub} y_{kt} + C_{noise}^{sub} \right) + \int_{\tau_t - \Delta_{\tau}/2}^{\tau_t + \Delta_{\tau}/2} A_{subGjt} \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{subGt}^2} \left[(x_{it} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - V_{xit}(\tau - \tau_t))^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + (y_{kt} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - V_{ykt}(\tau - \tau_t))^2 \right] \right\} d\tau. \quad (3.5)$$

Для оценки положения объекта может быть использована аппроксимация функции модельного протяженного изображения объекта, упорядоченной конечной смесью (суммой конечного количества) двумерных гауссиан [68, 128]. При этом, чем больший путь проходит объект за время экспозиции, тем большее количество гауссиан необходимо для его представления. Формально для этого необходимо воспользоваться формулой прямоугольника численного

интегрирования и представить в виде суммы второе слагаемое в выражении (3.8):

$$\begin{aligned}
 f_{Gnoise}^{sub}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_{\tau noise}^{sub}) &= \Delta_{\tau} (A_{noise}^{sub} x_{it} + B_{noise}^{sub} y_{kt} + C_{noise}^{sub}) + \\
 + \sum_{n=0}^{N_G-1} \psi_n A_{Gt}^{sub} \exp &\left\{ -\frac{1}{2\sigma_{subGt}^2} \left[(x_{it} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - V_{xit}(\tau_n - \tau_t))^2 + \right. \right. \\
 &\left. \left. + (y_{kt} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - V_{ykt}(\tau_n - \tau_t))^2 \right] \right\}, \quad (3.6)
 \end{aligned}$$

где $\tau_n = \tau_t + \Delta_{\tau}(n/(N_G - 1) - 0.5)$ – время привязки n -ого гауссиана;

N_G – количество гауссиан, используемых для аппроксимации протяженного изображения объекта;

ψ_n – коэффициент численного интегрирования.

При этом или количество интервалов численного интегрирования по времени составляет $N_G - 1$.

Координаты объекта на n -й момент времени, согласно выражению субпиксельной модели изображения объекта (3.6), можно определить как (рисунок 3.1):

$$\begin{aligned}
 x_{nt} &= x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \\
 y_{nt} &= y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t, \quad (3.7)
 \end{aligned}$$

где ω_t – угол между направлением движения объекта и осью абсцисс в системе координат ПЗС-кадра;

$$\ell_n = -\frac{d}{2} + n \cdot \frac{d}{N_G - 1}$$

– положение объекта на n -й момент времени (учитывая, что вся экспозиция представлена разделенной на количество моментов времени равное N_G) или положение n -ой гауссианы из N_G , используемых для

аппроксимации цифрового изображения объекта, смазанного собственным движением;

d – длина пути (в пикселях), пройденного объектом за время экспозиции, которая также является длиной изображения объекта.

Учитывая выражение (3.7) для координат объектов на n -й момент времени, выражение (3.6) можно представить в виде:

$$f_{Gnoise}^{sub}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_{\tau noise}^{sub}) = \Delta_{\tau} \left(A_{noise}^{sub} x_{it} + B_{noise}^{sub} y_{kt} + C_{noise}^{sub} \right) + A_{Gt}^{sub} \times \\ \times \sum_{n=1}^{N_G} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{subGt}^2} \left[(x_{it} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \cos \omega_t)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + (y_{kt} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \sin \omega_t)^2 \right] \right\}. \quad (3.8)$$

Вектор оцениваемых параметров включает в себя: параметры фоновой подложки $A_{noise}^{sub}, B_{noise}^{sub}, C_{noise}^{sub}$; координаты $x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}), y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ объекта на момент привязки кадра τ_t ; подынтегральную амплитуду A_{Gt}^{sub} изображения объекта; параметр σ_{subGt} формы подынтегральной модели изображения объекта на t -ом ПЗС-кадре; угол ω_t между направлением движения объекта и осью абсцисс в системе координат ПЗС-кадра:

$$\Theta_{\tau noise}^{sub} = (A_{noise}^{sub}, B_{noise}^{sub}, C_{noise}^{sub}, x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}), y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}), A_{Gt}^{sub}, \sigma_{subGt}, \omega_t) = \\ = (\theta_1, \dots, \theta_n, \dots, \theta_8), \quad (3.9)$$

где θ_n – n -й оцениваемый параметр.

При использовании вероятностной трактовки плотность распределения координат падения сигнальных фотонов от протяженного объекта, согласно субпиксельной гауссовой модели, выглядит аналогично выражению (2.10) для

объекта с круговым изображением.

Если из изображения объекта предварительно была вычтена фоновая подложка, то выражение модельного субпиксельного изображения объекта (3.2) можно переписать следующим образом:

$$f_G^{sub}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_\tau^{sub}) = C_{residual}^{sub} + A_{Gt}^{sub} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{subGt}^2} \left[(x_{it} - x_{\tau t}(\Theta_\tau^{sub}))^2 + (y_{kt} - y_{\tau t}(\Theta_\tau^{sub}))^2 \right] \right\}, \quad (3.10)$$

где $C_{residual}^{sub}$ – остаточная составляющая фоновой подложки.

Параметры плоской фоновой подложки субпиксельной модели цифрового изображения объекта, смазанного собственным движением.

Согласно определению субпиксельной гауссовой модели, можно составить выражение для фоновой составляющей теоретической яркости пикселей. Аналогично выражению для теоретической яркости пикселя (3.3) выражение для ее фоновой составляющей имеет вид:

$$I_{iktn} = \int_{x_{bi}}^{x_{ei}} \int_{y_{bk}}^{y_{ek}} G_{noise}^{sub}(x_{it}, y_{kt}) dx_{it} dy_{kt} = (x_{ei} - x_{bi})(y_{ek} - y_{bk}) \times \left(\frac{A_{noise}^{sub}(x_{ei} + x_{bi}) + B_{noise}^{sub}(y_{ek} + y_{bk})}{2} + C_{noise}^{sub} \right) = \Delta_{CCD}^2 (A_{noise}^{sub} x_{ikt} + B_{noise}^{sub} y_{ikt} + C_{noise}^{sub}). \quad (3.11)$$

где $G_{noise}^{sub}(x_{it}, y_{kt}) = A_{noise}^{sub} x_{it} + B_{noise}^{sub} y_{kt} + C_{noise}^{sub}$ – модель субпиксельного фонового изображения.

Выбор критерия оценки положения изображения объекта. Разработка вычислительных методов формирования наилучших оценок, методов,

свободных от потери информации, особенно актуально при наличии телескопов с малой апертурой. В работе выбрано два критерия качества оценок положения изображения объекта. Одним из них является минимум суммы квадратов отклонений между экспериментальной A_{ikt}^* и модельной $A_{ikt}(\Theta_{gent})$ яркостями пикселей ОВКО:

$$F_{\Delta A_T}(\Theta_{gent}) = \sum_{i,k}^{N_{IPS}} \left(A_{ikt}^* - A_{ikt}(\Theta_{gent}) \right)^2 \xrightarrow{\Theta_{gent}} \min, \quad (3.13)$$

где Θ_{gent} – вектор оцениваемых параметров:

$$\begin{aligned} \Theta_{gent} &= (A_N, B_N, C_N, X_t, Y_t, A_{Gt}, \sigma_{Gt}, \omega_t) = \\ &= (\theta_1, \dots, \theta_n, \dots, \theta_8). \end{aligned} \quad (3.14)$$

Оцениваемыми параметрами изображения объекта являются: положение X_t, Y_t , теоретическая амплитуда A_G , параметр формы изображения объекта σ_G . Дополнительно оценке подлежат параметры фоновой подложки A_N, B_N, C_N .

В качестве второго критерия наилучшей оценки положения протяженного объекта в работе используется критерий максимального правдоподобия:

$$L(\Theta_{gent}) \xrightarrow{x,y} \max, \quad (3.15)$$

где $L(\Theta_{gent})$ – функция правдоподобия, соответствующая условной, по искомым параметрам изображений объектов и фоновой подложки, вероятности формирования исследуемого нормированного изображения;

x, y – координаты центра изображения объекта в СК ПЗС-кадра.

Таким образом, при заданной совокупности яркостей пикселей ОВКО

необходимо разработать методы оценки вектора Θ_{gent} (3.14) изображения протяженных объектов, оптимальные согласно рассматриваемых критериев минимума наименьших квадратов отклонений (3.13) и максимального правдоподобия (3.15). Модельная форма изображения задается с помощью субпиксельной (3.2) гауссовой модели. Фоновая подложка может быть предварительно вычтенной из изображения или нет.

3.3 Разработка методов оценки положения объектов, смазанных собственным движением, на цифровых кадрах

3.3.1 Определение параметров цифрового изображения объекта, смазанного собственным движением, согласно критерию минимума суммы квадратов отклонений

Параметры цифрового изображения объекта, смазанного собственным движением, при использовании субпиксельной модели изображения объектов можно оценить с использованием критерия минимума суммы квадратов отклонений между модельными и экспериментальными яркостями пикселей.

Одним из используемых критериев (3.13) оценки параметров цифрового изображения объекта, смазанного собственным движением, является минимум суммы квадратов отклонений между экспериментальной A_{ikt}^* и модельной $A_{ikt}(\Theta_{gent})$ яркостями пикселей ОВКО Ω_{IPS} (раздел 2.3). В рамках субпиксельной модели изображения протяженных объектов, согласно выражению модельной яркости пикселей (3.3), отклонение между экспериментальной A_{ikt}^* и модельной $A_{ikt}(\Theta_{gent})$ яркостями пикселей ОВКО выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub} = & A_{ik\pi}^* - \Delta_{\tau} (A_{noise}^{sub} x_{it} + B_{noise}^{sub} y_{kt} + C_{noise}^{sub}) - A_{Gt}^{sub} \times \\ & \times \sum_{n=0}^{N_G} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{Gt}^2} \left[(x_{it} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \cos \omega_t)^2 + \right. \right. \\ & \left. \left. + (y_{kt} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \sin \omega_t)^2 \right] \right\}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

В методе Левенберга-Марквардта используется матрица Якоби (раздел 2.2). Матрица Якоби формируется из частных производных от отклонения (3.16) по параметрам вектора $\Theta_{\tau noise}^{sub}$ и выглядит аналогично матрице (2.12).

Не трудно показать, что производные от отклонения $\Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}$ между экспериментальной и модельной яркостями пикселя, по параметрам фоновой подложки имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}}{dA_{noise}^{sub}} &= -\Delta_{CCD}^2 y_{kt}; \\ \frac{d\Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}}{dB_{noise}^{sub}} &= -\Delta_{CCD}^2 x_{it}; \\ \frac{d\Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}}{dC_{noise}^{sub}} &= -\Delta_{CCD}^2. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Производные от отклонения $\Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}$ между модельной и экспериментальной яркостью пикселя по теоретическим координатам объекта на t -ом ПЗС-кадре имеют следующий вид:

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

$$\begin{aligned}
& \times \left(N_{x_{ei}}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2) - \right. \\
& \left. - N_{x_{bi}}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2) \right) = \\
& = -\frac{1}{N_G} \sum_{n=0}^{N_G} (m_{x_{it}}^{loc} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \cos \omega_t) \times \\
& \times \frac{A_{Gt}^{sub} F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} \times \\
& \times F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2), \tag{3.18}
\end{aligned}$$

где $m_{z_i}^{loc}$ – локальное математическое ожидание [106] случайной величины z на интервале $[z_{bi}, z_{ei}]$ при использовании вероятностной трактовки и просто обозначение в противном случае.

Аналогично (3.18) производная от отклонения $\Delta A_{ns-m(i,k)}^{sub}$ по параметру положения $y_{\tau t}(\Theta_{\tau}^{sub})$ объекта может быть представлена выражением:

$$\begin{aligned}
\frac{d\Delta A_{ns-m(i,k)}^{sub}}{dy_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})} &= -\frac{1}{N_G} \sum_{n=0}^{N_G} A_{Gt}^{sub} F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2) \times \\
& \times \left(N_{y_{ei}}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2) - N_{y_{bi}}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2) \right) = \\
& = -\frac{1}{N_G} \sum_{n=0}^{N_G} (m_{y_{kt}}^{loc} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \sin \omega_t) \times \\
& \times \frac{A_{Gt}^{sub} F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} \times \\
& F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2). \tag{3.19}
\end{aligned}$$

Производная по параметру σ_{subGjt} формы подынтегральной модели изображения объекта имеет вид:

$$\begin{aligned}
\frac{d\Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}}{d\sigma_{subGt}} = & -\frac{1}{N_G} \sum_{n=0}^{N_G} \frac{A_{Gt}^{sub} F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} \times \\
& \times ((x_{ei} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \cos \omega_t) N_{x_{ei}}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2) - \\
& - (x_{bi} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \cos \omega_t) N_{x_{bi}}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2)) - \\
& - \frac{A_{Gt}^{sub} F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} \times \\
& \times ((y_{ei} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})) N_{y_{ei}}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2) - \\
& - (y_{bi} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})) N_{y_{bi}}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2)). \quad (3.20)
\end{aligned}$$

Пользуясь выражением (3.3) модельной яркости пикселя, можно легко вычислить частную производную от отклонения $\Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}$ между экспериментальной и модельной яркостями по теоретической (подынтегральной) амплитуде A_{Gt}^{sub} пика изображения объекта:

$$\begin{aligned}
\frac{d\Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}}{dA_{Gt}^{sub}} = & -\frac{1}{N_G} \sum_{n=0}^{N_G} F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2) \times \\
& \times F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2). \quad (3.21)
\end{aligned}$$

Производная от отклонения $\Delta A_{ns_m(i,k)}^{sub}$ между модельной и экспериментальной яркостью пикселя непосредственно по углу ω_t выглядит следующим образом:

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

$$\begin{aligned}
& \times F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2) \times \\
& \times (\cos \omega(m_{y_{kt}}^{loc} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \sin \omega_t) - \\
& - \sin \omega_t(m_{x_{it}}^{loc} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \cos \omega_t)). \tag{3.22}
\end{aligned}$$

Так же можно записать выражение для субпиксельного изображения протяженного объекта с учетом предварительно проведенного вычитания фоновой подложки. Необходимость в таком выражении вызвана тем, что при процедуре вычитания фоновой подложки, подложка вычитается не полностью. Ее остаточную составляющую достаточно описать постоянной – $C_{residual}^{sub}$. В таком случае выражение для модельной яркости пикселя будет выглядеть аналогично выражению (3.10).

Оптимизационная задача по минимизации суммы квадратов отклонений между экспериментальной и модельной яркостями формируется аналогично выражению (3.13).

Матрица Якоби формируется аналогично матрице $J_{\Delta AG}^{sub}$ (2.14) с учетом вектора оцениваемых параметров Θ_{τ}^{sub} с количеством параметров 6.

При предварительно вычтенной фоновой подложке, отклонение $\Delta A_{m(i,k)}^{sub}$ между яркостями пикселей и их модельными (теоретическими) значениями в ОВКО, учитывая выражение (3.13), будет выглядеть аналогично (3.16).

При вычтенной фоновой подложке, частные производные от суммы квадратов отклонений по оцениваемым параметрам выглядят идентично и соответствуют выражениям (3.18), (3.19), (3.20), (3.21) и (3.22).

Частная производная от отклонения $\Delta A_{m(i,k)}^{sub}$, по параметру $C_{residual}^{sub}$ остаточной составляющей плоской фоновой подложки имеет вид аналогичный (2.23).

Вычислительный метод определения параметров цифрового

изображения объекта, смазанного собственным движением, согласно критерию минимума суммы квадратов отклонений (рисунок 3.2). При оценке положения элементов объекта со смазанным изображением по его ПЗС-изображению исследуется только область изображения гипотетического объекта Ω_{IPSS} (ОИГО), в которую попало счетное количество фотонов от объекта. А результатом наблюдений является совокупность относительных яркостей $\tilde{U} = (v_{11t}^*, \dots, v_{ikt}^*, \dots, v_{N_{IPSt}}^*)$.

1. Выбор начальных приближений. Начальное приближение положения звезды располагается на прямой, соответствующей перпендикуляру, опущенному из пика изображения звезды на прямую, вдоль которой расположено изображение объекта, смазанное собственным движением [27]. В качестве начальных приближений других параметров изображений объектов, смазанных собственным движением, могут быть использованы их оценки, полученные на этапе обнаружения данных объектов [27].

2. На основе начального приближения, полученного на предыдущей итерации, рассчитывается субпиксельная модель яркости протяженного изображения объекта (3.3), в пикселях, входящих в область изображения гипотетического объекта (ОИГО).

3. На основе субпиксельной модели (3.3) яркости протяженного изображения объекта рассчитываются элементы (3.17)–(3.22) матрицы Якоби (аналогично (2.14)), согласно вектору оцениваемых параметров (3.9).

4. Полученные на предыдущем шаге элементы матрицы Якоби поступают на вход процедуры алгоритма Левенберга-Марквардта [7,8], где происходит минимизация суммы квадратов отклонений между модельными и экспериментальными яркостями пикселей (3.16). В том числе на вход данного алгоритма поступает субпиксельная модель яркости протяженного изображения объекта (3.3).

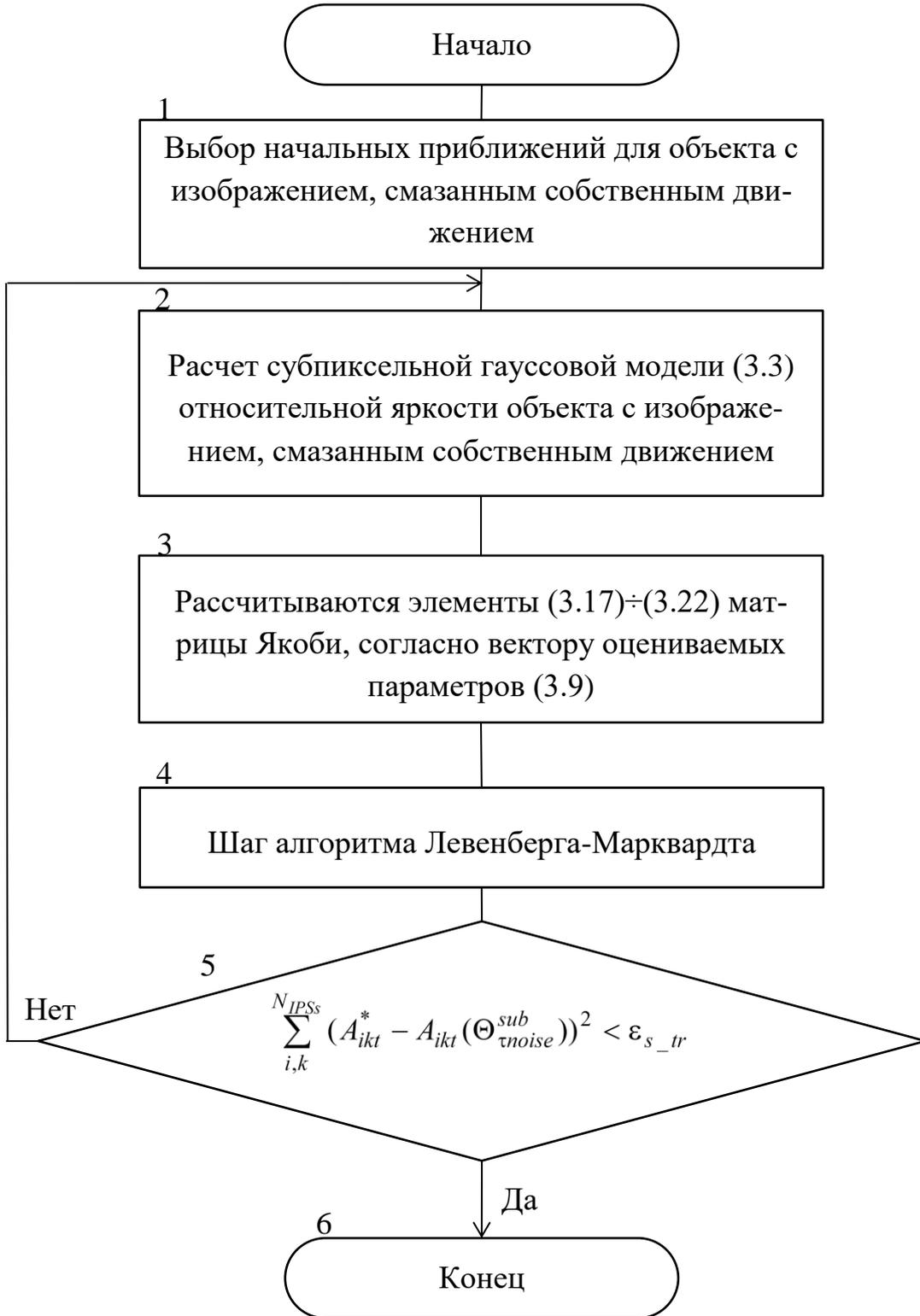


Рисунок 3.2 – Определение параметров цифрового изображения объекта, смазанного собственным движением, согласно критерию минимума суммы квадратов отклонений

5. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет выполнено условие $\sum_{i,k}^{N_{IPSS}} (A_{ikt}^* - A_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub}))^2 < \varepsilon_{s_tr}$, где ε_{s_tr} – константа, определяющая требуемую точность вычислений, либо пока количество итераций не достигнет заданного значения ε_{iter} . В противном случае на 4м этапе вычислительного алгоритма будет пересчитано условие $\sum_{i,k}^{N_{IPSS}} (A_{ikt}^* - A_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub}))^2 < \varepsilon_{s_tr}$ с новым параметром шага (согласно алгоритму Левенберга-Марквардта [109, 110]).

6. При выполнении условий в 5м пункте алгоритма, итерационный процесс заканчивается и полученные на этом шаге оценки вектора (2.11) оцениваемых параметров идут на выход алгоритма.

3.3.2 Вычислительный метод максимально правдоподобной оценки положения объекта с цифровым изображением, смазанным собственным движением, при использовании субпиксельной модели изображения

В этом подразделе для оценки вектора параметров протяженного объекта используется критерий максимального правдоподобия (3.15). Считается, что соответствующие ему методы обладают меньшей трудоемкостью [129, 130].

Как описывалось ранее (раздел 3.1), при получении оценки положения астероида с протяженным изображением оцениваются непрерывные величины – координаты объекта, по дискретным – яркостям пикселей ПЗС-матрицы. При этом изображение протяженного объекта является группированной выборкой координат падения фотонов (см. подраздел 2.1) [106, 123, 124].

При оценке положения элементов объекта со смазанным изображением, по его ПЗС-изображению исследуется только область изображения гипотетического объекта Ω_{IPSS} (ОИГО) в которую попало счетное количество фотонов от объекта. А результатом наблюдений является совокупность относительных яркостей $\tilde{U} = (v_{11t}^*, \dots, v_{ikt}^*, \dots, v_{N_{IPSt}}^*)$.

Необходимо синтезировать процедуру максимально правдоподобной оценки положения объекта с цифровым изображением, смазанным собственным движением. Вектор оцениваемых параметров $\Theta_{\tau t}^{sub}$ включает в себя параметры положения объекта со смазанным изображением $x_{\tau t}(\Theta_{\tau t}^{sub}), y_{\tau t}(\Theta_{\tau t}^{sub})$, СКО координат падения сигнальных фотонов σ_{subGt} и угол ω_t между направлением его видимого движения и осью абсцисс. В том числе оценке подлежат весовые характеристики изображений отдельных фотонов p_1 и фона p_0 .

Функция правдоподобия и общий вид системы уравнений максимального правдоподобия. Теоретическим аналогом относительных яркостей (2.3) являются вероятности попадания сигнальных фотонов в ik -й пиксель (с заданными границами) ПЗС-матрицы на t -м кадре в момент времени τ_t . Плотность распределения координат падения сигнальных фотонов от объекта со смазанным изображением на ПЗС-матрицу (с параметрами $x_{it}, y_{kt}, \Theta_{\tau t}^{sub}$) можно представить смесью распределений, аналогичной выражению (3.2). Учитывая вероятностный характер распределения координат сигнальных фотонов в пикселях ПЗС-матрицы выражение для вероятности попадания сигнальных фотонов в ik -й пиксель ПЗС-матрицы имеет вид, аналогичный выражению (3.3):

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

В рамках поставленной задачи функция правдоподобия $L(\Theta_{mlm}^{sub})$ является произведением вероятностей $v_{ikt}(\Theta_{\tau t}^{sub})$ попадания сигнальных фотонов в пиксели ПЗС-матрицы на момент времени τ_t , возведенных в степень,

пропорциональную количеству фотонов, попавших в данные пиксели [111, 129, 124]:

$$L(\Theta_{mlm}^{sub}) = \prod_{i,k}^{N_{IPS}} v_{ikt}^{A_{ikt}^*}(\Theta_{\tau noise}^{sub}). \quad (3.23)$$

На основании выражения (3.23), проведя ряд преобразований, общий вид уравнений системы уравнений максимального правдоподобия для оценки положения объектов со смазанным изображением на цифровом изображении можно представить выражением [106, 111, 113, 124, 129, 131]:

$$\sum_{i,k}^{N_{IPS}} \frac{v_{ikt}^*}{v_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})} \frac{\partial v_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})}{\partial \theta_n} = 0. \quad (3.24)$$

Как отмечалось ранее (2.10), моделью распределения координат падения фотонов есть вероятностная смесь со смешивающими весами, которые имеют в рамках исследуемой задачи свою физическую интерпретацию:

p_1 ($p_1 = 1 - p_0$) – вероятность того, что очередной фотон принадлежит объекту со смазанным изображением на t -ом кадре;

p_0 – вероятность того, что очередной фотон является фоновым.

Определение производных по параметрам изображения объекта и параметрам фоновой подложки. Согласно [111, 113, 124], производные от вероятности $v_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ по теоретическим координатам объекта на t -ом ПЗС-кадре имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dv_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})}{dx_t(\Theta_{\tau noise}^{sub})} &= \frac{1}{N_G} \sum_{n=0}^{N_G} A_{subGt} F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2) \times \\ &\times \left(N_{x_{ei}}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2) - N_{x_{bi}}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2) \right) = \\ &= \frac{1}{N_G} \sum_{n=0}^{N_G} (m_{x_{it}}^{loc} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \cos \omega_t) \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \frac{A_{subGt} F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} \times \\ & \times F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2). \end{aligned} \quad (3.25)$$

Аналогично (3.25) производная от относительной яркости $v_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ по параметру положения $y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ объекта определяется выражением:

$$\begin{aligned} \frac{dv_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})}{dy_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})} &= \frac{1}{N_G} \sum_{n=0}^{N_G} A_{subGt} F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2) \times \\ & \times \left(N_{y_{ei}}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2) - N_{y_{bi}}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2) \right) = \\ & = \frac{1}{N_G} \sum_{n=0}^{N_G} (m_{y_{kt}}^{loc} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \sin \omega_t) \times \\ & \times \frac{A_{subGt} F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} \times \\ & F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2). \end{aligned} \quad (3.26)$$

Производная от относительной яркости $v_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ по параметру σ_{subGt} формы подынтегральной модели изображения объекта, согласно [111, 113, 124], имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dv_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})}{d\sigma_{subGt}} &= \frac{1}{N_G} \sum_{n=0}^{N_G} \frac{A_{subGt} F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} \times \\ & \times ((x_{ei} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \cos \omega_t) N_{x_{ei}}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2) - \\ & - (x_{bi} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \cos \omega_t) N_{x_{bi}}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2)) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{A_{subGt} F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} \times \\
& \times ((y_{ei} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})) N_{y_{ei}}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2) - \\
& - (y_{bi} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})) N_{y_{bi}}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2)). \quad (3.27)
\end{aligned}$$

Производная от относительной яркости по синусу угла ω_t может быть представлена выражением:

$$\begin{aligned}
\frac{d\nu_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})}{d(\sin \omega_t)} &= \frac{1}{N_G \sigma_{subGt}^2} \sum_{n=0}^{N-1} \ell_n F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2) \times \\
& \times F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2) \times \\
& \times ((m_{yk}^{loc} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \sin \omega_t) - \\
& - \frac{\sin \omega_t}{\cos \omega_t} (m_{xi}^{loc} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \cos \omega_t)). \quad (3.28)
\end{aligned}$$

Аналогично для косинуса угла ω_t :

$$\begin{aligned}
\frac{d\nu_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})}{d(\cos \omega_t)} &= \frac{1}{N_G \sigma_{subGt}^2} \sum_{n=0}^{N-1} \ell_n F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2) \times \\
& \times F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2) \times \\
& \times ((m_{xi}^{loc} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \cos \omega_t) - \\
& - \frac{\cos \omega_t}{\sin \omega_t} (m_{yk}^{loc} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \sin \omega_t)). \quad (3.29)
\end{aligned}$$

Выражение для производной непосредственно по углу ω_t , с учетом вышеизложенного, будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
\frac{d\nu_{ikt}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}})}{d\omega_t} &= \frac{1}{N_G \sigma_{\text{subGt}}^2} \sum_{n=0}^{N-1} \ell_n F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{\text{subGt}}^2) \times \\
&\quad \times F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{\text{subGt}}^2) \times \\
&\quad \times (\cos \omega_t (m_{yk}^{\text{loc}} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}})) - \ell_n \sin \omega_t) - \\
&\quad - \sin \omega_t (m_{xi}^{\text{loc}} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}})) - \ell_n \cos \omega_t). \tag{3.30}
\end{aligned}$$

В свою очередь выражение для производной по скорости объекта в момент привязки кадра может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned}
\frac{d\nu_{ikt}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}})}{dV_{xit}} &= \frac{1}{\Delta \sigma_{\text{subGt}}^2} \int_{\tau_t - \Delta_\tau / 2}^{\tau_t + \Delta_\tau / 2} F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau}^{\text{sub}}) + V_{ykt}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2) \times \\
&\quad F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{xit}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2) (\tau_t - \tau) \times \\
&\quad (m_{xi}^{\text{loc}} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) - V_{xit}(\tau_t - \tau)) d\tau. \tag{3.31}
\end{aligned}$$

По аналогии выражение для производной $\frac{d\nu_{ikt}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}})}{dV_{yit}}$ имеет вид:

$$\begin{aligned}
\frac{d\nu_{ikt}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}})}{dV_{ykt}} &= \frac{1}{\Delta \sigma_{\text{subGt}}^2} \int_{\tau_t - \Delta_\tau / 2}^{\tau_t + \Delta_\tau / 2} F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{ykt}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2) \times \\
&\quad F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{xit}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2) (\tau_t - \tau) \times \\
&\quad (m_{yk}^{\text{loc}} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) - V_{ykt}(\tau_t - \tau)) d\tau. \tag{3.32}
\end{aligned}$$

В ряде случаев дисперсия разброса координат падения фотонов $D_f = \sigma_{\text{subGt}}^2$ также может считаться величиной, подлежащей оцениванию:

$$\begin{aligned}
\frac{d\mathfrak{v}_{ikt}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}})}{dD_f} &= \frac{1}{\Delta D_f} \int_{\tau_t - \Delta_\tau/2}^{\tau_t + \Delta_\tau/2} F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{ykt}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2) \times \\
&\quad \times F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{xit}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2) d\tau + \\
&+ \frac{1}{2D_f \Delta} \int_{\tau_t - \Delta_\tau/2}^{\tau_t + \Delta_\tau/2} F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{ykt}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2) ((x_{bi} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) - \\
&\quad - V_{xit}(\tau_t - \tau)) N_{x_{bi}}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{xit}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2) - \\
&\quad - (x_{ei} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) - V_{xit}(\tau_t - \tau)) N_{x_{ei}}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{xit}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2)) + \\
&\quad + F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{xit}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2) d\tau + \\
&+ \frac{1}{2\Delta} \int_{\tau_t - \Delta_\tau/2}^{\tau_t + \Delta_\tau/2} F_{xk}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{xit}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2) ((y_{bk} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) - \\
&\quad - V_{ykt}(\tau_t - \tau)) N_{y_{bk}}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{ykt}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2) - \\
&\quad - (y_{ek} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) - V_{ykt}(\tau_t - \tau)) N_{y_{ek}}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{ykt}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2)) + \\
&\quad + F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{ykt}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2) d\tau = \\
&= \frac{1}{\Delta} \left(\frac{1}{D_f} + 1 \right) \int_{\tau_t - \Delta_\tau/2}^{\tau_t + \Delta_\tau/2} F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{ykt}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2) \times \\
&\quad \times F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{xit}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2) d\tau + \\
&\quad + \frac{1}{2\Delta} \int_{\tau_t - \Delta_\tau/2}^{\tau_t + \Delta_\tau/2} F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{ykt}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2) \times \\
&\quad \times ((x_{bi} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) - V_{xit}(\tau_t - \tau)) N_{x_{bi}}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + \\
&\quad + V_{xit}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2) - (x_{ei} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) - V_{xit}(\tau_t - \tau)) \times \\
&\quad \times N_{x_{ei}}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{xit}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2)) d\tau + \\
&\quad + \frac{1}{2\Delta} \int_{\tau_t - \Delta_\tau/2}^{\tau_t + \Delta_\tau/2} F_{yk}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) + V_{xit}(\tau_t - \tau); \sigma_{\text{subGt}}^2) \times \\
&\quad \times ((y_{bk} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) - V_{ykt}(\tau_t - \tau)) N_{y_{bk}}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau\text{noise}}^{\text{sub}}) +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + V_{ykt}(\tau_t - \tau); \sigma_{subGt}^2) - (y_{ei} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - V_{ykt}(\tau_t - \tau)) \times \\
& \times N_{yek}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + V_{ykt}(\tau_t - \tau); \sigma_{subGt}^2)) d\tau.
\end{aligned} \tag{3.33}$$

Система уравнений максимального правдоподобия с использованием субпиксельной модели. При максимально правдоподобной оценке положения объекта на ПЗС-кадре используются только пиксели исследуемой ОВКО. С учетом выражений (3.25), (3.26) для оценок координат $x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ и $y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ объекта на t -ом ПЗС-кадре уравнения (3.24) максимального правдоподобия могут быть представлены в виде [111, 113, 124]:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \sum_{n=0}^{N_G} \frac{\nu_{ikt}^*}{N_G} (m_{xi}^{loc} - x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \cos \omega_t) \times \\
& \times \frac{A_{subGt} F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} \times \\
& \times F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2) / \nu_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) = 0,
\end{aligned} \tag{3.24}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \sum_{n=0}^{N_G} \frac{\nu_{ikt}^*}{N_G} (m_{yk}^{loc} - y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) - \ell_n \sin \omega_t) \times \\
& \times \frac{A_{subGt} F_{xi}(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma_{subGt}^2)}{\sigma_{subGt}} \times \\
& \times F_{yk}(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma_{subGt}^2) / \nu_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) = 0.
\end{aligned} \tag{3.25}$$

Проведя некоторые преобразования [111, 113, 124], уравнение максимального правдоподобия по координате $x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ можно представить в виде:

$$\hat{x}_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) = \frac{\sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \frac{\nu_{ikt}^*}{N_G} \lambda_{ikt} m_{xi}^{loc}}{\sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \frac{\nu_{ikt}^*}{N_G} \lambda_{ikt}}, \tag{3.36}$$

$$\text{Где } \lambda_{ikt} = \frac{\sum_{n=0}^{N_G} \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} g_{1ikt n}}{\sum_{n=0}^{N_G} \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} g_{2ikt n}}, \quad (3.37)$$

λ_{ikt} – апостериорные вероятности принадлежности фотонов ik -го пикселя t -го кадра объекту;

$$g_{1ikt n} = p_1(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma^2)(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma^2); \quad (3.38)$$

$$g_{2ikt n} = p_0 / N_G N_{IPSS} +$$

$$+ \sum_{n=0}^{N_G} p_1(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma^2)(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma^2); \quad (3.39)$$

$$\hat{p}_1 = \frac{\sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \lambda_{ikt} \upsilon_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})}{\lambda_0 + \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \lambda_{ikt} \upsilon_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})} \quad (3.40)$$

– оценка относительного веса фотонов от объекта;

$$\upsilon_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) = p_0 / N_G N_{IPSS} + \sum_{n=0}^{N_G} p_1 F_{ik} \quad (3.41)$$

– вероятность попадания сигнальных фотонов в ik -й пиксель ПЗС-матрицы на t -ом кадре;

$$F_{ik} = F_{xi}(m_x, \sigma^2) F_{yk}(m_y, \sigma^2); \quad (3.42)$$

$$F_{xi}(m_x, \sigma^2) = \int_{x_{bi}}^{x_{ei}} N_x(x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \cos \omega_t; \sigma^2); \quad (3.43)$$

$$F_{yk}(m_y, \sigma^2) = \int_{y_{bk}}^{y_{ek}} N_y(y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}) + \ell_n \sin \omega_t; \sigma^2); \quad (3.44)$$

$F_{z_i}(m_z; \sigma^2)$ – значение вероятности попадания нормально распределенной СВ z_i с математическим ожиданием m_z и дисперсией σ^2 в интервал $[z_{bi}, z_{ei}]$;

$N_z(m_z; \sigma^2)$ – значение плотности нормального распределения с математическим ожиданием m_z и дисперсией σ^2 в точке z ;

N_{IPSS} – количество пикселей в исследуемой ОВКО, в которых предполагается наличие изображения объекта;

$$\hat{p}_0 = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \sum_{i,k} \lambda_{ikt} \nu_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})} \quad (3.45)$$

– выражение для оценки относительного веса фоновых фотонов в исследуемой области Ω_{IPSS} ;

$$\lambda_0 = \frac{1}{N_{IPSS}} \sum_{i,k} \frac{p_0 \nu_{ikt}(\Theta_{\tau noise}^{sub})}{\frac{p_0}{N_G N_{IPSS}} + p_1 F_{ik}} \quad (3.46)$$

– апостериорные вероятности принадлежности фотонов исследуемой области Ω_{IPSS} фоновой подложке;

$\hat{x}_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ – оценка координаты объекта.

После проведения аналогичных преобразований с уравнением максимального правдоподобия по координате $y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$, выражения (3.34) и (3.35) примут вид:

$$\begin{cases} \hat{x}_{\tau t}(\Theta_{\tau \text{noise}}^{sub}) = \sum_{i,k} \frac{\upsilon_{ikt}^*}{N_G} \lambda_{ikt} m_{xi}^{loc} / \sum_{i,k} \frac{\upsilon_{ikt}^*}{N_G} \lambda_{ikt}; \\ \hat{y}_{\tau t}(\Theta_{\tau \text{noise}}^{sub}) = \sum_{i,k} \frac{\upsilon_{ikt}^*}{N_G} \lambda_{ikt} m_{yk}^{loc} / \sum_{i,k} \frac{\upsilon_{ikt}^*}{N_G} \lambda_{ikt}. \end{cases} \quad (3.47)$$

Если необходимо оценить и СКО координат падения фотонов объекта, то уравнение максимального правдоподобия для оценки СКО может быть представлено выражением [111, 113, 124]:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{subGt}^2 &= \frac{\sum_{i,k} \upsilon_{ikt}^* \lambda_{ikt} \left((m_{xi}^{loc} - \hat{x}_{\tau t}(\Theta_{\tau \text{noise}}^{sub}))^2 + (m_{yk}^{loc} - \hat{y}_{\tau t}(\Theta_{\tau \text{noise}}^{sub}))^2 \right)}{\sum_{i,k} L_{ik}} \approx \\ &\approx \frac{\sum_{i,k} \upsilon_{ikt}^* \lambda_{ikt} \left((m_{xi}^{loc} - \hat{x}_{\tau t}(\Theta_{\tau \text{noise}}^{sub}))^2 + (m_{yk}^{loc} - \hat{y}_{\tau t}(\Theta_{\tau \text{noise}}^{sub}))^2 \right)}{2 \sum_{i,k} \upsilon_{ikt}^* \lambda_{ikt}}, \end{aligned} \quad (3.48)$$

где

$$\begin{aligned} L_{ik} &= \frac{\upsilon_{ikt}^*}{\upsilon_{ikt}(\Theta_{\tau \text{noise}}^{sub})} p_1(F_{yk}(\Delta x_{bi} N_{x_{bi}}(\hat{x}(\Theta_{\tau \text{noise}}^{sub}); \sigma^2) + \\ &\quad + \Delta x_{ei} N_{x_{ei}}(\hat{x}(\Theta_{\tau \text{noise}}^{sub}); \sigma^2)) + \\ &\quad + F_{xi}(\Delta y_{bk} N_{y_{bk}}(\hat{y}(\Theta_{\tau \text{noise}}^{sub}); \sigma^2) + \Delta y_{ek} N_{y_{ek}}(\hat{y}(\Theta_{\tau \text{noise}}^{sub}); \sigma^2))). \end{aligned}$$

Приближенное равенство [113, 124] в уравнении для оценки $\hat{\sigma}_{subGt}^2$ (3.46)

вводится путем использования приближенной замены:

$$\begin{aligned} \Delta x_{bi} N_{x_{bi}}(\hat{x}(\Theta_{\tau \text{noise}}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) + \Delta x_{ei} N_{x_{ei}}(\hat{x}(\Theta_{\tau \text{noise}}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) &\approx F_{xi}(m_x, \sigma^2); \\ \Delta y_{bk} N_{y_{bk}}(\hat{y}(\Theta_{\tau \text{noise}}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) + \Delta y_{ek} N_{y_{ek}}(\hat{y}(\Theta_{\tau \text{noise}}^{sub}); \sigma_{subGt}^2) &\approx F_{yk}(m_y, \sigma^2), \end{aligned}$$

основанной на формуле прямоугольников численного интегрирования [132].

Сущность метода максимально правдоподобной оценки координат положения объекта с цифровым изображением, смазанным собственным движением, на ПЗС-кадре. Решение уравнения (3.47) может быть получено путем использования итерационной процедуры метода последовательных приближений [133]. Для оценки координат положения объекта со смазанным изображением поочередно производятся две операции. Первая – расщепление статистик пикселей ПЗС-матрицы, входящих в область изображения гипотетического объекта (ОИГО), на статистики изображения объекта и статистики остаточного фона.

Операция расщепления производится только для тех пикселей, которые входят в область Ω_{IPSS} изображения объекта, где предполагается наличие изображения объекта. В соответствии с начальными приближениями по значению параметров Θ_{noise}^{sub} , фотоны, попавшие в пиксели ОИГО Ω_{IPSS} , распределяются на принадлежащие изображению объекта и фоновой подложке. Результатом первой операции является совокупность коэффициентов расщепления λ_{ikt} и λ_0 .

Операция, следующая за расщеплением, – взаимно независимая оценка положения объекта. При этом используется процедура оценки, на которую поступает подвыборка, – результат расщепления статистик ПЗС-матрицы, полученных на текущей итерации. Процедура оценки на n -й итерации по детерминированному правилу (3.40), (3.45), (3.47), (3.48) формирует оценку координат положения соответствующего объекта.

Сформированные таким образом оценки поступают в качестве начального приближения на процедуру расщепления и т.д. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока либо все коэффициенты расщепления λ_{ikt} и λ_0 на n -м и $(n - 1)$ -м шаге не станут практически попарно равны, либо оценки $\hat{\Theta}_{(n-1)}$ и $\hat{\Theta}_n$ (где $\hat{\Theta} = \{\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_n, \dots, \hat{\theta}_8\}$) практически совпадут попарно:

$|\hat{\theta}_{s(n-1)} - \hat{\theta}_{sn}| < \varepsilon_s$, где ε_s – константа, определяющая требуемую точность вычислений.

Вычислительный метод максимально правдоподобной оценки положения объекта с изображением, смазанным собственным движением (рисунок 3.3).

При оценке положения элементов объекта со смазанным изображением по его ПЗС-изображению исследуется только область изображения гипотетического объекта Ω_{IPSt} (ОИГО), в которую попало счетное количество фотонов от объекта. А результатом наблюдений является совокупность относительных яркостей $\tilde{U} = (v_{11t}^*, \dots, v_{ikt}^*, \dots, v_{NIPSt}^*)$.

1. Выбор начальных приближений. Начальное приближение положения звезды располагается на прямой, соответствующей перпендикуляру, опущенному из пика изображения звезды на прямую, вдоль которой расположено изображение объекта, смазанное собственным движением [27]. В качестве начальных приближений других параметров изображений объектов, смазанных собственным движением, могут быть использованы их оценки, полученные на этапе обнаружения данных объектов [27].

2. На основе начального приближения, полученного на предыдущей итерации, осуществляется расщепление статистик пикселей ПЗС-матрицы, входящих в область изображения гипотетического объекта (ОИГО), на статистики изображения объекта λ_{ikt} (3.37) и статистики остаточного фона λ_0 (3.46).

3. Согласно (3.47) рассчитываются оценки координат положения объекта со смазанным изображением на t -м ПЗС-кадре (используется результат расщепления статистик ПЗС-матрицы, полученных на итерации 2).

4. Рассчитывается оценка СКО попадания фотонов от объекта с изображением, смазанным собственным движением, согласно формуле (3.48).

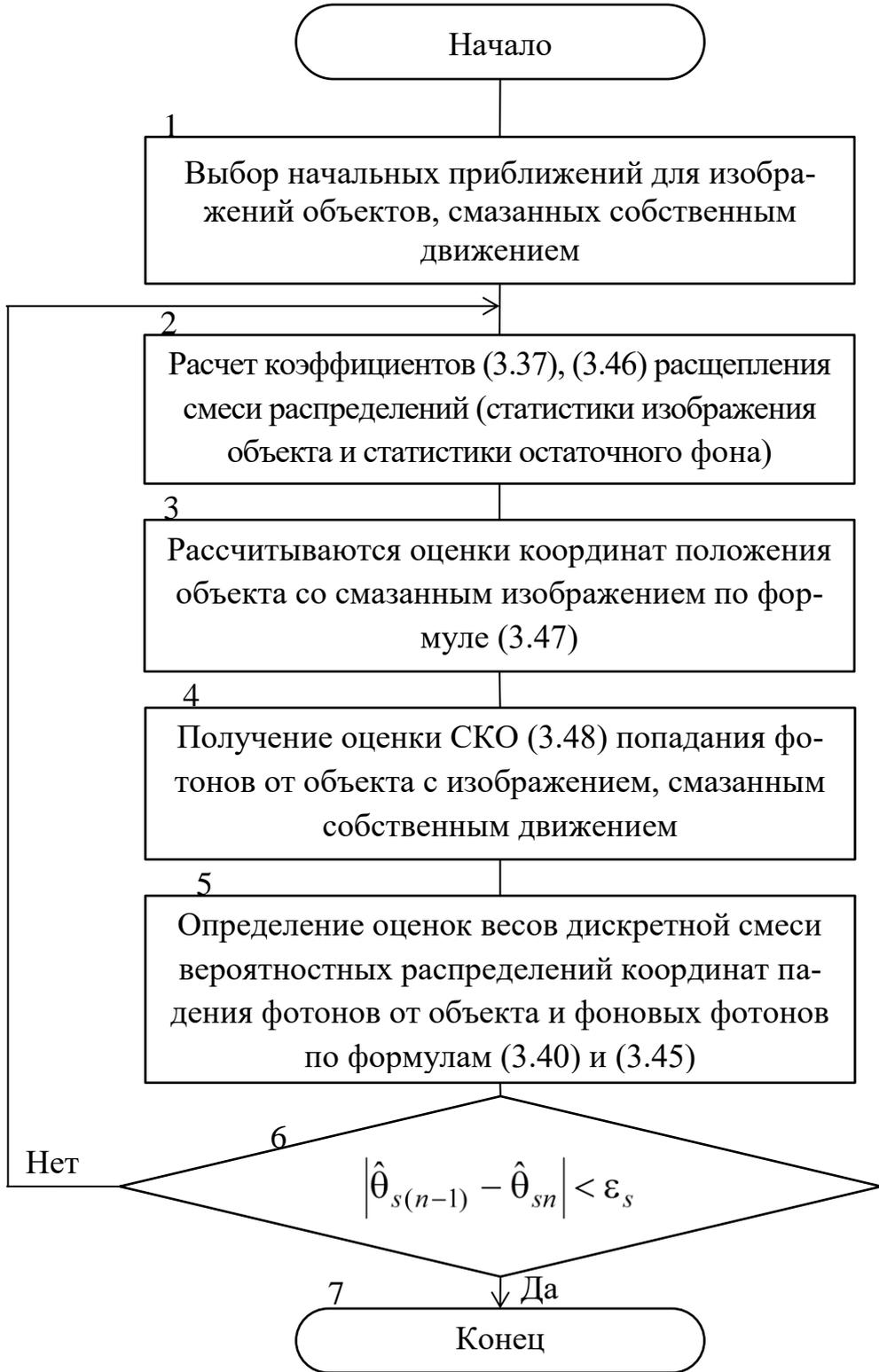


Рисунок 3.3 – Вычислительный метод максимально правдоподобной оценки положения объекта с изображением, смазанным собственным движением

5. Согласно формул (3.40) и (3.45), определяются оценки весов

дискретной смеси вероятностных распределений координат падения фотонов от объекта и фоновых фотонов.

6. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока либо все коэффициенты расщепления λ_{ikt} и λ_0 на n -м и $(n - 1)$ -м шаге не станут практически попарно равны, либо оценки $\hat{\Theta}_{(n-1)}$ и $\hat{\Theta}_n$ (где $\hat{\Theta} = \{\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_n, \dots, \hat{\theta}_8\}$) практически совпадут попарно: $|\hat{\theta}_{s(n-1)} - \hat{\theta}_{sn}| < \varepsilon_s$, где ε_s – константа, определяющая требуемую точность вычислений.

7. Конец работы алгоритма. На выходе алгоритм содержит итоговые оценки параметров протяженного изображения объекта.

3.4 Метод выделения изображений объектов, смазанных собственным движением

Постановка задачи. Постановка задачи практически полностью совпадает с используемыми в работе ранее. Далее конкретизируется самое необходимое. Исследуется наблюдение объекта с помощью оптического средства (телескопа), оснащенного ПЗС-матрицей. По результатам наблюдений одного участка небесной сферы формируется серия из N_{fr} цифровых ПЗС-кадров с временем привязки t -го кадра серии τ_t . Один из кадров серии называется базовым, а время его привязки считается равным τ_0 (как правило, время привязки среднего кадра серии, которое соответствует времени половины экспозиции указанного кадра).

Объект с высокой угловой скоростью (большим видимым движением – 10 пикселей за время экспозиции) на ПЗС кадрах имеет протяженное изображение, иными словами, изображение, смазанное собственным движением. Данным объектом может быть либо астероид, сближающийся с Землей, либо метеор, либо другой небесный объект с большим видимым движением на серии кадров N_{fr} .

Предварительные исследования показывают, что на этапе обнаружения в качестве модели видимого движения объекта с высокой угловой скоростью достаточно использовать линейную модель с независимым видимым движением объекта вдоль каждой координаты:

$$x_t = x_0 + V_x(\tau - \tau_0); \quad (3.47)$$

$$y_t = y_0 + V_y(\tau - \tau_0), \quad (3.48)$$

где τ – время;

τ_0 – время привязки базового кадра;

V_x, V_y – скорости объекта по координатам x и y соответственно;

x_t, y_t – координаты изображения объекта на момент τ ;

x_0, y_0 – положение протяженного объекта на время τ_0 привязки базового кадра.

Необходимо на исследуемой серии кадров выявить протяженные изображения (изображения объектов, смазанных собственным движением).

Суть метода выделения изображения объекта, смазанного собственным движением. К сожалению, решить данную задачу с приемлемым качеством обнаружения по данным одного кадра (на этапе внутрикадровой обработки) не удастся. В этой связи в работе задача решается в три этапа, один из которых соответствует внутрикадровой обработке, а два других – межкадровой.

Этап 1. При внутрикадровой обработке выделяются изображения, обладающие признаками протяженных.

Этап 2. Из множества протяженных изображений, выделенных на первом этапе, исключаются те, которые включают в себя хотя бы два круговых изображения известных звезд или звезд, попавших в сформированный внутренний каталог объектов, неподвижных на серии кадров.

Этап 3. Протяженные изображения (по одному на каждом кадре)

объединяются в серию протяженных изображений одного гипотетического объекта с использованием метода из класса стробовых. В заключение принимается решение о наличии изображений объектов, смазанных собственным движением.

Модель входных данных. На этапе внутрикадровой обработки описание (модель) изображения объекта, смазанного собственным движением, соответствует описанию, приведенному в подразделе 2.1.2.

В свою очередь, результаты внутрикадровой обработки по одному объекту одного кадра представляются в виде измерения Y_{in} (i -е измерение t -го кадра). Так как измерения по исследуемым изображениям объектов могут быть сформированы не на каждом кадре, то имеет место серия измерений (не более чем по одному с кадра) исследуемого протяженного объекта, гипотетически принадлежащих ему:

$$Y = (Y_{1(i,1)}, \dots, Y_{n(i,t)}, \dots, Y_{N_{mea}(i, N_{fr})}), \quad (3.49)$$

где $n(i, t) = n$ – номер измерения в серии измерений исследуемого объекта, которое является i -м измерением t -го кадра серии, гипотетически принадлежащим исследуемому объекту;

N_{mea} ($N_{mea} \leq N_{fr}$) – количество измерений положения объекта на N_{fr} кадрах.

В работе используется прямоугольная система координат (СК) ПЗС-кадра с центром в левом верхнем углу ПЗС-кадра.

В случае кругового (не протяженного) изображения, соответствующее ему i -е измерение t -го кадра содержит оценки: координат \hat{x}_t, \hat{y}_t изображения объекта на момент τ_0 привязки кадра; теоретической амплитуды \hat{A}_t пика изображения гипотетического объекта; параметра $\hat{\sigma}_t$ формы изображения

гипотетического объекта на t -ом ПЗС-кадре. В качестве оценок положения \hat{x}_t, \hat{y}_t могут использоваться оценки $\hat{x}_{t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}), \hat{y}_{t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$, основанные на субпиксельной модели изображения объекта, метод получения которых описан в разделе 3.2 (формулы (3.18) и (3.19)), а также в работе [20].

Для выделения изображения протяженного объекта к вышеописанным параметрам дополнительно оцениваются те, которые будут использованы для обнаружения протяженного объекта на этапе внутрикадровой обработки. К ним относятся оценки: угла Ω_t между направлением видимого движения объекта и осью абсцисс в системе координат ПЗС-кадра; скорости \hat{V}_x, \hat{V}_y видимого движения объекта по координатам x и y соответственно (рисунок 3.1). Вместо оценок скоростей видимого движения или вместе с ними может использоваться соответствующая им длина пути d (в пикселях), пройденного объектом за время экспозиции, которая также является длиной изображения объекта.

При оценке координат положения изображения объекта предполагается, что на кадре, согласно [111], проведена сегментация изображений – выделено множество пикселей Ω_{IPSS} (с количеством пикселей N_{IPSS}), отнесенных к изображению объекта на кадре. Причем сумма яркостей пикселей множества $\Omega_{IPSS(tr)}$ является интегральной яркостью исследуемого изображения объекта:

$$A_{\Omega_{IPSS}} = \sum_{i,k=0}^{N_{IPSS}} A_{ikt}^*, \quad (3.50)$$

где $A_{\Omega_{IPSS}}$ – интегральная яркость исследуемого объекта;

A_{ikt}^* – экспериментальная яркость ik -го пикселя ПЗС-матрицы.

Селективные признаки изображения протяженного объекта на этапе внутрикадровой обработки.

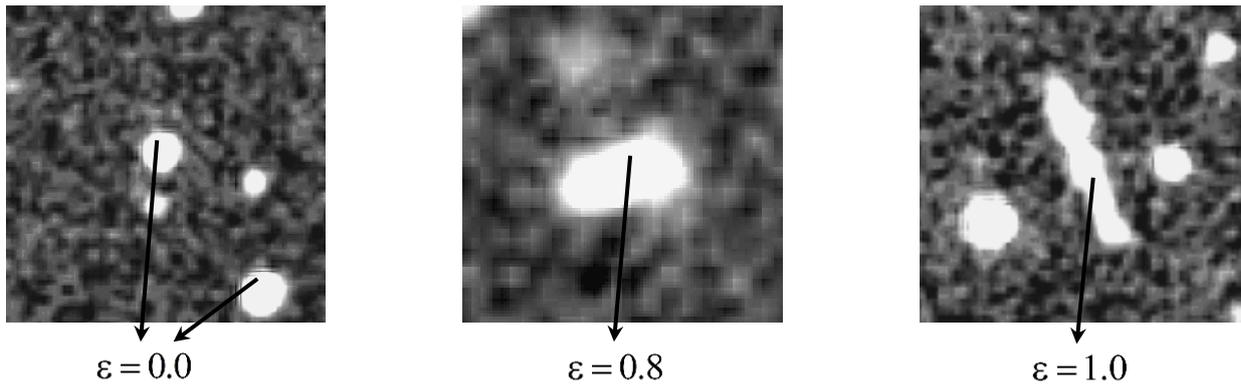


Рисунок 3.4 – Примеры изображений объектов (от круговых до вытянутых)

Изображения объектов небесных тел на ПЗС-кадре имеют различную форму. Для обнаружения объекта с вытянутым изображением на дискретном изображении кадра в работе использована характеристика его вытянутости. В качестве степени вытянутости изображения объекта в работе используется оценка его эксцентриситета $\hat{\varepsilon}$. Значение эксцентриситета изменяется в диапазоне от 0 до 1. Он равен нулю, если изображения объекта имеет форму круга, и единице для изображения объекта в форме линии [134] (рис.3.4, табл.3.1).

Таблица 3.1 – Значение эксцентриситета изображений относительно соотношения длин их осей

Отношение осей изображений	$\hat{\varepsilon}$
10:10	0.0
12:10	0.47
14:10	0.61
16:10	0.69
18:10	0.75
20:10	0.79
25:10	0.85
30:10	0.88
35:10	0.91
40:10	0.93

Оценка вытянутости и ориентации изображения объекта. Оценку эксцентриситета изображения объекта в рассматриваемом случае удобно

выражать через оценки центральных моментов второго порядка [134, 135].

Для определения эксцентриситета изначально необходимо оценить моменты первого порядка [134, 135]:

$$X_0 = \frac{\sum_{i,k=0}^{N_{IPSS}} A_{ikt}^* x_{it}}{\sum_{i,k=0}^{N_{IPSS}} A_{ikt}^*} ; \quad Y_0 = \frac{\sum_{i,k=0}^{N_{IPSS}} A_{ikt}^* y_{kt}}{\sum_{i,k=0}^{N_{IPSS}} A_{ikt}^*}, \quad (3.51)$$

где x_{it}, y_{kt} – координаты центра ik -го пикселя t -го кадра ПЗС-матрицы.

Кроме того, необходимо найти моменты второго порядка:

$$m_{20} = \sum_{i,k=0}^{N_{IPSS}} A_{ikt}^* (x_{it} - X_0)^2, \quad (3.52)$$

$$m_{02} = \sum_{i,k=0}^{N_{IPSS}} A_{ikt}^* (y_{kt} - Y_0)^2, \quad (3.53)$$

$$m_{11} = \sum_{i=0}^{N_{IPSS}} \sum_{k=0}^{N_{IPSS}} A_{ikt}^* (x_{it} - X_0)(y_{kt} - Y_0). \quad (3.54)$$

На основании полученных данных можно вычислить оценку эксцентриситета [134, 135]:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{m_{20} + m_{02} - \sqrt{(m_{20} - m_{02} + 4m_{11}^2)}}{m_{20} + m_{02} + \sqrt{(m_{20} - m_{02} + 4m_{11}^2)}}. \quad (3.55)$$

Ориентация изображения объекта (рис.3.5) определяется углом ω_t между осью x и осью x_j , в направлении которой изображение объекта является наиболее вытянутым.

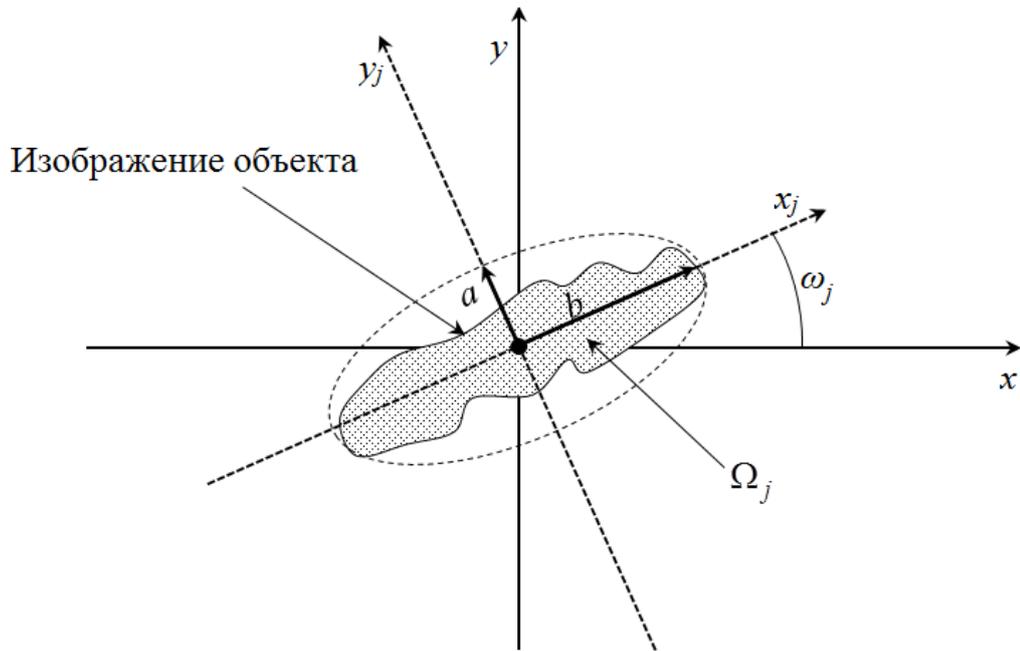


Рисунок 3.5 – Направление осей вытянутости изображения объекта

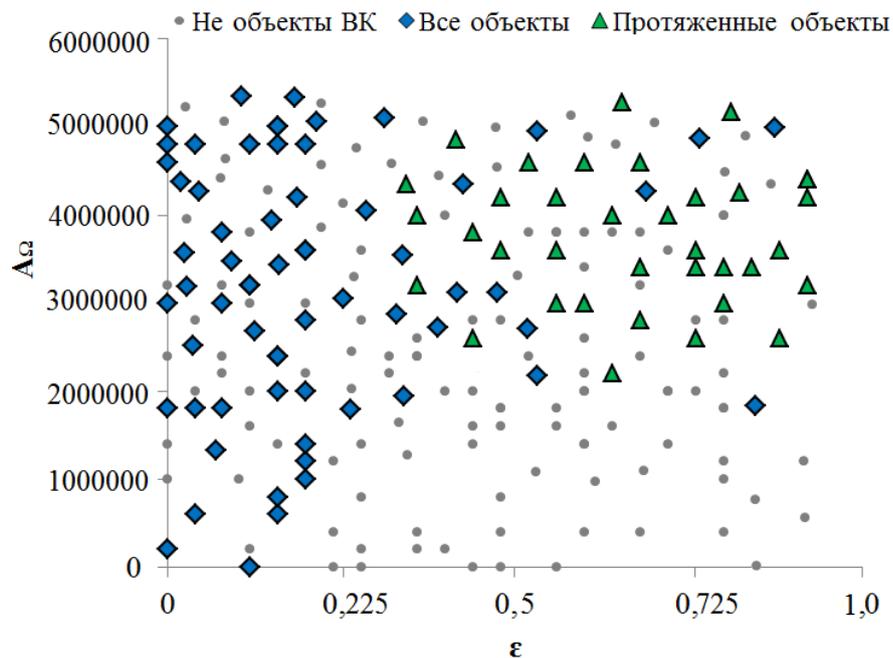


Рисунок 3.6 – Зависимость яркости изображения объектов от значения эксцентриситета для объектов с круговыми и протяженными изображениями

Согласно уравнению (3.56), данный угол ω_t отклонения оси x_j от оси x определяется соотношением [134]:

$$\omega_t = \frac{1}{2} \arctan \frac{2m_{11}}{m_{20} - m_{02}}. \quad (3.56)$$

Известно, что арктангенс определен на интервале $[-\pi/2, \pi/2]$. Для его определения на требуемом интервале $[0, \pi]$ необходимо принять ряд мер, обычных для такого случая.

Выделение протяженного изображения на этапе внутрикадровой обработки. Изображение протяженного объекта не отличается от изображения нескольких объектов, расположенных друг за другом на небольших угловых расстояниях на одном кадре. Поэтому безошибочное выделение искомым объектов с большим видимым движением по эксцентриситету невозможно.

Если объекты искомого класса имеют протяженное изображение, то они, как правило, ближе расположены к наблюдателю, чем круговые объекты. Чаще всего это приводит к большому значению интегральной яркости их изображений. Интуитивно понятно, что протяженное изображение, соответствующее объекту, смазанному собственным движением, имеет значительный эксцентриситет и большую интегральную яркость (рисунок 3.6), а значит, и отношение сигнал-шум (рисунок 3.7).

На рисунке 3.7 представлено распределение измерений всех объектов (рисунок 3.7а) и измерений, соответствующих протяженным объектам (рисунок 3.7б), на плоскости ОСШ-Эксцентриситет.

Из рисунков 3.7а и 3.7б видно, что совместное использование эксцентриситета изображения и его ОСШ обладает большей селективностью, чем раздельное использование рассматриваемых признаков.

Гистограмма значений эксцентриситета изображений объектов, выявленных на кадре и отождествленных с объектами звездных каталогов UCAC4 [120], USNO B1 [136] приведена на рисунке 3.8. Видно, что наименьшее количество протяженных объектов соответствует каталогу UCAC4 (рис 3.8а), большее их количество соответствует каталогу USNO B1 (рис. 3.8б).

Больше всего протяженных изображений представлено на графике 3.8в, так как он соответствует всем измерениям. На нем отображены не только измерения, привязанные к используемым каталогам, но и непривязанные измерения, включая ложные измерения.

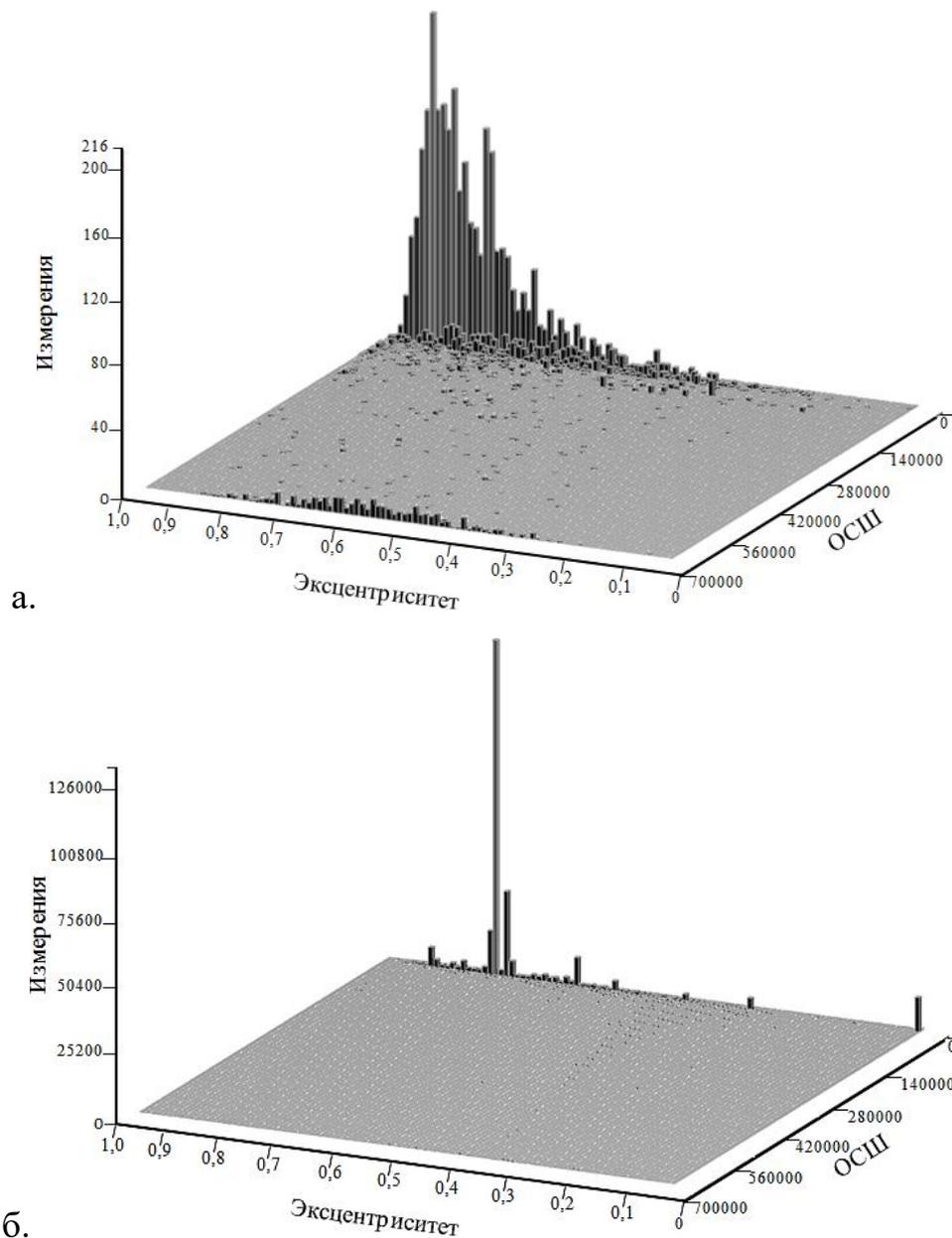


Рисунок 3.7 – Распределение измерений объектов на плоскости ОСШ-Эксцентриситет: а) измерения всех объектов; б) измерения протяженных объектов

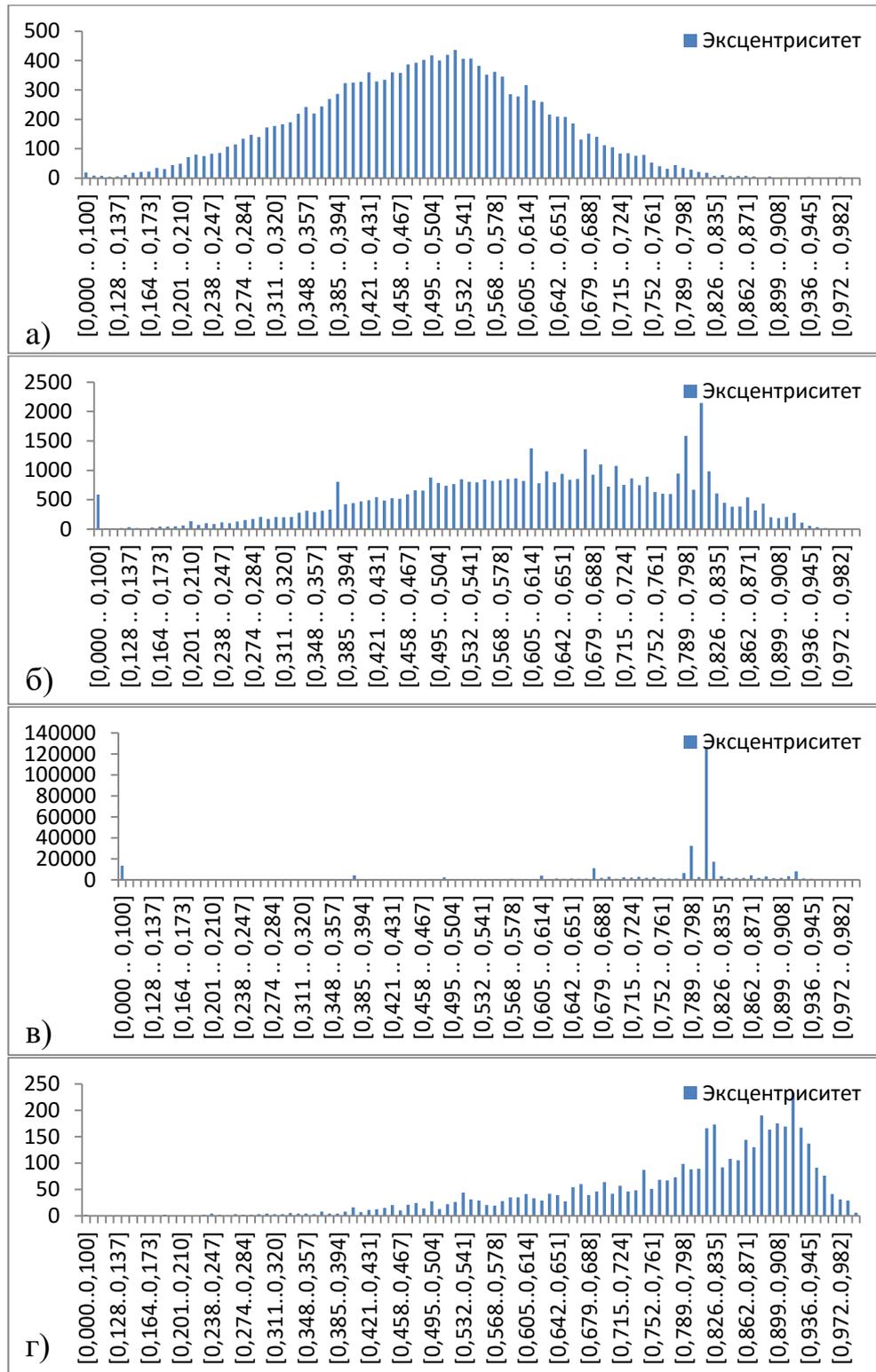


Рисунок 3.8 – Распределение измерений по значениям эксцентриситета:
 а) измерения, отождествленные с астрокаталогом UCAC4; б) измерения, отождествленные с фотокаталогом USNO B1; в) измерения всех объектов;
 г) измерения протяженных объектов

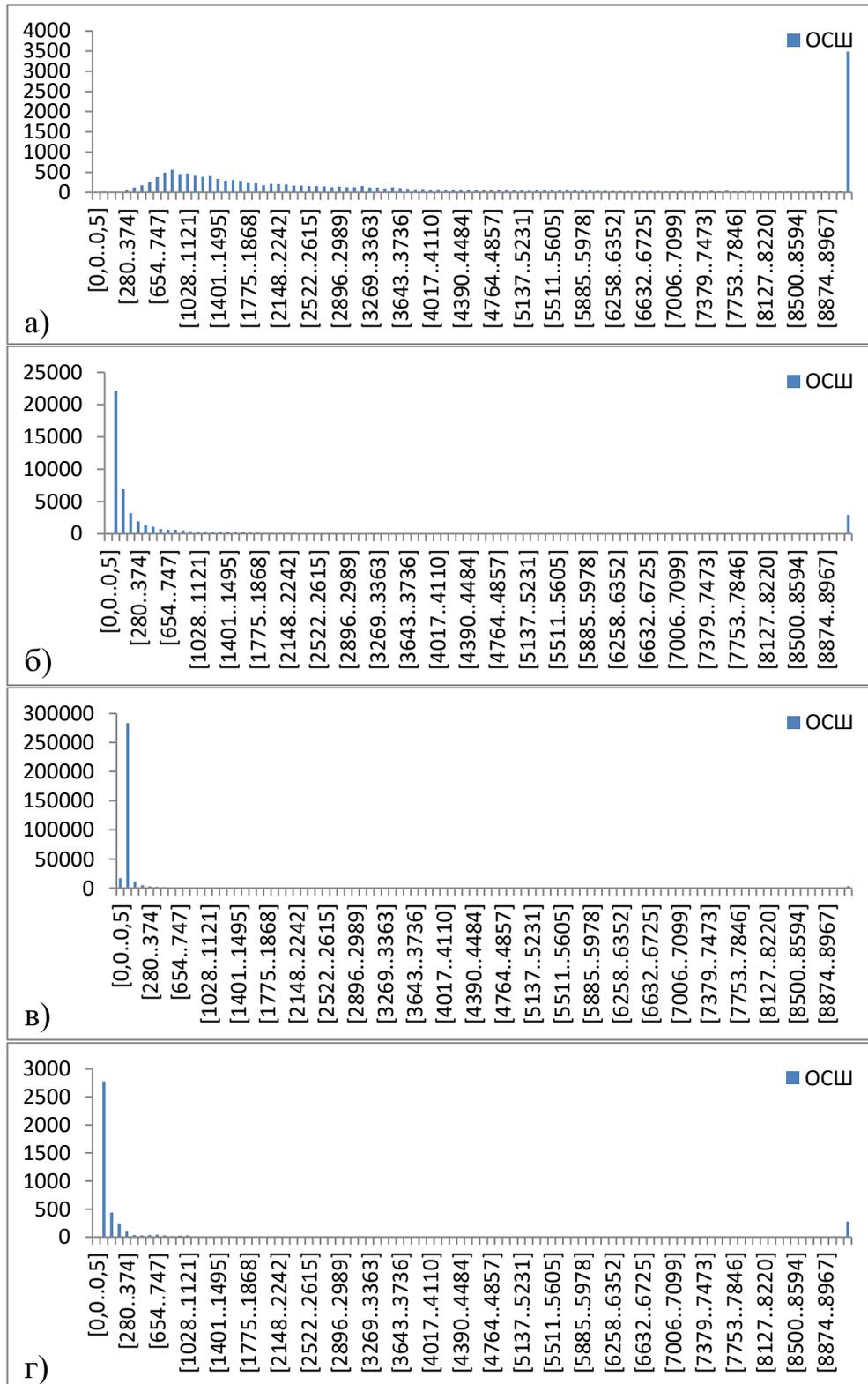


Рисунок 3.9 – Распределение измерений по диапазонам ОСШ: а) измерения, отождествленные с астрокаталогом UCAC4; б) измерения, отождествленные с фотокаталогом USNO B1; в) измерения всех объектов; г) измерения протяженных объектов

На рисунке 3.8г представлены оценки эксцентриситетов изображений, соответствующих протяженным объектам. Сравнительный анализ рисунков 3.8а и 3.8г свидетельствуют о селективности оценки эксцентриситета изображения при выделении объектов с протяженными изображениями. С другой стороны, данная селективность не настолько высока, чтобы признак эксцентриситета обеспечивал безошибочную различимость, рассматриваемых гипотез.

Анализ значений отношения сигнал-шум изображений гипотетических объектов UCAC4 и изображений, соответствующих протяженным объектам, представлен на рисунках 3.9а и 3.9б соответственно.

Анализ значений отношения сигнал-шум изображений гипотетических объектов UCAC4, USNO B1 и соответствующих всем измерениям приведен на рисунке 3.9. Здесь наблюдается обратная по отношению к эксцентриситету картина. Каталог UCAC4 (рис. 3.9а) соответствует изображению с самым большим ОСШ. Все измерения (рис. 3.9в) имеют самое меньшее среднее значение ОСШ. Промежуточное положение занимают измерения, привязанные к каталогу USNO B1 (рис. 3.9б).

На рисунке 3.9г представлены оценки эксцентриситетов изображений, соответствующих протяженным объектам.

Исходя из изложенного выше, на этапе внутрикадровой обработки изображение объекта считается протяженным, если выполняются условия:

$$\hat{\varepsilon} > \varepsilon_{kr}, \quad (3.57)$$

$$\hat{q} > q_{kr}, \quad (3.58)$$

где

$$\hat{q} = A_{\Omega IPSs} / \hat{\sigma}_{noise} \quad (3.59)$$

– оценка отношения сигнал-шум;

$\hat{\sigma}_{noise}$ – оценка СКО яркости фона.

Критические значения эксцентриситета ε_{kr} и отношения сигнал-шум q_{kr} выбираются из экспериментально полученных гистограмм, примеры которых приведены на рис. 3.4, 3.5, 3.6. В ходе проведения исследований разработанного метода выделения протяженных объектов использовались следующие значения указанных параметров: $\varepsilon_{kr} \geq 0.7$, $q_{kr} \geq 50$.

Проверка принадлежности протяженного изображения объектам внутреннего каталога с соответствующей отбраковкой (отбраковка изображений близких звезд). На этапе внутрикадровой обработки были выделены протяженные изображения (изображения, предположительно соответствующие изображениям объектов, смазанных собственным движением). Для этого предполагалось, что объект является вытянутым ($\varepsilon_{kr} \geq 0.7$) и значение ОСШ $q_{kr} \geq 50$. ОСШ определялось согласно выражения (3.59), а вытянутость – эксцентриситетом (3.55).

На этапе межкадровой обработки отождествляются кадры серии с формулярами звездного каталога и формируется внутренний каталог объектов, неподвижных на исследуемой серии кадров.

На базе пикселей, отнесенных к протяженным изображениям на этапе внутрикадровой обработки, также могут быть сформированы круговые изображения объектов, которые не смазаны собственным движением. На одном кадре изображения кластеров из нескольких звезд, выстроившихся в линию (рис. 3.10а, 3.10б), ничем не отличаются от изображений объектов, смазанных собственным движением (рис. 3.10в). По данным круговым изображениям формируется оценка положения предполагаемых объектов [113]. Совокупность всех сформированных на кадре измерений используется для формирования внутреннего каталога объектов, неподвижных на исследуемой серии кадров.

После этого из множества протяженных изображений исключаются те,

которые включают в себя хотя бы два круговых изображения известных звезд (звезд, отождествленных с используемыми астрометрическим и фотометрическим каталогами) или звезд, попавших в сформированный внутренний каталог объектов, неподвижных на серии кадров. При этом, считается, что j -е протяженное изображение включает в себя круговое изображение l -го объекта внутреннего каталога, объектов, неподвижных на серии кадров, если оценки координат x_l y_l этого объекта принадлежат области исследуемого j -го протяжённого изображения $x_l \in \Omega_j$, $y_l \in \Omega_j$ (где l и j номера объектов на исследуемом кадре).

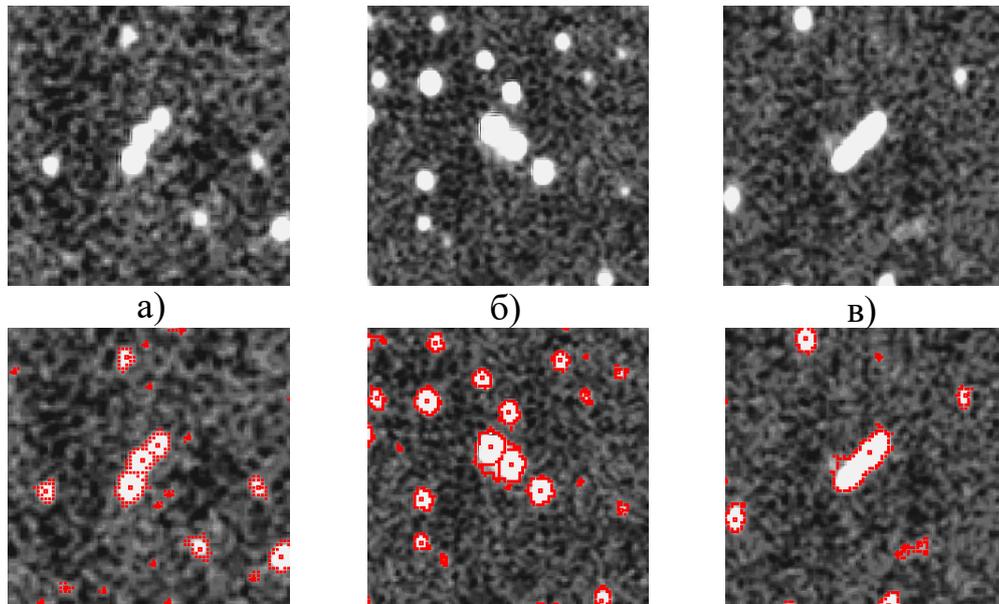


Рисунок 3.10 – Изображение объектов, смазанных собственным движением

МНК-оценка параметров видимого движения объекта вдоль одной координаты. 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.

Для объединения протяженных изображений в серию необходимо пересчитать координаты и ориентацию протяженных изображений с текущих

кадров на базовый кадр, то есть кадр, в координатах которого производятся операции межкадровой обработки. Для этого используются постоянные пластинки, получаемые на этапе отождествления измерений текущего кадра [7].

Совокупность оцениваемых параметров можно представить с помощью вектора оцениваемых параметров:

$$\hat{\Theta} = (\hat{\theta}_x, \hat{\theta}_y) = (\hat{x}_0, \hat{V}_x, \hat{y}_0, \hat{V}_y). \quad (3.60)$$

МНК-оценка (3.60) параметров видимого движения объекта (координата \hat{x}_0 положения на базовом кадре и скорость \hat{V}_x) вдоль координаты x имеет вид [6]:

$$\hat{x}_0 = \frac{D \cdot A_x - C \cdot B_x}{T \cdot D - C^2}, \quad (3.61)$$

$$\hat{V}_x = \frac{T \cdot B_x - C \cdot A_x}{T \cdot D - C^2}, \quad (3.62)$$

где $A_x = \sum_{t=1}^{N_{mea}} \hat{x}_t$; $B_x = \sum_{t=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau fr} \hat{x}_t$; $C = \sum_{t=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau fr}$; $D = \sum_{t=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau fr}^2$;

$\Delta_{\tau fr}$ – время между текущим и базовым кадрами $\Delta_{\tau fr} = (\tau_t - \tau_0)$.

Аналогично для координаты y :

$$\hat{y}_0 = \frac{D \cdot A_y - C \cdot B_y}{T \cdot D - C^2}, \quad (3.63)$$

$$\hat{V}_y = \frac{T \cdot B_y - C \cdot A_y}{T \cdot D - C^2}, \quad (3.64)$$

где $A_y = \sum_{t=1}^{N_{mea}} \hat{y}_t$; $B_y = \sum_{t=1}^{N_{mea}} \Delta_{\tau fr} \hat{y}_t$.

Обнаружение изображения объекта, смазанного собственным движением. После операций внутрикадровой и межкадровой обработки первого и второго этапов метода выделения изображений объектов, смазанных собственным движением, остается очень мало изображений, соответствующих истинным и ложным объектам. Это позволяет для указанного выше объединения использовать метод из класса стробовых.

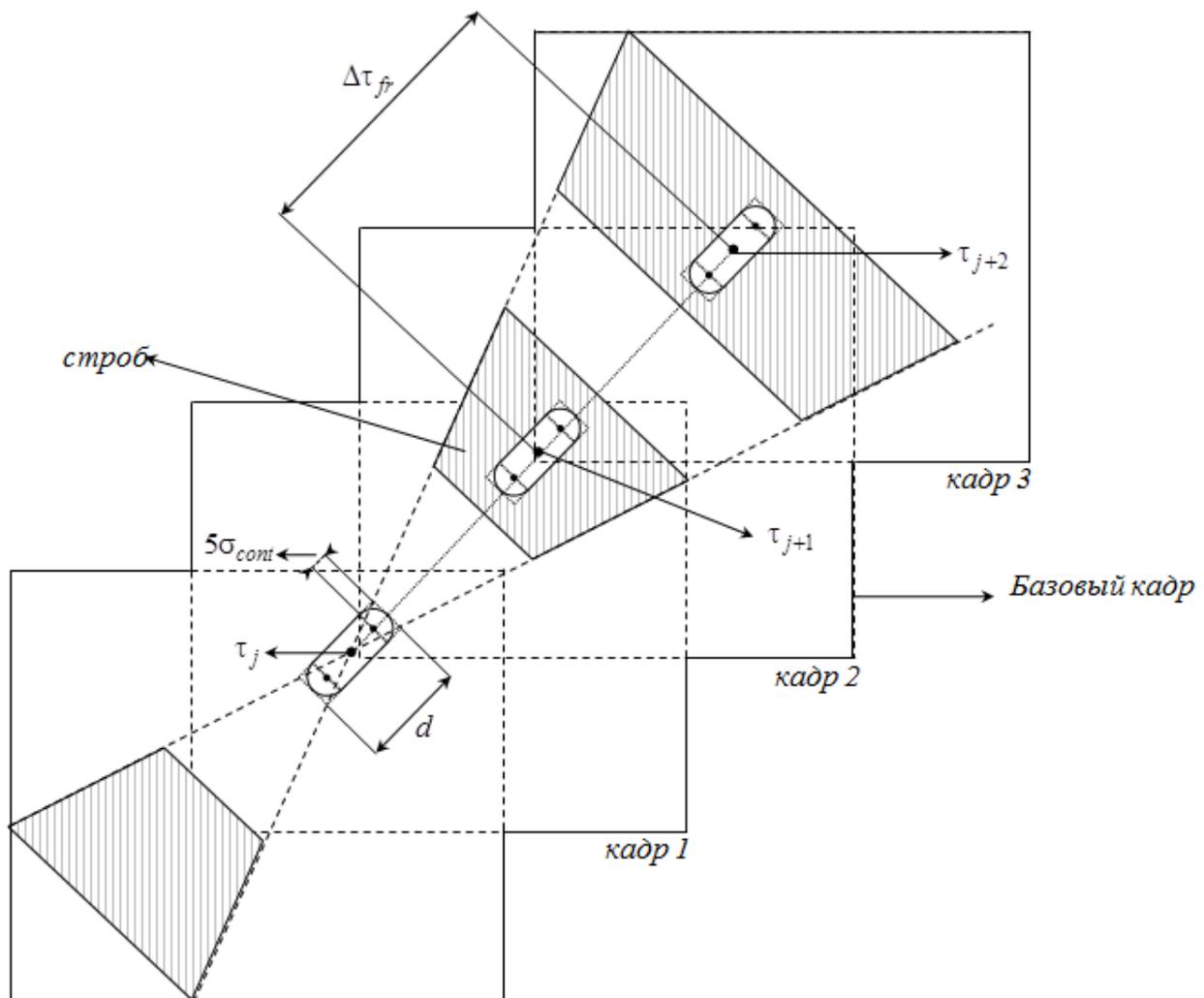


Рисунок 3.11 – Серия кадров с протяженным изображением объекта

Для реализации стробового метода (рис.3.11) объединения протяженных изображений в серию следует выполнить следующую последовательность операций.

1. Очередное протяженное изображение текущего кадра проверяется на принадлежность уже сформированным стробам объектов с большим видимым движением.

1.1 Положения стробов (ожидаемое/ экстраполированное положение объекта) определяются в соответствии с линейной моделью видимого движения объекта:

$$\hat{x}_{et} = \hat{x}_0 + \hat{V}_x(\tau - \tau_0), \quad (3.65)$$

$$\hat{y}_{et} = \hat{y}_0 + \hat{V}_y(\tau - \tau_0), \quad (3.66)$$

где $\hat{\Theta} = (\hat{\theta}_{x \max}, \hat{\theta}_{x \min}, \hat{\theta}_{y \max}, \hat{\theta}_{y \min})$ – параметры видимого движения.

Границы стробов определяются выражениями:

$$x_{\min t}^*(\hat{\theta}_{x \min}) = \hat{x}_0 + \hat{V}_{\min x} \Delta_{\tau fr}, \quad (3.67)$$

$$x_{\max t}^*(\hat{\theta}_{x \max}) = \hat{x}_0 + \hat{V}_{\max x} \Delta_{\tau fr}, \quad (3.68)$$

$$y_{\min t}^*(\hat{\theta}_{y \min}) = \hat{y}_0 + \hat{V}_{\min y} \Delta_{\tau fr}, \quad (3.69)$$

$$y_{\max t}^*(\hat{\theta}_{y \max}) = \hat{y}_0 + \hat{V}_{\max y} \Delta_{\tau fr}. \quad (3.70)$$

где $\hat{\theta}_{x \max}, \hat{\theta}_{x \min}, \hat{\theta}_{y \max}, \hat{\theta}_{y \min}$ – векторы параметров видимого движения объекта по каждой координате, соответствующие границам стробов;

$\hat{V}_{\min x}, \hat{V}_{\max x}, \hat{V}_{\min y}, \hat{V}_{\max y}$ – оценки минимальной и максимальной скорости протяженного объекта по координатам x и y соответственно:

$$\hat{V}_{\min} = \frac{d - 10\sigma_{cont}}{\Delta_{\tau}}, \quad \hat{V}_{\max} = \frac{d + 10\sigma_{cont}}{\Delta_{\tau}};$$

σ_{cont} – СКО координат границ изображения (СКО радиуса изображения);

d – длина пути (в пикселях), пройденного объектом за время экспозиции, которая также является длиной изображения объекта;

Δ_{τ} – время экспозиции.

Векторы $\hat{\theta}_{x \max}$, $\hat{\theta}_{x \min}$, $\hat{\theta}_{y \max}$, $\hat{\theta}_{y \min}$ включают в себя координаты \hat{x}_t , \hat{y}_t положения объекта и его скорости $\hat{V}_{\min x}$, $\hat{V}_{\max x}$, $\hat{V}_{\min y}$, $\hat{V}_{\max y}$ по каждой координате:

$$\hat{\theta}_{x \max} = (\hat{x}_0, \hat{V}_{\max x}), \quad \hat{\theta}_{x \min} = (\hat{x}_0, \hat{V}_{\min x}); \quad (3.71)$$

$$\hat{\theta}_{y \max} = (\hat{y}_0, \hat{V}_{\max y}), \quad \hat{\theta}_{y \min} = (\hat{y}_0, \hat{V}_{\min y}). \quad (3.72)$$

1.2. Считается, что изображение протяженного объекта попало в строб, если выполняется условие:

$$\begin{aligned} x_{\min et} < \hat{x}_t < x_{\max et}, \\ y_{\min et} < \hat{y}_t < y_{\max et}. \end{aligned} \quad (3.73)$$

1.3. Если данное изображение попадает в один из указанных стробов, параметры строба уточняются в соответствии с параметрами очередного протяженного изображения попавшего в строб согласно выражений (3.61)–(3.64).

2. Для каждого изолированного протяженного изображения (протяженного изображения, не попавшего в стробы объектов с большим видимым движением, не включенного в серию протяженных изображений) формируется новый строб (рисунок 3.11). Положение и ориентация строба

определяется углом изображения и вытянутостью протяженного изображения. Для этого используются выражения (3.65), (3.66). Размеры строба определяются показателями качества оконтуривания изображения, показателями точности оценки параметров протяженного изображения и пересчета координат и ориентации протяженных изображений с текущих кадров на базовый.

3. Объект с большим видимым движением считается обнаруженным (серия протяженных изображений одного объекта с большим видимым движением считается сформированной), если на N_{fr} кадрах в соответствующие стробы попало m измерений, сформированных по протяженным изображениям.

Вычислительный метод выделения (обнаружения) изображения объектов, смазанных собственным движением (рисунок 3.12).

1) На первом этапе (соответствует внутрикадровой обработке) из множества изображений объектов на кадре выбираются те изображения, которые имеют селективные признаки протяженных изображений ($\varepsilon_{kr} \geq 0.7$, $q_{kr} \geq 50$) (3.57), (3.58).

2) Исключение из множества протяженных измерений исследуемого кадра измерений, соответствующих изображениям известных объектов (звезд) или звезд попавших в сформированный внутренний каталог объектов, неподвижных на серии кадров.

3) Протяженные изображения (по одному на каждом кадре) объединяются в серию протяженных изображений одного гипотетического объекта.

3.1 Проверка протяженных изображений текущего кадра на принадлежность уже сформированным стробам объектов с большим видимым движением (3.73). В случае попадания очередного изображения в один из указанных стробов – с использованием метода наименьших квадратов уточняются, согласно выражений (3.61)–(3.63), параметры данного строба в соответствии с параметрами протяженного изображения, попавшего в строб.



Рисунок 3.12 – Вычислительный метод обнаружения изображения объектов, смазанных собственным движением

3.2 Для каждого изолированного протяженного изображения (не попавшего в уже существующие стробы объектов с большим видимым движением) формируется новый строб с параметрами (положением и размерами), определяемыми согласно выражений (3.65)–(3.70).

3.3 Объект с большим видимым движением считается обнаруженным, если на N_{fr} кадрах в соответствующие стробы попало m измерений, сформированных по протяженным изображениям.

Анализ показателей качества предложенного метода выделения изображений объектов, смазанных собственным движением. В таблице 3.2 представлены результаты обработки 8 кадров размера 3056x3056 пикселей. Кадры получены из обсерватории ISON-NM (International Scientific Optical Network, New Mexico). Данная обсерватория использует 40-см телескоп САНТЕЛ-400АН и ПЗС-матрицу FLI ML09000-65 (3056×3056 пикселей, размер пикселя 12 мкм), поле зрения составляет 100x100 угл. минут. Время экспозиции составляло 240 с.

В среднем на каждом кадре было сформировано около 42 тысяч измерений. После первого этапа (таблица 3.2) предложенного в работе метода (выполняется при внутрикадровой обработке) из 42 тысяч измерений остается около 3,5 % измерений, которые гипотетически могут соответствовать протяженным изображениям. После исключения объектов внутреннего каталога из всего количества измерений кадра остается только 1% измерений, которые гипотетически могут соответствовать протяженным изображениям.

Событие, заключающееся в ошибочном выделении объектов с большим видимым движением при исследованиях происходило не чаще чем 1 раз на несколько кадров. В этой связи количество исследуемых ошибочных обнаружений после 3 этапа метода выделения изображений объектов, смазанных собственным движением, в таблице 3.2 не приведено.

Таблица 3.2 – Пример распределения протяженных измерений на серии кадров до и после формирования внутреннего каталога (ВК)

№ кадра (размер)	Всего протяженных измерений на кадре	Протяженных измерений после 1 этапа метода	%	Протяженных измерений после 2 этапа метода	%
1 (3056x3056)	40852	1178	2,9%	339	0,8%
2 (3056x3056)	41458	1124	2,7%	375	0,9%
3 (3056x3056)	42805	1074	2,5%	340	0,8%
4 (3056x3056)	41732	1263	3,0%	340	0,8%
5 (3056x3056)	43211	2104	4,8%	554	1,2%
6 (3056x3056)	43259	1865	4,3%	461	1,0%
7 (3056x3056)	43818	1638	3,7%	314	0,7%
8 (3056x3056)	43691	1702	3,9%	443	1,0%

3.5 Типовые примеры изображений, смазанных собственным движением объектов

Разработанный метод обнаружения изображений объектов, смазанных собственным движением, был реализован в рамках программного комплекса автоматизированного обнаружения астероидов и комет CoLiTec (процедура «FASTCLT»). Исследования объектов с протяженными изображениями проводили в обсерваториях ISON-Kislovodsk и ISON-NM. Ниже приведены типовые примеры изображений, смазанных собственным движением объектов, обнаруженных на кадрах указанных обсерваторий.

В таблицах представлены следующие характеристики измерений объекта: в колонках 2-3 представлены координаты положения исследуемого объекта

$x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ и $y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$, которые рассчитываются согласно выражений (3.18) и (3.19); значение оценки эксцентриситета $\hat{\epsilon}$ (3.55) (колонка 4); угол ω_t (3.56) между направлением движения объекта и осью абсцисс (колонка 5); длина d изображения объекта (колонка 6); ширина и радиус изображения объекта (колонки 7-8), а также оценка параметра ОСШ (колонка 9), рассчитанная согласно выражению (3.59).

Также для каждого изображения объекта в таблице представлены параметры его движения. В качестве параметров движения объекта используются: угол траектории движения объекта; скорость видимого движения протяженного объекта на серии кадров; минимально допустимая скорость объекта, определяемая по длине его изображения (скорость на кадрах):

$$V_{ob_min} = (d - l_{ob} - 1) / (\Delta_{\tau} \times \Delta_{fr}), \quad (3.74)$$

где Δ_{τ} – время экспозиции;

Δ_{fr} – время между кадрами;

l_{ob} – ширина изображения объекта.

С учетом выражений (3.62) и (3.64) скорость видимого движения протяженного объекта на серии кадров (скорость на серии кадров) определяется выражением:

$$\hat{V}_{xy} = \sqrt{\hat{V}_x^2 + \hat{V}_y^2}. \quad (3.75).$$

В качестве еще одного параметра изображения объекта используется остаточная дисперсия по параметрам его движения. Оценкой дисперсии (остаточной дисперсией) по координате x с неизвестными координатами начального положения x_0, y_0 и скоростями видимого движения по каждой координате V_x, V_y считается оценка дисперсии $\sigma_{\theta x}^2$ в невырожденной линейной регрессион-

ной модели [137, 138]:

$$\sigma_{\hat{\theta}_x}^2 = \sum_{t=1}^{N_{mea}} (x_t - \hat{x}_t)^2 / (N_{mea} - 2), \quad (3.74)$$

$$\text{где } \hat{x}_t = \hat{x}_0 + \hat{V}_x(\tau_t - \tau_0) \quad (3.75)$$

– сглаженная оценка координаты x в СК базового ПЗС-кадра на t -м кадре.

N_{mea} ($N_{mea} \leq N_{fr}$) – количество измерений положения объекта на N_{fr} кадрах.

Аналогично, для координаты y :

$$\sigma_{\hat{\theta}_y}^2 = \sum_{t=1}^{N_{mea}} (y_t - \hat{y}_t)^2 / (N_{mea} - 2), \quad (3.76)$$

$$\text{где } \hat{y}_t = \hat{y}_0 + \hat{V}_y(\tau_t - \tau_0). \quad (3.77)$$

Суммарная остаточная дисперсия $\sigma_{\hat{\theta}}^2$ оценки координат протяженного объекта с неизвестными координатами начального положения x_0, y_0 и скоростями по каждой координате V_x, V_y составляет:

$$\sigma_{\hat{\theta}}^2 = \sigma_{\hat{\theta}_x}^2 + \sigma_{\hat{\theta}_y}^2. \quad (3.78)$$

Объект 1. Обсерватория D00, серия кадров Fast_18.6_4.0_02

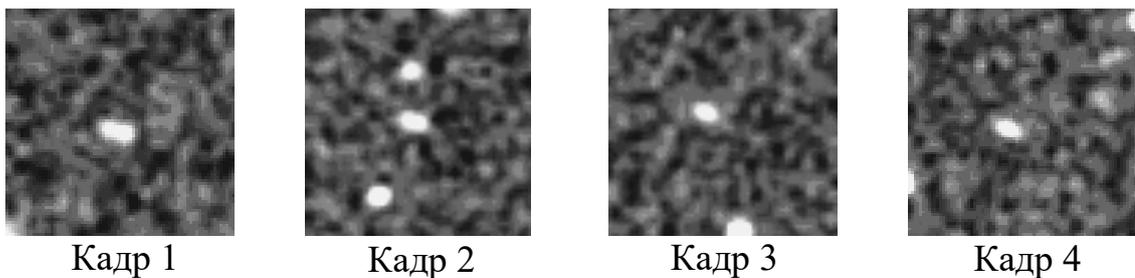


Рисунок 3.13 – Изображение объекта Fast_18.6_4.0_02 на кадрах

Таблица 3.3 – Характеристики измерений объекта (Fast_18.6_4.0_02) обсерватории D00, время экспозиции кадра $\Delta_t = 100$ сек

Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина изображения объекта	радиус изображения объекта	\hat{q}
1	1685	1543	0.81	163.7	7.2	2.5	3.4	114.8
2	1713	1557	0.81	168.8	7.8	3.9	3.4	125.0
3	1741	1571	0.76	157.1	6.6	2.6	3.0	97.3
4	1766	1583	0.88	152.7	7.8	2.1	3.2	96.2
среднее				160.5	7.35			
СКО				4.7	0.4			

Таблица 3.4 – Параметры движения объекта (серии кадров Fast_18.6_4.0_02) обсерватории D00

Параметр	Угол траектории [гр.]	Ост. Дисперсии	Скорость на кадрах V_{ob_min} [пикс.\кадр]	Скорость на серии [пикс.\кадр]
значение	153.4	0.00\0.03	30.1	31

Объект 2. Обсерватория D00, серия кадров Fast_18.7_4.0_03

Таблица 3.5 – Характеристики измерений объекта Fast_18.7_4.0_03 обсерватории D00

Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина изображения объекта	радиус изображения объекта	\hat{q}
1	-	-	0.3	-	-	-	-	-
2	1475	1706	0.66	29.6	6.3	1.8	2.7	86.6
3	1455	1729	0.84	31.5	6.2	2.0	1.3	65.7
4	1432	1754	0.88	129.6	6.6	2.2	2.2	65.0
среднее				63.5	6.4			
СКО				46.6	0.1			

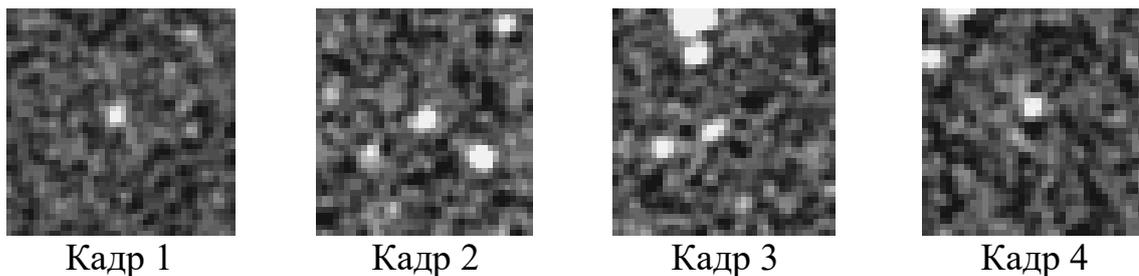


Рисунок 3.14 – Изображение объекта Fast_18.7_4.0_03 на кадрах

Таблица 3.6 – Параметры движения объекта (серии кадров) (Fast_18.6_4.0_02) обсерватории D00

Параметр	Угол траектории [гр.]	Δ_τ [сек.]	Ост. Дисперсии	Скорость на кадрах V_{ob_min} [пикс.\кадр]	Скорость на серии [пикс.\кадр]
значение	41.4	100	-	31.4	30.5

Объект 3. Обсерватория D00, серия кадров Fast_18.7_8.5_04

Таблица 3.7 – Характеристики измерений объекта (Fast_18.7_8.5_04) обсерватории D00

Кадр	X	Y	$\hat{\epsilon}$	ω_t	d	ширина изображения объекта	радиус изображения объекта	\hat{q}
1	1516	1498	0.87	17.1	8.7	2.1	3.6	89.2
2	1458	1521	0.91	21.7	9.2	1.9	3.9	132.2
3	1405	1542	0.90	16.4	9.7	1.5	3.8	106.9
4	-	-	-	-	-	-	-	-
Сред.				18.4	9.15			
СКО				2.0	0.3			

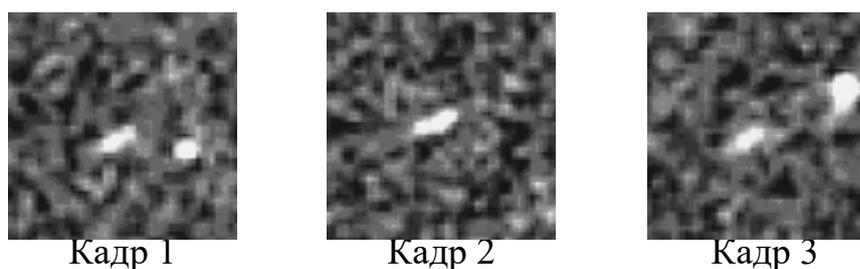


Рисунок 3.15 – Изображение объекта (Fast_18.7_8.5_04) на кадрах

Таблица 3.8 – Параметры движения объекта (серии кадров) (Fast_18.7_8.5_04) обсерватории D00

Параметр	Угол траектории [гр.]	$\Delta\tau$ [сек.]	Ост. Дисперсии	Скорость на кадрах V_{ob_min} [пикс.\кадр]	Скорость на серии [пикс.\кадр]
значение	21.5	100	0.01\0.00	62	56.3

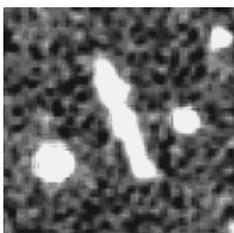
Объект 4. Обсерватория H15_3056, серия кадров Fast_12

Таблица 3.9 – Характеристики измерений объекта (H15_3056, серия кадров Fast_12) обсерватории H15

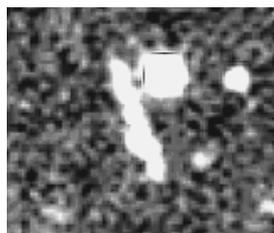
Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина изображения объекта	радиус изображения объекта
1	1575	1655	1.0	121.9	35.7	6.0	8.7
2	1539	1559	1.0	107.5	35.5	5.2	9.0
3	1503	1465	1.0	111.3	33.7	3.9	7.8
4	1467	1366	1.0	111.9	34.3	6.1	8.7
среднее				115.625	34.8		
СКО				2.0	1.4		

Таблица 3.10 – Параметры движения объекта (серии кадров) (H15_3056, серия кадров Fast_12) обсерватории H15

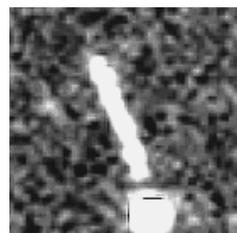
Параметр	Угол траектории [гр.]	$\Delta\tau$ [сек.]	Ост. Дисперсии	Скорость на кадрах V_{ob_min} [пикс.\кадр]	Скорость на серии [пикс.\кадр]
значение	110.5	240	1.95\0.27	97	102



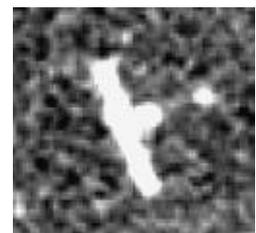
Кадр 1



Кадр 2



Кадр 3



Кадр 4

Рисунок 3.16 – Изображение объекта (H15_3056, серия кадров Fast_12) на кадрах

Объект 5. Обсерватория N15_3056, серия кадров Fast_8.6

Таблица 3.11 – Характеристики измерений объекта (N15_3056, серия кадров Fast_8.6) обсерватории N15

Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина изображения объекта	радиус изображения объекта
1	2557	284	0.93	46.4	25.9	6.3	7.6
2	2637	200	0.91	46.1	26.7	7.0	8.0
3	2707	127	0.92	46.2	24.8	7.2	7.3
4	2779	53	0.93	47.4	26.6	8.0	7.6
среднее				47.0	25.95		
СКО				0.3	0.7		

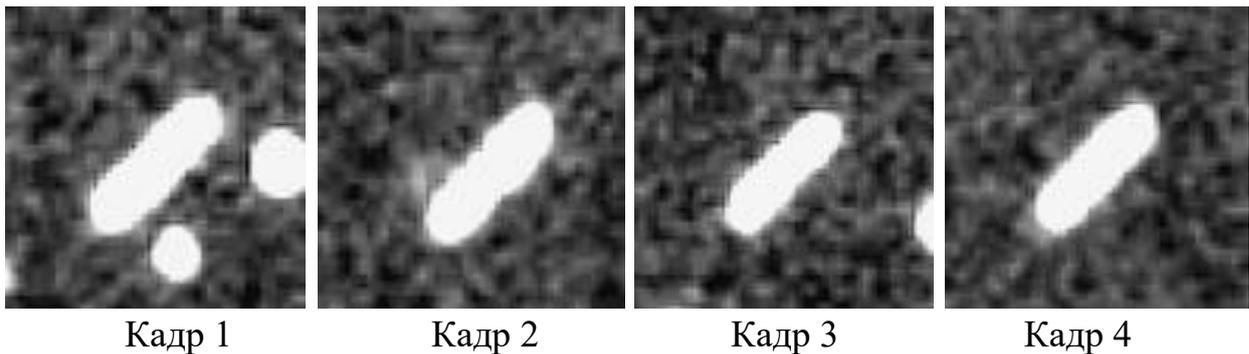


Рисунок 3.17 – Изображение объекта (N15_3056, серия кадров Fast_8.6) на кадрах

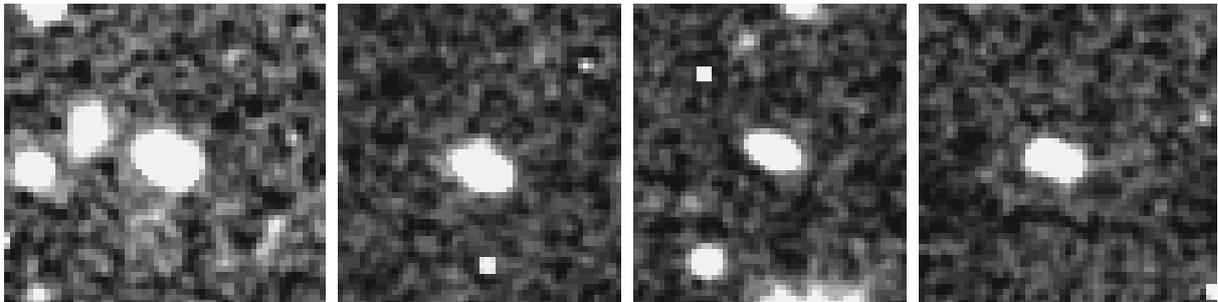
Таблица 3.12 – Параметры движения объекта (серии кадров) (N15_3056, серия кадров Fast_8.6) обсерватории N15

Параметр	Угол траектории [гр.]	Δ_τ [сек.]	Ост. Дисперсии	Скорость на кадрах V_{ob_min} [пикс.\кадр]	Скорость на серии [пикс.\кадр]
значение	46	240	0.07\0.12	115.35	109

Объект 6. Обсерватория N15_3056, серия кадров Fast_3.4

Таблица 3.13 – Характеристики измерений объекта (H15_3056, серия кадров Fast_3.4) обсерватории H15

Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина изображения объекта	радиус изображения объекта
1	1483.60	1381.48	0.93	148.9	16.9	8.8	7.2
2	-	-	-	-	-	-	-
3	1521.95	1484.08	0.92	154.2	14.7	6.9	6.5
4	1542.46	1538.34	0.93	164.0	16.6	6.2	4.9
среднее				155.7	16.0		
СКО				4.0	0.9		



Кадр 1

Кадр 2

Кадр 3

Кадр 4

Рисунок 3.18 – Изображение объекта (H15_3056, серия кадров Fast_3.4) на кадрах

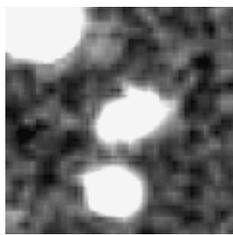
Таблица 3.14 – Параметры движения объекта (серии кадров) (H15_3056, серия кадров Fast_3.4) обсерватории H15

Параметр	Угол траектории [гр.]	Δ_τ [сек.]	Ост. Дисперсии	Скорость на кадрах V_{ob_min} [пикс.\кадр]	Скорость на серии [пикс.\кадр]
значение	159.5	240	0.00\0.05	67.7	58.5

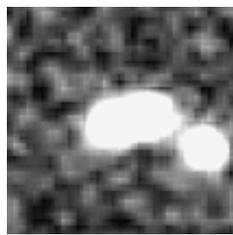
Объект 7. Обсерватория H15_4096, серия кадров Zone006

Таблица 3.15 – Характеристики измерений объекта (H15_4096, серия кадров Zone006) обсерватории H15

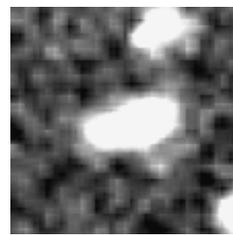
Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина изображения объекта	радиус изображения объекта	\hat{q}
1	2774	160	0.75	24.1	15.6	7.2	6.4	841
2	2713	182	0.81	6.1	17.7	6.1	7.1	992
3	2648	207	0.84	14.4	16.5	7.3	6.7	771
4	2586	229	0.81	14.2	15.7	6.5	6.6	761
среднее				14.7	17.125			
СКО				6.5	0.8			



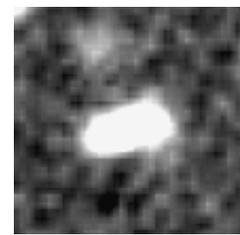
Кадр 1



Кадр 2



Кадр 3



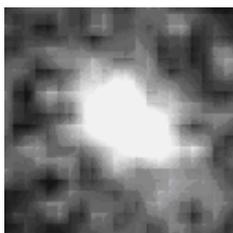
Кадр 4

Рисунок 3.19 – Изображение объекта (H15_4096, серия кадров Zone006) на кадрах

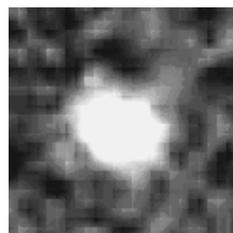
Таблица 3.16 – Параметры движения объекта (серии кадров) (H15_4096, серия кадров Zone006) обсерватории H15

Параметр	Угол траектории [гр.]	Δ_τ [сек.]	Ост. Дисперсии	Скорость на кадрах V_{ob_min} [пикс.\кадр]	Скорость на серии [пикс.\кадр]
значение	19.8	150	3.37\0.87	57.0	64

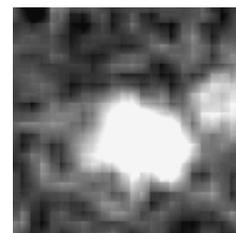
Объект 8. Обсерватория H15_4096, серия кадров Zone009



Кадр 1



Кадр 2



Кадр 4

Рисунок 3.20 – Изображение объекта (H15_4096, серия кадров Zone009) на кадрах

Таблица 3.17 – Характеристики измерений объекта (H15_4096, серия кадров Zone009) обсерватории H15

Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина изображения объекта	радиус изображения объекта	\hat{q}
1	1742	3769	0.75	141.9	15.8	7.8	6.5	597
2	1702	3754	0.52	146.1	14.5	8.5	6.7	754
3	1663	3746	Нет измерения, на звезде, рис. 1					
4	1621	3724	0.64	170.6	14.1	6.6	6.5	674
среднее				152.5	14.7			
СКО				12.6	0.7			

Таблица 3.18 – Параметры движения объекта (серии кадров) (H15_4096, серия кадров Zone009) обсерватории H15

Параметр	Угол траектории [гр.]	Δ_τ [сек.]	Ост. Дисперсии	Скорость на кадрах V_{ob_min} [пикс.\кадр]	Скорость на серии [пикс.\кадр]
значение	160.1	150	0.00\0.20	38.4	42

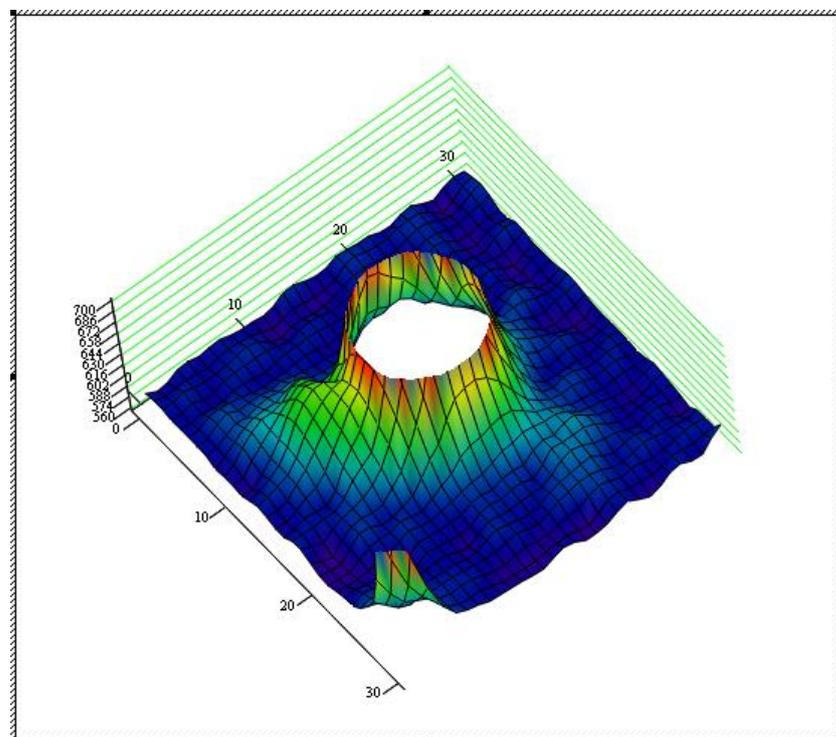


Рисунок 3.21 – Визуализация изображение объекта (H15_4096, серия кадров Zone009) рядом со звездой

Объект 9. Обсерватория H15_4096, серия кадров Zone016

Таблица 3.19 – Характеристики измерений объекта (H15_4096, серия кадров Zone016) обсерватории H15

Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина изображения объекта	радиус изображения объекта	\hat{q}
1	3201	2303	0.9	114.7	14.3	4.8	5.3	825
2	3175	2251	0.9	114.3	14.7	5.3	5.2	895
3	3147	2198	0.9	111.3	16.0	5.2	6.1	825
4	3121	2145	0.7	121.2	14.4	7.0	6.3	864
Сред.				116.82	14.85			
СКО				3.6	0.7			

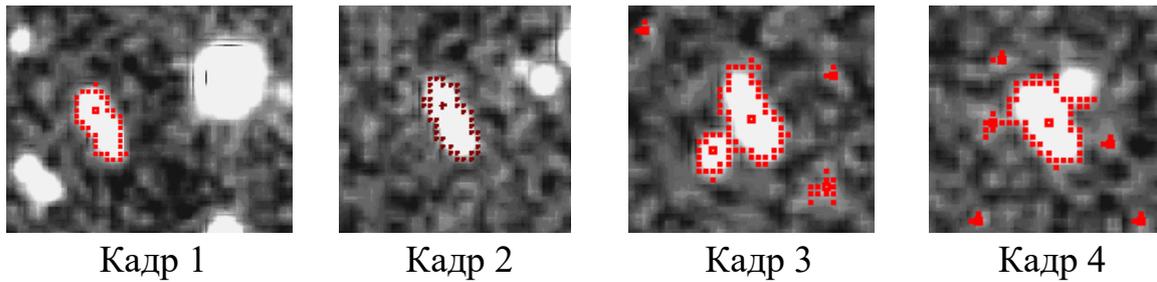


Рисунок 3.22 – Изображение объекта (H15_4096, серия кадров Zone016) на кадрах

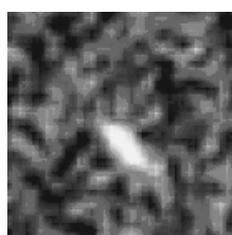
Таблица 3.20 – Параметры движения объекта (серии кадров) (H15_4096, серия кадров Zone016) обсерватории H15

Параметр	Угол траектории [гр.]	Δ_τ [сек.]	Ост. Дисперсии	Скорость на кадрах V_{ob_min} [пикс.\кадр]	Скорость на серии [пикс.\кадр]
значение	117.1	150	0.02\0.01	54.4	57

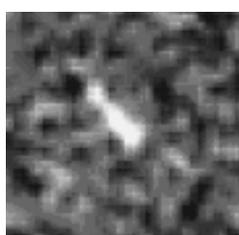
Объект 10. Обсерватория «Н.Мышевский» (L33), серия кадров 4

Таблица 3.21 – Характеристики измерений объекта («Н.Мышевский», серия кадров 4) обсерватории L33

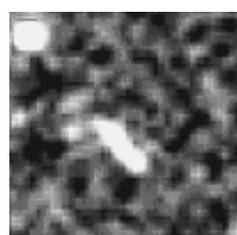
Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина изображения объекта	радиус изображения объекта	\hat{q}
1	714	511	0.94	135.0	12.8	2.0	4.3	255.5
2	659	448	0.84	140.1	10.1	2.5	4.0	135.9
3	616	399	0.90	140.7	13.2	3.2	4.6	223.9
4	575	353	0.89	128.6	11.1	2.9	4.1	312.5
Сред.				137.7	11.5			
СКО				3.1	1.2			



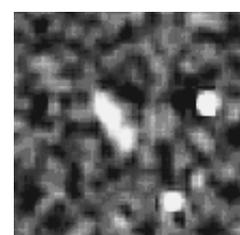
Кадр 1



Кадр 2



Кадр 3



Кадр 4

Рисунок 3.23 – Изображение объекта («Н.Мышевский», серия кадров 4) на кадрах

Таблица 3.22 – Параметры движения объекта (серии кадров) («Н.Мышевский», серия кадров 4) обсерватории L33

Параметр	Угол траектории [гр.]	Δ_τ [сек.]	Ост. Дисперсии	Скорость на кадрах V_{ob_min} [пикс.\кадр]	Скорость на серии [пикс.\кадр]
значение	139	180	0.11\0.10	67	64

Выводы по разделу 3

1. Разработан вычислительный метод (раздел 3.2.1 и 3.2.2) оценки параметров цифровых изображений объектов, смазанных собственным движением, на цифровых кадрах. Метод позволяет с точностью, близкой к потенциальной, оценивать местоположение протяженных объектов на ПЗС-кадре. В качестве модели формы протяженного изображения объекта использована субпиксельная гауссова

модель (3.6) и (3.8), которая описывает распределение координат падения фотонов в области кадра (в любой момент времени τ), соответствующей изображению протяженного объекта. В том числе предлагаемая модель учитывает наличие фоновой подложки (3.11) и позволяет оценивать ее параметры (3.17), а в случае ее предварительного вычитания – параметры остаточной фоновой составляющей. Субпиксельная гауссова модель также учитывает основные особенности процесса формирования изображения на ПЗС-кадре.

Метод использует критерий минимума суммы квадратов отклонений между экспериментальной и модельной яркостями пикселей (3.13) и критерий максимального правдоподобия (3.15). Использование данного метода позволяет расширить пределы достоверных измерений на область изображений с малыми отношениями сигнал-шум.

2. Разработан метод выделения изображений объектов, смазанных собственным движением. Данный метод состоит из трех этапов. На первом этапе выделяются протяженные изображения, соответствующие селективным признакам протяженных изображений (3.57), (3.58). На втором этапе исключаются случайным образом образованные кластеры объектов с круговыми изображениями. На третьем этапе методом, принадлежащем классу стробовых, 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.

Результаты исследования данного метода показали, что после исключения объектов внутреннего каталога из всего количества измерений кадра остается только 1% измерений, которые гипотетически могут соответствовать протяженным изображениям. Также после использования третьего этапа метода ложных обнаружений объектов с высокой скоростью видимого движения при экспериментальных исследованиях найдено не было.

Материалы раздела опубликованы в работах [5, 6, 21–23, 28, 32].

РАЗДЕЛ 4.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ С ИЗОБРАЖЕНИЯМИ, СМАЗАННЫМИ СОБСТВЕННЫМ ДВИЖЕНИЕМ, В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ

4.1 Реализация методов обработки в программном комплексе автоматизированного обнаружения астероидов и комет CoLiTec

1 марта 2009 года группой разработчиков астрономического программного обеспечения была начата разработка программы автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров CoLiTec [6, 21, 24, 25, 74, 75, 106, 113, 139, 140].

CoLiTec – единственная программа в открытом доступе с автоматическим выделением объектов с ненулевым видимым движением. Одна из лучших программ мира по точности наблюдений [6]. Единственное в мире программное обеспечение, надежно работающее на широких полях. Не имеет аналогов в СНГ и Балтии.

ПО CoLiTec выполняет внутрикадровую и межкадровую обработку кадров. Ядром ПО CoLiTec является обнаружение объектов на основе накопления статистик, пропорциональных энергии изображений, вдоль возможных траекторий движения объекта. В программе реализован метод распараллеливания обработки данных, что позволяет оперативно обрабатывать данные и подтверждать наиболее интересные обнаруженные объекты в ночь их открытия. Также CoLiTec обнаруживает оптическое послесвечение GRB. Программа адаптирована к использованию на широкопольных телескопах. С использованием такого телескопа была обнаружена комета P/2013 V3 (Nevski) (телескоп Genon – FOV 7.0°x4.0°, scale 6°/pix).

Визуальный просмотр результатов работы программы реализовано с использованием вьювера результатов [49]. Вьювер работает отдельно от основной программы, им можно независимо просматривать результаты ПО CoLiTec в то время как основная программа продолжает обработку данных.

Разработанное ПО (<http://91.212.253.48:8080/siap>) обеспечивает возможность публикации кадров обсерваторий, которые его используют, в рамках SIA протокола IVOA.

Программа разбита на отдельные блоки (рис. 4.1), связь между которыми осуществляется через файлы, что реализует идеологию открытой архитектуры и позволяет использовать на каждом этапе обработки, независимо разработанные программные средства.

Функциональное взаимодействие блоков в ПО CoLiTec. Серия ПЗС-кадров поступает на вход блока первичной обработки (внутрикадровая обработка). В блоке первичной обработки серии кадров осуществляется предварительная обработка кадров. Далее, согласно выражений (2.16), (2.18)÷(2.20) и (2.23), производится оценка положения и блеска объектов (формирование измерений объектов) на основании разработанного вычислительного метода обработки цифровых кадров для оценки параметров круговых объектов (рисунок 2.2).

В том числе, в блоке первичной обработки выполняется первый этап разработанного в третьем разделе диссертации вычислительного метода выделения изображений объектов (рисунок 4.2), смазанных собственным движением (раздел 3.4): выделяются изображения, обладающие признаками протяженных (формулы (3.57) и (3.58)).

По результатам отбора (согласно селективным признакам) протяженных объектов производится предварительная оценка их параметров (выражения (3.18)–(3.22) и (3.40), (3.45), (3.47), (3.48)) на основании разработанного вычислительного метода для оценки параметров цифровых изображений объектов, смазанных собственным движением, на цифровых кадрах (рисунок 3.2).

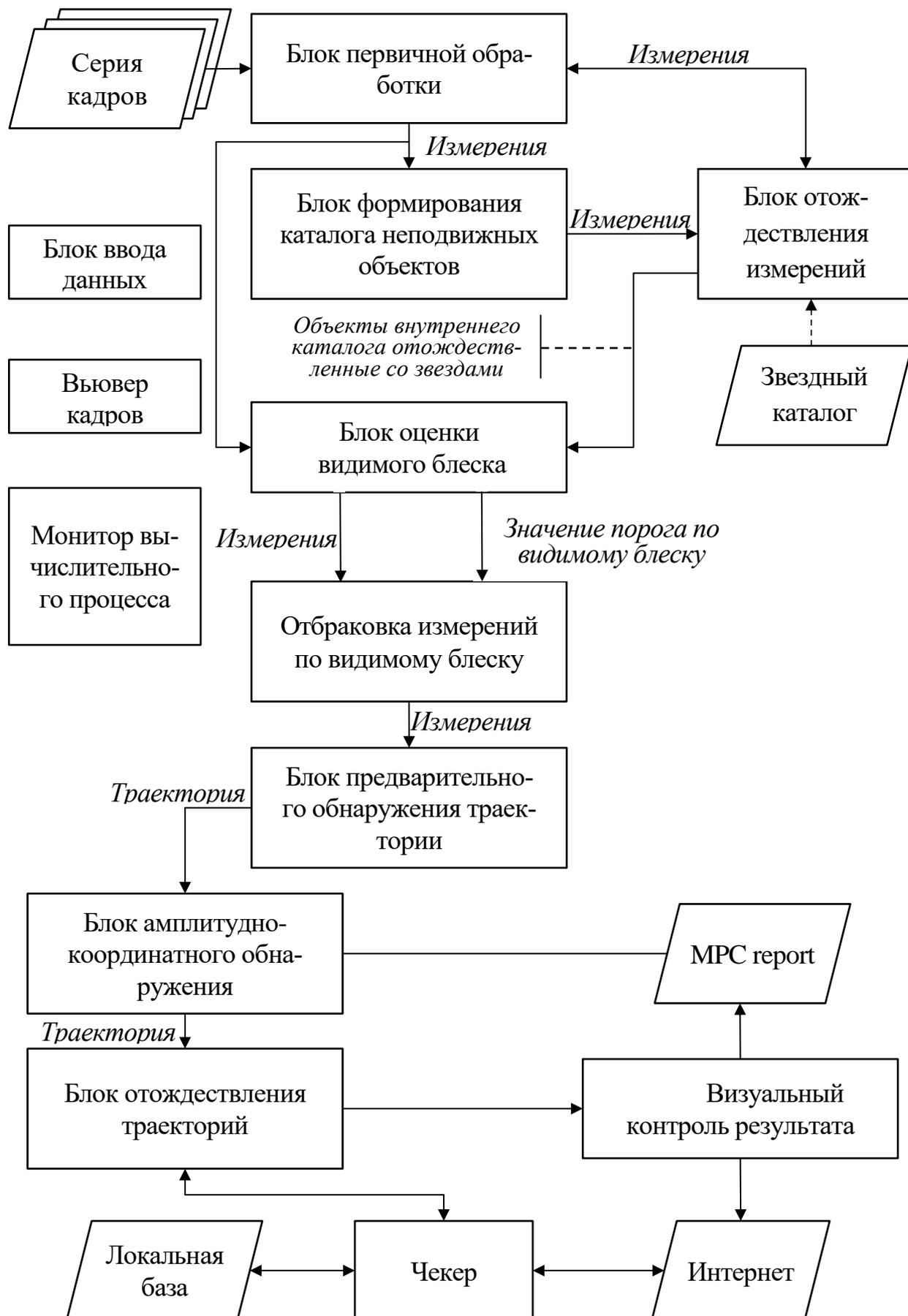


Рисунок 4.1 – Функциональная схема программы автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров CoLiTec

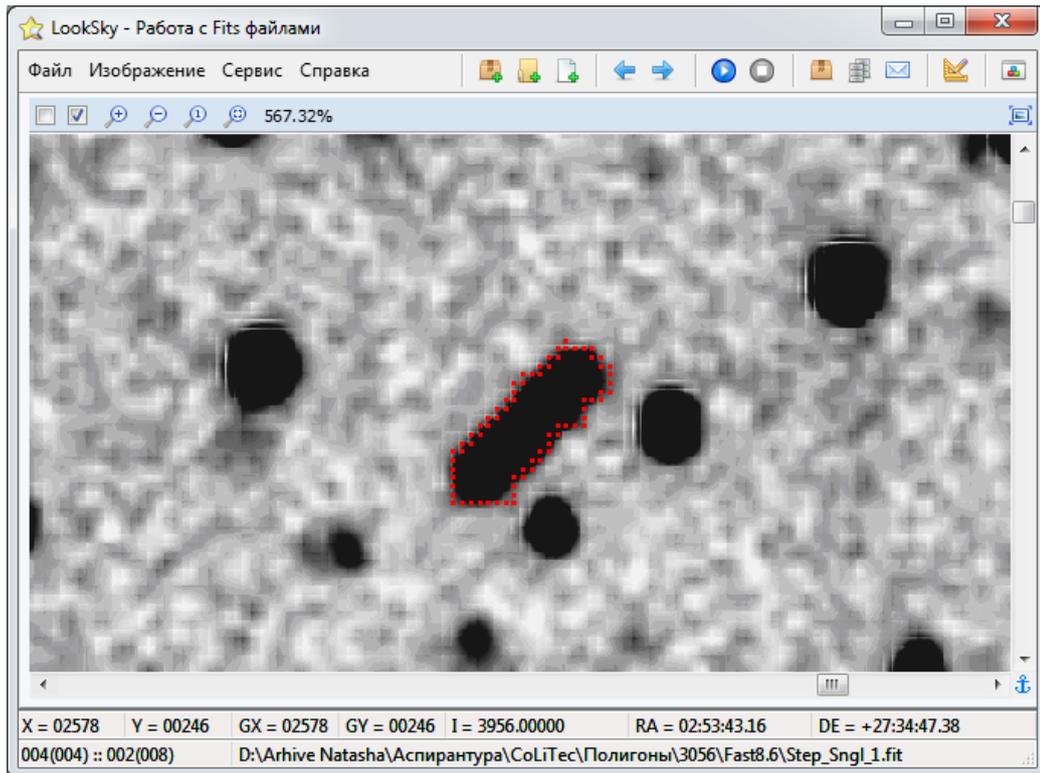


Рисунок 4.2 – Изображение объекта, соответствующего селективными признакам (3.57) и (3.58) во вьювере результатов

В результате, на выходе блока внутрикадровой обработки формируется совокупность измерений, принадлежащих разным кадрам серии. Измерения круговых объектов содержат оценки: положения $x_t(\Theta_{sh}^{sub}), y_t(\Theta_{sh}^{sub})$; теоретической амплитуды A_{subGt} ; параметра формы σ_{subGt} подынтегральной модели изображения объекта (2.4). Измерения протяженных объектов включают оценки: положения $x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub}), y_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$ объекта (в СК ПЗС-кадра) на момент привязки кадра τ_t , подынтегральной амплитуды A_{Gt}^{sub} изображения объекта, параметра σ_{subGt} формы подынтегральной модели (3.2) изображения объекта на t -ом ПЗС-кадре, угла ω_t между направлением движения объекта и осью абсцисс в СК ПЗС-кадра.

Совокупность измерений из первичной обработки поступает на межкадровую обработку, в блок формирования внутреннего каталога

неподвижных объектов (внутренний каталог) и в блок оценки видимого блеска. В блоке формирования внутреннего каталога производится отбор и отбраковка объектов, неподвижных на серии кадров с последующим отождествлением их со звездным каталогом в блоке отождествления измерений объектов.

Из множества протяженных изображений, выделенных на этапе первичной обработки, исключаются те, которые включают в себя хотя бы два круговых изображения известных звезд или звезд, попавших в сформированный внутренний каталог объектов, неподвижных на серии кадров. Что соответствует второму этапу метода выделения изображений объектов, смазанных собственным движением (раздел 3.4).

В блоке отождествления измерений проводится отождествление измерений со звездами опорного звездного каталога. Далее это используется в блоке внутрикадровой (первичной) обработки и в блоке оценки видимого блеска.

В результате работы блока оценки видимого блеска объектов формируются измерения с известными оценками видимого блеска и предельно допустимое значение отбраковки по видимому блеску, которые используются в блоке отбраковки измерений по видимому блеску. В блоке отбраковки по видимому блеску происходит отбраковка измерений согласно предельно допустимому значению, сформированному в предыдущем блоке. В результате, остаются только те измерения, оценка видимого блеска которых не превышает заданного допустимого значения.

Путем накопления статистик, соответствующих энергии от изображения объектов, вдоль возможных траекторий движения объекта (методом собирания света) [113, 114] в блоке предварительного обнаружения траекторий производится обнаружение траекторий движения объекта.

Также в блоке предварительного обнаружения траекторий выполняется третий этап метода выделения изображений объектов, смазанных собственным движением (раздел 3.4). Согласно выражений (3.61)–(3.63) и (3.65)–(3.70)

протяженные изображения (по одному на каждом кадре) объединяются в серию протяженных изображений одного гипотетического объекта с использованием метода из класса стробовых (раздел 3.4). В заключение, принимается решение о наличии изображений объектов, смазанных собственным движением согласно (3.73).

В следующем блоке (блоке амплитудно-координатного обнаружения) осуществляется МНК-оценка параметров предварительно обнаруженных траекторий. После чего принимаются решения об обнаружении астероидов.

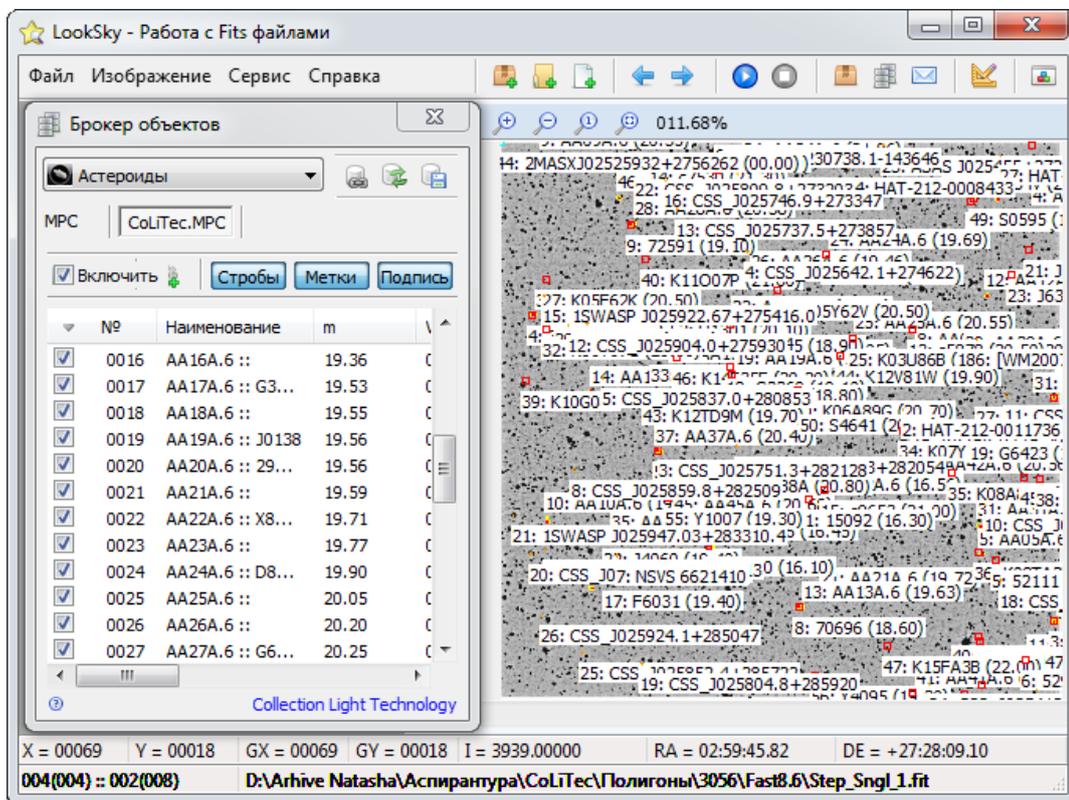


Рисунок 4.3 – Объекты ПО CoLiTec, отождествленные со звездным каталогом

Далее (в блоке отождествления траекторий) производится отождествление предварительно обнаруженных траекторий с траекториями известных астероидов, находящихся в исследуемой области небесной сферы. С помощью блока чекера получают данные об известных астероидах из локальной базы параметров орбит астероидов или с сервера MPC [121] (результат представлен на рисунке 4.3). В данном блоке также формируются запросы для локальной базы

орбит или интернет-сервера орбит. Ответы на сформированные запросы передаются в блок отождествления траекторий. На выходе блока отождествления траекторий формируются совокупности траекторий, отождествленных с известными астероидами и предварительно считающихся вновь открытыми.

Ручная отбраковка ложных траекторий происходит в блок визуального контроля результата. В результате работы блока совокупность отобранных траекторий преобразуется в отчет о наблюдениях в формате, принятом в MPC (MPC-report). Далее наблюдатель отправляет отчет с измерениями на сервер MPC посредством электронной почты.

4.2 Сравнение функциональных возможностей ПО CoLiTec и Astrometrica

ПО Astrometrica [17–19] достаточно известно среди профессионалов и любителей астрономии, занимающихся ПЗС-измерениями объектов Солнечной системы [118]. Основным недостатком ПО Astrometrica является очень слабые ее поисковые возможности в автоматическом режиме.

ПО CoLiTec [76] лишено данного недостатка. Сильной стороной внутрикадровой обработки ПО CoLiTec [6, 21, 24, 25, 75, 112, 113, 114] является яркостное выравнивание кадров любого размера; оценка положения объектов на ПЗС-кадрах с высокой точностью; возможность исключения из обработки измерений объектов с нулевым видимым движением; обнаружение астероидов на основе накопления статистики изображений объектов вдоль траекторий с неизвестными параметрами движения [140]; автоматическое исключение аномальных измерений.

ПО CoLiTec и Astrometrica реализуют такие возможности: быстрый выбор профиля конфигурации; калибровка кадров; инструменты настройки и трансформации изображения; поддержка локальных (XPM, USNO A2.0, USNO B1.0, UCAC3, UCAC4) и интернет (USNO B1.0, UCAC4) каталогов звезд; запись

координатной информации в формате WCS в заголовок FITS-кадра; интерактивный режим измерения объектов; инструмент «лупа»; автоматизированный поиск движущихся объектов; возможность визуальной инспекции автоматически обнаруженных, движущихся объектов; выдача астрометрических измерений в формате MPC; отправка измерений в MPC из интерфейса ПО; отображение известных и обнаруженных объектов на кадре; техника сложения кадров Track&Stack.

ПО CoLiTec, в отличие от ПО Astrometrica, реализует такие возможности: астрометрическая редукция ПЗС-кадров с большими полями зрения (от 2° до 10°); поддерживаемый локальный каталог Tycho2; поддерживаемые онлайн каталоги (NOMAD, SDSS v8); возможность отдельного применения опорных каталогов для астрометрической и фотометрической редукций; автоматизированный поиск движущихся тусклых объектов ($\text{SNR} \sim 2.5$); идентификация стационарных объектов с базами данных переменных звезд (VSX) и галактик (HyperLeda); версия OLDAS ПО CoLiTec обеспечивает оперативную обработку данных и назначение подтверждения интересных обнаруженных объектов в ночь их открытия; многопоточную поддержку многопроцессорных систем; контроль результатов астрономических наблюдений не позднее чем через 30 минут после их окончания; сохранение результатов обработки кадров (обнаруженные реальные объекты, объекты отклоненные оператором и пр.); вьювер LookSky [49] ПО CoLiTec работает отдельно от основной программы, не мешая ей продолжать обработку данных; идентификация обнаруженных движущихся объектов с онлайн базой MPCORB.

ПО CoLiTec не реализует такие возможности: поддерживаемые локальные каталоги (PPMXL и CMC-14); поддерживаемые онлайн каталоги (XPM, UCAC3 CMC-14, PPMXL); идентификация обнаруженных движущихся объектов с локальной базой MPCORB.

Более наглядное сравнение функций ПО CoLiTec и Astrometrica представлено в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сравнение функций функциональных возможностей ПО CoLiTec и Astrometrica

1	2	3	4
№	Функции	CoLiTec	Astrometrica
1.	Возможность быстрого выбора профиля конфигурации	+	+
2.	Калибровка кадров	+	+
3.	Инструменты настройки и трансформации изображения	+	+
4.	Астрометрическая редукция ПЗС-кадров с большими полями зрения (2° и более)	+	-
5.	Поддержка локальных опорных каталогов звезд	+	+
6.	Список поддерживаемых локальных каталогов	Tycho2, USNO A2.0, USNO B1.0, XPM, UCAC3, UCAC4	USNO A2.0, USNO B1.0, XPM, UCAC3, UCAC4, CMC-14, PPMXL
7.	Список поддерживаемых онлайн каталогов	USNO B1.0, NOMAD, UCAC4, SDSS v8	USNO B1.0, XPM, UCAC3, UCAC4, CMC-14, PPMXL
8.	Поддержка онлайн опорных каталогов звезд	+	+
9.	Возможность отдельного применения опорных каталогов для астрометрической и фотометрической редукций	+	-
10.	Запись координатной информации (WCS) в заголовок FITS-кадра	+	+
11.	Астрометрическая редукция «штрихов»	-	-
12.	Техника сложения кадров Track&Stack	-	+
13.	Интерактивный режим измерения объектов	+	+
14.	Инструмент «лупа»	+	+
15.	Автоматизированный поиск движущихся объектов	+	+

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4
16.	Автоматизированный поиск движущихся тусклых объектов (SNR~2.5)	+	-
17.	Автоматический режим обработки потока данных	+	-
18.	Возможность визуальной инспекции автоматически обнаруженных, движущихся объектов	+	+
19.	Выдача астрометрических измерений в формате MPC	+	+
20.	Отправка измерений в MPC из интерфейса программы	+	+
21.	Сохранение результатов обработки кадров (обнаруженные реальные объекты, объекты отклоненные оператором, и пр.)	+	-
22.	Идентификация обнаруженных движущихся объектов с локальной базой MPCORB	-	+
23.	Идентификация обнаруженных движущихся объектов с онлайн базой MPCORB (MPC)	+	-
24.	Идентификация стационарных объектов с базой данных переменных звезд (VSX)	+	-
25.	Идентификация стационарных объектов с базой данных галактик (HyperLeda)	+	-
26.	Отображение известных и обнаруженных объектов на кадре	+	+
27.	Открытый код	-	-
28.	Модульная конструкция (возможность подключения отдельных модулей)	+	-

4.3 Применение программы CoLiTec в системах автоматизированного обнаружения астероидов

Программа CoLiTec применяется для автоматизированного обнаружения астероидов в Андрушевской астрономической обсерватории, в Российской уда-

ленной обсерватории ISON-NM (Mayhill, New Mexico, USA), а также в обсерваториях ISON-Кисловодск и с конца 2013 года в ISON- Уссурийск.

Открытия CoLiТес. С помощью CoLiТес впервые в СНГ и Балтии были открыты астероид и комета в автоматизированном режиме.

С использованием CoLiТес было открыто 4 кометы (C/2011 X1 (Elenin) (MPEC 2010-X101) [141], P/2011 NO1(Elenin) (MPEC 2011-O10) [142], C/2012 S1 (MPEC 2012-S63) [143], P/2013 V3 (Nevski) (MPEC 2013-V45) [144]) из 7, открытых в СНГ и Балтии более чем за 20 последних лет. 10 декабря 2010 года с использованием программы CoLiТес была открыта комета C/2010 X1 (Elenin), которая стала первой кометой, открытой астрономом СНГ за последние 20 лет. Всего при помощи программы CoLiТес открыто более 1560 астероидов. Среди них 4 объекта сближающихся с Землей из 16 открытых за всю историю советской и постсоветской астрономии СНГ и Балтии, 21 троянский астероид Юпитера и 1 кентавр из двух, открытых в СНГ и Балтии. Еще 3 астероидам были посвящены отдельные электронные циркуляры MPC[145-147].

С использованием CoLiТес в 2012(2011) году сделано 80 (86)% наблюдений и 74 (75)% открытий астероидов в указанных странах.



Рисунок 4.4 – Линдли Джонсон (директор подразделения NASA по исследованию сближающихся с Землей объектов) про доклад группы CoLiТес

Международное признание результатов работы ПО CoLiTec. 30 сентября 2013 года на Asteroid Initiative Idea Synthesis Workshop [148] в НАСА состоялось успешное выступление группы разработчиков ПО CoLiTec с докладом на тему «Автоматизированное программное обеспечение для обработки изображений и обнаружения движущихся объектов – CoLiTec. Состояние и перспективы» [149]. Доклад был признан одним из лучших (рисунок 4.4).

Также в 2014 году программное обеспечение CoLiTec было рекомендовано для членов сети Gaia-FUN-SSO (<https://gaiafunssso.imcce.fr/>) в качестве программного инструмента для выявления слабых движущихся объектов на ПЗС-кадрах.

Выводы по разделу 4

1. Разработанные вычислительные методы: обработки цифровых кадров для оценки параметров круговых объектов (раздел 2.3); выделения изображений объектов, смазанных собственным движением (раздел 3.4); оценки параметров цифровых изображений объектов, смазанных собственным движением, на цифровых кадрах (раздел 3.3) успешно используются в рамках программного комплекса автоматизированного обнаружения астероидов и комет CoLiTec. Реализованные методы в рамках ПО CoLiTec были применены на следующих обсерваториях: Андрушевской астрономической обсерватории, в Российской удаленной обсерватории ISON-NM (Mayhill, New Mexico, USA), а также в обсерваториях ISON-Кисловодск и ISON- Уссурийск.

2. Использующие ПО CoLiTec обсерватории имеют одни из лучших показателей точности по обнаружению в мире [6]. Результаты работы программы, а также ее достижения признаны на международном уровне [148, 149].

3. Программный комплекс, использующий разработанные вычислительные методы, может быть полезен другим астрономическим обсерваториям Украины и мира для обнаружения астероидов и комет с круговыми и протяженными изображениями.

Материалы раздела опубликованы в работах [6, 22, 43 – 48].

ВЫВОДЫ

Для повышения точности оценки местоположения объектов с круговыми изображениями и изображениями, смазанными собственным движением, на ПЗС-кадрах решена актуальная научно-техническая задача разработки вычислительных методов обработки цифровых изображений для оценки положения небесных объектов с круговыми изображениями и изображениями, смазанными собственным движением.

В результате исследований были получены следующие новые научные результаты:

1. Разработан вычислительный метод обработки цифровых кадров для оценки параметров круговых объектов, который позволяет с точностью, близкой к потенциальной, оценивать местоположение объектов с круговым изображением на цифровом кадре. В качестве модели формы изображения объекта использована субпиксельная гауссова модель, которая описывает распределение попадания фотонов в пиксели цифрового кадра. Предлагаемая модель учитывает наличие шумовой подложки и позволяет оценивать ее параметры. Субпиксельная гауссова модель также учитывает основные особенности процесса формирования изображения на цифровом кадре.

2. Разработаны вычислительные методы оценки параметров цифровых изображений объектов, смазанных собственным движением. Методы позволяют с точностью, близкой к потенциальной, оценивать местоположение протяженных объектов на цифровом кадре. В качестве модели формы изображения объекта использована субпиксельная гауссова модель, которая описывает распределение координат падения фотонов в области кадра (в любой момент времени τ), соответствующей изображению протяженного объекта. Методы используют критерий минимума суммы квадратов отклонений между экспериментальной и модельной яркостями пикселей и критерий максимального правдоподобия. Использование данных методов

позволяет расширить пределы достоверных измерений на область изображений с малыми отношениями сигнал-шум.

3. Разработан метод выделения изображений объектов, смазанных собственным движением. Данный метод состоит из трех этапов. На первом этапе выделяются протяженные изображения, соответствующие селективным признакам протяженных изображений. На втором этапе исключаются случайные кластеры объектов с круговыми изображениями. На третьем этапе методом, принадлежащим классу стробовых, 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. Результаты исследования метода показали, что после применения последнего этапа метода остается только 1% измерений, которые гипотетически могут соответствовать протяженным изображениям. Также использования третьего этапа метода ложных обнаружений объектов с высокой скоростью видимого движения при экспериментальных исследованиях найдено не было.

4. Приведен анализ показателей точности вычислительного метода обработки цифровых кадров для оценки параметров круговых объектов в рамках ПО автоматического поиска астероидов на серии ПЗС-кадров CoLiTec. Исследования подтвердили высокую точность измерений ПО CoLiTec (раздел 2.4).

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

6. Разработанные вычислительные методы успешно используются в рамках программного комплекса автоматизированного обнаружения

астероидов и комет CoLiTec. Реализованные методы в рамках ПО CoLiTec были применены на следующих обсерваториях: Андрушевской астрономической обсерватории, в Российской удаленной обсерватории ISON-NM (Mayhill, New Mexico, USA), а также в обсерваториях ISON-Кисловодск и ISON- Уссурийск. Использующие ПО CoLiTec обсерватории имеют одни из лучших показателей точности по обнаружению в мире. Результаты работы программы, а также ее достижения признаны на международном уровне.

7. Обсерватории, использующие CoLiTec, имеют одни из лучших показателей точности в мире [6]. Результаты работы программы, а также ее достижения признаны на международном уровне [148, 149].

8. Разработанные вычислительные методы, а также программный комплекс, использующий их, могут быть полезны другим астрономическим обсерваториям Украины и мира для обнаружения и исследования астероидов и комет с круговыми и протяженными изображениями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Schmude Jr R. Artificial Satellites and How to Observe Them. – Springer Science & Business Media, 2012.
2. Hsu K. et al. China's military unmanned aerial vehicle industry // Washington, DC: US-China Economic and Security Review Commission. Israel. – 2013.
3. Baiocchi V., Dominici D., Mormile M. Unmanned aerial vehicle for post seismic and other hazard scenarios // Wit Transactions on the Built Environment. – 2013. – Т. 134. – С. 113 – 122.
4. Near Earth Object Program: NEO Discovery Statistics [Электронный ресурс] // NASA. – 2016. – Режим доступа к ресурсу: <http://neo.jpl.nasa.gov/stats/>.
5. Безкровный М. М. Методы исследования статистических характеристик CCD-измерений положений и блеска объектов солнечной системы / М. М. Безкровный, А. Н. Дашкова, Н. С. Соковикова, В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий // Восточно-Европейского журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 2/2(22). – С. 26 – 37.
6. Savanevych, V. E A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinates / V. E. Savanevych, O. B. Briukhovetskyi, N. S. Sokovikova, M. M. Bezkrorny, I. B. Vavilova, Yu. M. Ivashchenko, L. V. Elenin, S. V. Khlamov, Ia. S. Movsesian, A. M. Dashkova, A. V. Pogorelov // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2015. – Т. 451 (3). – С. 3287 – 3298.
7. Kouprianov V.V. Distinguishing features of CCD astrometry of faint GEO objects / V. Kouprianov // Advances in Space Research. – 2008. – № 7(41). – С. 1029 – 1038.
8. Bauer T. Improving the Accuracy of Position Detection of Point Light Sources on Digital Images / T. Bauer // Proceedings of the IADIS Multiconference, Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing, Algarve, Portugal. – June 20 – 22 2009. – С. 3 – 15.

9. Zhai C. et al. Detection of a Faint Fast-moving Near-Earth Asteroid Using the Synthetic Tracking Technique //The Astrophysical Journal. – 2014. – Т. 792. – №. 1. – С. 60.

10. Vereš P. et al. Improved asteroid astrometry and photometry with trail fitting //Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2012. – Т. 124. – №. 921. – С. 1197 – 1207.

11. FMO project [Электронный ресурс] // Spacewatch – Режим доступа к ресурсу: http://fmo.lpl.arizona.edu/FMO_home/index.cfm.

12. The Spaceguard Foundation home page. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <https://www.cfa.harvard.edu/~marsden/SGF/>.

13. ESA Space Situational Awareness. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Space_Situational_Awareness.

14. IAU Minor Planet Center. [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.net>.

15. Вавилова И. Б., Пакуляк Л. К., Шляпников А. А., и др. Астроинформационный ресурс Украинской виртуальной обсерватории (УкрВО): объединенный архив данных наблюдений, научные задачи и программное обеспечение // Кинематика и физика небесных тел. – 2012. – т.28. – №2. – С. 59 – 80.

16. Vavilova I.B., Pakuliak L. K., Protsyuk Yu. I., et al.UkrVO Joint Digitized Archive and Scientific Prospects // Baltic Astronomy. – 2012. – vol. 21, P. 356 – 365.

17. Miller J. P. et al. An International Asteroid Search Campaign //Astronomy Education Review. – 2008. – Т. 7. – №. 1. – С. 57 – 83.

18. Astrometrica [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу:<http://www.astrometrica.at/>.

19. Aguirre E. L. Comets, asteroids, and Astrometrica //Sky and Telescope. – 1997. – Т. 94. – №. 2. – С. 72.

20. Безкровный М.М. Оценка местоположения объекта на ПЗС-кадре при среднем времени экспозиции / Безкровный М.М., А.М. Кожухов, В.Е. Саваневич,

А.Б.Анненков, Соковикова Н.С. // Системы обработки информации: Зб. наук. пр. – Харків: ХУПС, 2012. – Вип. 7(105). – С. 44 – 50.

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

22. Nataliia S. S. The estimation of the object position on the digital CCD frame using the pixel model of the object image / S. S. Nataliia, E. S. Vadym, M. V. Michail, V. P. Artem, V. K. Sergii // Scholars Journal of Engineering and Technology. – 2015. – Т. 2/2(22). – С. 26 – 37

23. Саваневич В. Е. Метод выделения изображений небесных объектов, смазанных собственным движением / В. Е. Саваневич, Н. С. Соковикова, М. М. Безкровный, А. Б. Брюховецкий // Вестник НТУ ХПИ

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

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

26. Михайлова Л. О. Метод максимально правдоподобной оценки местоположения объектов компактной группы на ПЗС-кадре [Текст] / Л. О. Михайлова, В. Е. Саваневич, Н. С. Соковикова, М. М. Безкровный, С. В. Хламов // Восточно-Европейского журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 5/4(71). – С. 16 – 22.

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

68. – X., 2015. – С. 173 – 188

28. Безкровный М.М. Исследование точности оценки местоположения небесных объектов на ПЗС-кадрах / М.М. Безкровный В.Е. Саваневич, Н.С. Соковикова, Я.С. Мовсесян, А.В. Погорелов, А.Н. Дашкова, Н.Ю. Дихтярь, А.Б. Брюховецкий, Л.О. Михайлова // Восточно-Европейского журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 4/2(70). – С. 16 – 22.

29. Savanevych, V. E. Comparative analysis of the positional accuracy of CCD measurements of small bodies in the solar system software CoLiTec and Astrometrica / V. E. Savanevych, A. B. Briukhovetskyi, Yu. N. Ivashchenko, I. B. Vavilova, M. M. Bezkrivniy, E. N. Dikov, V. P. Vlasenko, N. S. Sokovikova, Ia. S. Movsesian, N. Yu. Dikhtyar, L. V. Elenin, A. V. Pohorelov, S. V. Khlamov // Kinematics and Physics of Celestial Bodies – 2015. – Т. 31 (6). – Р. 302 – 313

30. Саваневич, В.Е. Сравнительный анализ показателей точности позиционных ПЗС-измерений малых тел солнечной системы программными обеспечениями CoLiTec и Astrometrica / В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий, Ю.Н. Иващенко, И.Б. Вавилова, М.М. Безкровный, Е.Н. Диков, В.П. Власенко, Н. С. Соковикова, Я.С. Мовсесян, Н.Ю. Дихтярь, Л.В. Еленин, А.В. Погорелов, С.В. Хламов // Кинематика и физика небесных тел – 2015. – 31, №6 – С. 55 – 69.

31. Estimating the astronomical object parameters through CCD-frames in CoLiTec project: the current state perspectives / [V. E. Savanevych, O. B. Bryukhovetskiy, M. M. Bezkrivniy и др.]//Astronomy Space Physics Annual International Conference. Book of abstracts, May 21 – 24 Kyiv, Ukraine – 2013. – С. 89 – 90.

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

33. Соковикова Н. С. Оценка координат астероида на дискретном изображении (многоцелевой случай) / Н. С. Соковикова, М. М. Безкровный // Радиоэлектро-

ника и молодежь в XXI веке: 17-й Междунар. молодеж. форум, 22 – 24 апреля 2013 г. : сб. матер. форума. – Т. 5. – Харьков, 2013. – С. 242 – 243.

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

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

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

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

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

39. Безкровний М.М. Оцінка координат протяжних об'єктів на ПЗС-кадрі при середньому часі експозиції / М. М. Безкровний, В. Є. Саваневич, Н.С. Соковікова //

Усеукраїнська наукова конференція «Математичне моделювання та математична фізика» присвячена 90-річчю від дня народження В.М. Глушкова, 23 – 27 вересня 2013 р. : матеріали конференції. – Кременчуг, 2013. – С. 38 – 39.

40. Безкровний М. М., Саваневич В.Е., Соковикова Н.С. Пиксельные методы оценки местоположения объектов компактной группы с возможным смазом изображений собственным движением отдельных объектов // XI Міжнародна науково-практична конференція «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS–2013)». – Днепропетровск, ДНУ им. Олесь Гончара. – 20 – 22 нояб-ря 2013 г.

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

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

43. Savanevych V. Automated software for CCD-image processing and detection of small Solar System bodies / V. Savanevych, A. Bryukhovetskiy, N. Sokovikova, M. Bezkrvniy, S.Khlamov, L. Elenin, I. Movsesian, M. Dihtyar // "Asteroids, Comets, Meteors 2014"12-я международная конференция, 30 июня – 4 июля 2014 г.: сб. матер. конф. – Хельсинки, 2014. – С. 491.

44. Savanevych V. Observation of small Solar System bodies at the review programs observatory ISON-NM and ISON-Kislovodsk / V. Savanevych, A. Bryukhovetskiy, L. Elenin, V. Nevski, I. Molotov, M. Bezkrvniy, N. Sokovikova, Ia. Movsesian, S. Khlamov, M. Dikhtyar // Abstracts of 40th COSPAR Scientific Assembly, 2 – 10 August 2014, B0.4-0061-14

45. Саваневич В. Є. Методи оцінки місцеположення небесних об'єктів на серії ПЗС-кадрів / 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.

46. Savanevych V. CoLiTec – multifunction software for the CCD image processing [Электронный ресурс] / V. Savanevych, O. Bryukhovetskiy, N. Sokovikova, I. Movsesian, M. Dihtyar, A. Pogorelov // "International scientific and methodological conference KOLOS 2014", 4 – 6 декабря 2014 г.: сб. матер. конф. – Стакчин, Словакия, 2014. – Режим доступа к публ.: http://www.astrokolonica.sk/joomla15/files/kolos2014/kolos2014_abstractbook.pdf.

47. Savanevych V. Precision of astrometry measurements for asteroids survey made using the CoLiTec software [Электронный ресурс] / V. Savanevych, O. Bryukhovetskiy, N. Sokovikova, S. Khlamov, M. Bezkrivniy, A. Dahskova // "International scientific and methodological conference KOLOS 2014", 4 – 6 декабря 2014 г.: сб. матер. конф. – Стакчин, Словакия, 2014. – Режим доступа к публ.: http://www.astrokolonica.sk/joomla15/files/kolos2014/kolos2014_abstractbook.pdf.

48. Khlamov S. Precision of astrometry measurements made using CoLiTec software for asteroids survey [Электронный ресурс] / S. Khlamov, A. Ivantsov, V. Savanevich, A. Bryukhovetskiy, L. Elenin, M. Bezkrivniy, N. Sokovikova, Ia. Movsesian. // "Gaia-FUN-SSO-3 International Workshop 2014", 24 – 26 ноября 2014 г.: сб. матер. конф. – Париж, Франция, 2014. – Режим доступа к ресурсу: http://www.imcce.fr/hosted_sites/gaiafun2014/com/Khlamov.pdf

49. 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 — прийнято 20. 05. 14.

50. Свід. авторського права на твір №60581 / Комп'ютерна програма «Програма вирівнювання фону астрономічних кадрів FlatSky-CoLiTec» / Власенко В.П.,

Саваневич Є.В., Брюховецький О.Б., Соковікова Н.С., Хламов С.В., Погорелов А.В.; дата реєстрації. 09.07.2015.

51. 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. Мовсеян — прийнято 04. 06. 15

52. Zhao, H. B. Survey and Risk Assessment of Near Earth Asteroids / H. B. Zhao // Acta Astronomica Sinica. – 2010. – Т. 51(3). – С. 324 – 325.

53. 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: Сорок четвертая сессия, Вена, 12 – 23 февраля 2007 года, Пункт 9 предварительной повестки дня (А/АС.105/С.1/Л.290). [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.un.org/ru/documents/ods.asp?m=A/AC.105/C.1/L.290>.

54. Yeomans D., Chodas P. Additional details on the large fireball event over Russia on Feb. 15, 2013 //NASA NEO Program Office Announcement, March 1. – 2013.

55. Emel'yanenko V. V. et al. Astronomical and physical aspects of the Chelyabinsk event (February 15, 2013) //Solar System Research. – 2013. – Т. 47. – №. 4. – С. 240 – 254.

56. Moskowitz C. United Nations to adopt asteroid defense plan //Scientific American blog. – 2013.

58. Near Earth Object Program [Электронный ресурс] // NASA. – 2016. – Режим доступа к ресурсу: <http://neo.jpl.nasa.gov/index.html>.

57. National Aeronautics and space administration NEAR-EARTH ASTEROID TRACKING (NEAT) [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://neo.jpl.nasa.gov/programs/neat.html>.

59. IAU Minor Planet Center. List Of Observatory Codes. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.cfa.harvard.edu/iau/lists/Obs CodesF.html>.
60. Мушаилов Б. Р. О проблеме кометно-астероидной опасности // Астрон. календарь на. – 1997. – С. 210 – 219.
61. Kundt W. The 1908 Tunguska catastrophe: An alternative explanation // CURRENT SCIENCE-BANGALORE. – 2001. – Т. 81. – №. 4. – С. 399 – 406.
62. Комарова Е. С., Михалёв А. В. Проявление метеорной активности потока Леониды в излучении верхней атмосферы Земли // Проявление метеорной активности потока Леониды в излучении верхней атмосферы Земли. – 2014. – Т. 11 (№2). – С. 277 – 287.
64. Vallado D. A., McClain W. D. Fundamentals of astrodynamics and applications. – Springer Science & Business Media, 2001. – Т. 12.
65. Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Исследование точности астрометрической редукции при использовании комбинированного метода наблюдений небесных объектов. // Космічна наука і технологія. 2010. Т. 16. № 5. С. 71 – 76.
66. Harris A. W. The surface properties of small asteroids from thermal-infrared observations // Proceedings of the International Astronomical Union. – 2005. – Т. 1. – №. S229. – С. 449 – 463.
67. McLean I. S. Electronic Imaging in Astronomy: detectors and instrumentation. – Springer Science & Business Media, 2008.
68. Киселев А.А. Теоретические основания фотографической астрометрии / Киселев А.А. – М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит, 1989. – 264 с.
69. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция / Н.Н. Михельсон – М.: Наука, Гл. ред. физ. – мат. лит., 1976. – 512 с.
70. Hogg D. W., Lang D. Astronomical imaging: The theory of everything // arXiv preprint arXiv:0810.3851. – 2008.
71. PinPoint Astrometric Engine [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://pinpoint.dc3.com/>.

72. Izmailov I. S. Astrometric CCD observations of visual double stars at the Pulkovo Observatory / I. S. Izmailov, M. L. Khovricheva, M. Yu. Khovrichev et al. // *Astronomy Letters*. – 2010. – 5(36). – С. 349 – 354.

73. PRISM [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://prism-america.com/>

74. Саваневич, В.Е. Программа CoLiTec автоматизированного обнаружения небесных тел со слабым блеском / 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.

75. 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 — прийнято 21. 01. 13.

76. Collection Light Technology (CoLiTec). Software for automated asteroids and comets discoveries [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.neoastrosoft.com/>

77. Solano E. et al. Preccovery of near-Earth asteroids by a citizen-science project of the Spanish Virtual Observatory // *Astronomische Nachrichten*. – 2014. – Т. 335. – №. 2. – С. 142–149.

78. AstDyS [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://hamilton.dm.unipi.it/astdys/index.php?pc=0>

79. NEODyS [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://newton.dm.unipi.it/neodys/>

80. Chesley S. R., Milani A. NEODyS: an online information system for near-Earth objects // *Bulletin of the American Astronomical Society*. – 1999. – Т. 31. – С. 1117.

81. Pan-STARRS – the Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://pan-starrs.ifa.hawaii.edu/public/>.

82. Hsieh H. H. et al. The main-belt comets: The Pan-STARRS1 perspective // *Icarus*. – 2015. – Т. 248. – С. 289 – 312.
83. Lunar&Planetary Laboratory. Catalina Sky Survey [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://www.lpl.arizona.edu/css/>.
84. Graham M. J. et al. A possible close supermassive black-hole binary in a quasar with optical periodicity // *Nature*. – 2015. – Т. 518. – №. 7537. – С. 74 – 76.
85. The NEOWISE project [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://neowise.ipac.caltech.edu/>.
86. SPACEWATCH® Project [Электронный ресурс] // Arizona Board of Regents. – 2013. – Режим доступа к ресурсу: <http://spacewatch.lpl.arizona.edu/>.
87. The Australian Virtual Observatory (Aus-VO) [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://aus-vo.org.au/>.
88. China-VO [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://www.china-vo.org/>.
89. Brazilian Virtual Observatory BRAVO [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://bravo.iag.usp.br/>.
90. Canadian Virtual Observatory [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://cfht.hia.nrc.ca/cvo/>.
91. The European Virtual Observatory EURO-VO [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://www.euro-vo.org/>.
92. The German Astrophysical Virtual Observatory (GAVO) [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://www.g-vo.org/>.
93. The Hungarian Virtual Observatory [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://hvo.elte.hu/>.
94. Japanese Virtual Observatory [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://jvo.nao.ac.jp/index-e.html>.
95. Vavilova I. B. et al. Astroministry resource of the Ukrainian virtual observatory: Joint observational data archive, scientific tasks, and software // *Kinematics and physics of celestial bodies*. – 2012. – Т. 28. – №. 2. – С. 85 – 102.

96. Waszczak, A. Main-belt comets in the Palomar Transient Factory survey: I. The search for extendedness. / A. Waszczak, E. O. Ofek, O. Aharonson, et.al. // *Mon. Not. R. Astron.* – 2013. – № 000 – С. 1 – 19.

97. Gary B. L. Image subtraction procedure for observing faint asteroids / B. L. Gary, D. Healy. // *Minor Planet Bulletin.* – 2006. – №33. – С. 16 – 18.

98. Miura, N. Likelihood-based Method for Detecting Faint Moving Objects / N. Miura, K. Itagaki, N. Baba // *The Astronomical Journal.* – 2005. – Т. 130(3). – С. 1278 – 1285.

100. Zacharias N. UCAC3 pixel processing / N. Zacharias // *The Astronomical Journal.* – 2010. – № 139. – С. 2208 – 2217.

101. Yanagisawa, T. Automatic Detection Algorithm for Small Moving Objects / T. Yanagisawa, A. Nakajima et al. // *Publications of the Astronomical Society of Japan.* – 2005. – Т. 57(2). – С. 399 – 408.

102. Gural P. S., Larsen J. A., Gleason A. E. Matched filter processing for asteroid detection // *The Astronomical Journal.* – 2005. – Т. 130. – №. 4. – С. 1951.

103. Dell'Oro A., Cellino A. Observations of asteroids on the Gaia astrometric focal plane // *Planetary and Space Science.* – 2012. – Т. 73. – №. 1. – С. 10 – 14.

104. Lafreniere D. et al. A new algorithm for point-spread function subtraction in high-contrast imaging: A demonstration with angular differential imaging // *The Astrophysical Journal.* – 2007. – Т. 660. – №. 1. – С. 770.

105. Babu G. J. et al. Object detection in multi-epoch data // *Statistical Methodology.* – 2008. – Т. 5. – №. 4. – С. 299 – 306.

106. Саваневич В.Е. Определение координат статистически зависимых объектов на дискретном изображении / В.Е. Саваневич // *Радиоэлектроника и информатика.* – 1999. – № 1. – С. 4 – 8.

107. Саваневич В.Е. Обнаружение и оценка параметров траектории астероида / В.Е. Саваневич, А.М. Кожухов, А.Б. Брюховецкий, Е.Н. Диков, О.В.Герасименко // *Радиоэлектроника и информатика.* – 2011. – Вып. 1(52). – С. 15 – 21.

108. Саваневич В. Е. Метод предварительного обнаружения сигналов от небесных объектов на цифровом изображении / В. Е. Саваневич, А. М. Кожухов, А. Б. Брюховецкий // Системы озброєння та військова техніка. – Харків: ХУПС, 2011. – Вип. 2(26). – С. 169 – 173.
109. Levenberg K. A method for the solution of certain problems in least squares / K. Levenberg. // Quart. Appl. Math. – 1944. – №2. – С. 164 – 168.
110. Marquardt D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters / D. Marquardt. // SIAM J. Appl. Math. – 1963. – №11. – С. 431 – 441.
111. Кожухов О. М. Обчислювальні методи обробки зображень для оцінки місцезнаходження об'єктів зі слабким блиском : дис. канд. техн. наук : 01.05.02 / Кожухов Олександр Михайлович – Харків, 2012. – 208 с.
113. Саваневич В. Е. Оценка координат астероида на дискретном изображении / В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, А. М. Кожухов, Е. Н. Диков // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2010. Вып. 162. – С. 78 – 86.
114. Саваневич В. Е., Кожухов А. М., Брюховецкий А. Б., и др. Метод сложения ПЗС-кадров с накоплением сигнала от астероида со слабым блеском и ненулевым видимым движением на серии ПЗС-кадров // Системы озброєння та військова техніка. – Харків: ХУПС, 2010. – Вип. 3(23). – С. 154 – 159.
115. Statistics on residuals from observations of minor planets, by observatory code. MPC Submission Information [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.net/iau/special/residuals.txt>
116. Statistics on residuals from observations of numbered minor planets, by observatory code. MPC Submission [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.net/iau/special/residuals2.txt>
117. MPC статистика [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: http://www.neoastrosoft.com/mpc_statistic_ru/
118. Hudkova L. A., Gorel G. K., Ivantsov A. V. CCD observations of minor planets in Mykolaiv in 2002–2003 // Кинематика и физика небесных тел. – 2005.
119. Процюк Ю.И. Создание каталогов координат и собственных движений

звезд с использованием совместной обработки архивных фотографических и современных ПЗС-наблюдений/ Ю.И. Процюк, М.В. Мартынов, А.Э. Мажаев, О.Э. Ковылянская, С.В. Процюк, В.Н. Андрук // Кинематика и физика небесных тел. – 2014. – Т. 30. – № 6. – С. 54 – 65.

120. Zacharias N. et al. The fourth US naval observatory CCD astrograph catalog (UCAC4) // The Astronomical Journal. – 2013. – Т. 145. – №. 2. – С. 44.

121. MPCAT-OBS: Observation Archive: Minor Planet Checker [Электронный ресурс] // Minor Planet Center – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.net/iau/ECS/MPCAT-OBS/MPCAT-OBS.html>

122. HORIZONS System [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>

123. Брандт З. Анализ данных: Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров / З. Брандт; пер. с англ. – М.: Мир, АСТ, 2003. – 686 с.

124. Саваневич В. Є. Моделі та методи обробки даних при виявленні та оцінці параметрів траєкторій компактної групи малорозмірних космічних об'єктів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 01.05.02 / Саваневич Вадим Євгенович – Харків, 2006. – 35 с.

125. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс; пер. с англ. – М: Техносфера, 2005. – 1072с.

126. Гудмен Дж. Статистическая оптика / Дж. Гудмен; пер. с англ. – М.: Мир, – 1998. – 528 с.

127. Миронов А. В. Основы астрофотометрии. Практические основы высокоточной фотометрии и астрофотометрии звезд / А.В. Миронов – М: Физмат-лит, 2008. – 260 с.

128. Кобацкая Е. Н., Ларионов В. М. Фотометрические и поляриметрические наблюдения с ПЗС-камерой на телескопах LX200 и АЗТ-8.

129. (ММП)Вентцель Е.С. Теория вероятности и ее инженерные приложения. Учеб. пособие для вузов / Е.С. Вентцель Л.А. Овчаров – 2-е изд., стер. – М.: Высш.

шк., 2000. – 480с.

130. Горшенин А. К. Асимптотические свойства статистических процедур анализа смесей вероятностных распределений : дисс. канд. физ.-мат. наук : 01.01.05 / Горшенин Андрей Константинович – Москва, 2011. – 175 с.

131. Закс Ш. Теория статистических выводов / Ш. Закс; пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 776 с

132. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П.Жидков, Г.М. Кобельков М.: Лаборатория базовых знаний, 2003. – 632 с.

133. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Наука, 1970. – 664 с.

134. Яне Б. Цифровая обработка изображений / Б. Яне пер. с англ. – М: Техносфера, 2005. – 584с

135. Бялонович А. В. Диагностика структурного состояния стали 45 при воздействии циклической нагрузки / А. В. Бялонович, Т. Ю. Яковлева, Л. Е. Матохнюк // 131. Надійність і довговічність машин і споруд – 2009. – Вип 32– С. 184 – 193

136. Monet D. G. et al. The usno-b catalog //The Astronomical Journal. – 2003. – Т. 125. – №. 2. – С. 984.

137. Саваневич В. Е. Метод обнаружения астероидов, основанный на накоплении сигналов вдоль траекторий с неизвестными параметрами / В. Е. Саваневич, А. М. Кожухов, А. Б. Брюховецкий, Е. Н. Диков // Системи обробки інформації. – 2011. – Вип. 2(92). – С. 137 – 144.

138. Ермаков С.М. Математическая теория оптимального эксперимента / С.М. Ермаков, А.А. Жиглявский. – М.: Наука, 1987. – 320 с.

139. Саваневич В.Е. Оценка экваториальных координат астероида по оценкам его координат на ПЗС-кадре / В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий, А.М. Кожухов, Е.Н. Диков // Системи обробки інформації. – 2010. – Вип. 6(87). – С. 172 – 179.

141. MPEC 2010-X101: COMET C/2010 X1 (ELENIN) [Электронный ресурс] // Minor Planet Center. – 2010. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.org/mpec/K10/K10XA1.html>.

142. МРЕС 2011-O10: КОМЕТ P/2011 NO1 [Электронный ресурс] // Minor Planet Center. – 2011. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K11/K11O10.html>

143. МРЕС 2012-S63: КОМЕТ C/2012 S1 (ISON) [Электронный ресурс] // Minor Planet Center. – 2012. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.org/mpec/K12/K12S63.html>

144. МРЕС 2013-V45: КОМЕТ C/2013 V3 (NEVSKI) [Электронный ресурс] // Minor Planet Center. – 2013. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K13/K13V45.html>

145. МРЕС 2011-J02: 2011 HY52 [Электронный ресурс] // Minor Planet Center. – 2011. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K11/K11J02.html>

146. Minor Planet Center, МРЕС 2011-Q39: 2011 QD23 [Электронный ресурс] // Minor Planet Center. – 2011. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K11/K11Q39.html>

147. МРЕС 2010-X101: МРЕС 2011-W34: 2011 RC17 [Электронный ресурс] // Minor Planet Center. – 2010. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K11/K11W34.html>

148. Asteroid Initiative Idea Synthesis Workshop [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://www.nasa.gov/asteroidworkshop/#.Vko9z1XhDIV>

149. Software for processing asteroid survey frames. Status and initiatives(perspectives) [Электронный ресурс] / Savanevych V.E. – Режим доступа к ресурсу:

https://www.lpi.usra.edu/meetings/asteroid2013/Asteroid_2013_September/Lecture%20Hall/Mon/PM/07%20VIRTUAL-Savanevych/

Приложение А.
Акты использования и внедрения результатов диссертационных
исследований

Директор ИБРАИМОВИЧЕВЫХ РАН



ЧЕРВЕРДИН Б.Н.

СЕРЖЕВУ

10 марта 2014 г.

АКТ

О внедрении результатов научной деятельности Соковицкой Натальи Сергеевны – аспиранта кафедры ЭВМ Харьковского национального университета радиоэлектроники, кафедра электронных вычислительных машин.

Соковицкая Наталья Сергеевна является участником проекта по разработке программы автоматического поиска астероидов на серии ПЗС-кадров CoLiTec. В рамках проекта Соковицкой Н. С. были разработаны методы оценки положения объектов на цифровых изображениях, смазанных собственным движением. Такого рода объекты появляются в результате наблюдения АСЗ. При оценке параметров изображений объектов, смазанных собственным движением, в качестве PSF-моделей предложены подпиксельная и надпиксельная гауссовы модели. Подпиксельная гауссова модель, описывает распределение координат падения фотонов в области кадра, соответствующей изображению объектов, смазанных собственным движением. В рамках надпиксельной гауссовой модели изображения используется аппроксимация изображения объекта, смазанного собственным движением, упорядоченной смесью двумерных гауссоид. Данные модели позволяют наблюдать и более точно оценивать параметры объектов с изображением, смазанным собственным движением (в том числе и астероидов сближающихся с Землей).

Результаты внедрения предложенных моделей в программу CoLiTec показывают, что точность оценок подпиксельной модели изображения объектов, смазанного собственным движением примерно на 20% выше, чем у соответствующей надпиксельной. Это объясняется тем, что подпиксельная гауссова модель учитывает априорную форму протяженного изображения объекта, в результате чего гибче описывает любую форму реального изображения.

Использование предлагаемых моделей при масштабе пикселя 2''(H15) и 2,06''(D00) позволяет избегать появления критических невязок. По среднему модулю невязок, обсерватория ISON-NM является одной из лучших в мире в своем классе телескопов. В 2011 и 2012 году модуль средних невязок был равен 0,067'' и 0,061''.

Учитывая масштаб пикселя в 2''(H15), 2,06''(D00), 3,6''(C15) и размер апертуры телескопа 0,45m (H15), 0,4m (D00), 0,65m (C15) обсерватории ИСОН-партнеры

CoLiTec (ISON-NM, ISON-Kislovodsk, ISON-Ussuriysk) имеют достаточно высокие показатели точности по СКО измерений (в угловых секундах) среди телескопов со схожими характеристиками.

В рейтинге самых продуктивных обсерваторий мира по количеству измерений малых тел СС пользователи программы в 2012 году заняли 10 (H15), 13 (D00). По суммарным итогам 2011-2012 года обсерватория ISON-NM заняла 7 место по числу предварительных открытий. Эксплуатация ПО CoLiTec в обсерватории ISON-Ussuriysk начата с конца 2013 года.

С использованием CoLiTec было открыто 4 кометы из 7, открытых в СНГ и Балтии более чем за 20 последних лет.

С помощью разработанной программы CoLiTec за 2013 год в обсерватории ISON-NM, открыто 156 астероидов, количество наблюдений составляет 107989 из них объектов 25282. За 2012 год открыто 338 астероидов, количество наблюдений 97878 (24170 объектов).

Программа планируется к дальнейшему использованию в обсерваториях ISON-NM, ISON-Kislovodsk, ISON-Ussuriysk и может быть использована в других обсерваториях мира.

Акт составлен для представления в специализированный ученый совет по защите диссертаций и не является основанием для финансовых расчетов.

Наблюдатель обсерватории
Л.В. Еленин



/ Заведующий отделом №5
Ю.Ф. Голубев



10 марта 2014 г.

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02



Л.В. Колесник

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ГАО НАН України
д.ф.-м.н,
академік НАН України



Я.С. Яцків
16 квітня 2015р.

АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
Соковікової Наталії Сергіївни

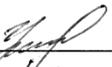
Комісія у складі голови комісії Кравчука С.Г., членів комісії Вавилової І.Б., Пакуляк Л.К., Головні В.В. склала даний акт у тому, що розроблені аспірантом кафедри Електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки Соковіковою Наталією Сергіївною методи: оцінки місцезнаходження об'єктів з цифровими зображеннями, що змазані власним рухом на ПЗЗ-кадрах з використанням субпіксельної моделі зображення об'єктів; дослідження точності оцінок місцезнаходження та блиску об'єктів із зображеннями, що змазані власним рухом, — впроваджено у програмному забезпеченні Української віртуальної обсерваторії для обробки астрономічних ПЗЗ-кадрів астрономічних оглядів та в рамках програми наукових досліджень «Методи та засоби експериментальної системи моніторингу об'єктів ближнього космосу з метою виявлення потенційно загрозливих ситуацій та підготовки заходів щодо їх усунення» (постанова 23.12.2011 № 353).

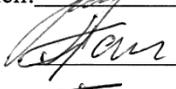
За допомогою розробленої Соковіковою Н.С. метода оцінки місцезнаходження об'єктів з цифровими зображеннями, що змазані власним рухом на ПЗЗ-кадрах здійснюється виявлення та визначення місцезнаходження небесних об'єктів, зображення яких є на ПЗЗ-кадрах. Розроблений метод дослідження точності оцінок місцезнаходження та блиску об'єктів із зображеннями, що змазані власним рухом дозволяє провести розширений аналіз низки статистичних характеристик вимірювань. Розроблені Соковіковою Н.С. методи обробки даних для виявлення та оцінки місцезнаходження об'єктів з зображеннями, що змазані власним рухом на ПЗЗ-кадрах та дослідження точності оцінок місцезнаходження та блиску об'єктів із зображеннями, що змазані власним рухом мають велике значення для моніторингу потенційно небезпечних навколосемних астероїдів.

Методи були реалізовані в рамках Української віртуальної обсерваторії при автоматичному пошуку астероїдів на серії ПЗЗ-кадрів. Дослідження показали, що при використанні запропонованих методів вдається отримати більшу кількість вимірювань небесних об'єктів (більше 11 %), ніж при використанні однієї з самих поширених програм Astrometrica. Такі результати були отримані за рахунок того, що при вимірюванні положення змазаних об'єктів або слабких об'єктів, що знаходяться на зображенні поруч з яскравими зірками, програма Astrometrica видає ознаку неможливості гарантувати достовірне вимірювання місцезнаходження об'єкта. У діапазонах блиску астероїдів <18 зоряної величини, значення середньоквадратичного відхилення екваторіальних координат положення об'єктів зменшилося більш ніж у два рази.

Акт складений для подання у спеціалізовану вчену раду по захисту дисертацій і не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії:  Кравчук С.Г., заст.. директора

Члени комісії:  Вавилова І.Б., зав. лаб. астроінформатики відділу АКІОЦ

 Пакуляк Л.К., с.н.с. відділу АКІОЦ

 Головні В.В., н.с. лаб. астроінформатики відділу АКІОЦ

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02



Л.В. Колесник

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. ректора Харківського
національного університету
радіоелектроніки

В.П. Машталір

«01» грудня 2015р.

про використання результатів дисертаційної роботи
Соковікової Наталії Сергіївни

Комісія у складі начальника відділу організації навчального процесу доцента Логвіна В. В., завідувача кафедри електронних обчислювальних машин професора Руденка О. Г., професора кафедри електронних обчислювальних машин Корабльова М.М., підтверджує, що результати дисертаційної роботи Соковікової Наталії Сергіївни «Обчислювальні методи обробки цифрових зображень для виявлення та оцінки параметрів об'єктів, що змазані власним 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 ВОНП

В. В. Логвін

Завідувач кафедри ЕОМ

О. Г. Руденко

Професор кафедри ЕОМ

М.М. Корабльов

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

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 проєкт в області розпізнавання, обробки,
 відтворення тексто-графічних і аудіо-візуальних даних

ПРОЄКТ

Програма автоматизованого відкриття астероїдів та комет
 на серії ПЗЗ-кадрів CoLiTec

*Голова організаційного комітету
 конкурсу інноваційних проєктів
 «IT-KHARKIV»*

A.V. Movchan

it-kharkiv.com.ua

28 листопада 2013 р.

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

Л.В. Колесник